

**PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICO-MECÂNICAS DO SOLO
E RENDIMENTO DE MILHO SUBMETIDO A DIFERENTES
SISTEMAS DE MANEJO**

MÁRCIO LUIS VIEIRA

Dissertação apresentada à Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da UPF, para obtenção do título de Mestre em Agronomia – área de concentração em Produção Vegetal.

Passo Fundo, abril de 2006.

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICO-MECÂNICAS DO SOLO
E RENDIMENTO DE MILHO SUBMETIDO A DIFERENTES
SISTEMAS DE MANEJO**

MÁRCIO LUIS VIEIRA

Orientador: Prof. Dr. Vilson Antonio Klein

Dissertação apresentada à Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da UPF, para obtenção do título de Mestre em Agronomia - área de concentração em Produção Vegetal.

Passo Fundo, abril de 2006.



UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL



A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação.

“Propriedades físico-hídrico-mecânicas do solo e rendimento de milho
submetido a diferentes sistemas de manejo”

Elaborada por

MARCIO LUIS VIEIRA

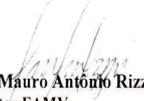
Como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em
Agronomia – Área de Produção Vegetal

Aprovada em: 20/04/2006
Pela Comissão Examinadora


Dr. Wilson Antonio Klein
Presidente da Comissão Examinadora
Orientador


Dra. Jurema Schons
Coordenadora PPGAgro


Dra. Silvia Del Carmen Imhoff
Universidad Nacional Del Litoral, Argentina


Dr. Mauro Antonio Rizzardi
Diretor FAMV


Dr. Álvaro Pires da Silva
ESALO, Piracicaba, SP

CIP – Catalogação na Publicação

- V658p Vieira, Márcio Luis
Propriedades físico-hídrico-mêcanicas do solo e rendimento
de milho submetido a diferentes sistemas de manejo / Márcio
Luis Vieira. – 2006.
104 f. : il. ; 29 cm.
- Orientação: Prof. Dr. Vilson Antonio Klein.
Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade de
Passo Fundo, 2006.
1. Solos – Conservação. 2. Solos – Compactação. 3. Milho.
4. Solos – Manejo. I. Klein, Vilson Antonio, orientador. II. Título.

CDU : 633.15

Catalogação: bibliotecária Jucelei Rodrigues Domingues - CRB 10/1569

Ao **Vilmar**, meu pai, pelo apoio,
disposição e companheirismo;
À **Maria Guiomar**, minha mãe,
pelo incentivo e carinho;
A **Daniela**, minha esposa, pelo
carinho e companheirismo;
Em especial a **Maria Luiza**
minha filha.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho teve a participação e a contribuição de inúmeras pessoas. Em especial gostaria de expressar meus agradecimentos às seguintes pessoas e entidades:

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, pela força espiritual, vida e saúde.

A minha família, pela compreensão e muitos esforços despendidos durante a realização do curso.

A Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária – UPF que, através do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, possibilitou a realização do Curso de Mestrado e deste trabalho.

Ao Professor Dr. Wilson Antonio Klein pela orientação, confiança, incentivo, profissionalismo e amizade demonstrada ao longo do curso, e que acima de tudo foi um companheiro nessa jornada de descobertas e aprendizados pela ciência do solo.

Aos docentes do Curso de Pós-graduação da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária pelos ensinamentos transmitidos.

Ao professor Walter Boller pela amizade, apoio, ensinamento e atenção.

Aos colegas do curso, em especial a Kurt Arns, Adriana Pezzarico Arns, Rodrigo Kurilo Câmara, Clóvis Dalri Marcolin e Alfredo Castamann, pela amizade, colaboração e convivência amigável no decorrer do curso.

Aos colegas “graxains” do Lafas: Marcos André Simon, Iradi João Biasuz Junior, João Paulo Massing, Giovani Zoldan, Fábio

Durigon e Estér Maria de Lima pela colaboração na realização desse trabalho e amizade.

Aos funcionários da FAMV pelo apoio e amizade.

Aos funcionários do Centro de Extensão e Pesquisa Agropecuária pela grande e fundamental colaboração nas atividades de campo.

Aos amigos de todas as horas, alguns geograficamente mais distantes, outros nem tanto, o meu obrigado.

A minha esposa Daniela, porque, simplesmente, esteve ao meu lado, fazendo valer todo o esforço despendido nesta jornada.

A todas as pessoas que, por diversas maneiras, colaboraram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

Resumo.....	1
Abstract.....	3
1 Introdução.....	5
2 Revisão de Literatura.....	7
2.1 Solo agrícola sob plantio direto.....	7
2.2 Descompactação mecânica do solo.....	9
2.3 Efeitos sobre as culturas.....	11
2.4 Textura do solo	16
2.5 Consistência do solo	18
2.6 Densidade do solo	20
2.7 Resistência mecânica do solo à penetração	21
2.8 Água no solo	23
2.9 Intervalo hídrico ótimo	24
2.10 Porosidade do solo	26
2.11 Infiltração de água no solo.....	27
2.12 Condutividade hidráulica do solo	29
2.13 Água disponível as plantas	32
3 Material e métodos.....	34
4 Resultados e discussões.....	48
4.1 Carbono Orgânico (CO)	48
4.2 Textura do solo	50
4.3 Consistência do solo	53
4.4 Densidade de sólidos.....	57
4.5 Densidade do solo.....	58

4.6 Densidade máxima do solo.....	60
4.7 Densidade relativa (DR).....	62
4.8 Porosidade do solo.....	63
4.9 Curvas de retenção da água no solo	67
4.10 Resistência mecânica à penetração do solo (RP)	68
4.11 Intervalo hídrico ótimo (IHO)	71
4.12 Variação do IHO em função da profundidade	75
4.13 Infiltração da água no solo	77
4.14 Condutividade hidráulica do solo saturado (K_0)	79
4.15 Condutividade hidráulica do solo não saturado	81
4.16 Rendimento da cultura do milho	84
5. Conclusões.....	86
6. Referências bibliográficas.....	87

LISTA DE TABELAS

Tabela	Página
1. Teor de carbono orgânico a base de volume em função do manejo e profundidade	47
2. Teores de argila, silte, areia total, areia muito grossa, areia grossa, areia média, areia fina e areia muito fina em função do manejo e profundidade	49
3. Teores de argila do solo em função do manejo e profundidade	50
4. Teores de silte do solo em função do manejo e profundidade	51
5. Teores de areia do solo em função do manejo e profundidade	51
6. Valores de umidade gravimétrica para o limite plástico em função do manejo e profundidade	53
7. Valores de umidade gravimétrica para o limite líquido em função do manejo e profundidade	54
8. Índice de plasticidade em função do manejo e profundidade	54
9. Razão entre umidade ótima de compactação e limite plástico em função do manejo e profundidade	55
10. Densidade de sólidos do solo em função do manejo e profundidade	57
11. Densidade do solo em função do manejo e profundidade	59
12. Densidade máxima do solo e umidade gravimétrica ótima em função do manejo e profundidade	60
13. Equações para cálculo de densidade máxima do solo e umidade gravimétrica ótima em função do manejo e profundidade	60
14. Densidade relativa do solo em função do manejo e profundidade	62

15. Porosidade total, macroporos, microporos e criptoporos do solo em função do manejo e profundidade	65
16. Parâmetros de ajuste da curva de retenção de água no solo em diferentes profundidades e manejos do solo	66
17. Resistência à penetração do solo na umidade correspondente a capacidade de campo em função do manejo e profundidade	69
18. Resistência à penetração do solo na umidade do solo correspondente ao ponto de murcha permanente em função do manejo e profundidade	69
19. Densidade crítica do solo e relativa no IHO com as RP de 1,4 e 2 MPa, nos manejos de solo	71
20. Condutividade hidráulica em solo saturado em função do manejo e profundidade	79
21. Parâmetros empíricos do ajuste da variação de armazenagem de água no solo até a profundidade z em função do tempo	80
22. Fluxo de água no solo no sentido descendente, durante a redistribuição da água no solo, para os manejos em profundidade	81
23. Parâmetros empíricos para cálculo da condutividade hidráulica do solo não saturado em função dos manejos	82
24. Número final de plantas, número final de espigas, peso médio de grãos por espiga e rendimento de grãos em função do manejo	83

LISTA DE FIGURAS

Figuras	Página
1. Esquema de instalação dos tensiômetros a campo	42
2. Detalhe da instalação dos tensiômetros, manômetro e delimitação da área no início do processo de inundação	43
3. Detalhe da parcela coberta com lona plástica para evitar evaporação	44
4. Limite de liquidez (LI) e limite plástico (LP) em função do manejo e profundidade	53
5. Ajuste da equação da resistência à penetração do solo em função da densidade e umidade volumétrica do solo	68
6. Variação da umidade volumétrica em função da densidade do solo para os níveis críticos de a 6 kPa (CC), PA de $0,1 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, PMP a 1500 kPa e RP de 1,4 MPa , a área hachurada representa o IHO	72
7. Variação da umidade volumétrica em função da densidade do solo para os níveis críticos de a 6 kPa (CC), PA de $0,1 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, PMP a 1500 kPa e RP de 2 MPa, a área hachurada representa o IHO	73
8. Variação do IHO em profundidade nos manejos de solo, a área hachurada representa valores negativos ...	75
9. Taxa de infiltração da água no solo em função dos sistemas de manejo	77
10. Condutividade hidráulica do solo saturado na camada de 0 à 30 cm do solo, determinada 24 meses após a escarificação	78
11. Precipitação pluvial durante o ciclo da cultura	84

PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICO-MECÂNICAS DO SOLO E RENDIMENTO DE MILHO SUBMETIDO A DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO

Márcio Luis Vieira¹; Vilson Antonio Klein²

RESUMO – Uma das práticas mecânicas, que pode ser adotada também em solos sob plantio direto (PD), é a escarificação, que tem por objetivo reduzir a densidade do solo e a resistência mecânica do solo à penetração das raízes e aumentar a permeabilidade do solo. O efeito dessas alterações sobre o desenvolvimento das plantas e, conseqüentemente o rendimento de grãos, é dependente das condições climáticas vigentes, sendo que, em condições em que a umidade do solo se mantém ideal as limitações físicas tendem a não se manifestar com muita intensidade. Este trabalho teve por objetivo estudar as alterações nas propriedades físico-hídrico-mecânicas de um LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico, conduzido sob PD e submetido à descompactação por escarificação, e o efeito destas sobre o rendimento do milho. Avaliou-se o teor de carbono orgânico (CO), a textura, a consistência, as densidades dos sólidos e do solo, a densidade relativa, a porosidade, as curvas de retenção de água no solo, a resistência mecânica à penetração (RP), o intervalo hídrico ótimo (IHO), a infiltração da água e a condutividade hidráulica do solo saturado (K_0) e não saturado através de tensiometria a campo. Os

¹ Mestrando do Programa de Pós-graduação em Agronomia (PPGAgro) da FAMV/UPF, Área de Concentração em Produção Vegetal.

² Orientador, Eng.-Agr., Dr. Professor da FAMV/PPGAgro/UPF

resultados indicaram que a área com escarificação (PDE) apresentou teor de CO, infiltração de água e K_0 superior ao PD, demonstrando ser uma alternativa para a conservação do solo e da água, com efeitos que permaneceram por mais de um ano. O IHO apresentou amplitude e densidade crítica semelhante para ambos os manejos de solo. O rendimento de grãos da cultura do milho não apresentou diferença significativa entre os sistemas de manejo de solo. Conclui-se que uma escarificação em solos sob PD tem efeitos por até 24 meses e melhora as condições para conservação do solo e da água, embora não proporcione melhores condições físico-mecânicas do solo detectáveis pelos métodos tradicionalmente empregados para avaliação destas.

Palavras chave: Compactação, conservação do solo, água no solo, milho (*Zea mays*).

**PHYSICAL, HYDRAULIC, AND MECHANICAL SOIL
PROPERTIES AND CORN YIELD UNDER DIFFERENT
MANAGEMENT SYSTEMS**

Márcio Luis Vieira; Vilson Antonio Klein

ABSTRACT – The goal of chiseling, which is one of the mechanical practices that can be used on no-tillage (NT) soils, are to reduce bulk density, as well as soil resistance to root penetration, and to increase soil water permeability. The effect of these changes on plant growth and consequently on grain yield depends on climatic conditions; therefore, in soils where soil moisture is ideal, physical limitations tend to be less intense. The present study aims to analyze the changes in the physical, hydraulic, and mechanical properties of an Oxisol, managed under the NT system and chiseled, and the effects of these changes on corn yield. The following soil parameters were assessed: organic carbon (OC) content, texture, consistency, bulk density and particle density, relative density, porosity, water retention curves, mechanical resistance to penetration (RP), least limiting water range (LLWR), water infiltration, and hydraulic conductivity of saturated (K_0) and unsaturated soils by means of field tensiometry. Results indicate that chiseled soils had higher OC content, water infiltration and K_0 than NT soils, being therefore an alternative to soil and water conservation, with effects that last for over one year. The critical amplitude and density of LLWR were similar in both management systems. Corn yield was not remarkably different between the management systems. The conclusion is that the effects of chiseling

on NT soils can last for two years and may can improve the conditions for soil and water conservation, although improvement or physical and mechanical soil conditions were not be detected by conventional methods.

Key words: Soil compaction, soil conservation, soil water, corn (*Zea mays*).

1. INTRODUÇÃO

Os solos agrícolas funcionam como um sistema complexo que retém e transmitem água, ar, nutrientes e calor às sementes e raízes das plantas, de maneira que é fundamental um ambiente físico favorável ao crescimento radicular para maximizar a produção das culturas. Os sistemas de preparo do solo devem oferecer condições favoráveis ao desenvolvimento das culturas. No entanto, dependendo do solo, do clima, da cultura e de seu manejo, eles podem promover a degradação da qualidade física do solo, com restrições ao crescimento radicular.

A busca por alternativas tecnológicas que possibilitem o uso racional do solo tem sido a tônica das discussões em torno do tema “manejo correto para uma agricultura sustentável”. Dos componentes do manejo, o preparo do solo talvez seja a atividade que mais influi no seu comportamento físico, pois atua diretamente na estrutura do solo. Além das modificações na porosidade e densidade, o manejo provoca alterações na estrutura do solo que afetam a retenção de água e a resistência mecânica, entre outros efeitos. Atualmente, no Brasil, como no resto do mundo, há uma grande preocupação com o aumento das áreas agrícolas com problemas de compactação, o que se deve em grande parte às operações mecanizadas realizadas sem considerar a umidade do solo.

O sistema de plantio direto, no qual a semeadura é realizada em solo coberto por palha, e, portanto, com o mínimo de revolvimento da camada superficial do solo, tende a minimizar a formação de camadas compactadas no solo, mas apesar disso, a utilização

continuada do plantio direto pode resultar em aumento da densidade do solo.

A compactação do solo, em plantio direto, originada da pressão exercida pelos rodados das máquinas e por implementos agrícolas sobre o solo, principalmente em condições de umidade ótimas para compactação, é um dos principais problemas físicos que limitam a produtividade das culturas. Esta compactação, genericamente caracterizada pela diminuição do volume de vazios ocupados pela água ou pelo ar, limita a infiltração e a redistribuição de água no solo; reduz as trocas gasosas e a disponibilidade de oxigênio, que afeta o crescimento das raízes em busca de água e nutrientes; limita o crescimento radicular por impedimento mecânico, culminando com a redução do crescimento da parte aérea e da produtividade das culturas.

A escarificação é apontada como uma ferramenta para proporcionar a descompactação do solo, mas não se sabe a duração de seus efeitos e de que forma eles atuam ao longo do tempo sobre o movimento da água no solo e sobre o rendimento das culturas.

A hipótese formulada para esse trabalho foi de que a descompactação mecânica do solo em áreas sob plantio direto com o uso de escarificadores melhora suas propriedades, as condições de conservação do solo e da água e exerce influência sobre o crescimento e desenvolvimento das plantas e o rendimento da cultura do milho.

Para verificar esta hipótese realizou-se esse trabalho, que teve como objetivo avaliar o efeito residual de uma escarificação em um solo sob plantio direto, sobre as propriedades do solo, movimento da água no solo e seus efeitos sobre a cultura do milho.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Solo agrícola sob plantio direto

A desestruturação do solo, a compactação e a redução nos teores de matéria orgânica são considerados os principais indutores da degradação dos solos agrícolas. Tal degradação, com todas as suas implicações e nefastas conseqüências, tem resultado no desafio de viabilizar sistemas de produção que possibilitem maior eficiência energética e conservação ambiental, criando-se novos paradigmas tecnológicos baseados na sustentabilidade. No novo conceito de sistema agrícola produtivo, a fertilidade do solo assume uma abrangência maior que a habitual, expressada apenas nos parâmetros de acidez, disponibilidade de nutrientes e teor de matéria orgânica. Os parâmetros físicos, como armazenamento e conservação de água, armazenamento e difusão do calor e permeabilidade ao ar e à água, passam a ter relevância na avaliação da fertilidade do solo (DENARDIN & KOCHHANN, 1993).

Neste contexto, o emprego efetivo do sistema plantio direto, em função de suas prerrogativas básicas, mostra-se muito mais importante e eficiente para as regiões tropicais e subtropicais exploradas com agricultura (FANCELLI & FAVARIN, 1989).

De acordo com Assis & Lanças (2003) o plantio direto é uma prática conservacionista especialmente adequada para as condições de ambiente de regiões tropicais, onde se faz necessário manter o solo protegido da ação do sol e da chuva, caracterizando-se pela sua

eficiência no controle de perdas de solo e água e na redução dos custos operacionais, principalmente pela eliminação de operações de preparo do solo, tais como a aração e a gradagem, sendo que a sua adoção tem viabilizado a implantação de sistemas de produção que possibilitem maior eficiência energética e conservação ambiental, tornando-se a base da sustentabilidade.

Os fatores do solo que afetam o desenvolvimento radicular podem ser divididos em fatores químicos, como nutrientes e elementos tóxicos, e fatores físicos, como resistência mecânica à penetração, disponibilidade hídrica e aeração (ROSOLEM, 1995). Quando um solo não saturado é submetido à determinada pressão, ocasionando redução de volume com conseqüente aumento de densidade, ocorre o processo de compactação do solo (GUPTA & ALLMARAS, 1987). O arranjo estrutural do solo, a consistência, a porosidade total, o número e tamanho dos poros e a difusão de gases são afetados pela compactação, que, por conseqüência, afeta o crescimento das raízes (TAYLOR & BRAR, 1991). Em termos práticos, o uso intensivo de máquinas, segundo Camargo & Alleoni (1997), vem tornando comuns os problemas de compactação em solos agrícolas.

Com a crescente utilização do sistema plantio direto, os atributos físicos do solo têm sido modificados, necessitando de pesquisas com períodos de duração mais longos para se poder estudar os fenômenos ligados à sua estrutura. Alguns atributos do solo são amplamente comentados, tais como a densidade do solo que mostra uma tendência de aumento nos primeiros anos de cultivo e, com o passar dos anos, apresenta uma tendência de diminuição da densidade.

Entretanto muitas dúvidas sobre o sistema persistem, sendo necessário obter informações de outros atributos físicos (ASSIS & LANÇAS, 2003).

Na literatura, existem inúmeros relatos dos níveis de compactação do solo cultivado sob sistema plantio direto. Contudo, ainda existem dúvidas sobre qual o estado de compactação do solo, sob sistema plantio direto, que influi negativamente na produção das culturas e quais os limites críticos das propriedades físico-mecânicas que limitam o pleno desenvolvimento das plantas (SECCO et al., 2004).

2.2 Descompactação mecânica do solo

De acordo com Silveira (1988), escarificar significa romper o solo da camada arável de 15 a 30 cm com o uso de implementos denominados escarificadores. Esses são implementos de hastes que são utilizados no preparo primário do solo, e que apresentam vantagens sobre os implementos de discos pelo fato de não promoverem uma inversão da camada de solo obtendo-se, com isto, maior capacidade operacional e principalmente menor alteração da estrutura do solo. Devem ser utilizados para descompactar o solo, rompendo camadas compactadas, facilitando a penetração das raízes e a infiltração da água no solo. Essas intervenções mecânicas são uma alternativa para reduzir as limitações físicas e por consequência químicas que o solo possa propiciar ao desenvolvimento das plantas.

A operação de descompactação tem por objetivo aumentar a porosidade, reduzindo a densidade e elevando a estabilidade de seus agregados, ao mesmo tempo em que rompe as camadas superficiais encrostadas e camadas superficiais adensadas. Em função disso, a descompactação facilita o desenvolvimento radicular das plantas, eleva a taxa de infiltração e a capacidade de armazenamento de água, aumenta a permeabilidade do solo, facilitando a mobilização da água no perfil e as trocas gasosas com a atmosfera, e reduz enxurradas e riscos de erosão (KOCHHANN & DENARDIN, 2000).

