

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS

CAMPUS DE BOTUCATU

**PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO RELACIONADAS À PRODUTIVIDADE DE
CULTURAS SOB SISTEMAS DE MANEJO.**

DÁCIO OLIBONE

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da Unesp - Câmpus de Botucatu,
para obtenção do título de Doutor em
Agronomia (Agricultura).

Botucatu – São Paulo

Maior - 2009

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS

CAMPUS DE BOTUCATU

**PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO RELACIONADAS À PRODUTIVIDADE DE
CULTURAS SOB SISTEMAS DE MANEJO.**

DÁCIO OLIBONE

Orientador: Prof. Dr. Ciro Antonio Rosolem

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da Unesp - Câmpus de Botucatu,
para obtenção do título de Doutor em
Agronomia (Agricultura).

Botucatu – São Paulo

Mai - 2009

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO
DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA
- LAGEADO - BOTUCATU (SP)

O46p Olibone, Dácio, 1977-
Propriedades físicas do solo relacionadas à produtividade de culturas sob sistemas de manejo / Dácio Olibone. -
Botucatu : [s.n.], 2009.
xvii, 151 f. : gráfs., tabs.

Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2009
Orientador: Ciro Antonio Rosolem
Inclui bibliografia.

1. Semeadura direta. 2. Escarificação. 3. Rotação de cultura. 4. Intervalo Hídrico Ótimo. I. Rosolem, Ciro Antonio. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. III. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: "PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO RELACIONADAS À PRODUTIVIDADE
DE CULTURAS SOB SISTEMAS DE MANEJO"

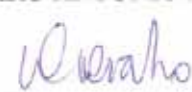
ALUNO: DÁCIO OLIBONE

ORIENTADOR: PROF. DR. CIRO ANTONIO ROSOLEM

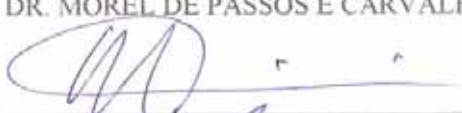
Aprovado pela Comissão Examinadora



PROF. DR. CIRO ANTONIO ROSOLEM



PROF. DR. MOREL DE PASSOS E CARVALHO



PROF. DR. PAULO LEONEL LIBARDI



PROF. DR. ALVARO PIRES DA SILVA



PROF. DR. JULIANO CARLOS CALONEGO

Data da Realização: 15 de maio 2009.

DEDICO

Á minha esposa, Ana Paula, por seu amor, apoio, amizade e por ter me incentivado na busca de novas oportunidades e a superar os desafios.
Aos meus pais, pelos inúmeros esforços para que seu filho chegasse até aqui. A eles dedico todos os méritos e sei que certamente sentem-se orgulhosos por mais essa conquista.

OFEREÇO

À minha filha, Júlia, pelo seu amor, mesmo quando seu papai está distante.
Obrigado por todos os momentos de alegria, os quais me deram alicerce e coragem para continuar.
Obrigado pelo carinho, amor e amizade.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, saúde e proteção.

À Faculdade de Ciências Agronômicas – UNESP – Botucatu/SP, pela oportunidade.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pela concessão da bolsa de estudo.

Ao Prof. Ciro Antonio Rosolem, pela orientação na realização desse trabalho e pela sua conduta sempre correta, além de respeito e amizade.

A todos os docentes do Departamento de Produção Vegetal, em especial aos Prof. Carlos Alexandre Costa Crusciol e Rogério Peres Soratto, pelas várias conversas produtivas.

Aos funcionários de campo, que foram primordiais na condução deste trabalho, pois sem eles não seria possível finalizar um experimento dessa magnitude.

Ao amigo Juliano Carlos Calonego, por toda a orientação nos procedimentos de análise física do solo, mas principalmente pelas dicas para determinação da curva de água no solo e IHO.

Ao amigo e técnico do laboratório de relação solo-planta, Dorival, pela amizade e pela sua pronta disponibilidade nas análises de laboratório.

Ao Izaias Pinheiro Lisboa e à Maryara Buriola Prando, que sempre estiveram dispostos a ajudar em todas as determinações, não somente como estagiários, mas principalmente como amigos.

Não poderia deixar de lembrar também, a todos aqueles estagiários que vieram da UNIOESTE e UEG, e que hoje muitos deles aqui estão cursando a Pós-graduação.

Aos muitos colegas do curso, pelo companheirismo e convivência durante estes anos.

Enfim, à toda a minha família, pelo apoio e incentivo, e em especial àqueles que sempre acreditaram...

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE QUADROS.....	xiii
APÊNDICE.....	xvii
1. RESUMO.....	1
2. SUMMARY.....	3
3. INTRODUÇÃO.....	5
4. REVISÃO DE LITERATURA.....	7
4.1. Disponibilidade hídrica em solos compactados.....	7
4.2. Estrutura do solo em condições de compactação.....	9
4.3. Resistência do solo à penetração.....	11
4.4. Manejo da compactação dos solos.....	12
4.5. Plantas de cobertura em solos compactados.....	14
4.6. Morfologia radicular em solos compactados.....	16
5. MATERIAL E MÉTODOS.....	19
5.1. Localização e histórico da área experimental.....	19
5.2. Características edáficas da área experimental.....	19
5.3. Características climáticas da área experimental.....	23
5.4. Tratamentos e delineamento experimental.....	25
5.5. Instalação e condução do experimento (08/2005).....	26
5.5.1. Aplicação de corretivos de acidez (08/2005).....	27
5.5.2. Escarificação do solo (08/2005).....	27
5.5.3. Semeadura e cultivo do milho (safra 2005/2006).....	27
5.5.4. Semeadura e cultivo da soja (safra 2005/2006).....	28
5.5.5. Semeadura e cultivo da <i>Brachiaria</i> (safra 2005/2006).....	29
5.5.6. Semeadura e cultivo da mamona (safra 2006).....	30
5.5.7. Semeadura e cultivo do sorgo (safra 2006).....	30
5.5.8. Semeadura e cultivo do milho + <i>Brachiaria</i> (2006/2007).....	31

5.5.9. Semeadura e cultivo do sorgo e da mamona (safra 2007).....	32
5.5.10. Semeadura e cultivo da soja (safra 2007/2008).....	32
5.6. Avaliações.....	33
5.6.1. Teor de matéria orgânica do solo.....	33
5.6.2. Coleta, preparo das amostras e análise de raízes.....	33
5.6.3. Coleta e preparo das amostras não deformadas.....	35
5.6.3.1. Propriedades físicas e físico-hídricas do solo.....	35
5.6.3.2. Intervalo hídrico ótimo (IHO).....	37
5.6.4. Coleta, preparo e análise das amostras de agregados do solo.....	39
5.6.5. Resistência do solo à penetração (RP).....	41
5.6.6. Produtividade de grãos.....	41
5.7. Análises estatísticas.....	42
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43
6.1. Teor de matéria orgânica no solo.....	43
6.2. Quantidade de raízes.....	47
6.2.1. Raízes das plantas de cobertura (11/2006).....	47
6.2.2. Raízes das plantas de milho (02/2007).....	52
6.2.3. Raízes das plantas de cobertura (11/2007).....	56
6.2.4. Raízes das plantas de soja (02/2008).....	61
6.3. Propriedades físicas e físico-hídricas do solo.....	65
6.3.1. Densidade do solo, macro, microporosidade e Porosidade total (11/2006).....	65
6.3.2. Densidade do solo, macro, microporosidade e Porosidade total (11/2007).....	68
6.3.3. Curva de retenção de água no solo e Índice S (11/2006).....	72
6.3.4. Curva de retenção de água no solo e Índice S (11/2007).....	78
6.3.5. Intervalo Hídrico Ótimo x Manejo do Solo (11/2006).....	83
6.3.6. Intervalo Hídrico Ótimo x Manejo do Solo (11/2007).....	89
6.3.7. Intervalo Hídrico Ótimo x Rotações de Culturas (11/2006).....	94
6.3.8. Intervalo Hídrico Ótimo x Rotações de Culturas (11/2007).....	103
6.3.9. Estabilidade de agregados (EA).....	111
6.3.10. Resistência do solo a penetração (RP).....	114
6.4. Produtividade das culturas.....	117

6.4.1. Massa seca das plantas de cobertura (11/2005).....	117
6.4.2. Produtividade da cultura da soja (safra 2005/2006).....	118
4.3. Massa seca das plantas de cobertura (11/2006).....	119
6.4.4. Produtividade da cultura do milho (safra 2006/2007).....	120
6.4.5. Massa seca das plantas de cobertura (11/2007).....	121
6.4.6. Produtividade da cultura da soja (safra 2007/2008).....	122
7. CONCLUSÕES.....	125
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	126