Os diferentes implementos disponíveis para o preparo do solo provocam alterações nas suas propriedades químicas, físicas e biológicas. Cada implemento trabalha o solo de maneira própria, alterando, de maneira diferenciada, estas propriedades. As intensidades de revolvimento do solo e de incorporação dos resíduos culturais promovem modificações nos teores de matéria orgânica (MO), na capacidade de troca de cátions (CTC), no pH, na dinâmica dos íons e na agregação do solo. Estas modificações tornam-se mais evidentes, conforme aumenta o tempo de uso da área (TOGNON et al., 1997; DE MARIA et al., 1999).

O implemento de hastes, em função de seu modo de ação, rompe o solo nos seus pontos de menor resistência, pulverizando-o menos e afetando pouco os seus agregados, dando assim, maior porosidade e estabilidade estrutural a esse solo, reduzindo significativamente os problemas de erosão hídrica (CAMARA, 2004), pois, de acordo com Camara & Klein (2005a) a escarificação do solo em plantio direto reduz a densidade e aumenta a rugosidade

superficial, a condutividade hidráulica e a taxa de infiltração de água no solo.

De acordo com Pierce et al. (1992) os efeitos benéficos da escarificação nas condições físicas do solo tendem a diminuir com o passar do tempo, mas tem-se constatado efeitos residuais nos solos, anos após terem sido escarificados.

Segundo Camara & Klein (2005b) a escarificação esporádica em solos sob plantio direto proporcionam condições físico-hídrica-mecânicas do solo mais favoráveis ao desenvolvimento das plantas, especificamente pela redução na resistência mecânica à penetração e pela não-redução do teor de matéria orgânica.

Araújo et al. (2004a) avaliando as alterações na qualidade física de um Latossolo Vermelho distroférico provocadas pela escarificação, após 13 anos de semeadura direta, concluíram que a escarificação do solo promoveu efeitos benéficos na camada de 0 a 15 cm principalmente em relação à porosidade de aeração. No entanto, na camada de 15 a 30 cm a escarificação reduziu o intervalo ótimo de tensão de água no solo (IOP), principalmente em virtude da resistência do solo à penetração que se comportou como limite superior em toda a faixa de variação do IOP.

2.3 Efeitos sobre as culturas

A compactação do solo é considerada por Freitas (1994) a maior limitação à alta produtividade das culturas em todo o mundo, pois afeta diretamente o crescimento de raízes, diminui a capacidade

de infiltração de água no solo, reduz a translocação de nutrientes, resultando em uma pequena camada para ser explorada pelas raízes. Destaca ainda que, por depender de vários fatores, principalmente a umidade do solo no período de crescimento das raízes, o efeito da compactação na produção das culturas é difícil de ser quantificado.

O diâmetro dos poros do solo exerce influência em termos de efeito de pressão externa no crescimento radicular. Quando uma raiz encontra um poro no solo cujo diâmetro é menor que o seu, esta somente continuará se expandindo se conseguir fazer pressão suficiente para dilatar o poro ou terá que diminuir o seu diâmetro afim de transpô-lo, parecendo na realidade que o diâmetro da raiz aumenta ao invés de diminuir quando encontra tais obstáculos (CAMARGO, 1983). Isto é comprovado na cultura de arroz de terras altas, onde Guimarães & Moreira (2001) concluíram que o aumento da densidade do solo proporcionou um decréscimo no crescimento da parte aérea e na quantidade de raízes observando ainda o engrossamento das raízes em função da compactação.

As raízes, para adentrarem no solo devem exercer uma pressão de crescimento superior a resistência que o solo oferece. As variáveis que atuam normalmente na penetração das raízes são a pressão de crescimento das raízes, o meio ambiente na zona radicular (relação ar-água, temperatura) e a resistência do solo (PRIMAVESI et al., 1984).

De acordo com Pedrotti (1995), o balanço das forças externas e internas é responsável pelo crescimento radicular, sendo que a raiz pode exercer pressões de 9 a 13 bar contra a parede do solo, sendo que a mais importante é a pressão mínima que o solo impõe às

raízes e que reduzirá significativamente a elongação radicular, seguido da pressão máxima que a raiz pode exercer.

O efeito da pressão na ramificação das raízes pode ser observado quando a raiz principal não diminui o seu diâmetro para passar nos poros e as raízes laterais parecem responder a imposição de obstáculos mecânicos de maneira muito semelhante a principal, o que torna em ambos os casos todo o sistema radicular definhado e inteiramente coberto com pelos radiculares. Se houverem obstáculos apenas a raiz principal; as raízes laterais irão se proliferar formando uma configuração radicular densa e rasa. Isto em condições de campo, dificilmente garante a sobrevivência da planta em períodos de seca, embora ambas às raízes no mesmo tempo, poderão estar explorando volumes de solo que apresentem condições de umidade, nutrientes ou mesmo toxicidade (PEDROTTI, 1995).

Corsini & Ferraudo (1999), avaliando o efeito de sistemas de cultivos na densidade do solo, concluíram que nos três primeiros anos de plantio direto ocorre o aumento da densidade do solo e diminuição da porosidade, reduzindo o desenvolvimento radicular, e que somente a partir do quinto ano agrícola esses parâmetros começam a se restabelecer a níveis normais de cultivo. Sendo que, no sistema plantio direto a recuperação da estrutura na camada superficial do Latossolo Roxo e na linha da cultura, para atingir níveis de densidade do solo, porosidade e níveis de desenvolvimento radicular semelhantes aos obtidos logo após a realização das operações mecânicas de preparo, inicia-se no quarto ano agrícola e completa-se no oitavo.

Rosolem et al. (1994) mostraram que a compactação do solo afetou o crescimento radicular, mas não afetou a produção de matéria seca total e a parte aérea de plantas de milho. Gediga (1991) constatou que, em níveis considerados intermediários de compactação do solo, houve incrementos no acúmulo de massa na parte aérea do milho.

Para Bennie (1996) é difícil generalizar conclusões, pois a influência da compactação do solo sobre o crescimento radicular é decorrente de diversos fatores, que dependem das características genéticas das plantas, das condições ambientais e do estágio de desenvolvimento do vegetal. De acordo com Falleiro et al. (2003) as alterações edáficas, provocadas pelos diferentes sistemas de preparo, podem requerer ajustes no manejo das culturas e nas recomendações de adubação e calagem. Estes ajustes podem ocorrer de acordo com a região, em decorrência das diferenças no manejo e na rotação de culturas empregada ou de fatores ligados ao clima e ao solo.

Foloni et al. (2003) afirmam que o impedimento físico em subsuperfície altera a distribuição do sistema radicular das plantas de milho ao longo do perfil do solo, porém, não diminui a produção total de raízes, sendo que, uma camada compactada com resistência à penetração da ordem de 1,4 MPa impede que o sistema radicular do milho atravesse essa camada e se desenvolva em profundidade.

Secco et al. (1996), trabalhando com a cultura da soja, não observaram diferença no rendimento de grãos comparando vários sistemas de manejo de solo, entre eles o PD e a escarificação em plantio direto, sendo que, Vieira et al. (2004), também não encontraram diferenças significativas no rendimento de grãos de soja comparando plantio direto com plantio direto escarificado. Em

contrapartida, Ferreras et al. (2001), concluíram que o rendimento de soja sob PD foi 47,88% inferior ao PDE.

Eltz et al. (1989) observaram que a produtividade de milho em sistema plantio direto é superior ao sistema de manejo convencional, concluindo que provavelmente seja devido a um período maior de conservação da água no perfil, maior fertilidade na camada explorada pelas raízes e menor perda de solo.

De acordo com Beutler et al. (2004) a determinação do intervalo hídrico ótimo é um parâmetro importante no monitoramento da compactação do solo e na prevenção de perdas de produtividade do arroz de sequeiro. A compactação do solo a partir de um valor de resistência à penetração de 1,82 MPa e de densidade do solo de 1,62 Mg.m⁻³ reduz a produtividade do arroz de sequeiro em um Latossolo Vermelho de textura média.

Beutler & Centurion (2004) estudando plantas de soja e arroz encontraram redução na altura de plantas em valores de resistência à penetração (RP) superiores a 3 MPa, sendo que, a produção de matéria seca da parte aérea das plantas de soja foi reduzida na RP de 3,76 e 3,37 MPa e de 3,93 e 3,37 MPa para as plantas de arroz.

Os efeitos negativos de estados de compactação do solo na produtividade das culturas em condições de lavoura são escassos, dada a dificuldade de isolar o fator compactação do solo. Chancellor (1977) constatou que a compactação pelo tráfego pesado não influenciou o rendimento de grãos de trigo, do sorgo e do milho, atribuindo este fato à continuidade de poros gerada pela proximidade dos agregados do solo, o que teria melhorado a disponibilidade de água por ascensão

capilar. Centurion & Demattê (1992) também não encontraram respostas significativas em termos de rendimento de grãos de milho.

O índice de área foliar de plantas de milho submetidas a déficit hídrico foi maior em solos de textura argilosa pesada e franco-argilo-siltosa do que no solo de textura franco-arenosa, para uma mesma profundidade de solo e a altura das plantas de milho foi reduzida, quando a fração de água disponível às plantas foi inferior a 0,57, 0,74 e 0,52 e a senescência das folhas foi aumentada, quando a fração de água disponível às plantas foi inferior a 0,34, 0,63 e 0,38 para os solos de textura argilosa pesada, franco-argilo-siltosa e franco-arenosa, respectivamente (CARLESSO & SANTOS, 1999).

2.4 Textura do solo

O conhecimento sobre a distribuição granulométrica de partículas sólidas é essencial para várias aplicações. Assim, é por meio da análise granulométrica que se determina a textura dos solos, parâmetro fundamental na inferência do potencial de compactação, da disponibilidade de água, da aeração, da condutividade do solo ao ar, à água e ao calor, da infiltração e da redistribuição de água (PREVEDELLO, 1996). Além disso, como os processos de erosão, transporte e deposição de partículas sólidas são dependentes, entre outras grandezas, da granulometria dos materiais expostos e carreados, o traçado da curva granulométrica é essencial na hidrossedimentologia, possibilitando a obtenção de diâmetros característicos das amostras, fundamentais na estimativa do

deslocamento de sedimentos em bacias hidrográficas (CARVALHO et al., 2000, SILVA et al., 2004).

De acordo com Buckman & Brady (1976), ao examinar curvas características de umidade do solo, verifica-se que elas variam especificamente com a textura. Os solos de textura mais fina retêm maior porcentagem de água, ao longo de toda a faixa de energia. Tal condição é prevista por possuírem maior porcentagem de matéria coloidal, maior espaço poroso e superfície adsorptiva muito maior. De acordo com Shetron (1972), certas propriedades físicas e químicas do solo, tais como retenção de água e capacidade de troca de cátions estão altamente associadas a superfície específica.

Para Petersen et al. (1968) a textura é provavelmente o fator de maior importância na retenção de água do solo. Outra propriedade geralmente considerada importante no regime de umidade do solo é a matéria orgânica. O volume de água disponível geralmente aumenta com o teor de matéria orgânica nos solos de textura mais grossa. Porém, quando as texturas tornam-se mais finas, os aumentos na capacidade de água disponível são mais influenciados pela textura do que pela matéria orgânica.

Oliveira Jr. et al. (1996), em trabalho sobre caracterização físico-hídrica de solos (quatro LATOSSOLOS e um PODZÓLICO) no Paraná, verificaram uma diminuição da retenção de água em profundidade, sendo que os maiores valores de umidade na superfície deveram-se provavelmente aos teores mais elevados de matéria orgânica. Também observaram que os valores da superfície específica total são mais elevados nos solos que apresentam maiores teores de

óxidos de ferro, evidenciando a influência mineralógica em fenômenos de retenção hídrica.

2.5 Consistência do solo

As relações na interface solo-implemento (ferramentas de manejo do solo) são muito complexas, pois são afetadas pelas propriedades físico-hídrico-mecânicas do solo e pelas características das ferramentas. Entre as propriedades físico-hídrico-mecânicas, a consistência do solo, que descreve a resposta do solo à ação das forças externas que tendem a deformá-lo e podem ocasionar fluxo, fratura ou compressão do solo (FORSYTHE, 1975), é uma das mais importantes. Um solo pode apresentar vários estados de consistência conforme o seu conteúdo de água; os valores de conteúdo de água nos pontos de transição são denominados de limites. Assim, o limite plástico é o valor do conteúdo de água abaixo do qual o solo se apresenta friável e o limite líquido aquele acima do qual o solo se comporta como fluído.

Define-se como índice de plasticidade a diferença entre o limite líquido e o limite plástico. É na condição de solo friável, isto é, abaixo do limite plástico, que se recomenda a realização das operações motomecanizadas em função da mínima coesão entre as partículas do solo e da menor adesão do solo às ferramentas de preparo e semeadura (ASHBURNER & SIMS, 1984).

Se o solo estiver muito seco, apresenta alta coesão, exigindo maior potência das máquinas agrícolas e por outro lado se o solo estiver muito úmido além de problemas de sustentação e capacidade de tração dos tratores, ocorrerão danos à estrutura, pois filmes de água

estarão dispostos ao redor das partículas, funcionando como lubrificante, favorecendo a desagregação pela pressão exercida pelas máquinas e implementos agrícolas, compactando-o (SILVEIRA, 1988).

Poucos estudos foram realizados sobre este assunto no Brasil. Atualmente alguns trabalhos, têm sido apresentados, como o de Figueiredo et al. (1998) que obtiveram valores de limite plástico em torno de $0,32 \text{ kg kg}^{-1}$ em Latossolo Roxo da região de Lavras – MG, observou ainda que a umidade ótima de compactação está a 90% do limite plástico, dentro da faixa de friabilidade do solo.

Braida (2004), estudando um Nitossolo, constatou que o acúmulo de matéria orgânica resulta em um aumento significativo dos limites de liquidez e de plasticidade, sem que ocorresse alteração do índice de plasticidade (intervalo de umidade entre os limites de liquidez e de plasticidade). De acordo com Baver et al. (1972), isso ocorre porque a manifestação da plasticidade ocorre apenas depois que duas condições sejam atendidas: deve haver água suficiente para a formação de camadas rígidas de moléculas de água nas superfícies coloidais adjacentes e deve haver água extra para funcionar como lubrificante entre as camadas rígidas de moléculas de água, assim, a matéria orgânica afetaria apenas a primeira demanda, tornando-a maior, mas não teria efeito sobre a segunda demanda de água.

2.6 Densidade do solo

A densidade do solo é definida como o quociente de sua massa de sólidos por seu volume; é afetada por cultivos que alteram a estrutura e por consequência o arranjo e o volume dos poros. Estas alterações afetam propriedades físico-hídricas importantes como a porosidade de aeração, a retenção de água no solo, a disponibilidade de água às plantas e a resistência do solo à penetração (KLEIN, 1998).

Segundo Beltrame & Taylor (1980), as causas das alterações na densidade dos solos são naturais, difíceis de serem definidas e avaliadas, agindo lentamente no solo, como por exemplo, a eluviação de argilas e as forças mecânicas originadas da pressão causada pelos rodados das máquinas agrícolas e pela própria ação de implementos sobre o solo. Afirmam, ainda que esta pressão é originária das forças de tração e do próprio peso do trator e implementos. O tráfego excessivo realizado indiscriminadamente sob diferentes condições de umidade do solo é o principal responsável pela compactação.

Trabalho de Assis & Lanças (2004) verifica uma diminuição da densidade do solo de acordo com o tempo de adoção no sistema plantio direto, a partir dos 12 anos, sendo que se deve observar que os resultados relacionados com os sistemas de manejo do solo apresentam uma diversidade de respostas a um mesmo sistema, por causa de características do solo, da planta, do clima e outros. Os maiores valores de densidade do solo nos primeiros anos de implantação do sistema plantio direto se devem ao não revolvimento do solo e com o passar dos anos o efeito nocivo dessa compactação

desaparece, à medida que o plantio direto se estabelece adequadamente.

Outro parâmetro que pode ser usado como um indicador de compactação é a densidade relativa, obtida por meio da relação entre densidade do solo e densidade máxima do solo, obtida em laboratório (KLEIN, 2002). O mesmo autor concluiu que, em um Latossolo Roxo, de textura argilosa, o valor de densidade relativa em que as condições ao desenvolvimento das plantas seriam ótimas foi de 0,715. Kay (2000), em solos da Escandinávia e no oeste do Canadá, obteve densidade relativa ótima entre 0,77 e 0,84.

Ferreras et al. (2001), afirma que a densidade relativa quando supera 0,86 a 0,90 (dependendo da textura do solo), ocorre uma grande redução no volume de macroporos, afetando o movimento normal da água e ar, sendo que estes estariam relacionados com um menor crescimento e rendimento das culturas. Também observaram em um solo siltoso, sob plantio direto uma densidade relativa de 0,82 e 0,85 nas camadas de 0-6 cm e 10-16 cm, respectivamente e no plantio direto escarificado na ordem de 0,69 e 0,85, nas mesmas camadas, refletindo drasticamente no rendimento da cultura de soja.

2.7 Resistência mecânica do solo à penetração

A resistência mecânica do solo à penetração é uma das propriedades físicas do solo diretamente relacionada com o crescimento das plantas e modificada pelos sistemas de preparo do solo. O crescimento das raízes pode causar a deformação do solo

numa zona próxima à ponta das raízes e a pressão exercida contra as partículas e/ou agregados deve ser suficiente para propiciar a penetração e o alongamento das raízes (BENNIE, 1996). Valores excessivos de resistência do solo à penetração podem influenciar o crescimento das raízes em comprimento e diâmetro (MEROTTO & MUNDSTOCK, 1999) e na direção preferencial do crescimento radicular (IJIMA & KONO, 1991).

Além disso, estudos indicam que a resistência do solo à penetração das raízes tem efeitos diretos no crescimento da parte aérea das plantas (MASLE & PASSIOURA, 1987) e na partição de carboidratos entre a raiz e parte aérea (MASLE & FARQUHAR, 1988). Valores críticos de resistência à penetração dependem da espécie (BENGOUGH & MULLINS, 1990). Desta forma, a resistência do solo à penetração é fundamental para a avaliação dos efeitos dos sistemas de preparo no ambiente físico do solo para o crescimento das plantas.

O alongamento radicular só é possível quando a pressão de crescimento das raízes for maior do que a resistência mecânica do solo à penetração (PASSIOURA, 1991). Segundo Russel & Goss (1974), a pergunta a ser feita seria qual a impedância mecânica máxima do solo suportável para que não haja prejuízos à produção agrícola. Silva et al. (2002) relatam que um valor de 2 MPa de resistência à penetração do solo tem sido associado a condições impeditivas para o crescimento das raízes e da parte aérea das plantas.

2.8 Água no solo

O solo, o reservatório de água para as plantas, é afetado pelo manejo e práticas culturais alterando a dinâmica e a retenção de água nos seus poros. Esta retenção de água na matriz do solo é governada por duas forças principais: as forças capilares e as forças de adsorção, as quais denomina de forças mátricas que dá origem ao termo potencial mátrico da água no solo. Destaca ainda que um gráfico relacionando a umidade do solo com o potencial mátrico, se denomina curva de retenção da água no solo (KLEIN, 1998).

De acordo com Reichardt (1987) sistemas de manejo que possibilitem a manutenção de maior volume de água disponível para as culturas contribuem para a diminuição do estresse hídrico. Muitos fatores afetam a retenção da água no solo, sendo o principal deles a textura, pois ela determina a área de contato entre as partículas sólidas e a água, determinando em boa parte a distribuição do diâmetro dos poros. Arruda et al. (1987) tentaram efetuar uma correlação entre textura do solo e água disponível e concluíram, afirmando que a capacidade de campo e do ponto de murcha permanente, baseado somente na textura pode levar a conclusões enganosas.

Conforme Borges et al. (1999), o aumento da compactação acarreta o aumento da umidade do solo e redução da porosidade de aeração, que pode implicar no suprimento de oxigênio, disponibilidade de nutrientes, elementos em níveis tóxicos às plantas e aos microrganismos.

A avaliação do processo da redistribuição da água no solo, em condições de campo, demanda considerável tempo e apreciável custo,

porque as propriedades hidráulicas do solo sofrem extensa variabilidade espacial e estão sujeitas à freqüentes alterações no tempo (LOYOLA & PREVEDELLO, 2003).

2.9 Intervalo hídrico ótimo (IHO)

A qualidade física do solo para o crescimento das plantas é determinada não só pela disponibilidade de água, aeração e temperatura, mas também pela resistência que a matriz do solo oferece à penetração das raízes. Num solo degradado, além da redução da quantidade de água disponível, a taxa de difusão de oxigênio e a resistência do solo à penetração podem limitar o crescimento das plantas na faixa de potenciais que determina a disponibilidade de água no solo. Desta forma, a caracterização dos efeitos dos sistemas de uso e manejo sobre a degradação e qualidade física do solo é mais bem quantificada por medidas integradoras destas modificações (ARAÚJO et al., 2004a).

Neste contexto, o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO), termo introduzido no Brasil por Tormena et al. (1998), a partir do trabalho de Silva et al. (1994), incorpora num único dado a amplitude de água do solo em que são mínimas as limitações ao desenvolvimento de plantas associadas à disponibilidade de água, aeração e resistência do solo à penetração. O IHO integra as propriedades físicas do solo que diretamente influenciam o desenvolvimento das culturas. Estas inter-relações dependem da condição estrutural do solo e, portanto, do grau de degradação da estrutura a que o solo está submetido. Desta

maneira, o IHO é utilizado como indicador da qualidade física e estrutural do solo, como proposto por Silva et al. (1994).

Os impactos do uso e manejo na qualidade física do solo têm sido quantificados, utilizando diferentes propriedades físicas relacionadas com a forma e com a estabilidade estrutural do solo, tais como: densidade do solo (DE MARIA et al., 1999), porosidade do solo (BEUTLER et al., 2001; OLIVEIRA et al., 2001) e resistência do solo à penetração das raízes (TORMENA & ROLOFF, 1996; ROSOLEM et al., 1999).

Neste sentido, Lal (1994) sugere que estas avaliações utilizem medidas integradoras do comportamento físico do solo, fazendo menção ao IHO. Os valores médios de propriedades, como densidade, água disponível e porosidade do solo, permitem comparar os efeitos dos sistemas de manejo e, por meio das suas magnitudes, inferir a respeito da qualidade física do solo. Por outro lado, a utilização do IHO permite identificar, por meio da quantificação e da integração dos dados relativos à água disponível, aeração e resistência do solo à penetração, as restrições impostas pela degradação estrutural à qualidade física do solo para o crescimento das plantas.

Imhoff et al. (2001) utilizaram o conceito do IHO juntamente com a pressão de preconsolidação para estimar as pressões críticas que podem ser aplicadas sem causar a degradação da qualidade física do solo para o crescimento das plantas.

2.10 Porosidade do solo

Os sistemas de preparo do solo promovem modificações nas propriedades físicas como a agregação do solo (CASTRO FILHO et al., 1998), a densidade e a porosidade do solo (DE MARIA et al., 1999). A macroporosidade é drasticamente reduzida com a compactação do solo (DIAS JR. & PIERCE, 1996). De forma geral estas propriedades funcionam como indicadores de possíveis restrições ao crescimento radicular das culturas.

De acordo com Materechera et al. (1992), a resistência mecânica do solo causa aumento do diâmetro das raízes na camada compactada por provocar modificações morfológicas e fisiológicas, específicas a cada espécie ou cultivar, a fim de se adaptarem. As raízes diminuem de diâmetro para penetrar pequenos poros, pois a resistência mecânica do solo estimula a proliferação de raízes laterais, as quais são mais finas (RUSSEL & GOSS, 1974). Portanto, existe uma estreita relação entre porosidade do solo e crescimento radicular, com crescimento de raízes maior onde há maior número e continuidade de macroporos (HATANO et al., 1988).

Por sua vez, foi verificado que solos excessivamente porosos são prejudiciais à absorção de água e nutrientes pelas raízes, por causa do menor contato solo/raiz, provocando também um menor desenvolvimento das plantas (HÄKANSSON, 1990; BEUTLER & CENTURION, 2003).

Segundo Klein & Libardi (2002b) estudando as alterações que o manejo do solo para fins agrícolas provoca nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho, concluíram que o manejo do solo em área

irrigada aumentou a densidade do solo até à profundidade de 0,4 m, diminuindo a porosidade total e alterando a distribuição do diâmetro dos poros, acarretando a conseqüente diminuição do volume de macroporos e aumento de micro e criptoporos, sendo que, em densidades superiores a $1,256 \text{ Mg.m}^{-3}$ a porosidade de aeração passou a ser limitante (inferior a $0,10 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$).

2.11 Infiltração de água no solo

A infiltração é o processo da penetração de água no sentido vertical descendente. A capacidade de infiltração de água no solo é afetada pelo tempo, umidade inicial, porosidade e textura, condutividade hidráulica, entre outros. Com o transcorrer do tempo a capacidade de infiltração vai diminuindo tendendo para uma taxa constante de infiltração, que será igual à máxima condutividade hidráulica da camada limitante (KLEIN, 1998).

As operações agrícolas, quando realizadas sem o controle da umidade do solo, provocam aumento da área compactada do solo, o que pode reduzir a infiltração e, conseqüentemente, a disponibilidade de água para as plantas, comprometendo a produtividade (PEDROTTI, 1995 e SECCO et al., 2004).

A utilização de implementos de preparo do solo, como escarificadores, segundo Cassel et al. (1978) aumentam significativamente a capacidade de infiltração de água no solo, enquanto que Camara (2004) e Muktar et al. (1985) destaca o

incremento na capacidade de infiltração que uma escarificação pode ocasionar em áreas com plantio direto.

Câmara & Klein (2005a), estudando o efeito da escarificação nas propriedades de um Latossolo Vermelho Distrófico típico, constataram que a taxa inicial bem como a final de infiltração aos 120 minutos, foi afetada pelo manejo do solo, observando-se uma diferença na taxa inicial de infiltração a favor do plantio direto escarificado de 2,2 vezes e na taxa final de 3,77 vezes. O plantio direto apresentou uma taxa final de infiltração de 26,49 mm h⁻¹ e o plantio direto escarificado de 99,99 mm h⁻¹, sendo que o efeito da escarificação é constatado pela maior taxa de infiltração.

Para Cichota et al. (2003) a taxa de infiltração, que, normalmente apresenta alta variabilidade espacial, tem importância agrônômica pelo seu papel na formação de enxurrada e na determinação de taxas viáveis de irrigação. Esta variabilidade espacial do solo, decorrente de sua formação e manejo agrícola, tem atraído o interesse de cientistas do solo há muito tempo, sendo que, quando estas variações aumentam com a distância entre amostras, uma parcela explicável pela dependência está embutida na variação geral do atributo.

Nesse caso, a análise da variabilidade espacial tem importância no sentido de subsidiar o planejamento de um experimento, bem como na avaliação dos efeitos dos tratamentos, visando reduzir a variação experimental atribuída ao erro aleatório. Verificou-se a existência de dependência espacial com alcance na ordem de 3,5 m para a taxa de infiltração, sendo que, o número de observações necessárias para um

desvio definido aumentou quando se utilizaram apenas dados espacialmente independentes (CICHOTA et al., 2003).

2.12 Condutividade hidráulica do solo

De acordo com Teixeira et al. (2005) o conteúdo de água no solo é uma variável utilizada em estudos que envolvem agricultura, hidrologia e meteorologia, dentre outros. Na agricultura, essa informação é necessária para muitas aplicações, que incluem o planejamento da irrigação para o aumento da produção agrícola. Dentro deste contexto, o monitoramento do conteúdo de água torna-se importante para a obtenção, por exemplo, da função condutividade hidráulica do solo não saturado.

O fluxo da água em solo não saturado, na região do sistema radicular dos cultivos é muito pouco estudado. No entanto, o seu conhecimento é de fundamental importância no entendimento dos processos de infiltração, redistribuição e suprimento de água às culturas (KLEIN, 1998).

As propriedades físicas do solo, como a textura e a estrutura determinam o fluxo de água no solo. Nesse sentido, Ellies et al. (1997) destacam a importância da funcionalidade do sistema poroso do solo, englobando propriedades tais como: quantidade, tamanho, morfologia, continuidade e orientação dos poros. Todas estas propriedades do espaço poroso, que influenciam a condutividade, podem ser reunidas no termo único "geometria porosa dos solos" (LIBARDI, 2005).

A condutividade hidráulica (K) do solo não saturado, pode ser descrita como uma função $K(\theta)$, onde θ = umidade volumétrica do solo, que traduz o quanto ele conduz de água em dada umidade. A contribuição que este fluxo pode representar para a região das raízes das plantas é, ainda, mais importante e foi estudado por Jong Van Lier & Libardi (1997) que observaram que uma raiz individual de uma planta de arroz é capaz de retirar água do solo de uma distância de mais de 0,1m no intervalo de alguns dias. Esses resultados concordam com os de Hullugale & Willatt (1983) que destacam que, em condições de baixa densidade de raízes, deve-se utilizar uma condutividade hidráulica crítica em vez de uma umidade crítica na avaliação do desenvolvimento das plantas.

Segundo Sharma & Uehara (1968), a condutividade hidráulica, para Latossolos, decresce rapidamente quando pequenas tensões são aplicadas. Próximo à saturação, a condutividade foi de aproximadamente 150 mm.h^{-1} , com 10kPa de tensão foi reduzida para $0,1 \text{ mm.h}^{-1}$. Othmer et al. (1991) atribuem isto à agregação desse solo, que proporciona uma distribuição bimodal do diâmetro dos seus poros os quais são, por isso, classificados em poros inter-agregados e poros intra-agregados. Os primeiros são rapidamente esvaziados fazendo decrescer rapidamente a condutividade, e os segundos, mais lentamente, proporcionando uma condutividade menor.

O comportamento da condutividade hidráulica, em solos com estrutura microagregada próximo a saturação é diferente de outros solos argilosos (RADULOVICH et al., 1992, e CHEN et al., 1993). Nesses solos, na faixa de umidade de domínio dos macroporos (poros interagregados), a função $K(\theta)$ é governada pelo potencial

gravitacional, enquanto na faixa de umidade abaixo da capacidade de campo (poros intra-agregados) o potencial mátrico passa a governar, valendo para esta condição a clássica teoria, baseada na equação de Richards.

Estudando as mudanças nas características físicas do solo sob diferentes manejos, Blevins et al. (1984) concluíram que a condutividade hidráulica do solo não saturado, em uma faixa de baixas tensões, foi maior para solos sob plantio direto do que em sistema de cultivo convencional.

Em contraposição, Roth et al. (1988) estudando os parâmetros físicos e hídricos do solo em diferentes manejos, constataram que em potenciais abaixo de 20 kPa, o plantio direto apresentou menores valores de condutividade hidráulica do que manejo convencional, enquanto, acima deste potencial mátrico, apresentou valores superiores, o que segundo os autores é muito importante no contexto da determinação de água disponível às plantas. Esta aparente contradição pode ser explicada em função de alguns fatores, entre os quais a variação de manejos adotados dentro do plantio direto, uns com maior atividade biológica no solo, outros utilizando culturas com sistema radicular mais agressivo e profundo, e a própria variação das características físicas do solo.

Avaliando a condutividade hidráulica em Latossolo Roxo ácrico, submetido ao plantio direto sem irrigação e ao plantio direto irrigado comparando com o solo de mata em condição natural Klein & Libardi (2002a) concluíram que esta é diminuída através de alterações na estrutura do solo, como o aumento da densidade, redução da porosidade total e alteração da distribuição do diâmetro dos poros.

2.13 Água disponível as plantas

De acordo com Reichardt & Timm (2004) o conceito de água disponível (AD), como aquela contida no solo entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente é indispensável para o correto manejo da água e orientação de projetos de irrigação. O critério é controverso mas se usado com bom senso é de grande utilidade no entendimento da dinâmica da água e sua disponibilidade às culturas. A grande dificuldade é estabelecer critérios para a definição da umidade na qual o solo se encontra na capacidade de campo e no ponto de murchamento permanente.

Em relação a este ponto, Reichardt (1988) fez uma detalhada revisão sobre “capacidade de campo” citando o trabalho pioneiro de Veihmeyer e Hendrickson que definem a capacidade de campo como sendo a quantidade de água retida no solo, depois que o excesso tenha drenado e a taxa de movimento descendente tenha decrescido acentuadamente, o que geralmente ocorre dois a três dias depois de uma chuva ou irrigação em solos permeáveis de estrutura e textura uniformes.

O principal fator que determina a murcha permanente das plantas é a taxa de movimento de água através do solo até as raízes como comprovaram Jong Van Lier & Libardi (1997) para a cultura do arroz.

Por outro lado Letey (1985) frisa que em determinadas situações, nem toda a água retida entre a capacidade de campo e o ponto de murchamento permanente é disponível às plantas, introduzindo assim, o conceito de faixa de umidade não limitante,

definida como intervalo hídrico ótimo (IHO), é aquela em que a faixa de umidade do solo cujos limites são definidos considerando-se além da capacidade de campo e o ponto de murcha permanente, a resistência à penetração e a porosidade de aeração do solo.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi instalado no Centro de Extensão e Pesquisa Agropecuária da Universidade de Passo Fundo, no município de Passo Fundo, uma região com altitude média de 700 m acima do nível do mar, clima segundo a classificação de Koeppen, do tipo Cfa 1 (subtropical chuvoso) e com coordenadas S - 28° 12' e W - 52° 23'.

O solo da área experimental pertence a Unidade de Mapeamento Passo Fundo, classificado como LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico, relevo ondulado e substrato basalto, com composição média de 0,55 kg kg⁻¹ de argila, 0,12 kg kg⁻¹ de silte e 0,33 kg kg⁻¹ de areia.

A área vinha sendo conduzida sob sistema plantio direto contínuo por um período de oito anos com a seguinte seqüência de culturas: 1997/98 azevém-soja, 1998/99 azevém-milho, 1999/00 cevada-soja, 2000/01 azevém-soja, 2001/02 azevém-milho, 2002/03 azevém-soja, 2003/04 azevém-soja. Na área ocorreu ressemeadura natural de azevém e após a colheita da soja, no mês de maio de 2003, realizou-se a escarificação em parte da área, utilizando-se um escarificador modelo Jumbo-Matic, equipado com cinco hastes de formato parabólico, discos de corte e rolo destorroador/nivelador, a uma profundidade média de 25 cm. Sobre a área existia azevém, sendo que este foi estabelecido por ressemeadura natural.

A semeadura do milho foi efetuada no mês de setembro, sendo que, para a implantação da cultura do milho foi utilizado um trator MF modelo 620, equipado com uma semeadora adubadora modelo SHM-15, marca Semeato, com sulcador tipo guilhotina para

adubo, disco duplo para semente e espaçamento entre as linhas de 0,85 m.

O rendimento de grãos foi calculado coletando-se espigas de milho, em dez linhas de 10 m em cada unidade experimental. Os grãos colhidos foram pesados, e determinada a umidade para correção do rendimento de grãos, para umidade de 13%.

O delineamento experimental utilizado foi em faixas, com parcelas subdivididas e 5 repetições, sendo o sistema plantio direto (PD) e sistema plantio direto escarificado (PDE) as parcelas principais e as subparcelas constituídas das profundidades de coleta das amostras para as propriedades do solo. As profundidades amostradas foram: 2,5; 7,5; 12,5; 17,5; 22,5 e 27,5 cm, considerando o plano horizontal que divide a amostra em duas partes iguais.

As amostras com estrutura preservada (n=60), utilizadas para a determinação da densidade do solo, retenção de água e resistência mecânica do solo à penetração, foram coletadas nas profundidades anteriormente citadas, com o auxílio de um amostrador do tipo “Umland”, utilizando cilindros de aço inoxidável com 5 cm de diâmetro e 5 cm de altura. Juntamente retirou-se amostras com estrutura não preservada para a determinação da densidade de sólidos, granulometria, análise química e testes de proctor.

Efetou-se a análise granulométrica seguindo a rotina do Laboratório de Física e Água do Solo da FAMV/UPF, baseada na metodologia descrita por Gee & Bauder (1986), utilizando como dispersante solução aquosa de hidróxido de sódio (4 kg.m^{-3}) e densímetro de Boyoucos para as leituras. A primeira leitura foi feita 40 s após 6 horas de agitação para determinação da areia total e a

segunda 2 horas após para determinação da argila, sendo a fração silte determinada por diferença. A separação da fração areia foi feita por lavagem e peneiramento em peneira com malha de 0,053 mm. Após secas em estufa efetuou-se a separação das frações areia, através de peneiramento em muito grossa (> 1 mm), grossa (0,5 – 1,0 mm), média (0,25 – 0,5 mm), fina (0,105 – 0,25 mm) e muito fina ($< 0,105$ mm).

O teor de carbono orgânico do solo foi determinado através da utilização do método de Walkley - Black, considerado como padrão, baseado no princípio da oxidação da matéria orgânica, com dicromato de potássio em meio sulfúrico, com aquecimento externo, conforme a metodologia descrita por Tedesco et al. (1995) obteve-se o teor de carbono orgânico, que foi multiplicado pela densidade do solo para transformação a base de volume.

A determinação da densidade dos sólidos e do solo foi realizada conforme a metodologia descrita pela Embrapa (1997).

A porosidade total foi determinada pela relação entre densidade do solo e densidade dos sólidos. A classificação dos poros: macroporos, microporos e criptoporos foi feita aplicando tensões crescentes. Os macroporos (poros com diâmetro maior que 0,05 mm) foram determinados na tensão de 6 kPa (EMBRAPA, 1997), os criptoporos a partir de 1500 kPa (KLEIN, 1998) e os microporos (poros com diâmetro entre 0,05 e 0,0002 mm) foram obtidos pela diferença entre as tensões de 6 e 1500 kPa.

As amostras foram colocadas nas tensões de 3; 6; 9; 10; 12; 50; 100 e 300 kPa, para determinação da curva de retenção da água no solo. Para as tensões até 12 kPa utilizou-se funis de placas

porosas (Funis de Haynes) e para as tensões superiores foram utilizadas painéis de pressão com placas porosas (Câmaras de Richards). As amostras foram submetidas às tensões até que o fluxo de água cesse. Para a determinação da tensão de 500 e 1500 kPa foi empregado um psicrômetro modelo WP4 Dewpoint Potentia Meter (DECAGON DEVICES, 2000), onde foram realizadas várias amostragens e estimou-se a umidade para estas tensões. Para fazer essa estimativa, os dados foram transferidos para um gráfico de uma planilha de cálculo (Excel) e foi inserida uma linha de tendência polinomial de segundo grau que gerou uma equação com os parâmetros para o cálculo.

A umidade do solo em função do potencial mátrico foi ajustada pela Equação (1) de Van Genuchten (1980), utilizando-se o software SWRC (Dourado Neto et al., 1990) para a obtenção dos parâmetros empíricos de ajuste α , m , n , e fixando o θ_s no valor correspondente à porosidade total e θ_r como valor da umidade volumétrica a tensão de 1500 kPa.

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha \Psi_m)^n]^m} \quad (1)$$

onde:

θ = Umidade do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)

θ_s = Umidade do solo saturado ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)

θ_r = Umidade do solo à tensão de 1500 kPa ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)

Ψ_m = Potencial mátrico da água no solo (kPa)

α , m , n = Parâmetros empíricos da equação.

A resistência mecânica do solo à penetração (RP) foi determinada em laboratório, utilizando um penetrômetro eletrônico modelo MA-933, marca Marconi, com velocidade constante de 0,1667 mm s⁻¹, equipado com uma célula de carga de 200 N, e haste com cone de 4 mm de diâmetro de base e semi-ângulo de 30⁰, receptor e interface acoplado a um microcomputador para coleta dos dados através de um software próprio do equipamento. As determinações foram realizadas em amostras com estrutura preservadas submetidas a diferentes tensões (0; 6; 12; 25; 50; 100; 300 kPa). Para cada amostra foram obtidos 250 valores e utilizados cerca de 200 valores centrais para se obter a média. Os valores de RP foram ajustados a um modelo não-linear proposto por Busscher (1990), que ajusta a RP em relação à densidade e umidade do solo conforme a Equação (2).

$$RP = a * \theta^b * Ds^c \quad (2)$$

onde:

a, b, c = Parâmetros empíricos

Ds = Densidade do solo

θ = Umidade volumétrica (m³ m⁻³)

A RP na umidade da capacidade de campo e do ponto de murcha permanente foi determinada através da equação descrita anteriormente (Equação 2) na forma logarítmica (Equação 3).

$$\ln RP = a + b \ln Ds - c \ln \theta \quad (3)$$

onde:

a, b, c = Parâmetros empíricos
Ds = Densidade do solo
ln = logaritmo neperiano
 θ = Umidade volumétrica ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)

Para a determinação da densidade máxima do solo e umidade ótima de compactação foi utilizado o ensaio de Proctor, na qual a amostra é compactada em um cilindro metálico de aproximadamente 1000 cm^3 , em três camadas, cada uma recebendo 25 golpes de um soquete de 2,5 kg caindo de uma altura de 30,5 cm, semelhante ao que é preconizado por Nogueira (1998) e correspondendo a uma energia de 560 kPa. Para obter a curva de compactação, o solo foi compactado em 7 ou 8 umidades, com intervalos de cerca de 1,5% de umidade gravimétrica, partindo-se de uma umidade de 16% que permitiu-se que o quarto ou quinto ponto ficasse próximo à umidade crítica. Após cada compactação, foram retiradas duas amostras do corpo cilíndrico formado (base, meio e topo), para determinação da umidade real. Para ambos os manejos realizaram-se apenas uma repetição para cada profundidade amostrada.