LISTA DE FIGURAS

Página

- Figura 1.** Curvas características da água no solo e índices S (Dexter, 2004a), referentes à amostragem realizada para caracterização da área, nas profundidades de 0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,6m.....22
- Figura 2.** Variação do conteúdo de água em função da densidade do solo nos níveis críticos da capacidade de campo (CC = -0,01 MPa), ponto de murcha permanente (PMP = -1,5 MPa), porosidade de aeração (PA = 10 %) e resistência do solo à penetração (RP = 2 MPa), no centro das camadas 0,05-0,10 m (A) e 0,10-0,20 m (B).....22
- Figura 3.** Total de chuva mensal (mm) e temperatura média (°C) mensal referente aos anos agrícolas 2005/2006 (A), 2006/2007 (B) e 2007/2008 (C), na Fazenda Experimental Lageado, em Botucatu-SP.....24
- Figura 4.** Teores médios de matéria orgânica no solo, referente às amostras coletadas em (A – 11/2005); após primeiro ano (B – 11/2006) e após segundo ano (C – 11/2007).....45
- Figura 5.** Teores médios de matéria orgânica no solo, referente às amostras coletadas após um ano (A e B – 11/2006) e após segundo ano de experimento (C e D – 11/2007) sob sistemas de produção com (A e C) e sem escarificação inicial (B e D). M/S/So – milho / soja / sorgo; M/S/B – milho / soja / *Brachiaria* e M/S/B+Ma – milho / soja / *Brachiaria* + mamona.....47
- Figura 6.** Massa seca de raízes, comprimento radicular e diâmetro médio radicular das plantas de cobertura, referente às amostragens no primeiro ano nos sistemas de rotação com (A, B e C) e sem escarificação inicial (D, E e F), respectivamente. M/S/So – milho / soja / sorgo; M/S/B – milho / soja / *Brachiaria* e M/S/B+Ma – milho / soja / *Brachiaria* + mamona.....51
- Figura 7.** Massa seca de raízes, comprimento radicular e diâmetro médio radicular do milho, referente às amostragens no primeiro ano nos sistemas de rotação com (A, B e C) e sem escarificação inicial (D, E e F), respectivamente. M/S/So – milho / soja / sorgo; M/S/B – milho / soja / *Brachiaria* e M/S/B+Ma – milho / soja / *Brachiaria* + mamona.....55

- Figura 8.** Massa seca de raízes, comprimento radicular e diâmetro médio radicular de plantas de cobertura, referente a amostragem em 11/2007 nos sistemas de rotação com (A, B e C) e sem escarificação inicial (D, E e F), respectivamente. M/S/So – milho / soja / sorgo; M/S/B – milho / soja / *Brachiaria* e M/S/B+Ma – milho / soja / *Brachiaria* + mamona.....60
- Figura 9.** Massa seca de raízes, comprimento radicular e diâmetro médio radicular de plantas de soja, referente a amostragem em 02/2008 nos sistemas de rotação com (A, B e C) e sem escarificação inicial (D, E e F), respectivamente. M/S/So – milho / soja / sorgo; M/S/B – milho / soja / *Brachiaria* e M/S/B+Ma – milho / soja / *Brachiaria* + mamona.....64
- Figura 10.** Curvas características da água no solo, referentes à amostragem realizada após o primeiro ano do experimento (2005/2006), nos diferentes tratamentos envolvendo os sistemas de rotação de culturas e escarificação, nas camadas de 0,00-0,05 m (A); 0,05-0,10 m (B); 0,10-0,20 m (C); 0,20-0,40 m (D) e 0,40-0,60 m (E). M/S/So – milho / soja / sorgo; M/S/B – milho / soja / *Brachiaria* e M/S/B+Ma – milho / soja / *Brachiaria* + mamona.....75
- Figura 11.** Valores de *S* das amostras coletadas após o primeiro ano do experimento (2005/2006), nos diferentes tratamentos envolvendo os sistemas de rotação de culturas e escarificação, nas camadas de 0,00-0,05 m (A); 0,05-0,10 m (B); 0,10-0,20 m (C); 0,20-0,40 m (D) e 0,40-0,60 m (E). M/S/So – milho / soja / sorgo; M/S/B – milho / soja / *Brachiaria* e M/S/B + Ma – milho / soja / *Brachiaria* + mamona.....76
- Figura 12.** Curvas características da água no solo referente a amostragem realizada após o segundo ano do experimento (2006/2007), nos diferentes tratamentos envolvendo os sistemas de rotação de culturas e escarificação, nas camadas de 0,00-0,05 m (A); 0,05-0,10 m (B); 0,10-0,20 m (C); 0,20-0,40 m (D) e 0,40-0,60 m (E). M/S/So – milho / soja / sorgo; M/S/B – milho / soja / *Brachiaria* e M/S/B+Ma – milho / soja / *Brachiaria* + mamona.....80
- Figura 13.** Valores de *S* das amostras coletadas após o segundo ano do experimento (2006/2007), nos diferentes tratamentos envolvendo os sistemas de rotação de culturas e escarificação, nas camadas de 0,00-0,05 m (A); 0,05-0,10 m (B); 0,10-0,20 m (C); 0,20-0,40 m (D) e 0,40-0,60 m (E). M/S/So – milho / soja / sorgo; M/S/B – milho / soja / *Brachiaria* e M/S/B+Ma – milho / soja / *Brachiaria* + mamona.....81

- Figura 14.** Variação do conteúdo de água em função da densidade do solo, nos níveis críticos da capacidade de campo ($CC = -0,01$ MPa), ponto de murcha permanente ($PMP = -1,5$ MPa), porosidade de aeração ($PA = 10\%$) e resistência à penetração ($RP = 2$ MPa), referente às amostras coletadas na camada de 0,05-0,10 m, com escarificação (A) e sem escarificação inicial (B) em 11/2006. A área hachurada representa o IHO.....88
- Figura 15.** Variação do conteúdo de água em função da densidade do solo, nos níveis críticos da capacidade de campo ($CC = -0,01$ MPa), ponto de murcha permanente ($PMP = -1,5$ MPa), porosidade de aeração ($PA = 10\%$) e resistência à penetração ($RP = 2$ MPa), referente às amostras coletadas na camada de 0,10-0,20 m, com escarificação (A) e sem escarificação inicial (B) em 11/2006. A área hachurada representa o IHO.....89
- Figura 16.** Variação do conteúdo de água em função da densidade do solo, nos níveis críticos da capacidade de campo ($CC = -0,01$ MPa), ponto de murcha permanente ($PMP = -1,5$ MPa), porosidade de aeração ($PA = 10\%$) e resistência à penetração ($RP = 2$ MPa), referente às amostras coletadas na camada de 0,05-0,10 m, com escarificação (A) e sem escarificação inicial (B) em 11/2007. A área hachurada representa o IHO.....93
- Figura 17.** Variação do conteúdo de água em função da densidade do solo, nos níveis críticos da capacidade de campo ($CC = -0,01$ MPa), ponto de murcha permanente ($PMP = -1,5$ MPa), porosidade de aeração ($PA = 10\%$) e resistência à penetração ($RP = 2$ MPa), referente às amostras coletadas na camada de 0,10-0,20 m, com escarificação (A) sem escarificação inicial (B) em 11/2007. A área hachurada representa o IHO.....94
- Figura 18.** Variação do conteúdo de água em função da densidade do solo, nos níveis críticos da capacidade de campo ($CC = -0,01$ MPa), ponto de murcha permanente ($PMP = -1,5$ MPa), porosidade de aeração ($PA = 10\%$) e resistência à penetração ($RP = 2$ MPa), referente às amostras coletadas na camada de 0,05-0,10 m, após o primeiro ano do experimento. A área hachurada representa o IHO. (A) escarificação - milho / soja / sorgo; (B) escarificação - milho / soja / *Brachiaria*; (C) escarificação - milho / soja / *Brachiaria*+mamona; (D) sem escarificação - milho / soja / sorgo; (E) sem escarificação - milho / soja / *Brachiaria*; (F) sem escarificação - milho / soja / *Brachiaria* + mamona.....101