Com base nos valores de umidade real e densidade do solo correspondentes, estimou-se a densidade máxima (Equação 4) e a umidade ótima de compactação (Equação 5) de cada uma das amostras de cada profundidade. Para fazer essa estimativa, os dados foram transferidos para um gráfico de uma planilha de cálculo (Excel) e foi inserida uma linha de tendência polinomial de segundo grau que gerou uma equação com os parâmetros para o cálculo.

$$D_{\text{máx.}} = a2Ug + b \quad (4)$$

$$Ug \text{ ótima} = \frac{b}{2a} \quad (5)$$

Para determinação da densidade relativa (KLEIN, 2002), com os dados de densidade máxima do solo para todas as profundidades, determinados anteriormente através do teste de Proctor normal com 560 kPa de energia, (NOGUEIRA, 1998) esta foi calculada a partir da Equação (6):

$$DR = \frac{\text{Densidade do solo}}{\text{Densidade máxima do solo}} \quad (6)$$

O limite de liquidez (LL), que corresponde à umidade do solo quando são necessários 25 golpes no aparelho de Casagrande para fechar uma ranhura padrão aberta na superfície da amostras, foi determinado conforme metodologia descrita pela Embrapa (1997), na qual utiliza-se a fração do solo que passa pela peneira 40 (malha com abertura de 0,425 mm).

O limite de plasticidade (LP), que corresponde à umidade na qual ao se moldar um cilindro de solo com 3 mm de diâmetro surgem fissuras na superfície do mesmo (início da fragmentação), foi determinado conforme metodologia descrita pela Embrapa (1997), que também especifica o uso da fração do solo que passou pela peneira 40.

Para determinar o intervalo hídrico ótimo (IHO) foi utilizada a metodologia descrita por Klein (1998), calculando-se a umidade na porosidade de aeração (PA) mínima de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Sojka, 1992), no ponto de murcha permanente (PMP) a 1500 kPa, na capacidade de campo (CC) a 6kPa e na resistência a penetração (RP) de 1,4 MPa devido a evidências de que para a cultura do milho seja em torno deste valor (Folloni et al., 2003). A PA, CC e PMP, e os dados foram linearizados em função da densidade do solo. A RP, por outro lado, foi ajustada de forma não linear, devido a mesma sofrer interações da densidade e da umidade do solo (Equação 7).

$$\theta = EXP \frac{\ln RP - a - b \ln Ds}{c} \quad (7)$$

onde:

a, b, c = Parâmetros empíricos

Ds = Densidade do solo

ln = logaritmo neperiano

EXP= exponencial

θ = Umidade volumétrica ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)

A determinação da taxa de infiltração da água do solo foi realizada 24 meses após a escarificação, utilizando o método de inundação com cilindros concêntricos equipados com bóia, até a obtenção da taxa constante de infiltração, conforme descrito por Klein (1998). Os resultados obtidos foram ajustados à equação de Kostiakov.

Após a colheita do milho, 24 meses após a escarificação, foram coletadas amostras de solo com aproximadamente $0,0003 \text{ m}^3$

(75 mm de diâmetro e 68 mm de altura), com as quais foi determinada a condutividade hidráulica do solo (K) saturado em laboratório, conforme a metodologia proposta pela Embrapa (1997), utilizando-se um permeâmetro de carga constante e, a partir das medidas quantitativas obtidas, foi calculada a condutividade hidráulica do solo saturado com a equação (8). Para determinação da condutividade hidráulica do solo saturado em laboratório foram utilizadas quatro profundidades 0 à 7,5 cm, 7,6 à 15 cm, 15,1 à 22,5 cm e 22,6 à 30 cm e três repetições.

$$K = \frac{q \times L}{A \times H \times t} \quad (8)$$

onde:

K = Condutividade hidráulica (cm hora⁻¹)

q = Volume percolado (ml)

L = Altura da amostra de solo (cm)

H = Altura da amostra de solo e da lâmina de água (cm)

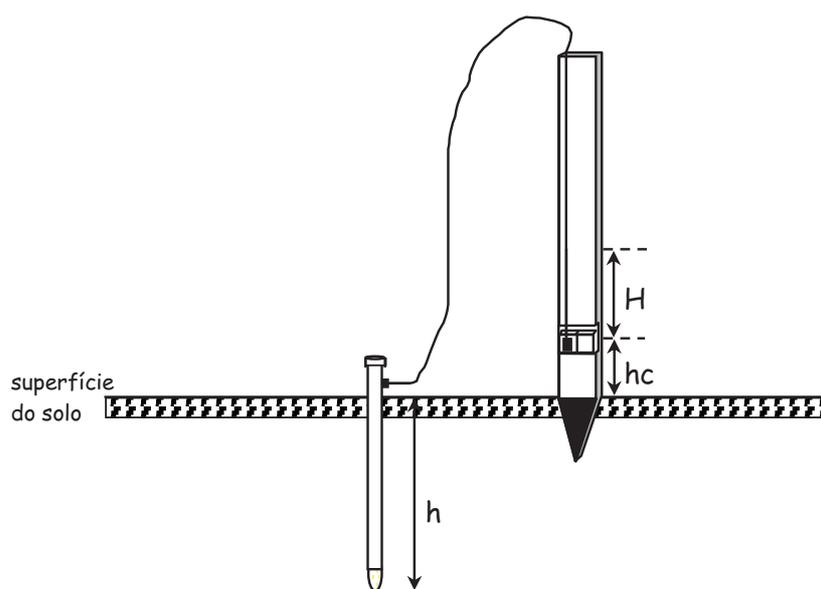
A = Área do cilindro (cm²)

t = tempo (h)

Para determinação do potencial mátrico (Ψ_m) foram utilizados tensiômetros com manômetro de mercúrio. Antes da construção as cápsulas porosas foram submetidas aos testes de condutância e pressão de borbulhamento, selecionando-se as que apresentavam condutância maior que $1.10^{-5} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, seguindo recomendação de Cassel & Klute (1986) e pressão de borbulhamento superior a 100 kPa. Após terminada a construção dos tensiômetros efetuou-se novamente o teste de pressão de borbulhamento para verificar possíveis vazamentos seguindo metodologia proposta por

Libardi (1997). Manteve-se os tensiômetros submersos em água durante uma semana e no momento da instalação do experimento o espaguete era conectado ao manômetro de mercúrio, e este ativado (Figura 1).

Para determinação da condutividade hidráulica do solo não saturado, 6 baterias (3 em cada tratamento) de 7 tensiômetros foram instaladas no campo 24 meses após a escarificação. As cápsulas porosas dos tensiômetros foram instaladas no perfil a profundidades de 5, 10, 15, 20, 25, 30 e 35 cm.



$$\Psi_m = -12,6 H + hc + h$$

Figura 1 - Esquema de instalação dos tensiômetros a campo.

Utilizou-se o método do perfil instantâneo proposto por Hillel et al. (1970), sendo que para delimitar as parcelas, foram utilizadas folhas de flandre de 0,05 mm de espessura, 0,35 m de altura e 13 m de comprimento, unindo as extremidades por meio de grampos e obtendo-se um círculo com 3 m de diâmetro e aproximadamente 7 m² de área inundada, conforme pode ser visto na Figura 2.



Figura 2 - Detalhe da instalação dos tensiômetros, manômetro e delimitação da área no início do processo de inundação.

Abriu-se um sulco em forma circular com 0,2 m de profundidade, onde foi introduzida a folha de flandre. Após fechado o sulco iniciou-se a inundação das parcelas. Cessada a infiltração, para

evitar a evaporação de água, cobriu-se a parcela com lonas de plástico, e com folhas de isopor junto aos tensiômetros (Figura 3).

No $t=0$ de redistribuição de água iniciaram-se as leituras diárias dos tensiômetros sempre as 8 horas da manhã, antes do sol esquentar o plástico ou a água dos tensiômetros e dos espaguetes, o que poderia acarretar em erros nas determinações. As leituras foram efetuadas durante um período de aproximadamente 21 dias.



Figura 3 - Detalhe da parcela coberta com lona plástica para evitar evaporação.

Com os valores de potencial mátrico obtidos através das leituras dos tensiômetros e as curvas de retenção, gráficos de armazenagem da água no solo em função do tempo para cada profundidade e manejo foram confeccionados e os dados ajustados a uma equação do tipo potencial (Equação 9).

$$h_z = at^b \quad (9)$$

onde:

h_z = armazenagem de água no solo (mm) até a profundidade z (mm)

t = tempo (h)

a ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$) e b são parâmetros empíricos

Derivando-se a Equação 9 com relação ao tempo obtém-se a Equação 10 para cálculo do fluxo (q) de água em cada profundidade e tempo.

$$\frac{dH_z}{dt} = q = ab t^{b-1} \quad (10)$$

Para o cálculo do gradiente de potencial total obtidos através dos tensiômetros, foram utilizados valores de potencial total logo acima e logo abaixo da profundidade em questão (Equação 11), razão pela qual não foi possível calcular a condutividade na primeira e última profundidade.

$$\text{grad } \Phi_t(Z_i) = \frac{\Phi_t(Z_{i-1}) - \Phi_t(Z_{i+1})}{Z_{i-1} - Z_{i+1}} \quad (11)$$

Calculou-se a condutividade hidráulica do solo não saturado, através da Equação 12.

$$K(\theta) = \frac{q}{\text{grad } \Phi_t} \quad (12)$$

Para obtenção de uma relação entre K e θ procurou-se ajustar os valores de $K(\theta)$ (mm.h^{-1}) em função de θ ($\text{m}^3.\text{m}^{-3}$), para cada profundidade e manejo de solo (Equação 13).

$$K = \text{EXP}^{a\theta + b} \quad (13)$$

onde:

K = condutividade hidráulica (mm.h^{-1})
 θ = umidade volumétrica do solo ($\text{m}^3.\text{m}^{-3}$)
 a e b = são parâmetros empíricos

Os resultados de infiltração de água no solo foram analisados através do teste “t”, enquanto que os demais resultados foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Duncan a 0,05 de significância. As análises foram processadas por meio do Statistical Analysis System (SAS Institute, 1996).

A densidade máxima do solo, umidade ótima de compactação e as curvas de retenção de água no solo não foram comparadas estatisticamente por não apresentarem repetições.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Carbono Orgânico (CO)

O teor de carbono orgânico no solo 24 meses após a escarificação (Tabela 1) apresentou diferença significativa entre os dois manejos, tendo o PDE na média apresentado valores maiores do que o PD. Na superfície o PD apresentou uma variação menor do que o PDE, e em profundidade, o PDE apresentou uma variação percentual menor entre as camadas do que o PD, o que indica que houve uma redistribuição dos restos culturais da superfície em profundidade, e provavelmente um maior desenvolvimento do sistema radicular do azevém nas menores profundidades, pois, este apresenta um sistema radicular fasciculado e superficial.

Tabela 1 – Teor de carbono orgânico a base de volume em função do manejo e profundidade

Profundidade	PD	PDE	Média
-----cm-----	-----%-----		
2,5	B 2,54 a	A 3,16 a	2,85
7,5	B 2,31 ab	A 2,89 b	2,60
12,5	B 2,24 bc	A 2,87 b	2,55
17,5	A 2,15 bc	A 2,32 c	2,24
22,5	A 2,06 c	A 2,18 c	2,12
27,5	A 1,74 d	A 2,06 c	1,90
Média	B 2,17	A 2,58	
CV	7,04 %		

Médias antecedidas pela mesma letra maiúscula na horizontal e seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem significativamente pelo teste de Duncan 5% de significância.

Tanto no PD quanto no PDE, a profundidade de 2,5 cm foi a que apresentou maior quantidade de CO. Comparando os sistemas nas profundidades, o PD foi estatisticamente igual ao PDE nas profundidades de 17,5, 22,5 e 27,5 cm, enquanto que nas demais profundidades o PDE apresentou teores de CO superiores ao PD.

Resultados como esses são importantes, pois indicam o contrário do que afirmam muitos autores, (CARVALHO et al., 1999; FERRERAS et al., 2001; BAYER et al., 2003 e ARAÚJO et al., 2004), que qualquer tipo de preparo do solo reduz o teor de CO no solo. Isto se deve ao fato de que o revolvimento do solo no preparo convencional aumenta as taxas de perda de carbono orgânico (BAYER et al., 2000), o que ocorre devido ao fracionamento e incorporação de resíduos vegetais, maior disponibilidade de oxigênio, maiores temperaturas e menor proteção física intra-agregados, reduzindo gradativamente os estoques de carbono orgânico, o que não ocorre com a escarificação.

Estes resultados são corroborados por Bertol et al. (2001), Camara (2004) e Silva et al. (2005), onde utilizando a escarificação pode-se proporcionar um menor revolvimento do solo e conseqüente pouca incorporação dos restos culturais. Por sua vez, a agregação e as alterações no microclima em solos sob preparo reduzido contribuem para o acúmulo de matéria orgânica em solos não totalmente revolvidos, como tem sido verificado por diversos autores (BAYER & MIELNICZUK, 1997; BAYER et al., 2000; CASTRO FILHO et al., 2002).

Estes dados demonstram ainda que após vinte e quatro meses a escarificação ainda possui efeito e pode melhorar a estrutura

do solo mantendo ou aumentando o teor de CO, propiciando assim, uma maior retenção de H₂O em baixas tensões (FREIRE & SCARDUA, 1979).

4.2 Textura do solo

A composição granulométrica do solo é uma característica inerente ao solo que possui grande importância no estudo do seu comportamento físico-hídrico. Vários fatores físico-hídricos do solo são influenciados pelo teor de argila do solo, tais como, o estado de energia da água no solo, o fluxo não saturado, porosidade e densidade do solo (BRAIDA, 2004).

Tabela 2 – Teores de argila, silte, areia total (AT), areia muito grossa (AMG), areia grossa (AG), areia média (AM), areia fina (AF) e areia muito fina (AMF) em função do manejo e profundidade (PROF)

PROF	Argila	Silte	Areia					
			AT	AMG	AG	AM	AF	AMF
---cm---	-----		kg.kg ⁻¹					
	-----		PD					
2,5	0,3579	0,2381	0,4040	0,002	0,007	0,079	0,251	0,064
7,5	0,4256	0,2276	0,3468	0,005	0,011	0,060	0,214	0,058
12,5	0,4407	0,2105	0,3488	0,008	0,016	0,082	0,185	0,057
17,5	0,4605	0,2043	0,3352	0,003	0,006	0,055	0,208	0,064
22,5	0,4605	0,1943	0,3452	0,005	0,014	0,079	0,188	0,060
27,5	0,5341	0,1899	0,2760	0,004	0,006	0,045	0,164	0,057
Média	0,4466	0,2108	0,3427	0,005	0,010	0,067	0,202	0,060
	-----		PDE					
2,5	0,3220	0,2808	0,3972	0,002	0,012	0,096	0,228	0,059
7,5	0,4011	0,2401	0,3588	0,005	0,023	0,079	0,189	0,062
12,5	0,4056	0,2186	0,3758	0,005	0,017	0,086	0,208	0,060
17,5	0,4011	0,2299	0,3690	0,004	0,016	0,087	0,203	0,059
22,5	0,4803	0,2059	0,3138	0,007	0,011	0,065	0,177	0,053
27,5	0,4605	0,2205	0,3190	0,006	0,020	0,078	0,161	0,053
Média	0,4118	0,2326	0,3556	0,005	0,016	0,082	0,194	0,058

A análise granulométrica foi realizada com a finalidade, muito mais, de caracterizar o solo local, do que verificar a existência de um possível efeito da escarificação na distribuição das partículas primárias do solo.

A composição granulométrica do perfil do solo e o fracionamento da areia nos dois manejos onde foi realizado o experimento estão apresentados na Tabela 2. O resultado da análise granulométrica mostrou que o LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico apresenta um incremento de argila em profundidade (Tabela 2) em ambos os manejos, sendo que resultados semelhantes foram encontrados por Machado et al. (1981), reforçando esta característica deste tipo de solo.

Tabela 3 – Teores de argila do solo em função do manejo e profundidade

Profundidade	PD	PDE	Média
-----cm-----	-----kg.kg ⁻¹ -----		
2,5	A 0,3579 f	B 0,3220 d	0,3450 f
7,5	A 0,4256 e	A 0,4011 c	0,4184 e
12,5	A 0,4407 d	B 0,4056 c	0,4282 d
17,5	A 0,4605 c	B 0,4011 c	0,4358 c
22,5	B 0,4605 b	A 0,4803 a	0,4704 b
27,5	B 0,5341 a	A 0,4605 b	0,4973 a
Média	A 0,4466	B 0,4118	
CV	1,77%		

Médias antecedidas pela mesma letra maiúscula na horizontal e seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem significativamente pelo teste de Duncan 5% de significância.

Nas três frações do solo ocorreram diferenças significativas entre manejos e entre profundidades, conforme Tabelas 3, 4 e 5.

Tabela 4 – Teores de silte do solo em função do manejo e profundidade

Profundidade	PD	PDE	Média
-----cm-----	-----kg.kg ⁻¹ -----		
2,5	B 0,2381 a	A 0,2808 a	0,2594 a
7,5	A 0,2276 ab	A 0,2401 b	0,2338 b
12,5	A 0,2105 b	A 0,2186 cd	0,2146 c
17,5	B 0,2043 c	A 0,2299 bc	0,2171 c
22,5	A 0,1943 c	A 0,2059 d	0,2001 d
27,5	B 0,1899 c	A 0,2205 cd	0,2052 d
Média	B 0,2108	A 0,2326	
CV	3,77%		

Médias antecedidas pela mesma letra maiúscula na horizontal e seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem significativamente pelo teste de Duncan 5% de significância.

Tabela 5 – Teores de areia do solo em função do manejo e profundidade

Profundidade	PD	PDE	Média
-----cm-----	-----kg.kg ⁻¹ -----		
2,5	A 0,4040 a	A 0,3972 a	0,4006 a
7,5	A 0,3468 b	A 0,3588 c	0,3528 c
12,5	B 0,3488 b	A 0,3758 b	0,3613 b
17,5	B 0,3352 b	A 0,3690 bc	0,3521 d
22,5	A 0,3452 b	B 0,3138 d	0,3295 e
27,5	B 0,2760 c	A 0,3190 d	0,2975 f
Média	B 0,3427	A 0,3556	
CV	1,81%		

Médias antecedidas pela mesma letra maiúscula na horizontal e seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem significativamente pelo teste de Duncan 5% de significância.

Em relação à fração argila (Tabela 3), esta foi inferior no PDE em relação ao PD em cinco das seis profundidades e na média dos manejos, sendo que, existem duas possibilidades para a ocorrência deste fato. A primeira é de que uma parte desta argila, que se encontra

dispersa em água tenha sido carregada para fora da área junto com enxurrada provocada por precipitação, devido á declividade da área do experimento, mas esta é pouco provável devido a maior capacidade de infiltração de água no solo deste manejo.

A segunda e mais provável, é de que o solo da área escarificada apresentando maiores teores de carbono orgânico (Tabela 1) tenha aumentado a agregação da argila, dificultando a determinação desta, fato destacado por Kertzman (1996), que afirma ocorrer este fato, provocando o fenômeno da ocorrência da pseudo-areia ou pseudo-silte.

4.3 Consistência do solo

A consistência do solo analisada através dos limites plástico (LP) e líquido (LL), bem como através do índice de plasticidade do solo (IP), são apresentados nas Tabelas 6, 7 e 8.

Para o limite plástico não ocorreram modificações nas médias dos manejos, apenas nas profundidades entre manejos e dentro dos manejos, principalmente na camada superficial, onde elevou a umidade para este limite no PDE. Nesta condição a umidade do solo na capacidade de campo, a condição de friabilidade é atingida mais rapidamente, podendo este solo ser cultivado antes do que o solo do PD.

Os parâmetros LL e IP (Figura 4 e Tabela 6) apresentaram diferenças nas médias em função dos manejos adotados.

Tabela 6 – Valores de umidade gravimétrica para o limite plástico (LP) em função do manejo e profundidade

Profundidade	PD	PDE	Média
-----cm-----	-----kg.kg ⁻¹ -----		
2,5	B 0,1942 c	A 0,2068 c	0,2005
7,5	B 0,1937 c	A 0,2095 bc	0,2016
12,5	A 0,2221 b	B 0,2083 bc	0,2152
17,5	A 0,2161 b	A 0,2124 bc	0,2143
22,5	B 0,2184 b	A 0,2439 a	0,2311
27,5	A 0,2546 a	B 0,2163 b	0,2355
Média	A 0,2165	A 0,2162	
CV	3,66%		

Médias antecedidas pela mesma letra maiúscula na horizontal e seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem significativamente pelo teste de Duncan 5% de significância.

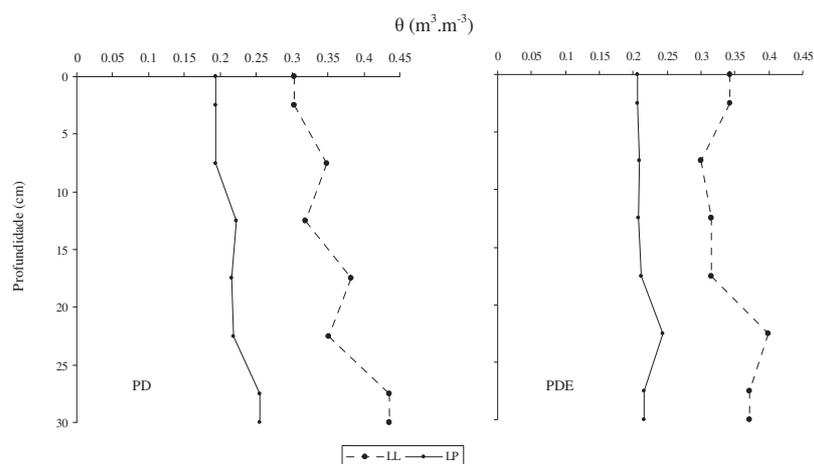


Figura 4 - Limite de liquidez (LI) e limite plástico (LP) em função do manejo e profundidade.

A partir destes dados, uma vez determinada a umidade na qual o solo atinge o limite plástico, isto é, a umidade na qual se torna friável (faixa ótima para trabalhos agrícolas, onde a coesão é

reduzida), através das leituras dos tensiômetros à campo ou pela curva de retenção a água no solo, poder-se-á facilmente monitorar as condições de trafegabilidade conforme destaca Earl (1996).

Tabela 7 – Valores de umidade gravimétrica para o limite líquido (LL) em função do manejo e profundidade

Profundidade	PD	PDE	Média
-----cm-----	----- kg.kg ⁻¹ -----		
2,5	B 0,3031 a	A 0,3440 c	0,3237
7,5	A 0,3490 b	B 0,3001 e	0,3246
12,5	A 0,3188 b	A 0,3154 d	0,3171
17,5	A 0,3829 b	B 0,3146 d	0,3488
22,5	B 0,3512 b	A 0,3990 a	0,3750
27,5	A 0,4357 c	B 0,3719 b	0,4038
Média	A 0,3568	B 0,3409	
CV	3,75%		

Médias antecedidas pela mesma letra maiúscula na horizontal e seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem significativamente pelo teste de Duncan 5% de significância.

Tabela 8 – Índice de plasticidade (IP) em função do manejo e profundidade

Profundidade	PD	PDE	Média
-----cm-----			
2,5	B 10,89 d	A 13,76 b	12,32
7,5	A 15,54 b	B 9,06 c	12,30
12,5	A 9,67 d	A 10,70 c	10,18
17,5	A 16,68 ab	B 10,22 c	13,45
22,5	A 13,28 c	A 15,51 a	14,39
27,5	A 18,10 a	B 15,57 a	16,83
Média	A 14,03	B 12,47	
CV	11,88%		

Médias antecedidas pela mesma letra maiúscula na horizontal e seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem significativamente pelo teste de Duncan 5% de significância.

Em relação à consistência, os valores de umidade para o limite plástico e líquido, obtidos por Petter (1990) foram de 0,27 e 0,44 kg.kg⁻¹, respectivamente, em um solo classificado como Haplorthox. Figueiredo et al. (1998) obtiveram valores para limite plástico em torno de 0,32 kg.kg⁻¹ em Latossolo Roxo da região de Lavras – MG, demonstrando a diferença em relação ao tipo de solo.

Os teores de matéria orgânica do solo explicam as alterações dos limites de consistência do solo, uma vez que o PDE apresentou até os 12,5 cm valores superiores ao outro manejo. Soane et al. (1972), Emerson (1995) e Ball et al. (1996) destacam que é mais importante a qualidade do que quantidade de matéria orgânica na alteração da plasticidade do solo.

Tabela 9 – Razão entre umidade ótima de compactação (UG) e limite plástico (LP) em função do manejo e profundidade

Profundidade -----cm-----	PD	PDE	Média
2,5	A 1,1311 a	B 1,0430 b	1,0870
7,5	A 1,1256 a	B 1,0148 bc	1,0702
12,5	A 1,0696 b	B 0,9799 d	1,0249
17,5	B 1,0543 b	A 1,0821 a	1,0682
22,5	A 1,1174 a	B 0,8775 e	1,0169
27,5	B 1,0263 b	A 1,0077 cd	0,9974
Média	A 1,0874	B 1,0008	
CV	3,53%		

Médias antecedidas pela mesma letra maiúscula na horizontal e seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem significativamente pelo teste de Duncan 5% de significância.

Um outro ponto importante a ser comentado é a razão umidade ótima de compactação (UG) em relação ao limite plástico (LP) apresentado na Tabela 9, sendo que, Ojeniyi & Dexter (1979)

indicam que essa razão é igual a 0,9 para um Argissolo, sugerindo que esta umidade ótima de compactação pudesse ser estimada como sendo 90% do limite de plasticidade. Este fato assume relevância, pois, a determinação da umidade em que os solos adquirem características friáveis é muito importante, uma vez que com estes dados é possível definir as faixas de umidade em que poderão ser feitos preparos ou semeadura afetando ao mínimo a estrutura do solo.

Para a razão UG/LP, ocorreram diferenças entre os manejos, onde ocorreu uma diminuição desta do PD em relação ao PDE, sendo que este fato potencializa os riscos de compactação, pois, o ponto de friabilidade do solo torna-se bem próximo a umidade ótima de compactação do solo.

4.4 Densidade de sólidos

Em relação à densidade média dos sólidos, esta reduziu no PDE em relação ao PD (Tabela 10), principalmente devido ao fato de ocorrer um incremento de CO ao longo do perfil (Tabela 1).

Comparando os sistemas nas profundidades, o PD apresentou valores de densidade de sólidos superiores ao PDE nas profundidades de 2,5 e 7,5cm, enquanto que nas demais profundidades o PDE foi estatisticamente igual ao PD.

Esses resultados são semelhantes aos apresentados por Ceddia (1996) e concordam com Kiehl (1979) e Libardi (2005), que afirmam ser a CO como precursor da matéria orgânica (MO) o parâmetro que mais se correlaciona com densidade de sólidos, pois

solos com altos teores de MO tendem a apresentar um baixo valor de densidade de sólidos. Kiehl (1979) e Prevedello (1996) relatam que a densidade de sólidos da MO é bastante baixa, variando de 0,6 a 1,0 Mg m^{-3} .

Tabela 10 – Densidade de sólidos do solo em função do manejo e profundidade

Profundidade	PD	PDE	Média
-----cm-----	-----Mg m ⁻³ -----		
2,5	A 2,740 a	B 2,667 bc	2,703
7,5	A 2,691 bc	B 2,643 c	2,667
12,5	A 2,691 bc	A 2,667 bc	2,679
17,5	A 2,715 ab	A 2,715 a	2,715
22,5	A 2,679 c	A 2,715 a	2,697
27,5	A 2,727 a	A 2,691 ab	2,709
Média	A 2,707	B 2,683	
CV	0,59%		

Médias antecedidas pela mesma letra maiúscula na horizontal e seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem significativamente pelo teste de Duncan 5% de significância.

4.5 Densidade do solo

Observou-se que para os valores de densidade do solo na média dos manejos (Tabela 11), estes não apresentaram diferença significativa. Estes dados são importantes, pois, concordam com Ralisch et al. (2001), que concluíram que a escarificação tem efeito somente para uma cultura, não tendo efeito residual para outras culturas subseqüentes, enquanto que Pierce et al. (1992) relata que o efeito da escarificação pode persistir por anos em um solo franco-

arenoso. Quanto à densidade do solo em profundidade não foi verificada diferença significativa entre os manejos.

Tabela 11 – Densidade do solo em função do manejo e profundidade

Profundidade	PD	PDE	Média
-----cm-----	-----Mg m ⁻³ -----		
2,5	A 1,52 a	A 1,40 a	1,46 a
7,5	A 1,47 a	A 1,43 a	1,45 ab
12,5	A 1,47 a	A 1,43 a	1,45 ab
17,5	A 1,37 b	A 1,42 a	1,40 bc
22,5	A 1,36 b	A 1,41 a	1,38 cd
27,5	A 1,32 b	A 1,33 a	1,33 d
Média	A 1,42	A 1,40	
CV	4,98%		

Médias antecedidas pela mesma letra maiúscula na horizontal e seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem significativamente pelo teste de Duncan 5% de significância.

Embora não tenham ocorrido diferenças significativas a densidade do solo no PD foi 8,09% maior do que no PDE na camada de 2,5 cm, 2,09% na camada de 7,5 cm e 3,12 % na camada de 12,5 cm. A maior densidade do solo encontrada no experimento foi no PD na camada de 2,5 cm, fato também constatado por Assis & Lanças (2003), onde constataram uma diminuição desta densidade do solo com o tempo de adoção do sistema plantio direto, principalmente a partir dos 12 anos de implantação, sendo que estes dados também são corroborados por Da Ros et al.(1997).

Deve-se observar que os resultados relacionados com os sistemas de manejo do solo apresentam uma diversidade de respostas a um mesmo sistema, por causa de características do solo, da planta e do clima.

A escarificação, não manteve a redução de densidade do solo porque embora o escarificador promova uma mobilização do solo, ocasionando o empolamento com aumento da porosidade total (BOLLER, 1990, KLEIN & BOLLER, 1995 e KLEIN et al., 1995), com o passar do tempo ocorre novamente um adensamento natural devido a ausência de revolvimento, como também, pela compactação ocasionada pelo tráfego de máquinas (DE MARIA et al., 1999).

4.6 Densidade máxima do solo

A densidade máxima do solo determinada através do teste de Proctor (Tabela 12) foi semelhante entre as profundidades e os manejos, e a umidade ótima de compactação também se portou desta forma. A densidade média máxima do solo foi maior no PDE, ao contrário do que Braida et al. (2003) afirmam, sendo que era de se esperar que o acúmulo de MO solo reduzisse a densidade máxima do solo e aumentasse a umidade crítica da máxima compactação, ressaltando que a magnitude é dependente da granulometria do solo, sendo maior em solos arenosos, o que em parte explica este resultado (Tabela 5).

As equações utilizadas para calcular a densidade máxima do solo e umidade gravimétrica ótima de compactação estão apresentadas na Tabela 13. Dias Junior & Miranda (2000), estudando o processo de compactação, demonstraram que as classes de solos apresentam comportamento distinto devido à variação de textura, matéria orgânica e umidade, encontrando em um Latossolo Vermelho-

amarelo com teor de argila de $0,37 \text{ kg.kg}^{-1}$, uma DMS de $1,57 \text{ Mg m}^{-3}$, e uma umidade ótima de $0,20 \text{ kg.kg}^{-1}$, e num Latossolo Vermelho-escuro com $0,57 \text{ kg.kg}^{-1}$ de argila, uma DMS de $1,44 \text{ Mg m}^{-3}$, e uma umidade ótima de compactação de $0,26 \text{ kg.kg}^{-1}$.

Tabela 12 – Densidade máxima do solo (DMS) e umidade gravimétrica ótima (UG) em função do manejo e profundidade

Profundidade (cm)	PD		PDE	
	DMS (Mg m^{-3})	UG (kg kg^{-1})	DMS (Mg m^{-3})	UG (kg kg^{-1})
2,5	1,55	0,2194	1,55	0,2156
7,5	1,57	0,2176	1,59	0,2125
12,5	1,50	0,2371	1,60	0,2037
17,5	1,48	0,2278	1,54	0,2298
22,5	1,52	0,2438	1,60	0,2100
27,5	1,42	0,2612	1,57	0,2179
Média	1,51	0,2345	1,58	0,2149

Tabela 13 – Equações para cálculo de densidade máxima do solo (DMS) e umidade gravimétrica ótima (UG) em função do manejo e profundidade

Manejo	Profundidade (cm)	Equação	R ²
PD	2,5	$y = -40,279x^2 + 17,675x - 0,3871$	0,9378
	7,5	$y = -35,555x^2 + 15,469x - 0,1141$	0,9711
	12,5	$y = -34,080x^2 + 16,163x - 0,4189$	0,7894
	17,5	$y = -53,584x^2 + 24,408x - 1,2979$	0,8847
	22,5	$y = -56,379x^2 + 27,486x - 1,8307$	0,8968
	27,5	$y = -22,173x^2 + 11,578x - 0,0914$	0,9779
PDE	2,5	$y = -38,906x^2 + 16,776x - 0,2589$	0,9385
	7,5	$y = -36,378x^2 + 15,460x - 0,0474$	0,9529
	12,5	$y = -39,045x^2 + 15,907x - 0,0189$	0,9812
	17,5	$y = -33,103x^2 + 15,209x - 0,2117$	0,9851
	22,5	$y = -42,952x^2 + 18,042x - 0,2909$	0,9551
	27,5	$y = -40,442x^2 + 17,616x - 0,3513$	0,9481

Camara (2004) estudando um LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico semelhante a este do trabalho encontrou para o PD uma DMS média de $1,54 \text{ Mg m}^{-3}$, e uma umidade ótima de $0,25 \text{ kg.kg}^{-1}$, e no PDE, uma DMS de $1,51 \text{ Mg m}^{-3}$, e uma umidade ótima de compactação de $0,25 \text{ kg.kg}^{-1}$.

4.7 Densidade relativa (DR)

A DR no campo foi maior no PD do que no PDE (Tabela 14) apresentando diferença entre manejos e profundidades de 12,5 e 27,5 cm. Dentro dos manejos não ocorreram diferenças entre as profundidades, demonstrando uma maior uniformidade da densidade do solo em profundidade. Comparando os manejos nas profundidades, o PD apresentou uma DR superior ao PDE na profundidade de 12,5 cm e 27,5 cm, indicando uma compactação do solo nestas profundidades.

Beutler et al. (2005), concluíram que a densidade relativa ótima para a produtividade de soja em casa de vegetação, foi superior no Latossolo Vermelho eutroférico argiloso (0,84), comparada à do Latossolo Vermelho caulínico de textura média (0,75) na tensão de 0,01 MPa e que no campo a densidade relativa ótima para a soja foi de 0,80.

Ferreras et al. (2001), observaram em um solo siltoso da Argentina ($0,20 \text{ kg.kg}^{-1}$ argila; $0,70 \text{ kg.kg}^{-1}$ silte e $0,10 \text{ kg.kg}^{-1}$ de areia) encontraram valores de densidade relativa de 0,82 e 0,69 na

camada superficial (0 –6 cm) enquanto na camada de 10-16 cm foi de 0,87 e 0,85 para plantio direto e escarificação respectivamente. Nesse solo observaram que a cultura da soja apresentou menor rendimento de grãos no plantio direto (1700 kg.ha⁻¹) do que no escarificado (3550 kg.ha⁻¹). Destacam ainda o efeito da camada superficial adensada em plantio direto, onde observaram menor desenvolvimento do sistema radicular e menor quantidade de nódulos.

Tabela 14 – Densidade relativa do solo em função do manejo e profundidade

Profundidade (cm)	PD	PDE	Médias
2,5	A 0,978 a	A 0,901 a	0,940 a
7,5	A 0,937 a	A 0,898 a	0,918 abc
12,5	A 0,984 a	B 0,892 a	0,938 a
17,5	A 0,927 a	A 0,922 a	0,924 ab
22,5	A 0,896 a	A 0,871 a	0,884 c
27,5	A 0,930 a	B 0,849 a	0,889 bc
Média	A 0,942	B 0,889	
CV	4,92 %		

Médias antecedidas pela mesma letra maiúscula na horizontal e seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem significativamente pelo teste de Duncan 5% de significância.

4.8 Porosidade do solo

As porosidades totais e a macroporosidade (Tabela 15) não apresentaram diferenças entre os manejos, concordando com os resultados obtidos por Inoue et al. (2002) e Costa et al. (2002). A microporosidade também não apresentou diferença significativa entre os manejos (Tabela 15).

No manejo PDE em profundidade, exceto nas profundidades 2,5 e 7,5 e 12,5 cm para porosidade total, as demais não diferiram entre si para macro e microporosidade.

Um ponto importante a ser destacado é a grande variação dos valores de macroporosidade ($CV = 52,36\%$ - Tabela 15), indicando uma elevada variabilidade espacial, o que pode interferir no desenvolvimento do sistema radicular das plantas e no fluxo de água em profundidade.

Em termos de distribuição dos poros do solo, a macroporosidade no perfil variou de 0,0402 a 0,0929 $m^3 m^{-3}$, e não foi influenciada pelos sistemas de preparo do solo. Esses valores de macroporosidade não são considerados adequados para as plantas, em termos de garantia de aeração do sistema radicular e drenagem da água no solo, cujo limite crítico é de 0,1 $m^3.m^{-3}$ (VOMOCIL & FLOCKER, 1961; BAVER et al., 1972; REYNOLDS et al., 2002; Libardi, 2005). No entanto, a constatação da grande variação espacial dessas condições no solo conforme (MOREIRA & SILVA, 1987), e as variabilidades temporais podem minimizar essas limitações.

Deve-se ressaltar que o fluxo de gases bem como o movimento de água no solo, estão intimamente relacionados ao volume de macroporos, ou seja, a garantia da oxigenação radicular bem como a capacidade de infiltração e redistribuição de água no perfil dependem dessa propriedade. Sua efetividade, nesses casos, depende além da quantidade, da sua continuidade em profundidade e da abertura à superfície (SILVA et al., 2005). Normalmente o revolvimento do solo promove um aumento temporário da macroporosidade, quando comparado à semeadura direta.

Esse efeito, entretanto, é eliminado pela reconsolidação ou adensamento natural do solo o qual, no momento da coleta poderia ser considerado como o valor máximo considerando-se que o último revolvimento do solo foi realizado aproximadamente 24 meses anterior à amostragem do solo.

O volume de criptoporos (Tabela 15) apresentaram diferença significativa entre os manejos, sendo que no PD estes ocupam em torno de $0,2166 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, demonstrando que 51,40% da água retida no solo está indisponível às plantas, enquanto que no PDE os criptoporos, ocupam em torno de $0,1911 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, correspondendo a 46,87% da água retida no solo.

Tabela 15 – Porosidade total, macroporos, microporos e criptoporos do solo em função do manejo e profundidade

Profundidade	PD	PDE	Médias
-----cm-----	-----m ³ m ⁻³ -----		
Porosidade Total			
2,5	A 0,4452 a	A 0,4762 b	0,4607 c
7,5	A 0,4436 a	A 0,4692 b	0,4564 c
12,5	A 0,4527 a	A 0,4647 b	0,4587 c
17,5	A 0,4948 a	A 0,4773 a	0,4861 b
22,5	A 0,4910 a	A 0,4865 a	0,4888 b
27,5	A 0,5150 a	A 0,5047 a	0,5099 a
Média	A 0,4737	A 0,4798	
CV	5,49 %		
Macroporos			
2,5	A 0,0508 b	A 0,0929 a	0,0718 a b
7,5	A 0,0591 a b	A 0,0471 a	0,0531 b
12,5	A 0,0402 b	A 0,0759 a	0,0581 a b
17,5	A 0,0712 a b	A 0,0630 a	0,0671 a b
22,5	A 0,0663 a b	A 0,0731 a	0,0697 a b
27,5	A 0,0898 a b	A 0,0801 a	0,0849 a
Média	A 0,0629	A 0,0720	
CV	52,36 %		
Microporos			
2,5	A 0,2115 b	A 0,2132 a	0,2124 a b
7,5	A 0,1854 c	A 0,2489 a	0,2171 a b
12,5	A 0,1969 b c	A 0,1957 a	0,1963 b
17,5	A 0,2119 b	A 0,2358 a	0,2238 a
22,5	A 0,2358 a	B 0,1974 a	0,2166 a b
27,5	A 0,1873 c	A 0,2087 a	0,1980 b
Média	A 0,2048	A 0,2166	
CV	13,66 %		
Criptoporos			
2,5	A 0,1830 d	A 0,1700 c	0,1765 e
7,5	A 0,1991 c	B 0,1732 c	0,1862 d
12,5	A 0,2156 b	B 0,1931 b	0,2044 b
17,5	A 0,2118 b	B 0,1785 b	0,1952 c
22,5	B 0,1890 c d	A 0,2161 a	0,2025 b
27,5	A 0,2379 a	B 0,2159 a	0,2263 a
Média	A 0,2060	B 0,1911	
CV	4,71 %		

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem significativamente pelo teste de Duncan 5% de significância.

4.9 Curvas de retenção da água no solo

O ajuste da umidade do solo nas profundidades em função do potencial mátrico, pelo modelo de Van Genuchten (1980), foi muito similar entre os manejos e as profundidades. Os parâmetros empíricos do ajuste estão apresentados na Tabela 16.

Essa similaridade entre os manejos e profundidades pode ser atribuída ao fato de que as amostras foram coletadas doze meses após a escarificação, e não apresentavam diferenças na porosidade do solo.