Figura 19. Variação do conteúdo de água em função da densidade do solo, nos níveis críticos da capacidade de campo (CC = -0,01 MPa), ponto de murcha permanente (PMP = -1,5 MPa), porosidade de aeração (PA = 10%) e resistência à penetração (RP = 2MPa), referente às amostras coletadas na camada de 0,10-0,20 m, após o primeiro ano do experimento. A área hachurada representa o IHO. (A) escarificação - milho / soja / sorgo; (B) escarificação - milho / soja / *Brachiaria*; (C) escarificação - milho / soja / *Brachiaria* + mamona; (D) sem escarificação - milho / soja / sorgo; (E) sem escarificação - milho / soja / *Brachiaria*; (F) sem escarificação - milho / soja / *Brachiaria* + mamona.....102

Figura 20. Densidade crítica do solo nas camadas de 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, no primeiro ano dos tratamentos com (A) e sem escarificação (B) sob os sistemas de rotação. M/S/So - milho / soja / sorgo; M/S/B - milho / soja / *Brachiaria* e M/S/B+Ma - milho / soja / *Brachiaria* + mamona.....103

Figura 21. Variação do conteúdo de água em função da densidade do solo, nos níveis críticos da capacidade de campo (CC = -0,01 MPa), ponto de murcha permanente (PMP = -1,5 MPa), porosidade de aeração (PA = 10%) e resistência à penetração (RP = 2MPa), referente às amostras coletadas na camada de 0,05-0,10 m, após o segundo ano do experimento. A área hachurada representa o IHO. (A) escarificação - milho / soja / sorgo; (B) escarificação - milho / soja / *Brachiaria*; (C) escarificação - milho / soja / *Brachiaria*+mamona; (D) sem escarificação - milho / soja / sorgo; (E) sem escarificação - milho / soja / *Brachiaria*; (F) sem escarificação - milho / soja / *Brachiaria* + mamona.....109

Figura 22. Variação do conteúdo de água em função da densidade do solo, nos níveis críticos da capacidade de campo (CC = -0,01 MPa), ponto de murcha permanente (PMP = -1,5 MPa), porosidade de aeração (PA = 10%) e resistência à penetração (RP = 2MPa), referente às amostras coletadas na camada de 0,10-0,20 m, após o segundo ano do experimento. A área hachurada representa o IHO. (A) escarificação - milho / soja / sorgo; (B) escarificação - milho / soja / *Brachiaria*; (C) escarificação - milho / soja / *Brachiaria* + mamona; (D) sem escarificação - milho / soja / sorgo; (E) sem escarificação - milho / soja / *Brachiaria*; (F) sem escarificação - milho / soja / *Brachiaria* + mamona.....110

Figura 23. Densidade crítica do solo nas camadas de 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, no segundo ano dos tratamentos com (A) e sem escarificação (B) sob os sistemas de rotação. M/S/So - milho / soja / sorgo; M/S/B - milho / soja / *Brachiaria* e M/S/B+Ma - milho / soja / *Brachiaria* + mamona.....111

Figura 24. Resistência do solo à penetração nas camadas estudadas em 08/2005 (A e B), em 11/2006 (C e D) e 11/2007 (E e F) com e sem escarificação inicial do solo, respectivamente, sob os sistemas de rotação. M/S/So – milho / soja / sorgo; M/S/B – milho / soja / *Brachiaria* e M/S/B+Ma – milho / soja / *Brachiaria* + mamona.....115

LISTA DE QUADROS

	Página
Quadro 1. Características químicas e físicas do solo da área experimental antes da instalação dos tratamentos (08/2005).....	21
Quadro 2. Sistema de rotação de culturas implantado na safra de 2005/2006 sob Sistema de Semeadura Direta e Escarificação.....	26
Quadro 3. Análise de variância para os teores de MO no solo referente a amostragem em 11/2005, após primeiro ano (11/2006) e após segundo ano de experimento (11/2007).....	46
Quadro 4. Análise de variância para os parâmetros radiculares de plantas de cobertura referente a amostragem em 11/2006.....	49
Quadro 5. Valores de massa seca radicular (g dm^{-3}), comprimento radicular (cm cm^{-3}) e diâmetro médio radicular ($\text{mm x } 10^{-4}$) das plantas de cobertura referente a amostragem em 11/2006.....	50
Quadro 6. Análise de variância para os parâmetros radiculares das plantas de milho referente a amostragem em 02/2007.....	53
Quadro 7. Desdobramento da interação para massa seca radicular (g dm^{-3}), comprimento radicular (cm cm^{-3}) e diâmetro médio radicular ($\text{mm x } 10^{-4}$) das plantas de milho referente a amostragem em 02/2007	54
Quadro 8. Análise de variância para os parâmetros radiculares das plantas de cobertura referente a amostragem em 11/2007	57
Quadro 9. Valores da massa seca radicular (g dm^{-3}), comprimento radicular (cm cm^{-3}) e diâmetro médio radicular ($\text{mm x } 10^{-4}$) das plantas de cobertura referente a amostragem em 11/2007.....	58
Quadro 10. Análise da variância para os parâmetros radiculares das plantas de soja referente as amostragem em 02/2008.....	62

Quadro 11. Valores do comprimento radicular (cm cm^{-3}) e diâmetro médio radicular ($\text{mm} \times 10^{-4}$) das plantas de soja referente à amostragem em 02/2008.....	63
Quadro 12. Macroporosidade, microporosidade, porosidade total e densidade do solo, referente a amostragem realizada após o primeiro ano (11/2006).....	66
Quadro 13. Macroporosidade, microporosidade, porosidade total e densidade do solo, referente a amostragem realizada após segundo ano (11/2007).....	70
Quadro 14. Parâmetros calculados para o ajuste da curva de retenção de água no solo, amostragem de 11/2006.....	77
Quadro 15. Parâmetros calculados para o ajuste da curva de retenção de água no solo, amostragem de 11/2007.....	82
Quadro 16. Estimativa dos parâmetros da regressão para resistência à penetração do solo ($RP = \text{MPa}$) em função do conteúdo volumétrico da água ($\theta_v = \text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e densidade do solo ($D_s = \text{g cm}^{-3}$) na camada de 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m de profundidade, referente à amostragem realizada em 11/2006: $RP = a \theta_v^b D_s^c$ para os diferentes sistemas de manejo do solo.....	83
Quadro 17. Estimativa dos parâmetros da regressão para o conteúdo volumétrico da água no solo ($\theta_v = \text{m}^3 \text{m}^{-3}$) em função da densidade ($D_s = \text{g cm}^{-3}$) e do potencial mátrico ($\Psi = \text{MPa}$) na camada de 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m de profundidade, referente à amostragem realizada em 11/2006: $\theta_v = \exp (d + e D_s) \Psi^f$ para os diferentes sistemas de manejo do solo.....	84
Quadro 18. Estimativa dos parâmetros da regressão para resistência à penetração do solo ($RP = \text{MPa}$) em função do conteúdo volumétrico da água ($\theta_v = \text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e densidade do solo ($D_s = \text{g cm}^{-3}$) na camada de 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m de profundidade, referente à amostragem realizada em 11/2007: $RP = a \theta_v^b D_s^c$ para os diferentes sistemas de manejo do solo.....	90
Quadro 19. Estimativa dos parâmetros da regressão para o conteúdo volumétrico da água no solo ($\theta_v = \text{m}^3 \text{m}^{-3}$) em função da densidade ($D_s = \text{g cm}^{-3}$) e do potencial mátrico ($\Psi = \text{MPa}$) na camada de 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m de profundidade, referente à amostragem realizada em 11/2007: $\theta_v = \exp (d + e D_s) \Psi^f$ para os diferentes sistemas de manejo do solo.....	91