Tabela 16 – Parâmetros de ajuste da curva de retenção de água no solo em diferentes profundidades e manejos do solo

Manejo	Prof. (cm)	α (1/kPa)	m	n	θ_s ($m^3 m^{-3}$)	θ_r ($m^3 m^{-3}$)
PD	2,5	0,0006	4,8518	0,6432	0,4452	0,1830
	7,5	0,0005	4,5019	0,5172	0,4436	0,1900
	12,5	0,0005	4,0311	0,6343	0,4527	0,1994
	17,5	0,0005	4,3243	0,5472	0,4948	0,1996
	22,5	0,0007	4,7753	0,6731	0,4910	0,1833
	27,5	0,0004	4,0135	0,4365	0,5150	0,2241
PDE	2,5	0,0004	4,3466	0,4537	0,4762	0,1643
	7,5	0,0005	4,5289	0,4761	0,4692	0,1617
	12,5	0,0004	4,2416	0,4733	0,4647	0,1794
	17,5	0,0005	4,4511	0,5589	0,4773	0,1785
	22,5	0,0005	4,4190	0,4992	0,4865	0,2095
	27,5	0,0003	3,7214	0,4413	0,5047	0,1898

Onde: α , m, n – parâmetros empíricos; θ_r – umidade do solo residual e θ_s – umidade do solo saturado.

4.10 Resistência mecânica à penetração do solo (RP)

Na média a RP não apresentou diferença significativa entre os manejos do solo nas condições avaliadas (capacidade de campo em 6 kPa e ponto de murcha permanente em 1500 kPa) doze meses após a escarificação. A figura 5 apresenta a relação entre as leituras de RP medidas e calculadas.

Estes dados concordam com Ralisch et al. (2001), que verificaram o efeito da redução na RP no espaço de tempo durante um ciclo de cultura anual, concluindo que o efeito da escarificação na RP não perdura por mais do que um cultivo, contradizendo Inoue et al. (2002) e Cavalieri et al. (2003), que apresentam trabalhos demonstrando a eficiência da escarificação na redução da resistência mecânica do solo.

Na umidade do solo na capacidade de campo (Tabela 17), a RP no PD apresentou diferença significativa entre as profundidades, sendo que as profundidades de 2,5 e 7,5 cm apresentaram os maiores valores de RP, diferindo das demais. O PDE também apresentou uma variação significativa, sendo a menor RP na profundidade 27,5 cm, e a maior na profundidade de 2,5 cm, enquanto que nas demais não diferiram.

Não se observou diferença significativa entre os sistemas de manejo em profundidade. Verificaram-se também diferenças no comportamento da RP em profundidade na média dos manejos. As profundidades 17,5, 22,5 e 27,5 cm apresentaram a menor RP diferindo das demais, ressaltando não ser somente a densidade que afeta a RP, mas também a umidade do solo (BUSSCHER, 1990).

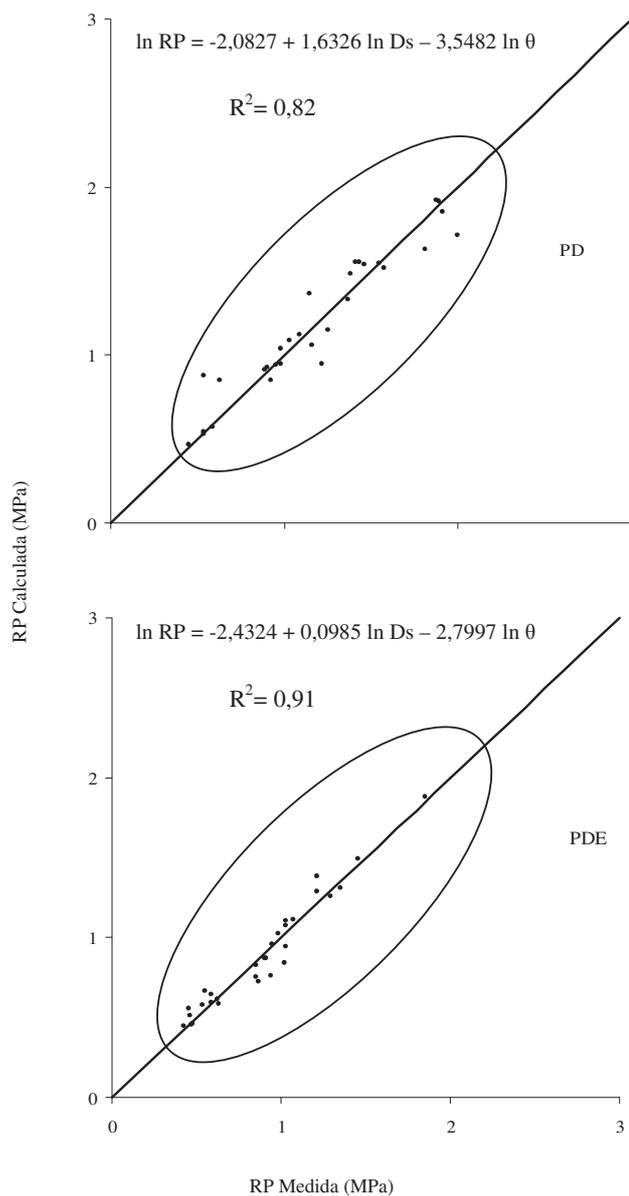


Figura 5 - Ajuste da equação da resistência à penetração do solo em função da densidade e umidade volumétrica do solo.

Tabela 17 – Resistência à penetração do solo na umidade correspondente a capacidade de campo em função do manejo e profundidade

Profundidade	PD	PDE	Médias
-----cm-----	-----MPa-----		
2,5	A 1,40 a	A 1,34 a	1,37
7,5	A 1,39 a	A 1,13 ab	1,26
12,5	A 1,23 b	A 1,30 ab	1,26
17,5	A 1,04 c	A 1,09 ab	1,06
22,5	A 1,02 c	A 1,09 ab	1,05
27,5	A 0,97 c	A 1,02 b	1,00
Média	A 1,17	A 1,16	
CV	13,59 %		

Médias antecedidas pela mesma letra maiúscula na horizontal e seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem significativamente pelo teste de Duncan 5% de significância.

Tabela 18 – Resistência à penetração do solo na umidade do solo correspondente ao ponto de murcha permanente em função do manejo e profundidade

Profundidade	PD	PDE	Médias
-----cm-----	-----MPa-----		
2,5	A 5,83 a	A 5,84 a	5,83
7,5	A 4,72 b	A 4,79 b	4,75
12,5	B 4,08 d	A 4,77 b	4,42
17,5	B 3,76 e	A 4,40 b	4,08
22,5	A 4,60 b	B 3,72 c	4,16
27,5	A 4,27 c	B 3,46 c	3,87
Média	A 4,54	A 4,50	
CV	7,46 %		

Médias antecedidas pela mesma letra maiúscula na horizontal e seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem significativamente pelo teste de Duncan 5% de significância.

Na condição de umidade do solo no ponto de murcha permanente (Tabela 18) a RP não apresentou diferença entre os sistemas de manejo de solo. O PD apresentou uma RP média de 4,54

MPa, enquanto que o PDE 4,50 MPa, demonstrando que após 24 meses a influência da escarificação em diminuir a limitação mecânica do crescimento do sistema radicular das plantas em condições de déficit hídrico não possui mais efeito.

Em profundidade no PD, a maior RP foi a 2,5 cm, enquanto que na profundidade de 17,5 cm constatou-se a menor RP. No PDE, a RP da profundidade de 2,5 cm foi superior as demais, e nas profundidades de 22,5 e 27,5 cm apresentou a menor RP entre as profundidades.

Comparando a RP entre manejos em profundidades, o PDE foi significativamente inferior nas profundidades de 22,5 e 27,5 cm e superior nas camadas de 12,5 e 17,5 cm, ao passo que na profundidade de 2,5 e 7,5 cm os manejos de solo não diferiram estatisticamente, sendo que essas camadas no PDE foram as que apresentaram as maiores densidades.

4.11 Intervalo hídrico ótimo (IHO)

No IHO, a RP aumentou conforme o aumento da densidade e redução da umidade do solo e tanto a RP de 1,4 MPa (Figura 6) como a de 2 MPa (Figura 7) apresentaram-se como limite inferior em todas as densidades.

Para o PD, o limite inferior do IHO com a RP de 1,4 MPa, o PMP não se apresentou como limitante em nenhuma das condições observadas, sendo esse afetado antes pela RP, o limite superior permaneceu na CC até a densidade de $1,27 \text{ Mg m}^{-3}$, passando então a

PA ser limitante (Figura 3). A densidade crítica, isso é, onde o IHO é igual a zero, foi de $1,43 \text{ Mg m}^{-3}$ (Tabela 19).

No PDE, também não ocorreram limitações com o PMP no limite inferior, pois a RP foi a limitante em todas as situações. O limite superior permaneceu na CC limitante até a densidade de $1,29 \text{ Mg m}^{-3}$ (Figura 3) a partir dessa passou a ser a PA, apresentando uma densidade crítica de $1,43 \text{ Mg m}^{-3}$ (Tabela 19).

No IHO com RP de 2 MPa, a densidade crítica do solo apresentada pelos sistemas foi de $1,51 \text{ Mg m}^{-3}$ no PD e $1,53 \text{ Mg m}^{-3}$ no PDE (Tabela 19).

Tabela 19 – Densidade crítica do solo e relativa no IHO com as RP de 1,4 e 2 MPa, nos manejos de solo

Manejo do solo	IHO = 0 (RP 1,4 MPa)		IHO = 0 (RP 2 MPa)	
	Ds (Mg m^{-3})	DR	Ds (Mg m^{-3})	DR
PD	1,43	0,95	1,51	1,00
PDE	1,43	0,91	1,53	0,97

Onde: Ds – densidade crítica do solo e DR – densidade relativa crítica.

O PD apresentou como limite inferior somente a RP e para limite superior a CC até a densidade de $1,27 \text{ Mg m}^{-3}$, nas densidades superiores a PA.

No PDE o limite inferior também foi somente a RP e no limite superior a CC foi a limitante até a densidade de $1,29 \text{ Mg m}^{-3}$, a partir desta densidade a PA tornou-se limitante.

A densidade relativa crítica, isso é, onde IHO é igual a zero, com RP de 1,4 MPa no PD foi de 0,95 e para o PDE 0,91, na RP de 2 MPa a densidade relativa crítica foi 1,00 para PD e 0,97 no PDE (Tabela 19).

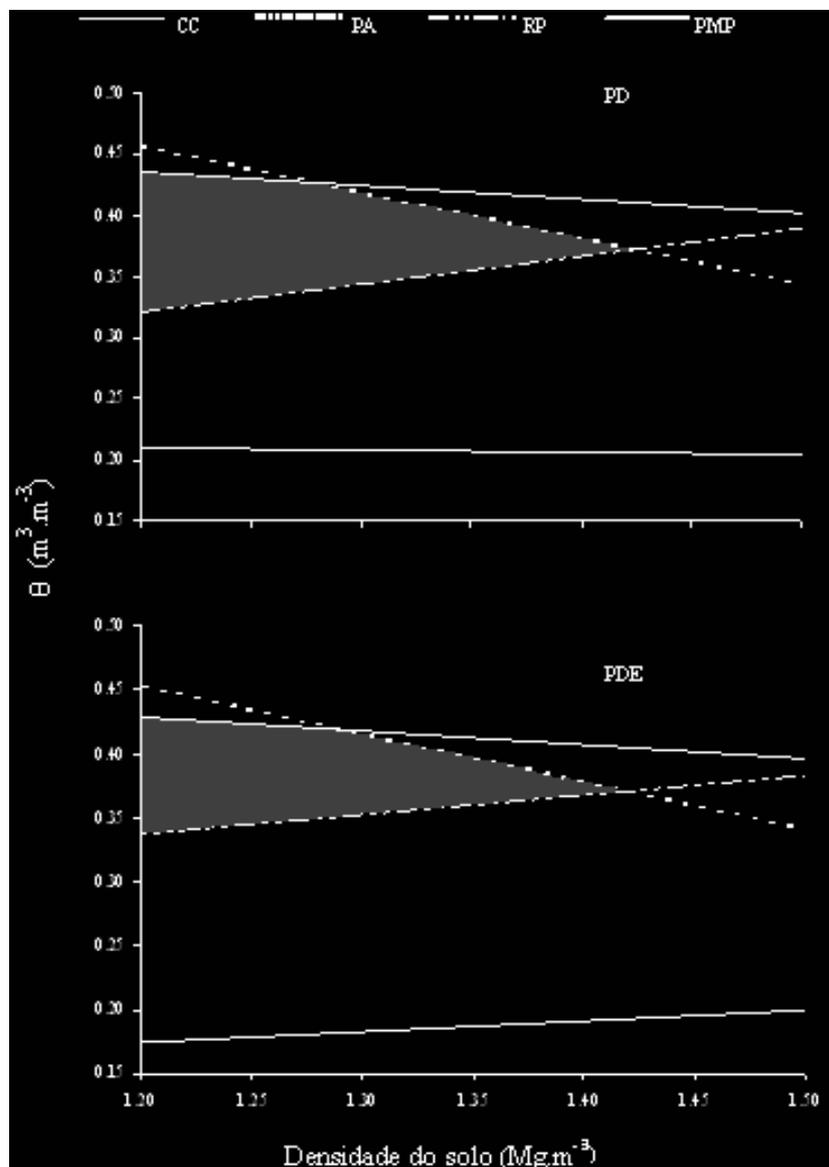


Figura 6 - Variação da umidade volumétrica em função da densidade do solo para os níveis críticos de a 6 kPa (CC), PA de 0,1 m³.m⁻³, PMP a 1500 kPa e RP de 1,4 MPa , a área hachurada representa o IHO.

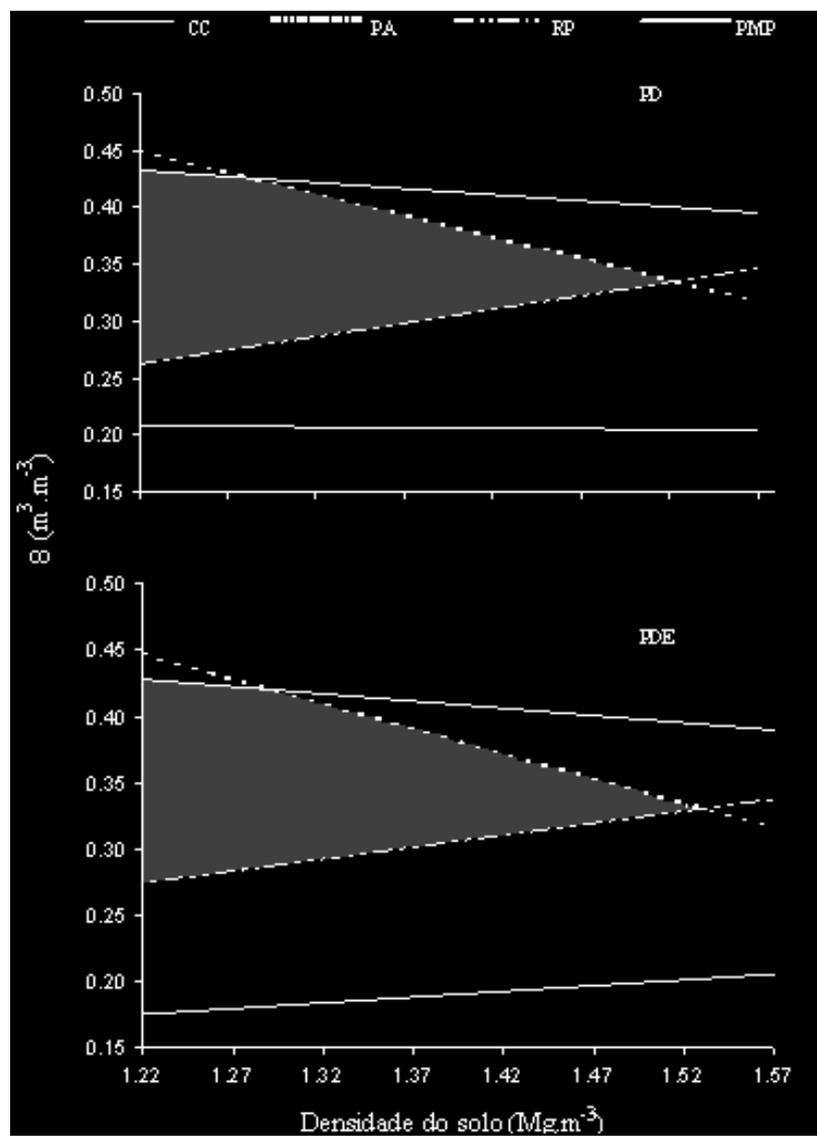


Figura 7 - Variação da umidade volumétrica em função da densidade do solo para os níveis críticos de a 6 kPa (CC), PA de 0,1 m³.m⁻³, PMP a 1500 kPa e RP de 2 MPa, a área hachurada representa o IHO.

4.12 Variação do IHO em função da profundidade

A variação do IHO (Figura 8) com RP de 1,4 MPa no PD apresentou-se de 0 a $0,0665 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. As profundidades de 17,5 a 27,5 cm apresentaram os maiores intervalos, enquanto que nas profundidades de 2,5, 7,5 e 12,5 cm apresentaram valor zero demonstrando uma camada de solo extremamente restritiva ao desenvolvimento das plantas.

No PDE a amplitude do IHO variou de 0 a $0,0290 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Na profundidade de 27,5 apresentou o maior IHO, e na profundidade de 12,5 cm foi zero.

No IHO com RP de 2 MPa, ocorreu um aumento do intervalo ótimo, sendo que no PD, o IHO foi de $0,0185$ a $0,1273 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e no PDE de $0,0458$ a $0,0946 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

O PDE apresentou nas profundidades de 2,5, 7,5 e 12,5 cm o IHO superior ao PD, evidenciando o efeito da escarificação mesmo após 12 meses da operação, a que tem por objetivo diminuir a RP e aumentar o volume de água facilmente disponível à cultura.

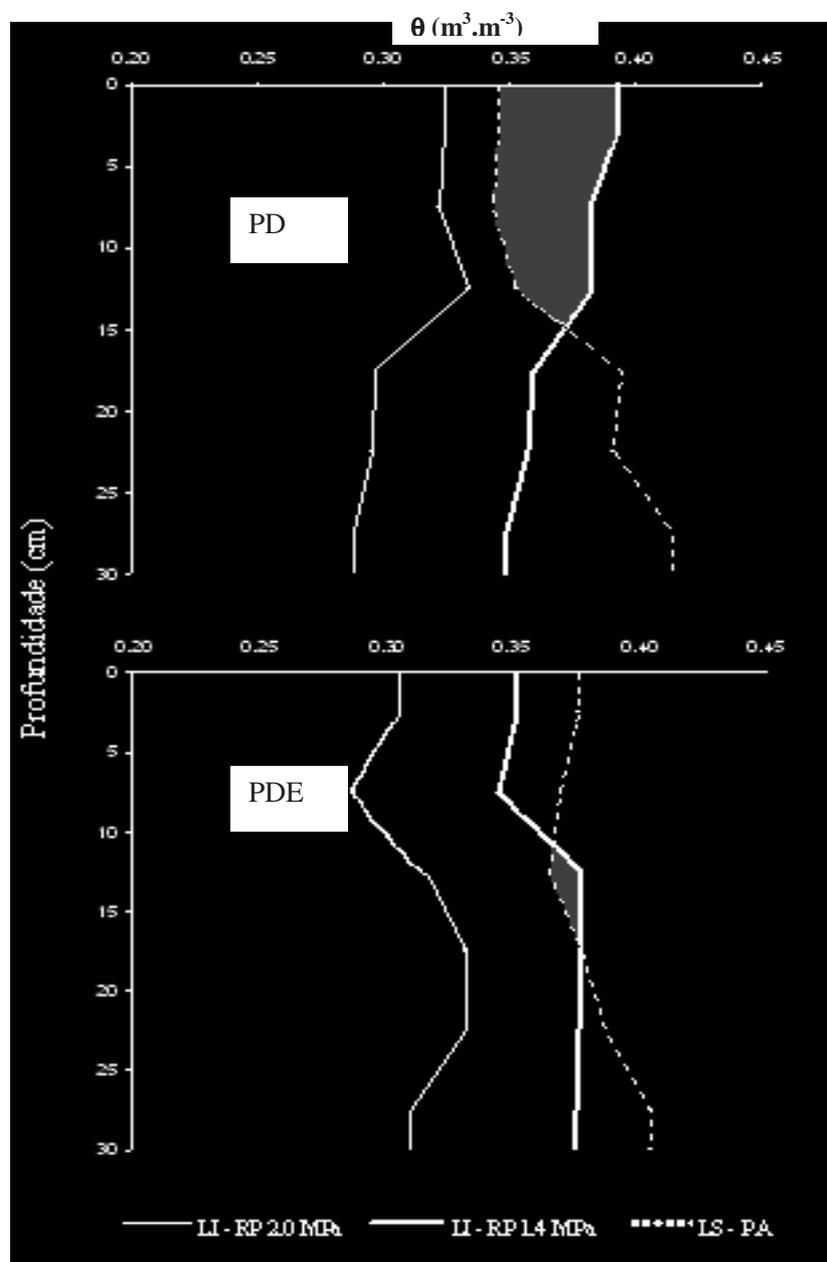


Figura 8 - Variação do IHO em profundidade nos manejos de solo, a área hachurada representa valores iguais a zero.