- Quadro 20.** Estimativa dos parâmetros da regressão para resistência à penetração do solo ($RP = \text{MPa}$) em função do conteúdo volumétrico da água ($\theta_v = \text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e densidade do solo ($D_s = \text{g cm}^{-3}$) na camada de 0,05-0,10 m de profundidade, referente à amostragem realizada em 11/2006: $RP = a \theta_v^b D_s^c$ 97
- Quadro 21.** Estimativa dos parâmetros da regressão para resistência à penetração do solo ($RP = \text{MPa}$) em função do conteúdo volumétrico da água ($\theta_v = \text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e densidade do solo ($D_s = \text{g cm}^{-3}$) na camada de 0,10-0,20 m de profundidade, referente à amostragem realizada em 11/2006: $RP = a \theta_v^b D_s^c$ 98
- Quadro 22.** Estimativa dos parâmetros da regressão para o conteúdo volumétrico da água no solo ($\theta_v = \text{m}^3 \text{m}^{-3}$) em função da densidade ($D_s = \text{g cm}^{-3}$) e do potencial mátrico ($\Psi = \text{MPa}$) na camada de 0,05-0,10 m de profundidade, referente à amostragem realizada em 11/2006: $\theta_v = \exp(d + e D_s) \Psi^f$ 99
- Quadro 23.** Estimativa dos parâmetros da regressão para o conteúdo volumétrico da água no solo ($\theta_v = \text{m}^3 \text{m}^{-3}$) em função da densidade ($D_s = \text{g cm}^{-3}$) e do potencial mátrico ($\Psi = \text{MPa}$) na camada de 0,10-0,20 m de profundidade, referente à amostragem realizada em 11/2006: $\theta_v = \exp(d + e D_s) \Psi^f$ 100
- Quadro 24.** Estimativa dos parâmetros da regressão para resistência à penetração do solo ($RP = \text{MPa}$) em função do conteúdo volumétrico da água ($\theta_v = \text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e densidade do solo ($D_s = \text{g cm}^{-3}$) na camada de 0,05-0,10 m de profundidade, referente à amostragem realizada em 11/2007: $RP = a \theta_v^b D_s^c$ 105
- Quadro 25.** Estimativa dos parâmetros da regressão para resistência à penetração do solo ($RP = \text{MPa}$) em função do conteúdo volumétrico da água ($\theta_v = \text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e densidade do solo ($D_s = \text{g cm}^{-3}$) na camada de 0,10-0,20 m de profundidade, referente à amostragem realizada em 11/2007: $RP = a \theta_v^b D_s^c$ 106
- Quadro 26.** Estimativa dos parâmetros da regressão para o conteúdo volumétrico da água no solo ($\theta_v = \text{m}^3 \text{m}^{-3}$) em função da densidade ($D_s = \text{g cm}^{-3}$) e do potencial mátrico ($\Psi = \text{MPa}$) na camada de 0,05-0,10 m de profundidade, referente à amostragem realizada em 11/2007: $\theta_v = \exp(d + e D_s) \Psi^f$ 107
- Quadro 27.** Estimativa dos parâmetros da regressão para o conteúdo volumétrico da água no solo ($\theta_v = \text{m}^3 \text{m}^{-3}$) em função da densidade ($D_s = \text{g cm}^{-3}$) e do potencial mátrico ($\Psi = \text{MPa}$) na camada de 0,10-0,20 m de profundidade, referente à amostragem realizada em 11/2007: $\theta_v = \exp(d + e D_s) \Psi^f$ 108

Quadro 28. Valores da estabilidade de agregados referentes a amostragem em 11/2006.....	112
Quadro 29. Valores da estabilidade de agregados referentes a amostragem em 11/2007.....	113
Quadro 30. Valores da umidade gravimétrica do solo em amostras coletadas simultaneamente ao teste de RP em 08/2005, 11/2006 e 11/2007.....	116
Quadro 31. Produtividade média da massa seca de milho ADR 500 e das plantas daninhas no momento do manejo de milho aos 65 DAE.....	118
Quadro 32. Produtividade média de grãos de soja, cultivar Embrapa 48, safra 2005/2006.....	119
Quadro 33. Produtividade média da massa seca das plantas de cobertura em 11/2006.....	120
Quadro 34. Produtividade média de grãos de milho, cultivar DOW 2B710, safra 2006/2007.....	121
Quadro 35. Produtividade média da massa seca das plantas de cobertura em 11/2007.....	122
Quadro 36. Produtividade média de grãos de soja, cultivar Embrapa 48, safra 2007/2008.....	123

APÊNDICE

	Página
Figura 26. Velocidade de infiltração (VI) em cm h^{-1} na camada superficial, a 0,10 e 0,20 m de profundidade, respectivamente, em 2006: A) com escarificação inicial do solo; B) sem escarificação inicial do solo.....	145
Figura 27. Velocidade de infiltração (VI) em cm h^{-1} na camada superficial, a 0,10 e 0,20 m de profundidade, respectivamente, em 2007: A) com escarificação inicial do solo; B) sem escarificação inicial do solo.....	147
Quadro 37. Médias de umidade do solo no momento das avaliações de infiltração (10/2006).....	146
Quadro 38. Médias de umidade do solo no momento das avaliações de infiltração (10/2007).....	148
Quadro 39. Teores médios de matéria orgânica, fósforo, potássio, cálcio e magnésio no solo após o cultivo da soja (abril 2008).....	149

1. RESUMO

A rotação de culturas e a manutenção de resíduos culturais sobre a superfície do solo durante parte ou todo o ano podem aumentar o potencial deste em armazenar água pelas melhorias físicas e físico-hídricas. Neste sentido, objetivou-se com este trabalho estudar o comportamento de três sistemas de rotação de culturas quanto as propriedades físicas e físico-hídricas de um Nitossolo Vermelho de textura argilosa sob Sistema de Semeadura Direta com e sem escarificação inicial. O sistema de rotação de culturas foi implantado na safra de 2005/2006 como segue: (1) milheto / soja / sorgo / milho / sorgo / soja (2) milheto / soja / *Brachiaria* / milho + *Brachiaria* / soja, e (3) milheto / soja / mamona + *Brachiaria* / milho + *Brachiaria* / *Brachiaria* + mamona / soja. O experimento foi conduzido na Fazenda Experimental Lageado (Botucatu-SP), nos anos agrícolas de 2005/2006, 2006/2007 e 2007/2008. O delineamento experimental foi o de blocos ao acaso com quatro repetições em esquema de parcelas subdivididas. Foram consideradas parcelas aquelas cultivadas em SSD com e sem escarificação, e subparcelas as cultivadas em sistemas de rotação. A escarificação do solo foi realizada inicialmente após a aplicação do corretivo de acidez no primeiro ano (08/2005). Foram coletadas amostras de raízes, tanto das espécies de cobertura como do milho e da soja, nas profundidades de 0,00-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m. As raízes das plantas de cobertura foram amostradas antes da dessecação química. Já as raízes do milho e da soja foram respectivamente amostradas na linha e na entrelinha de semeadura, quando as culturas apresentavam-se em estágio de pleno florescimento e R₂. Para determinar a densidade do solo, a macroporosidade e a

microporosidade, a porosidade total e a curva característica da água do solo, foram coletadas amostras indeformadas de solo, por meio de anéis volumétricos nas camadas 0,00-0,05, 0,05-0,10, e no centro das camadas de 0,10-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m. Para determinar o intervalo hídrico ótimo (IHO), foram retiradas amostras nas profundidades de 0,05-0,10 e de 0,10-0,20 m. As amostragens foram feitas antes de iniciar o experimento (08/2005) para caracterização da área, após o manejo das espécies de cobertura antes da semeadura do milho (11/2006) e antes da semeadura da soja (11/2007) em trincheiras abertas em cada parcela. Nas trincheiras abertas para coleta dos anéis volumétricos, também retiraram-se amostras deformadas nas mesmas camadas para determinar o teor de matéria orgânica do solo. Nas profundidades de 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m coletaram-se torrões de solo para avaliação da estabilidade de agregados. A produtividade da soja foi determinada no ano agrícola de 2005/2006 e 2007/2008 e do milho em 2006/2007. Após a condução do experimento, pode-se concluir que a escarificação inicial do solo promoveu melhores condições físico-hídricas logo após sua realização, porém, com efeito, pouco duradouro, de no máximo 2 anos. O índice S em todas as avaliações foi superior aos índices relatados na literatura. O sistema de manejo de solo mantido sem escarificação inicial e com rotação de culturas melhora suas condições físico-hídricas a partir do segundo ano, igualando-se ao sistema que recebeu a escarificação. Em condições de solo úmido, a produtividade não é limitada, mesmo quando há altos níveis de compactação do solo. A rotação de culturas, mesmo melhorando as condições físico-hídricas do solo não é suficiente para sobrepujar os efeitos do regime hídrico durante o ciclo das culturas. Em condições de déficit hídrico, a rotação com *Brachiaria* solteira ou em consórcio com mamona foi a que proporcionou os melhores resultados, tanto para estruturação do solo, quanto para produtividade de massa, fator importantíssimo para o sucesso do sistema de semeadura direta. A variação dos valores de IHO observados após o segundo ano de experimento não resultaram em perdas ou ganhos de produtividade de soja, o que deixa clara a necessidade de avaliar a frequência com que a umidade do solo permanece dentro do IHO durante o ciclo da cultura.