4.13 Infiltração de água no solo

Os resultados da capacidade de infiltração da água no solo feitas no campo para os manejos PD e PDE foram ajustadas à equação de Kostiakov, sendo que, este ajuste pode ser considerado baixo (inferior a 10%), o que indica uma alta variabilidade espacial deste parâmetro, também destacado por Vieira et al. (1981), Gurovich e Stern (1983), Lima & Silans (1999) e Cichota et al. (2003).

É importante destacar que os pontos experimentais apresentados no gráfico são oriundos de três determinações (repetições).

A taxa inicial, bem como a final de infiltração aos 180 minutos, foi afetada pelo manejo do solo (Figura 9), observando-se uma diferença na taxa inicial de infiltração a favor do PDE de 1,54 vezes e na taxa final de 2,12 vezes. O PD apresentou uma taxa final de infiltração de 12,72 mm h⁻¹ e o plantio direto escarificado de 27,07 mm h⁻¹. O efeito da escarificação após 24 meses é constatado pela maior taxa de infiltração.

O mesmo efeito foi observado por Centurion & Demattê (1992) e Camara & Klein (2005a) que relata uma diferença na taxa inicial de infiltração de 2,20 vezes e na taxa final aos 120 min de 3,77 vezes se comparado o PDE em relação ao PD.

De acordo com Bertol et al. (2001) e Cintra et al. (1983), a taxa de infiltração determinada pelo método dos duplos cilindros concêntricos pode superestimar a taxa em cerca de 8 a 10 vezes, pois apresenta carga hidráulica pela lâmina de água presente sobre o solo e não promove o selamento superficial.

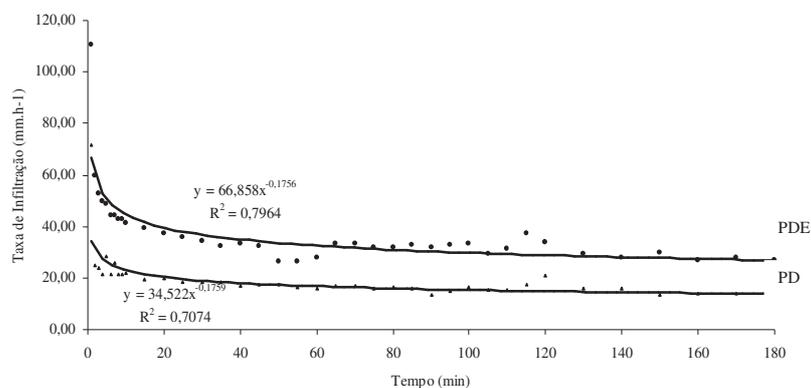


Figura 9 - Taxa de infiltração da água no solo em função dos sistemas de manejo.

De acordo com Reichert et al. (1999), a maior estabilidade de agregados na superfície dos Latossolos propicia menor suscetibilidade à desagregação pelo impacto das gotas da chuva e menor taxa de formação do selo superficial, mantendo altas taxas de infiltração por períodos mais longos. Isso permite inferir que este solo pode suportar chuvas intensas e de alta erosividade por longo período, quando as condições de subsuperfície não são limitantes ao fluxo de água em condições de campo, isto é, solo profundo e ausência de camadas subsuperficiais compactadas.

4.14 Condutividade hidráulica do solo saturado (K_0)

Para a condutividade hidráulica do solo saturado, determinada aos 24 meses após a escarificação (Figura 10), os resultados demonstraram que mesmo após esse período, o PDE apresentava, ainda uma capacidade significativamente maior de condução de água, sendo que os valores de K_0 foram cerca de 6 vezes superiores no PDE em relação ao PD.

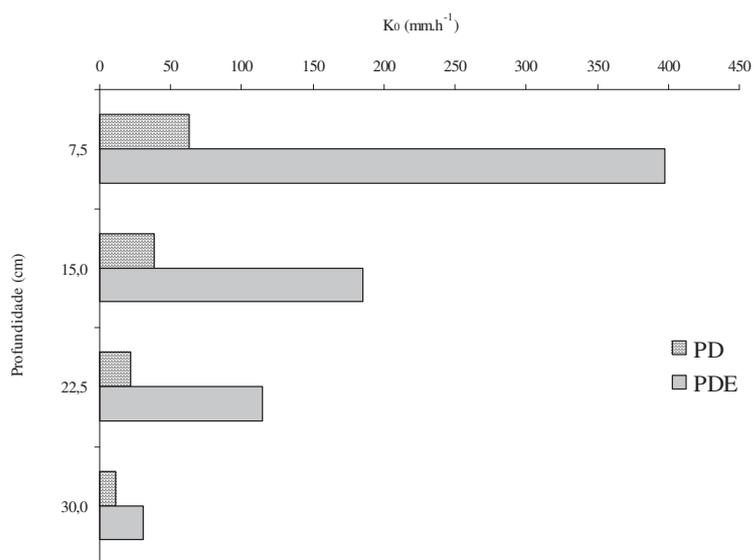


Figura 10 – Condutividade hidráulica do solo saturado na camada de 0 à 30 cm do solo, determinada 24 meses após a escarificação.

Tabela 20 – Condutividade hidráulica em solo saturado em função do manejo e profundidade

Profundidade	PD	PDE	Médias
-----cm-----	-----mm.h ⁻¹ -----		
3,75	B 62,74 a	A 397,84 a	230,32 a
11,25	B 38,28 b	A 185,68 b	111,98 b
18,75	B 22,04 c	A 114,35 c	68,19 c
26,25	B 11,68 d	A 31,00 d	21,34 d
Média	B 33,70	A 182,22	
CV	15,22 %		

Médias antecedidas pela mesma letra maiúscula na horizontal e seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem significativamente pelo teste de Duncan 5% de significância.

Ocorreram diferenças estatísticas entre os manejos, entre profundidades dentro dos manejos e nas médias dos manejos.

É importante considerar que a elevada variabilidade espacial deste parâmetro, demonstrada pelos elevados coeficientes de variação obtidos, também destacada por Ellies et al. (1997), pode proporcionar uma importante condição de maior infiltração, ou condução de água no solo, pois dentro do microrelevo da superfície do solo, a água tende a se mover para a parte mais baixa podendo encontrar condições de maior infiltrabilidade.

4.15 Condutividade hidráulica do solo não saturado

Analisando-se os parâmetros empíricos de ajuste dos dados experimentais a Equação 9 e seus respectivos coeficientes de determinação (Tabela 21) para as profundidades e manejos constata-se o bom ajuste dos dados à equação, com valores de r^2 sempre maiores que 0,90 e na maioria dos casos ficando sempre próximos de 0,99. A similaridade dos parâmetros empíricos entre os manejos demonstra uma certa uniformidade do comportamento da água no solo após 24 meses da escarificação.

Tabela 21– Parâmetros empíricos do ajuste da variação de armazenagem de água no solo até a profundidade z (mm) em função do tempo

z (mm)	Manejo					
	PD			PDE		
	a (mm.h ^{-b})	b	r^2	a (mm.h ^{-b})	b	r^2
100	42,568	-0,0155	0,94	44,430	-0,0229	0,95
150	67,118	-0,0094	0,97	67,067	-0,0210	0,98
200	95,228	-0,0146	0,98	93,025	-0,0178	0,99
250	120,880	-0,0130	0,97	117,810	-0,0208	0,99
300	144,660	-0,0176	0,99	145,430	-0,0197	0,99

Para o fluxo de água no solo (q) nas diferentes profundidades e tempos, calculado pela equação 10, observa-se uma depleção de água semelhante entre os manejos (Tabela 22).

Com o gradiente de potencial total calculado pela Equação 11, calculou-se a condutividade hidráulica (K) através da Equação 12. Do ajuste de K em função de θ obtiveram-se os parâmetros empíricos da Equação 13 que estão apresentados na Tabela 23.

Tabela 22 – Fluxo de água no solo no sentido descendente ($\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$), durante a redistribuição da água no solo, para os manejos em profundidade

Tempo (h)	Profundidade (m)				
	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30
PD					
8	7.139	7.912	6.878	7.763	6.321
22	1.496	1.692	1.433	1.654	1.296
46	0.858	0.985	0.819	0.961	0.732
70	0.850	0.984	0.809	0.958	0.719
94	0.845	0.984	0.803	0.957	0.710
118	0.840	0.983	0.798	0.956	0.703
142	0.837	0.983	0.793	0.955	0.698
190	0.831	0.982	0.787	0.953	0.689
238	0.827	0.982	0.782	0.952	0.682
286	0.824	0.982	0.778	0.951	0.677
334	0.821	0.981	0.775	0.950	0.672
382	0.819	0.981	0.772	0.949	0.668
430	0.816	0.981	0.769	0.949	0.665
454	0.815	0.981	0.768	0.948	0.663
PDE					
8	7.019	7.304	7.584	6.736	7.370
22	1.466	1.538	1.609	1.397	1.555
46	0.839	0.886	0.932	0.796	0.897
70	0.830	0.879	0.928	0.785	0.891
94	0.824	0.874	0.925	0.777	0.887
118	0.820	0.871	0.923	0.772	0.884
142	0.816	0.868	0.921	0.767	0.882
190	0.810	0.864	0.918	0.760	0.878
238	0.805	0.860	0.916	0.754	0.875
286	0.801	0.858	0.915	0.750	0.872
334	0.798	0.855	0.913	0.746	0.870
382	0.796	0.853	0.912	0.743	0.869
430	0.793	0.852	0.911	0.740	0.867
454	0.792	0.851	0.911	0.738	0.866

Tabela 23 – Parâmetros empíricos para cálculo da condutividade hidráulica do solo não saturado em função dos manejos

z (mm)	Manejo					
	PD			PDE		
	a (mm.h ^{-b})	b	r ²	a (mm.h ^{-b})	b	r ²
100	-11,593	1,343	0,69	-8,209	2,885	0,67
150	-11,820	1,132	0,66	-16,825	6,351	0,85
200	-14,906	3,852	0,82	-45,713	19,713	0,94
250	-13,698	3,393	0,85	-43,093	20,362	0,92
300	-15,273	4,674	0,84	-39,040	18,533	0,95

Era esperado que ocorressem diferenças no fluxo de água e nos respectivos perfis de umidade, em função do tempo, no solo sob PDE em relação ao PD, pois, segundo Wu et al. (1992) o preparo do solo por escarificação induz a mudança na macroporosidade, influenciando o movimento de água no solo. Este efeito esperado não teve efeito residual após 24 meses da escarificação, também em relação a interação de sistema de manejo em função da profundidade.

A partir do cálculo do potencial mátrico, por intermédio dos tensiômetros, pode-se determinar a capacidade de campo (CC) em 6 kPa, para ambos os manejos em um LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico.

As baixas correlações constatadas entre as equações de regressão de $\ln(K)$ em função de θ , com seus coeficientes de determinação (R^2) menores do que 0,90 na sua maioria devem-se principalmente a pequena variação de umidade no perfil do solo, pois, após 21 dias da saturação o potencial mátrico do solo em ambos os manejos chegou a apenas 10 kPa. Demonstrando assim, que neste solo após atingir-se a CC o decréscimo do teor de água ocorre de forma bastante lenta.

4.16 Rendimento da cultura do milho

Os resultados de rendimento de grãos, número final de plantas, número final de espigas e peso médio de grãos por espiga não apresentaram diferença significativa entre os manejos (Tabela 24).

Tabela 24 – Número final de plantas (POP), número final de espigas (ESP), peso médio de grãos por espiga (PME) e rendimento de grãos (REND) em função do manejo

Manejos *	POP (plantas.m ⁻²)	ESP (espigas.m ⁻²)	PME (g)	REND (kg.ha ⁻¹)
PD	5,53	4,70	79,23	3746
PDE	5,69	4,81	88,84	4274
Média	5,61	4,76	84,04	4010
CV (%)	9,04	10,33	13,08	18,80

* Diferença não significativa.

Este fato pode ser atribuído à distribuição pluvial (Figura 11) ocorrida durante o ciclo da cultura, pois se observa que a partir do segundo mês do desenvolvimento vegetativo e durante todo o período reprodutivo o regime de chuvas encontrava-se abaixo do normal, sendo que, este elevado déficit hídrico coincidiu com o período da floração e enchimento de grãos da cultura, condição em que o fator limitante foi a disponibilidade de água no solo.

Este fato foi constatado a partir da coleta e determinação da umidade em ambos os manejos durante este período de déficit hídrico, a partir do qual se verificou a ocorrência de volumes de água no solo próximo ao PMP, sendo que não foi possível expressar um possível efeito diferenciado residual da escarificação do solo.

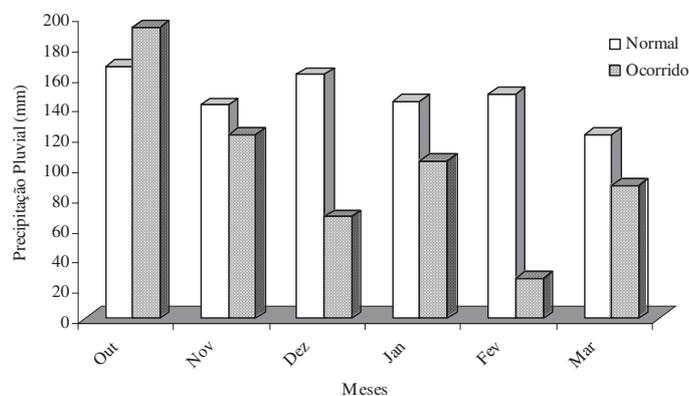


Figura 11 – Precipitação pluvial durante o ciclo da cultura. (Fonte: Rede Nacional de Agrometeorologia, 2005)

Castro (1995), também avaliando a cultura do milho, encontrou uma diferença significativa com relação a população de plantas e população de espigas, verificando que tanto no plantio escarificado (PE) quanto no plantio direto (PD) muitas plantas se desenvolveram mas não emitiram espigas. Com relação ao rendimento de grãos, o PD foi superior ao PE, mas na média dos sete anos que antecederam o estudo, a diferença foi inferior a 3% entre a maior e a menor produção, sendo que isto demonstrou que na média de vários anos a diferenciação entre sistemas é muito pequena, podendo ser mais significativa em anos que ocorra algum fenômeno que favoreça um ou outro sistema (CASTRO, 1995).

Destaca-se ainda que, por depender de vários fatores, principalmente a umidade do solo no período de crescimento das raízes, o efeito da compactação sobre a produção das culturas é difícil de ser quantificado (FREITAS, 1994).

5 CONCLUSÕES

A hipótese levantada foi parcialmente comprovada, permitindo concluir que uma escarificação em um LATOSSOLO VERMELHO sob PD tem efeitos por até 24 meses e melhoram as condições para conservação do solo e da água, embora não proporcione melhores condições físico-mecânicas do solo ao desenvolvimento das plantas.

A capacidade de campo para ambos os manejos em um LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico é de 6 kPa . A adoção da escarificação aumentou os teores de carbono orgânico na camada até 12,5 cm de profundidade do solo.

Do ponto de vista hídrico, as curvas de retenção de água e a água disponível não foram afetadas pelos sistemas de manejo avaliados.

O revolvimento do solo não influenciou a porosidade total, a densidade do solo e a resistência mecânica do solo à penetração, mas aumentou a condutividade hidráulica do solo saturado e a taxa de infiltração de água no solo, dois anos após o preparo, comprovando algum efeito residual. Verificam-se, a partir disto, que talvez as metodologias utilizadas não sejam capazes de detectar estas alterações físicas, necessitando, portanto, de uma melhor avaliação destas.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, M.A.; TORMENA, C.A.; INOUE, T.T.; COSTA, A.C.S. Efeitos da escarificação na qualidade física de um Latossolo Vermelho distroférico após treze anos de semeadura direta. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 28, n. 3, p. 495-504, 2004.

ARAÚJO, M.A.; TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 28, n. 2, p. 337-345, 2004.

ARRUDA, F.B.; ZULLO, Jr.J.; OLIVEIRA, J.B. Parâmetros de solo para o cálculo da água disponível com base na textura de solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 11, p. 11-15, 1987.

ASHBURNER, J.E; SIMS, B.G. *Elementos de diseño del tractor y herramientas de labranza*. IICA, San José, 1984, 474p.

ASSIS, R.L. de; LANÇAS, K.P. Efeito do tempo de adoção do sistema plantio direto na densidade do solo máxima e umidade ótima de compactação de um nitossolo vermelho distroférico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 28, n. 2, p. 337-345, 2004.

BALL, B.C.; CAMPBELL, D.J.; HUNTER, E.A. Soil compactability in relation to physical and organic properties at 156 sites in UK. *Soil Tillage Res.*, v. 57 83-91, 2000.

BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; SAAB, S.C. Diminuição da humificação da matéria orgânica de um Cambissolo Húmico em plantio direto. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, v. 27, p. 537-544, 2003.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Características químicas do solo afetadas por métodos de preparo e sistemas de culturas. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, v. 21, p. 105-12, 1997.

BAYER, C.; MIELNIZUK, J.; MARTIN-NETO, L. Efeitos de sistemas de preparo e de cultura na dinâmica da matéria orgânica e na

mitigação das emissões de CO₂. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 24, p. 599-607, 2000.

BAVER, L.D.; GARDNER, W.H.; GARDNER, W.R. *Soil physics*. 4^a Ed. New York: John Wiley & Sons, 1972. 498 p.

BELTRAME, L. F. S.; TAYLOR, J.C. Causas e efeitos da compactação do solo. *Lavoura Arrozeira*, v. 33, p. 59-62, 1980.

BENGHOUGH, A. G.; MULLINS, C.E. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. *Journal of Soil Science*, v. 41, p. 341-358, 1990.

BENNIE, A. T. P. Growth and mechanical impedance. In: WAISEL, Y.; ESHEL, A.; KAFKAFI, U. *Plant roots*. 2nd ed. New York: M. Dekker, 1996. p. 453-470.

BERTOL, I.; BEUTLER, J. F.; LEITE, D.; BATISTELA, O. Propriedades físicas de um Cambissolo Húmico afetadas pelo tipo de manejo do solo. *Scientia Agrícola*, Lavras, v. 58, p. 555-60. 2001.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Efeito do conteúdo de água e da compactação do solo na produção de soja. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 38, n. 7, p. 849-856, 2003.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Matéria seca e altura de plantas de soja e arroz em função do grau de compactação e do teor de água de dois latossolos. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v. 24, n. 1, p. 843-849, 2005.

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*, v. 29, p. 599-607, 2000.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SILVA, A.P.; ROQUE, C.G.; FERRAZ, M.V. Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo na produtividade de arroz de sequeiro. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 39, n. 6, p. 575-580, 2004.

BEUTLER, A. N.; SILVA, M.L. N.; CURI, N.; FERREIRA, M. M.; CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO, I.A. Resistência à penetração e permeabilidade de Latossolo Vermelho distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 25, p. 167-177, 2001.

BLEVINS, R. L., SMITH, M. S., THOMAS, G. W. Changes in soil properties under no-tillage. In: PHILLIPS, R. E., PHILLIPS, S. H. (Ed.) *No-tillage agriculture: principles and practices*. New York: VNR, 1984. Cap. 9, p. 190-230.

BOLLER, W. *Desenvolvimento de complementos para semeadoras em solo sob preparo reduzido*. Santa Maria, 1990. 146 p. Dissertação (Mestrado) – UFSM, 1990.

BORGES, E.N.; LOMBARDI NETO, F.; CORREIA, G.F.; BORGES, E.V.S. Alterações físicas introduzidas por diferentes níveis de compactação em um latossolo Vermelho-escuro textura média. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 34, p. 663-67, 1999.

BRAIDA, J. A. *Matéria orgânica e resíduos vegetais na superfície do solo e suas relações com o comportamento mecânico do solo sob plantio direto*. Santa Maria, 2004. 107 p. Tese (Doutorado), UFSM, 2004.

BRAIDA, J. A.; SEQUINATTO, L.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; VEIGA, M. Da. Carbono orgânico e suas implicações na umidade crítica para a compactação do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29, Ribeirão Preto, 2003. *Resumo expandido*. Ribeirão Preto: SBCS, 2003. CD-ROM.

BUCKMAN, H.O.; BRADY, N.C. *Natureza e propriedades dos solos*. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1976. 594 p.

BUSSCHER, W. J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. *Transactions of the ASAE*, v. 33, p. 519-24, 1990.

CAMARA, R.C. *Influência da escarificação do solo sob sistema plantio direto nas propriedades do solo e na cultura da soja*. Passo Fundo, 2004. 85 p. Dissertação (Mestrado) - UPF, 2004.

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

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

CAMARGO, O.A. *Compactação do solo e o desenvolvimento de plantas*. São Paulo. Fundação Cargill, 1983. 44 p.

CAMARGO, O. A. de; ALLEONI, L. R. F. *Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas*. Piracicaba: Esalq, 1997. 132 p.