PHYSICAL PROPERTIES OF SOIL RELATED TO PRODUCTIVITY UNDER CROP SYSTEMS. Botucatu, 2009, 168 p. Tese (Doutorado em Agronomia/Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: DÁCIO OLIBONE

Adviser: CIRO ANTONIO ROSOLEM

2. SUMMARY

Crop rotations and maintenance of plant residues on surface may improve soil physical and physical-hydraulic properties and, consequently, water storage capacity, for some months or all year long. The objective of this work was to study three different crop rotation systems and their effects on physical and physical-hydraulic properties of a clay-texture Hapludox under no tillage system, with and without previous chiseling. Crop rotations were sown in 2005/2006, as follows: (1) millet / soybean / sorghum / maize / sorghum / soybean; (2) millet / soybean / *Brachiaria* / maize + *Brachiaria* / soybean and (3) millet / soybean / castor bean + *Brachiaria* / maize + *Brachiaria* / *Brachiaria* + castor bean / soybean. The experiment was carried out on Lageado Experimental Farm (Botucatu-SP-Brazil), in the agriculture years 2005/2006, 2006/2007 and 2007/2008. The experimental design was the completely randomized block, with subdivided plots and four replications. Main plots consisted of crops under no tillage system with and without previous chiseling. Subplots consisted of crop rotations. Chiseling was carried out right after liming in the first year (August of 2005). Cover crops, maize and soybean root samples were taken at depths of 0.00-0.05, 0.05-0.10, 0.10-0.20, 0.20-0.40 and 0.40-0.60 m. Cover crop roots were sampled before chemical desiccation. As for maize and soybean roots, sampling took place in the row and spacing row, at full flowering and R2 growth stage, respectively. Soil bulk density, macro and micro porosity, total porosity and the curve of soil water retention were evaluated using undisturbed samples. Volumetric cores were taken at depths of 0.00-0.05 and 0.05-0.10, and in the center of the depths 0.10-0.20, 0.20-0.40 and 0.40-0.60 m. The least limit water range (LLWR) was calculated using samples taken at depths of 0.05-0.10 and 0.10-0.20 m.

Sampling was carried out before the experiment (August of 2005), after cover crop management and before maize sowing (November of 2006) and before soybean sowing (November of 2007), in trenches opened in each subplot. From these trenches, disturbed samples were also taken at the same depths for organic matter analysis. For the evaluations of aggregate stability, samples were taken at depths of 0.05-0.10 and 0.10-0.20 m. Soybean yield was obtained in 2005/2006 and 2007/2008 and maize yield, in 2006/2007. It was concluded that previous chiseling improved soil physical-hydraulic conditions; however, the effects remained for 2 years, at the latest. The *S* indexes of all evaluations were higher than the values found in literature. The crop system with no previous chiseling but with crop rotations improved soil physical-hydraulic properties in the second year and later, similarly to the chiseled system. Crop yield is not limited in humid soils, even when chiseling is accentuated. Crop rotation systems improve soil physical-hydraulic conditions, but some effects of water unavailability during crop development may not be overcome. In drought stress condition, the rotation with *Brachiaria* sole or mixed with castor bean showed better results, either for soil structure or dry matter production, which is essential in no tillage system. Variations in LLWR values, observed in the second year or later, did not decrease or increase soybean yield. Then, it is necessary to evaluate how often soil moisture remains within the LLWR during crop development.

Keywords: no tillage, chiseling, cover crop, least limit water range.

3. INTRODUÇÃO

As culturas da soja e do milho apresentam grande expressão econômica nacional e atualmente ocupam as maiores áreas cultivadas, distribuídas nos mais variados ambientes edafoclimáticos. Em quase sua totalidade, são cultivadas num sistema agrícola totalmente mecanizado, onde o uso intensivo do solo, em condições inadequadas de umidade, favorece o aparecimento de camadas compactadas em superfície e subsuperfície, ocasionando mudanças nas características químicas, mas principalmente nas características físicas do solo, que refletem diretamente no crescimento das raízes e conseqüentemente no crescimento, desenvolvimento e produtividade das plantas.

Os efeitos nocivos da compactação são mais visíveis quando ocorre um período de déficit hídrico, que dependendo da formação e manejo do solo, pode ser mais ou menos intenso num determinado tempo.

Na prática, com a expectativa de minimizar os efeitos da compactação, os produtores têm usado o método mecânico, que por meio da movimentação de hastes no solo, rompe a camada compactada, porém com elevado gasto de energia, tempo de execução e assim aumentando os custos. Visando alcançar uma maior sustentabilidade dos sistemas de produção, principalmente em épocas de recessão econômica mundial, tem sido constante a busca por diferentes manejos do solo como alternativa ao método convencional.

Neste sentido, a rotação de culturas com espécies de plantas com sistema radicular profundo e vigoroso e com capacidade de crescer em solos com alta

resistência mecânica à penetração, têm se apresentado como alternativa de baixo custo e com ótimos resultados na estruturação do solo.

Assim, a *Brachiaria* é uma espécie que tem se destacado por sua adaptação e agressividade em todas as latitudes, com crescimento vigoroso e alta tolerância aos solos ácidos, além de ótima resistência as condições de deficiência hídrica, comum nas regiões onde há uma maior dificuldade de produção de palha. Contudo, essa prática pode ser considerada como alternativa viável aos sistemas de Integração Lavoura-Pecuária.

Os canais resultantes do crescimento das raízes ("bioporos") de uma espécie cultivada anteriormente e a agregação do solo por exsudados radiculares, podem promover melhores condições para o crescimento e desenvolvimento das raízes da cultura sucessora. As modificações da porosidade total e a relação entre macro e microporos no perfil alteram o potencial do solo em armazenar água, característica que cresce em importância em condições tropicais, principalmente na viabilização da produção de palha para o sistema de semeadura direta.

Neste contexto, o trabalho foi conduzido com o objetivo de avaliar o comportamento de 3 sistemas de rotação de culturas sob sistema de semeadura direta, com e sem escarificação mecânica inicial, por meio de determinações físico-hídricas do solo, além do crescimento radicular das plantas e da produtividade das culturas no sistema.

4. REVISÃO DE LITERATURA

Nas condições tropicais brasileiras o uso de sistema agrícola totalmente mecanizado, com intensivo preparo do solo em condições inadequadas pode favorecer o aparecimento de camada compactada (SILVA et al., 2000; OLIVEIRA et al., 2003), ocasionando profundas mudanças nas características químicas e, principalmente, nas características físicas do solo, que se refletem no crescimento das raízes. Conseqüentemente, pode haver prejuízo no crescimento, desenvolvimento e produtividade das culturas (BEUTLER & CENTURION, 2004), em função da alteração no armazenamento de água e disponibilidade de nutrientes (CANALLI & ROLOFF, 1997; CAMARGO & ALLEONI, 1997), colocando em risco a sustentabilidade dos sistemas agrícolas.

4.1. Disponibilidade hídrica em solos compactados

Na agricultura, a água é essencial ao desenvolvimento das plantas e regula os demais fatores físicos e químicos do solo que influenciam diretamente o crescimento e a produtividade das culturas (LETEY, 1985). Além das condições climáticas e tipo de solo, o manejo dado ao solo é muito importante no aumento ou redução da disponibilidade hídrica para as plantas.

A umidade do solo varia espacial e temporalmente (LIBARDI et al., 1996). O sistema de semeadura direta (SSD) é eficiente em reduzir as perdas de água do solo por evaporação, no entanto, o não revolvimento do solo e o intenso tráfego de máquinas

produzem camadas compactadas em subsuperfície (0,08-0,12 m), aumentando a microporosidade (KERTZMANN, 1996; BEUTLER et al, 2008) que retêm água a tensões superiores à capacidade de extração pelas plantas.

A densidade do solo tende a aumentar com a profundidade do perfil por causa das pressões naturais exercidas pelas camadas superiores (CAMARGO & ALLEONI, 1997), peso dos veículos (CENTURION & DEMATTÊ, 1985; PEDROTTI et al., 2001) e/ou animais (LIMA et al., 2004) sobre a superfície do solo que origina uma força externa que causa reorganização das suas partículas, que passam a ocupar menor volume (JORGE, 1985; DIAS JÚNIOR, 2000). Essas pressões provocam o fenômeno da compactação, reduzindo a porosidade do solo (BORGES et al., 1999). O valor da densidade é variável para um mesmo solo, dependendo da natureza, das dimensões e da maneira como estão dispostas as partículas e, também, do teor água e de matéria orgânica (KIEHL, 1979).

Assim, o crescimento das plantas é afetado quando alguns atributos físicos do solo atingem valores-limites do intervalo hídrico ótimo (IHO), como porosidade de aeração inferior a 10% (GRABLE & SIEMER, 1968), resistência à penetração das raízes superior a 2 MPa (TAYLOR et al., 1966) e quantidade de água no solo que não esteja entre a capacidade de campo e ponto de murcha permanente, ou seja, entre os potenciais de $-0,01$ MPa e $-1,5$ MPa, respectivamente (CASSEL & NIELSEN, 1986).

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 (STONE & SILVEIRA, 2001), porosidade do solo (OLIVEIRA et al., 2001) e resistência do solo à penetração das raízes (TORMENA & ROLOFF, 1996; ROSOLEM et al., 1999; BEUTLER et al., 2001; FREDDI et al, 2007).

A interação entre esses atributos em uma única variável foi quantificada por Silva et al., (1994), como “Least Limiting Water Range” que foi traduzido para português como “Intervalo Hídrico Ótimo” (IHO). Segundo esses autores, o crescimento das raízes é menos restrito dentro desse intervalo, que tem como limite superior o teor de água no solo na condição de capacidade de campo ou o teor de água em que a porosidade de aeração se encontra no valor de 10%. Como limite inferior, pode-se ter o teor de água do solo na condição de ponto de murcha permanente, ou seja, pelo teor de água no solo em que a

resistência do solo à penetração seja igual a 2,0 MPa. Desta forma, Silva & Kay (1997) afirmam que os sistemas de manejo que proporcionam menor valor de IHO expõem as culturas a uma maior frequência de situações de estresse por excesso ou falta de água.

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.

A densidade do solo é a variável independente na determinação do IHO. Quanto menor o IHO maior o grau de degradação da estrutura do solo e maiores os riscos das culturas serem expostas aos estresses hídricos durante o crescimento e desenvolvimento. Neste sentido, os sistemas de preparo do solo devem oferecer condições físicas favoráveis ao crescimento e desenvolvimento das culturas.

Mais recentemente foi proposto por Dexter, 2004a e Dexter, 2004b, o parâmetro S para também avaliar a qualidade física e estrutural do solo. Para obter o índice S é necessário a definição da curva de retenção de água do solo com o valor da tangente do ângulo no ponto de inflexão da curva.

Assim, o S pode ser determinado diretamente na curva de retenção de água. Entretanto, os dados de umidade podem ser obtidos por meio de uma função matemática e o ponto de inflexão calculado por estimativas dos parâmetros usados. Neste caso, a função de Van Genuchten (1980) é a mais usada.

4.2. Estrutura do solo em condições de compactação

A intensa mobilização dos solo tropical traz como consequência sua desagregação superficial, sujeita à formação de uma fina crosta resultante da dispersão das suas partículas, e ainda outra camada subsuperficial compactada, resultante da pressão exercida pelo peso dos implementos agrícolas e pela ação direta dos pneus (CASTRO et al., 1987).

De maneira geral, o sistema de preparo convencional do solo promove compactação subsuperficial devido à carga aplicada ao longo dos anos pelos equipamentos de preparo do solo (CENTURION & DEMATTÊ, 1985; HÄKANSSON et al., 1988; PEDROTTI et al., 2001), ao passo que, no sistema de semeadura direta, a compactação ocorre nos primeiros centímetros do perfil, devido ao efeito cumulativo das pressões exercidas pelo tráfego de máquinas, além da acomodação natural das partículas (CARVALHO JÚNIOR et al., 1998).

Segundo Peche Filho (1999), o material orgânico presente no solo, mas que ainda não entrou em processo acelerado de decomposição, como os pedaços de raízes, fragmentos de caule e restos de colheita, têm o papel de prevenção contra a compactação, pois aumenta a compressibilidade, propiciando aeração e diminuindo o efeito do rearranjo das partículas causado pelo tráfego de máquinas agrícolas. Jones (1995) também destaca que a manutenção dos resíduos na superfície do solo é capaz de absorver parte das forças originadas pelos rodados das máquinas agrícolas.

À medida que aumenta a compactação ocorre a redução da porosidade total e aumento da resistência à penetração e da densidade do solo (MORAES et al., 1995 e BORGES et al., 1999), causando impedimento físico ao desenvolvimento do sistema radicular e restringindo o movimento da água e do ar ao longo do perfil (JORGE, 1985; RICHART et al., 2005).

Em solo compactado o número de macroporos é reduzido e a densidade é maior, o que, em solo seco, resulta em maior resistência física ao crescimento das raízes e decréscimo na água disponível. Em condições de solo úmido ocorre falta de oxigênio para a respiração das raízes e elevadas concentrações de etileno na zona radicular, derivadas de menor aeração (GRABLE & SIEMER, 1968; MARSCHNER, 1995).

Torres & Saraiva (1999) demonstraram que os problemas de compactação são mais graves em solos argilosos devido à alta superfície de contato das partículas de argila, o que pode provocar elevadas densidades e aumento da resistência à penetração, principalmente quando as práticas de manejo reduzem a matéria orgânica do solo. Para esses autores, no SSD os canais verticais contínuos na camada arável servem como rotas, ligando a superfície do solo às camadas mais profundas, proporcionando, abaixo dos 15 cm, maior densidade de enraizamento. Esses canais, além de melhorarem a infiltração de água,

permitem o carreamento de solo fértil das camadas superficiais para as mais profundas e facilitam as trocas de O_2 e CO_2 entre a atmosfera e o solo. Por isso, no SSD as raízes podem seguir a orientação dos canais verticais e das fendas, mesmo que esses não tenham a orientação vertical, para alcançarem camadas mais profundas do solo.

Assim, as raízes, ao encontrar uma camada de impedimento, se entortam e crescem paralelamente à superfície do solo. Isto causa um desenvolvimento superficial e raso, prejudicando o suprimento de água e de nutrientes (MORAES et al., 1995; STEINHARDT, 1983), ocasionando perda de produtividade (ALVARENGA et al., 1997) e enfraquecendo a sustentação da planta (JORGE, 1985).

4.3. Resistência do solo à penetração

Segundo Bueno & Vilar (1998), a compactação é entendida como ação mecânica por meio da qual se impõe ao solo uma redução de seu índice de vazios, ocorrendo como consequência, um acréscimo da resistência ao cisalhamento e a redução da compressibilidade e da permeabilidade. A resistência à penetração aumenta com a compactação do solo, sendo restritiva ao crescimento radicular acima de certos valores que, conforme Grant e Lanfond (1993), variam de 1,5 a 3,0 MPa. Porém, Arshad et al. (1996) apontaram os valores restritivos para o crescimento das raízes entre 2,0 a 4,0 MPa. Contudo são admitidos valores mais elevados em SSD, da ordem de 5,0 MPa (EHLERS et al., 1983).

No entanto, Rosolem et al. (1994a) constataram que a resistência do solo à penetração na ordem de 0,69 MPa reduziu em 50 % o crescimento radicular da soja. Porém, para a cultura do milho, uma redução na mesma proporção ocorreu com resistência à penetração de 1,42 MPa, embora o crescimento radicular não tenha sido completamente inibido mesmo com resistência de 4,0 MPa.

Mielniczuk et al. (1985), em trabalho para verificar a capacidade de algumas plantas de cobertura em aprofundar suas raízes em camadas compactadas, constataram que o tremoço amarelo e o tremoço branco apresentaram 72 e 24 %, respectivamente, de penetração de raízes em uma camada de solo com 2,4 MPa de resistência à penetração. Em trabalho semelhante, Kirkegaard et al. (1992) observaram que a resistência à penetração de 3,5 MPa reduziu o crescimento radicular de guandu em aproximadamente 60 %.

Silva e Rosolem (2001) observaram que, em um solo de textura arenosa, uma densidade de até $1,6 \text{ g cm}^{-3}$, correspondente a uma resistência à penetração de 1,22 MPa, não houve a supressão do crescimento radicular de aveia preta, guandu, milho, mucuna preta, sorgo granífero e tremoço azul, porém o milho apresentou-se como a espécie mais indicada para a cobertura, por suas características de produção de matéria seca e crescimento radicular. De acordo com NUERNBERG et al., (1986) plantas que produzem raízes profundas, com crescimento inicial rápido e agressivo, podem recuperar solos fisicamente degradados. No entanto, deve-se adotar a rotação adequada de culturas, para que os resultados sejam rapidamente evidenciados.