CARLESSO, R.; SANTOS, R.F. Crescimento de plantas de milho submetidas a déficit hídrico em solos de diferentes texturas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 23, p. 27-33, 1999.

CARVALHO, N.O.; FILIZOLA JÚNIOR, N.P.; SANTOS, P.M.C.; LIMA, J.E.F.W. *Guia de práticas sedimentométricas*. Brasília: ANEEL, 2000. 154 p.

CARVALHO, E. J.; FIGUEIREDO, M. de S.; COSTA, L. M. da. Comportamento físico-hídrico de um Podzólico Vermelho-amarelo câmbico fase terraço sob diferentes sistemas de manejo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. Brasília, v. 34, p. 257-65, 1999.

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

CASSEL, D.K.; KLUTE, A. Water Potential: Tensiometry. In: KLUTE, A.(Ed.) *Methods of soil analysis: physical, chemical and mineralogical methods*. Madison: American Society of Agronomy, 1986. cap. 23, p. 563-596.

CASTRO FILHO, C. et al. Aggregate stability under different soil management systems in a Red Latosol in State of Parana, Brazil. *Soil Tillage Research*, v. 65, p. 45-51, 2002.

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

CASTRO, O. de. *Comportamento físico e químico de um Latossolo roxo em função do seu preparo na cultura do milho (Zea mays L.)*. Piracicaba, 1995. 128 p. Tese (Doutorado), USP-ESALQ, 1995.

CAVALIERI, K. M. V.; TORMENA, C. A.; FRIEDRICH, R.; PINTRO, J. C.; COSTA, A. C. S.; FIDALSKI, J. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho eutroférico sob dois sistemas de manejo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29, Ribeirão Preto, 2003. *Resumo expandido*. Ribeirão Preto: SBCS, 2003. CD-ROM.

CEDDIA, M. B. *Efeitos do sistema de corte na produção de cana-de-açúcar e em propriedades físicas de solo de tabuleiros no Espírito Santo*. Seropédica, 1996. 74 p. Dissertação (Mestrado) – UFRJ, 1996.

CENTURION, J. F.; DEMATTÊ, J. L. I. Sistema de preparo de solos de cerrado: Efeitos nas propriedades físicas e na cultura do milho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. Brasília, v. 27, p. 315-24, 1992.

CHANCELLOR, W.J. *Compaction of soil by agricultural equipment*. Berkeley: University of California, Division of Agricultural Sciences, 1977. 53p.

COSTA, F. S.; ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; WOBETO, C. Sistemas de manejo do solo e propriedades físicas de um Latossolo Bruno: Efeitos de 20 anos. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 14, Cuiabá, 2002. *Resumos Expandidos*. Cuiabá: SBCS, 2002. CD-ROM.

CHEN, C.; THOMAS, D. M.; GREEN, R. E.; WAGENET, R. J. Two-Domain estimation of hydraulic properties in macropore soils. *Soil Science Society of American Journal*, v. 57, p. 680-6, 1993.

CINTRA, F. L. D.; MIELNICZUK, J.; SCOPEL, I. Caracterização do impedimento mecânico em um Latossolo Roxo do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 7, p. 323-7, 1983.

CICHOTA, R.; JONG VAN LIER, Q. de; LEGUIZAMÓN ROJAS, C.A. Variabilidade espacial da taxa de infiltração em Argissolo Vermelho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 27, p. 789-798, 2003.

CORSINI, P. C. & FERRAUDO, A. S. Efeitos de sistemas de cultivos na densidade e macroporosidade do solo e no desenvolvimento radicular do milho em Latossolo roxo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 34, p. 289-98, 1999.

Da ROS, C.O.; SECCO, D.; FIORIN, J.E.; PETRERE, C.; CADORE, M.A.; PASA, L. Manejo do solo a partir de campo nativo: efeito sobre a forma e estabilidade da estrutura ao final de 5 anos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 21, p. 241-247, 1997.

DECAGON DEVICES. *Operator's manual version 1.3 WP4 dewpointmeter*. USA, Decagon devices, 2000. 70 p.

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*, v. 23, p. 703-709, 1999.

DENARDIN, J. E.; KOCHHANN, R. A. Requisitos para a implantação e manutenção do sistema plantio direto. In: EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Trigo. *Plantio direto no Brasil*. Passo Fundo : Aldeia Norte, 1993. p. 19-27.

DIAS JUNIOR, M. S.; MIRANDA, E. E. V. de. Comportamento da curva de compactação de cinco solos da região de Lavras (MG). *Ciência Agrotécnica*, Lavras, v. 24, p. 337-46, 2000.

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

DOURADO NETO, D.; JONG VAN LIER, Q. de; BOTREL, T. A.; LIBARDI, P. L. Programa para confecção da curva de retenção de água no solo utilizando o modelo de Genutchen. *Engenharia Rural*, v. 1, p. 92-102, 1990.

ELLIES, A., GREZ, R., RAMIREZ, C. La conductividad hidráulica en fase saturada como herramienta para el diagnóstico de la estructura del suelo. *Agro Sur*, v. 5, p. 51-56, 1997.

ELTZ, F. M. L.; ORLOWSKI, E.; ROLOFF, G. Efeito de sistema de preparo nas propriedades físicas e químicas de um Latossolo Bruno álico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.13, p. 259-67, 1989.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de solos. *Manual de métodos de análise de solo*. 2ª Ed. Rio de Janeiro: 1997 212 p.

FALLEIRO, R. M.; SOUZA, C. M. ; SILVA, C. S. W; SEDIYAMA, C. S.; SILVA, A. A.; FAGUNDES, J. L. Influência dos sistemas de preparo nas propriedades químicas e físicas do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 27, n.6 , p. 1097-1104, 2003.

FANCELLI, A. L.; FAVARIN, J. L. Desempenho da cultura do milho em plantio direto e convencional. In: FANCELLI, A.L. (Coord.) *Plantio direto no Estado de São Paulo*. Piracicaba : FEALQ/ESALQ, 1989. p. 174-175.

FERRERAS, L. A.; BATTISTA, J. J. de; AUSILIO, A.; PECORARI, C. Parâmetros físicos del suelo em condiciones no perturbadas y bajo laboreo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 36, p. 161-70, 2001.

FIGUEIREDO, L.H.A.; DIAS JUNIOR, M.S.; SANTOS, G. A. & BUENO FILHO, J.S.S. Efeitos dos manejos do solo na densidade do solo máxima e umidade ótima de um Latossolo roxo. In: REUNIÃO

BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 12, Fortaleza, 1998. *Anais*. Fortaleza: SBCS, 1998. p. 294-295.

FOLONI, J. S. S.; CALONEGO, J. C.; LIMA, S. L.de. Efeito da compactação do solo no desenvolvimento aéreo e radicular de cultivares de milho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 38, n.8, p. 947-53, 2003.

FORSYTHE, W. *Física de Suelos*. Manual de Laboratorio. San José, Costa Rica: IICA, 212p. 1975.

FREIRE, J. C.; SCARDUA, R. Influência da matéria orgânica na retenção de umidade de um latossolo roxo distrófico do município de Lavras, Minas Gerais. *Ciênc. Prat. Lavras*, v. 3, p. 29-36, 1979.

FREITAS, P. L., de Aspectos físicos e biológicos do solo. In: LANDERS, J.N. Ed. *Experiências de Plantio Direto no Cerrado*. Goiânia: APDC, 1994. p. 199-213. 261p.

GEDIGA, K. Influence of subsoil compaction on the uptake of ⁴⁵Ca from the soil profile and on maize yield. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v. 19, n. 2, p. 351-355, 1991.

GEE, G.W.; BAUDER, J.W. Particle size analysis. In: KLUTE, A. (Ed.) *Methods of soil analysis: physical, chemical and mineralogical methods*. Madison: American Society of Agronomy, 1986, p. 383-411.

GUIMARÃES, C. M.; MOREIRA, J. A. A. Compactação do solo na cultura do arroz de terras altas. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 36, p. 703-7, 2001.

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

GUROVICH, L. A.; STERN, J. Variabilidad espacial de la velocidad de infiltración en el suelo. II. Análisis geostadístico y estructura espacial. *Ciencia e Investigación Agraria*. v. 10, p. 271-8, 1983.

HÄKANSSON, I. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. *Soil & Tillage Research*, v. 16, p. 105-20, 1990.

HATANO, R.; IWANAGA, K.; OKAJIMA, H.; SAKUMA, T. Relationship between the distribution of soil macropores and root elongation. *Soil Science and Plant Nutrition*, Tokyo, v. 34, n. 4, p. 535-546, 1988.

HILLEL, D. *Solo e água: fenômenos e princípios físicos*. Porto Alegre, UFRGS, 1970. 231 p.

HULUGALLE, N. R., WILLATT, S. T. The role of soil resistance in determining water uptake by plant root systems. *Australian Journal of Soil Research*, v. 21, p. 571-574, 1983.

IJIMA, M.; KNO, Y. Interspecific differences of the root system structures of four cereal species as affected by soil compaction. *Japanese Journal of Crop Science*, v. 60, p. 130-138, 1991.

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

INOUE, T. T.; ARAÚJO, M. A.; TORMENA, C. A.; ESTEVES, N.; MIGNOSO, V.; LEITE, J. C. Influência da escarificação em propriedades físicas de um Latossolo vermelho distroférico após 13 anos de plantio direto. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 14, Cuiabá, 2002. *Resumos Expandidos*. Cuiabá: SBCS, 2002. CD-ROM.

JONG VAN LIER, Q. de, LIBARDI, P. L. Extraction of soil water by plants: development and validation of a model. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 21, n. 2, p. 535-542, 1997.

LAL, R. Methods and guidelines for assessing sustainable use of soil and water resources in the tropics. *Soil Management Support Service*, USDA, U.S. Agency for International Development. Ohio, Ohio State University, 1994. 78p. (Technical Monograph n° 21)

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop productions. *Advances in Soil Science*, v. 1, p. 277-94, 1985.

LIBARDI, P. L. *Determinação da condutância hidráulica e da pressão de borbulhamento de cápsulas porosas para tensiômetros*. Piracicaba: ESALQ, 1997. 10p.

LIBARDI, P. L. *Dinâmica da água no solo*. 1ª Ed. Piracicaba : Edusp, 2005. 335p.

LIMA, C. A. G.; SILANS, A. P. de. Variabilidade espacial da infiltração de água no solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 34, p. 2311-20. 1999.

LOYOLA, J.M.T.; PREVEDELLO, C.L. Modelos analíticos para predição do processo da redistribuição da água no solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 27, p. 783-787, 2003.

KAY, V. A. *Potential indicators of the quality of soil structure for plant growth. Workshop internacional em avanços em ciência do solo: a física do solo na produção agrícola e qualidade ambiental*. Disponível na internet: http://www.esalq.usp.br/lsn/work_pal.htm. Acessado: 13 de outubro de 2000.

KERTZMANN, F. F. *Modificações na estrutura e no comportamento de um Latossolo Roxo provocado pela compactação*. São Paulo, 1996. 153 p. Tese (Doutorado) – USP, 1996.

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

KLEIN, V. A. Densidade relativa – um indicador de qualidade física do solo. In: In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 14, Cuiabá, 2002. *Resumos Expandidos*. Cuiabá: SBCS, 2002. CD-ROM.

KLEIN, V. A. *Propriedades físico-hídrico-mecânicas de um Latossolo roxo, sob diferentes sistemas de uso e manejo*. Piracicaba, 1998. 150 p. Tese (Doutorado), USP-ESALQ, 1998.

KLEIN, V. A.; BOLLER, W. Avaliação de diferentes métodos de manejo do solo e métodos de semeadura em áreas sob plantio direto. *Revista Ciência Rural*, Santa Maria, v. 25, p. 395-398. 1995.

KLEIN, V. A.; BOLLER, W.; CANDATEN, A.; BORTOLOTTI, D. R.; DALPAZ, R. C. Avaliação de escarificadores e reposta da cultura do milho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 19, p. 307-311. 1995.

KLEIN, V.A.; LIBARDI, P.L. Condutividade hidráulica de um Latossolo Roxo, não saturado, sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Ciência Rural*, v. 32, n. 6, p. 945-953, 2002a.

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

KOCHHANN, R.A.; DENARDIN, J.E. *Implantação e manejo do sistema plantio direto*. Passo Fundo: EMBRAPA-CNPT, 2000. 36 p.

MACHADO, J.A.; PAULA SOUZA, D.M.de; BRUM, A.C.R. Efeito de anos de cultivo convencional em propriedades físicas do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 5, p. 187-189, 1981.

MASLE, J.; FARQUHAR, G.D. Effects of soil strength on the relation of water-use-efficiency and growth to carbon isotope discrimination in wheat seedlings. *Plant Physiology*, v. 86, p. 32-38, 1988.

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

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.

MEROTTO, A.; MUNDSTOCK, C.M. Wheat root growth as affected by soil strength. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 23, p. 197-202, 1999.

MOREIRA, J. A. A., SILVA, C. J. C. G. Características de retenção de água de um solo podzólico vermelho amarelo de Goiana, Pernambuco. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 22, n. 4, p. 411-8, 1987.

MUKTAR, S.; BAKER, J. L.; HORTON, R.; ERBACH, D. C. Soil water infiltration as affected by the use of the paraplow. *Transactions of the ASAE*, v. 28, p. 1811-6, 1985.

NOGUEIRA, J. B. *Mecânica dos solos: ensaios de laboratório*. São Carlos: USP, EESC, 1998. 248 p.

OJENIYI, S.O.; DEXTER, A.R. Soil factor affecting the macrostructure produced by tillage. *Trans. Am. Sci. Agric. Eng.*, v. 22, p. 339-343, 1979.

OLIVEIRA, J. O. A. P.; VIDIGAL FILHO, P. S.; TORMENA, C. A.; PEQUENO, M. G.; SCAPIM, C. A.; MUNIZ, A. S.; SAGRILO, E. Influência de sistemas de preparo do solo na produtividade da mandioca (*Manihot esculenta*, Crantz). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 25, p. 443-450, 2001.

OLIVEIRA JÚNIOR, R.C.; VALENTE, M.A.; RODRIGUES, T.E.; SILVA, J.M.L. Caracterizações físico-hídricas de cinco perfis de solos do nordeste paranaense. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO, 13, Águas de Lindóia, 1996. *Anais*. Águas de Lindóia: SBCS, 1996. CD-ROM.

OTHMER, H., DIEKKRUGER, B., KUTILEK, M. Bimodal porosity and unsaturated hydraulic conductivity. *Soil Science*, v. 52, p.139-150, 1991.

PASSIOURA, J. B. Soil structure and plant growth. *Australian Journal of Soil Research*, Collingwood, v. 29, p. 717-728, 1991.

PEDROTTI, A. Compactação do solo: um problema oculto. *Lavoura Arrozeira*, v. 48, p.18-21, 1995.

PETERSEN, G.W.; CUNNINGHAM, R.L.; MATELSKI, R.P. Moisture characteristics os Pennsylvania soils. II. Soil factors affecting moisture retention within a textural class-Silt Loam. *Soil Science Society American Proceedings*, Madison, v. 32, n. 6, p. 866-870, 1968.

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 & Tillage Research*, Amsterdam, v. 30, p. 149 - 165, 1992.

PREVEDELLO, C.L. *Física do solo com problemas resolvidos*. Curitiba: Salesward-discovery, 1996. 446 p.

PRIMAVESI, O.; MELO, F.A.F.; LIBARDI, P.L. Seleção preliminar de parâmetros físicos mais adequados para estudar o efeito de compactação de amostras de solo na produção de matéria seca vegetal de feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*). *Anais da ESALQ*, Piracicaba, v. 41, n. 1, p. 449-483, 1984.

RADULOVICH, R.; SOLLINS, P.; BAVEYE, P.; SOLÓRZANO, E. Bypass water flow through unsaturated microaggregated tropical soils. *Soil Science Society of American Journal*, v. 56, p. 721-6, 1992.

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

REICHARDT, K. *Água em sistemas agrícolas*. São Paulo: Manole, 1987. 188 p.

REICHARDT, K. Capacidade de campo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 12, p. 211-216, 1988.

REICHARDT, K.; TIMM, L.C. *Solo, Planta e Atmosfera: conceitos, processos e aplicações*. São Paulo: Manole, 2004. 478 p.

REICHERT, J.M.; VEIGA, M. da; CABEDA, M.S.V. Selamento superficial e infiltração de água em solos do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 16, p. 289-298, 1992.

REYNOLDS, W.D. et al. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. *Geoderma*, v. 110, p. 131-146, 2002.

ROSOLEM, C. A. *Relações solo-planta na cultura do milho*. Jaboticabal: Funep, 1995. 53 p.

ROSOLEM, C. A.; FERNANDEZ, E. M.; ANDREOTTI, M. & CRUSCIOL, C. A. C. Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 34, p. 821-828, 1999.

ROSOLEM, C. A.; VALE, L. S. R.; GRASSE, H. F.; MORAES, M. H. de. Sistema radicular e nutrição do milho em função da calagem e da compactação do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 18, p. 491-497, 1994.

ROTH, C.H., MEYER, B., FREDE, H.G., et al. Effect of mulch rates and tillage systems on infiltrability and other soil physical properties of an oxisol in Paraná, Brazil. *Soil & Tillage Research*, v. 11, p. 81-91, 1988.

RUSSEL, R. S.; GOSS, M. J. Physical aspects of soil fertility: the response of roots to the mechanical impedance. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, Wageningen, v. 22, p. 305-18, 1974.

SECCO, D.; DA ROSS, C. O.; FIORIN, J. E.; PAUTZ, C. V.; PASA, L. Efeito de sistemas de manejo nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho-escuro. In: REUNIÃO SUL-BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 1, Lages, 1996. *Resumo Expandido*. Lages: SBCS, p. 127-8. 1996.

SECCO, D.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; DA ROS, C.O. Produtividade de soja e propriedades físicas de um latossolo

submetido a sistemas de manejo e compactação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 28, p. 797-804, 2004.

SHARMA, M.L.; UEHARA, G. Influence of soil structure on water relations in low Humic Latosols: II. Water movement. *Soil Science Society American Proceedings*, Madison, v. 32, p. 770-774, 1968.

SHETRON, S.G. Distribution of free iron and organic carbon as related to available water in some forested sandy soils. *Soil Science Society American Proceedings*, Madison, v. 38, n.2, p. 859-862, 1972.

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

SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; IMHOFF, S. Intervalo hídrico ótimo. In: MORAES, M. H.; MÜLLER, M. M. L.; FOLONI, J. S. S. *Qualidade física do solo: métodos de estudo-sistemas de preparo e manejo do solo*. Jaboticabal: Funep, 2002. p. 1-18.

SILVA, E.M.; LIMA, J.E.F.W.; RODRIGUES, L.N.; AZEVEDO, J.A. Comparação de modelos matemáticos para o traçado de curvas granulométricas. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 39, n. 4, p. 363-370, 2004.

SILVA, M.A.S da; MAFRA, A.L.; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Atributos físicos do solo relacionados ao armazenamento de água em um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo. *Ciência Rural*, v. 35, n. 3, p. 544-552, 2005.

SILVEIRA, G.M. *O preparo do solo: implementos corretos*. Rio de Janeiro: Globo, 1988. 243 p.

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

SOJKA, R.E. Stomatal closure in oxygen-stressed plants. *Soil Science Society of America Journal*, v. 154, p. 269-80. 1992.

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

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHEN, H.; VOLKWEISS, S. J. *Análise de solo, plantas e outros minerais*. Departamento de solos – Faculdade de Agronomia. UFRGS. Porto Alegre. 1995. 174 p.

TEIXEIRA, C.F.A.; MORAES, S.O.; SIMONETE, M.A. Desempenho do tensiômetro, TDR e sonda de nêutrons na determinação da umidade e condutividade hidráulica do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 29, p. 161-168, 2005.

TOGNON, A. A.; DEMATTÊ, J. A. M.; MAZZA, J. A. Alterações nas propriedades químicas de latossolos roxos em sistemas de manejo intensivos e de longa duração. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 21, p. 271-278, 1997.

TORMENA, C. A.; ROLLOF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 20, p. 333-339, 1996.

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

VAN GENUTCHEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of American Journal*. Madison, v. 44, p. 892-8, 1980.

VIEIRA, M.L.; KLEIN, V.A.; MÄSSING, J.P.; SIMON, M.A. Produção de massa seca de azevém e rendimento de soja em plantio direto escarificado. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 15, Santa Maria, 2004. *Resumos Expandidos*. Santa Maria: SBCS; UFSM, 2004. CD-ROM.

VIEIRA, S. R.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Spatial variability of field-measured infiltration rate. *Soil Science Society of America Journal*, v. 45, p. 1040-48, 1981.

VOMOCIL, J. A.; FLOCKER, W. J. Effect of soil compaction on storage and movement of soil air and water. *Transaction of the ASAE*. St. Joseph, v. 4, p. 242-6, 1961.

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