Dutra et al. (2004), estudando a qualidade física de um Latossolo Vermelho muito argiloso sob pastagem perene na região oeste do Paraná, verificaram que a densidade do solo apresentou um coeficiente de variação próximo ao determinado por Imhoff et al., (2000), para um Nitossolo Vermelho argiloso do estado de São Paulo. A média da densidade do horizonte Ap do solo sob pastagem ($1,45 \text{ g cm}^{-3}$) foi significativamente superior àquela do solo sob mata ($1,07 \text{ g cm}^{-3}$), atingindo valores de até $1,60 \text{ g cm}^{-3}$, considerados altos para as condições de solos com mais de 80 % de argila.

4.4. Manejo da compactação dos solos

Tem-se observado nas últimas quatro décadas uma clara intensificação da produção em áreas cuja topografia favorece a mecanização intensiva, como é o caso das regiões brasileiras sob vegetação original de Cerrado. Porém, o manejo intensivo do solo tem limitado o tempo disponível para as operações de tratamentos culturais e colheita, forçando os agricultores a operar, com frequência, em condições inadequadas de umidade do solo (DIAS JÚNIOR & PIERCE, 1996), com tratores de maior peso e potência (MANTOVANI, 1987). Dentre as consequências indesejáveis deste modelo de agricultura destaca-se a mudança do estado de agregação do solo com a compactação.

Para romper a compactação, destaca-se, entre outros métodos, a escarificação mecânica que torna o solo mais solto, sem inverter as camadas. Essa intervenção elimina os efeitos nocivos da compactação ou adensamento de camadas do solo, que ocorrem, geralmente, numa profundidade de até 40 cm (JORGE, 1985) e, de acordo com Verneti Jr. &

Gomes (1999), deve ser feita utilizando-se implementos de hastes que possam operar abaixo da camada compactada.

No entanto, outra alternativa à escarificação mecânica é a utilização da rotação de culturas, prática que possibilita a diversificação dos sistemas radiculares, e sua ação sobre o solo. Assim, Abreu et al. (2004) ao avaliarem o efeito da escarificação mecânica (escarificador) e biológica (*Crotalaria spectabilis*) na redução da compactação de um argissolo franco-arenoso, constataram que deve-se levar em consideração as alterações das propriedades hídricas e mecânicas usadas como indicadoras da estrutura do solo. Usando o indicador condutividade hidráulica do solo, observaram maior eficácia da escarificação biológica na ruptura da camada compactada e o estabelecimento de poros condutores de água. Em contrapartida, se o indicador for a resistência à penetração, o resultado é inverso.

Deve-se ressaltar que no SSD, normalmente os valores de resistência à penetração são maiores do que quando comparados aos preparos em que há maior mobilização do solo, como o da escarificação (LEVIEN, 1999). Porém, o sistema de preparo do solo que envolve seu revolvimento induz a formação de camadas compactadas em subsuperfície, ao contrário do SSD, que propicia maior homogeneidade estrutural no perfil de solo (CENTURION & DEMATTÊ, 1985 e PEDROTTI et al., 2001)

Entretanto, Castro (1989) e Gill et al. (1996) relatam o aumento na compactação do solo devido ao uso continuado do SSD, já que o uso intensivo da área, seja para a produção de grãos ou cobertura morta, causa redução da macroporosidade e aumento da densidade e da microporosidade do solo. Beutler et al. (2001) e Tormena et al. (2002), também observaram maior compactação do solo no SSD, quando comparado com o convencional.

A maioria dos trabalhos aponta para uma compactação na camada superficial no SPD, em experimentos de curta duração. Entretanto, Henklain (1997), após 20 anos, observou menor densidade do solo e maior volume total de poros e macroporosidade para o SSD, em comparação com outros métodos de preparo do solo. Hakoyama et al. (1995) observaram que no sistema convencional a compactação do solo localizou-se entre 8 e 27 cm de profundidade. Já no SSD, essa camada de maior densidade localizou-se entre 5 e 12 cm de profundidade. Resultados semelhantes foram obtidos por Pedrotti et al., (2001).

De Maria et al. (1999) em trabalho para avaliar a influência de diferentes sistemas de preparo do solo, utilizando grade pesada, arado escarificador e o SSD, na densidade e resistência à penetração em um Latossolo Roxo, e relacionar esses atributos físicos com o desenvolvimento radicular da soja, verificaram que nos sistemas de preparo do solo com grade pesada e SSD houve compactação do solo entre 0,1 e 0,3 m, respectivamente. Porém, os maiores valores de resistência e densidade não determinaram a redução da densidade de comprimento de raízes. Em trabalho semelhante, Kluthcouski et al. (2000) usando rotação com *Brachiaria*, não constataram efeito dos manejos de solo sobre o rendimento de grãos na cultura da soja. Já Figueiredo et al. (2000) não encontraram diferenças significativas na densidade máxima do solo em consequência de diversos métodos de preparo.

Segundo Silva et al. (2002), o revolvimento e a desagregação do solo diminuem substancialmente a sua capacidade de receber carga (pressão de preconconsolidação), sendo essa capacidade aumentada de 2 a 4 vezes no SSD. Este aspecto está relacionado com a permanência da continuidade dos poros, resultante da decomposição das raízes, liberação de exsudados radiculares, atividade biológica do solo mais efetiva, proporcionando maior estabilidade dos agregados (DEXTER, 1991).

4.5. Plantas de cobertura em solos compactados

O uso da rotação de culturas com espécies que tenham sistema radicular vigoroso, com capacidade de crescer em solos com alta resistência à penetração, criando poros por onde as raízes da cultura subsequente possam crescer tem sido utilizado como alternativa à escarificação mecânica, para reduzir a compactação do solo (STONE & SILVEIRA, 2001; SILVA & ROSOLEM, 2002). O fato de existir espécies com capacidade de explorar camadas profundas do solo vem a possibilitar uma intensificação da reciclagem de nutrientes, pois ao ocorrer a decomposição da parte aérea dessas plantas aumenta-se a disponibilidade de nutrientes nas camadas superficiais (FIORIN, 1999).

Neste contexto, Muller et al. (2001), em trabalho com plantas de adubação verde em vasos com camada compactada em subsuperfície, observaram um acúmulo das raízes próximo à superfície. Dentre as espécies estudadas, o nabo forrageiro e a aveia preta foram as que melhor conseguiram romper essa camada, cuja resistência à penetração chegou

até 1,70 MPa, e explorar o volume de solo abaixo dela. Cintra & Mielniczuk (1983) apontam as espécies de coberturas tais como a colza e o tremoço, com grande potencial de recuperação de solos compactados, pela maior capacidade de penetração da raiz pivotante em camadas compactadas, ao contrário da soja, que teve sua raiz pivotante desviada lateralmente.

Gonçalves et al. (2004), avaliando o crescimento de plantas de amaranho, nabo forrageiro, pé de galinha, quinoa, kenaf, gergelim, milho e guandu em solo com camada compactada e densidade de $1,41 \text{ g cm}^{-3}$, constataram que o milho, variedade ADR 500 e ADR 300, apresentaram maiores valores de densidade de comprimento radicular abaixo da camada compactada.

Séguy & Bouzinac (1995) obtiveram resultados satisfatórios usando safrinhas de sorgo e milho em períodos marginais de chuva, permitindo, além da proteção do solo, a intensificação da reciclagem de nutrientes que seriam lixiviados, e o aumento da reestruturação dos solos por meio dos sistemas radiculares que exploram até 2 m de profundidade no perfil.

Rosolem et al. (2002) avaliaram o crescimento radicular de *Crotalaria juncea*, *Crotalaria spectabilis*, girassol, milho e sorgo de guiné, em vasos com camada subsuperficial compactada, observando que o milho e o sorgo de guiné apresentaram maior potencial para serem usados como plantas de cobertura em solos compactados, por apresentarem maior densidade de comprimento radicular. Constataram também que o crescimento radicular dessas espécies foi afetado com o aumento da resistência do solo à penetração, o que não ocorreu, ou ocorreu suavemente, com as espécies *C. spectabilis* e *C. juncea*, respectivamente, que tiveram valores de densidade de comprimento radicular quase que constante, mesmo com o aumento da compactação do solo.

Cunha et al. (2004) verificaram que a resistência mecânica do solo à penetração é afetada pela presença da *Brachiaria* em sistemas de rotação de culturas, após 1 ano de rotação, apresentando menores valores de resistência à penetração (2,3 a 2,71 MPa), nas profundidades de 0,15-0,35 m, contra 2,93 a 3,28 MPa, para mesma profundidade no tratamento sem *Brachiaria*.

Por outro lado, Genro Junior et al. (2004) não observaram nenhum efeito das plantas de cobertura com sistema radicular abundante e formador de poros biológicos, na redução da resistência mecânica do solo à penetração.

Em solos onde as raízes finas podem explorar canais radiculares e fissuras existentes, culturas com raízes pivotantes são mais afetadas pela compactação que aquelas com raízes fasciculadas mais finas (WHITELEY & DEXTER, 1982). Entretanto, raízes de maior diâmetro apresentam maior resistência ao encurvamento em solo compactado (WHITELEY & DEXTER, 1984), o que, segundo Henderson (1989), é importante em solos deficientes em macroporos, onde as raízes necessitam mais deformar o solo do que explorar fissuras.

O acúmulo de resíduos vegetais na superfície do solo pode atuar como um colchão, dissipando parte das cargas nele aplicadas. Assim, Acharya & Sharma (1994) e Dao (1996) observaram que a presença de resíduos na superfície do solo reduziu sua compactação superficial, em comparação com o sem resíduos na superfície. Contrariamente, Gupta et al. (1987) não observaram diferenças significativas na densidade do solo mesmo quando submetido ao tráfego, tendo diferentes quantidades de resíduos de milho na superfície.

Oliveira Júnior et al., (2004) avaliaram o efeito de palhadas de milho, soja, níger, sorgo e algodão em cobertura na resistência mecânica à penetração em solo com algodoeiro, constataram que a palha de sorgo foi a espécie com menor incremento da resistência do solo a penetração, relacionada com a produção de fitomassa e densidade de raiz.

4.6. Morfologia radicular em solos compactados

A compactação do solo reduz a infiltração de água e aumenta o risco de erosão e de déficit hídrico e nutricional das plantas, fazendo com que as raízes desenvolvam-se superficialmente (MORAES et al., 1995). Alvarenga et al., (1997) observaram decréscimos da produção da massa seca da parte aérea, e do acúmulo de nutrientes à medida que a densidade do solo aumentou. Queiroz-Voltan et al. (2000) enfatizaram que em solo compactado as raízes das plantas não utilizam adequadamente os nutrientes disponíveis, uma vez que o desenvolvimento de novas raízes, responsáveis pela absorção de água e nutrientes, fica prejudicado, além de decréscimo da quantidade de oxigênio na rizosfera limitar os processos metabólicos.

Segundo Passioura (1991), a estrutura do solo influencia o crescimento radicular de várias formas, sendo os efeitos sobre o alongamento radicular os mais claros e determinantes sobre a habilidade das raízes em extrair água e nutrientes do solo em quantidades adequadas. Para Benghough & Mullins (1990), o alongamento radicular só é possível quando a pressão radicular for maior que a impedância mecânica. Porém, existem outros fatores a serem considerados como a continuidade dos macroporos, a fertilidade, a presença de microorganismos patogênicos ou simbióticos nos macroporos, a oxigenação do solo e a quantidade de água disponível.

Para Bennie (1996), ao crescer a raiz exerce uma pressão contra as partículas do solo, afastando-as, para permitir o seu alongamento. Contudo, quando há presença de camada com estado de compactação superior à capacidade de penetração das raízes, ocorre um aumento do diâmetro radicular e uma diminuição do seu comprimento, resultando em menor volume de solo explorado e decréscimo da absorção de água e nutrientes, culminando com a redução da produção das plantas.

De acordo com Taylor (1974), as raízes das plantas, ao se desenvolverem, atravessam poros com diâmetros superiores aos seus, ou poros que foram aumentados pelo deslocamento das partículas do solo pelo seu crescimento, o qual será diminuído ou inexistente quando a pressão hidrostática das células das raízes não for capaz de vencer a resistência oferecida pelas camadas de compactação.

Materechera et al. (1992) e Guimarães & Moreira (2001) enfatizaram que com a compactação do solo as raízes sofrem modificações morfológicas e fisiológicas, específicas de cada espécie ou cultivar, a fim de se adaptarem. Para esses autores, a resistência mecânica do solo aumenta o diâmetro das raízes na camada adensada. No entanto, Russel & Goss (1974) argumentaram que as raízes diminuem de diâmetro para penetrar pequenos poros, devido a resistência mecânica do solo provocar proliferação de raízes laterais, as quais são mais finas.

Entretanto, Merotto Jr. & Mundstock (1999) afirmaram que as raízes podem crescer através dos poros e pontos de menor resistência, mas são incapazes de reduzir seu diâmetro para penetrar em poros menores.

Reinert et al. (2008), trabalhando com diferentes espécies de plantas de cobertura em solo compactado, observaram que para a densidade do solo na faixa de 1,75 e 1,85 g cm⁻³, ocorreu restrição ao crescimento radicular, com deformações na morfologia das raízes em grau médio, e acima de 1,85 g cm⁻³ essas deformações foram de maior magnitude, com grande engrossamento radicular, desvios no crescimento vertical e concentração na camada mais superficial do solo.

Já Queiroz-Voltan et al., (2000) não constataram alterações anatômicas nas raízes de dois cultivares de soja em estado de compactação do solo de até 1,50 g cm⁻³.

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1. Localização e histórico da área experimental

O experimento foi conduzido em área da Fazenda Experimental Lageado, Faculdade de Ciências Agronômicas – UNESP – em Botucatu, Estado de São Paulo. A localização da área experimental está definida pelas coordenadas geográficas: 22°49' S e 48°25' W de Greenwich, com altitude média de 770 metros e declividade de 3%.

O experimento foi instalado em uma área que vinha sendo cultivada há 5 anos, em SSD, com soja/aveia preta ou milheto/milho, sendo a soja e o milho cultivados no verão e a aveia preta e milheto no outono/inverno.

5.2. Características edáficas da área experimental

O solo da área experimental é classificado como Nitossolo Vermelho (EMBRAPA, 2006), de textura argilosa, com relevo plano à suave ondulado e com boa drenagem.

Em agosto de 2005, antes da demarcação das parcelas experimentais, foram abertas cinco trincheiras de 0,50 x 0,50 x 0,60 m (largura x comprimento x profundidade), escolhidas de maneira aleatória, para a coleta de amostras deformadas, nas profundidades de 0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40; 0,40-0,60 m, e não deformadas no centro das mesmas profundidades. Para as amostras deformadas determinou-se a

granulometria, conforme descrito em Embrapa (1997) e foram realizadas análises químicas para determinar a fertilidade do solo, de acordo Raij et al. (2001). Nas amostras não deformadas avaliaram-se a densidade do solo (Ds), a macroporosidade (Mp), a microporosidade (mp), a porosidade total (Pt) e a curva característica de água no solo (CR), pelo método do anel volumétrico (EMBRAPA, 1997).

O IHO foi determinado de acordo com o método proposto por Silva et al. (1994), coletando-se anéis volumétricos nas profundidades de 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m. Torrões de solo foram coletados nas camadas de 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m para avaliação da estabilidade de agregados via seca (KIEHL, 1979 e EMBRAPA, 1997).

Para detectar uma possível camada de impedimento físico ao crescimento radicular, foi determinada a campo, a resistência mecânica do solo à penetração (RP) ao longo do perfil, com auxílio de um penetrógrafo eletrônico, com célula de carga, desenvolvido por Santos e Lanças (1999). Um valor médio de RP foi obtido como resultado de 72 testes executados em pontos escolhidos aleatoriamente, procurando representar o mais fielmente possível toda a área experimental.

Os resultados das análises químicas, físicas e granulométricas estão apresentados no quadro 1. As figuras 1 e 2 representam a CR e o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO), respectivamente, nas condições do solo antes da instalação dos tratamentos.

Quadro 1. Características químicas e físicas do solo da área experimental antes da instalação dos tratamentos (08/2005).

Características químicas											
Camada	pH	MO	P-resina	Ca	Mg	K	H+Al	Al	SB	CTC	V
(m)	CaCl ₂	g dm ⁻³	mg dm ⁻³	-----mmol _c dm ⁻³ -----							%
0,00-0,05	4,7	27	4,6	16	8,6	1,6	45	0,4	26	71	36
0,05-0,10	4,5	22	2,5	10	5,8	0,6	49	0,7	16	66	26
0,10-0,20	4,5	22	3,0	9	6,1	0,4	50	0,6	15	66	24
0,20-0,40	4,2	20	1,1	4	3,2	0,3	68	1,6	7	75	9
0,40-0,60	4,0	20	0,7	1	2,1	0,3	92	4,1	2	95	3
Características físicas											
Camada	RP	Umidade ⁽¹⁾	Densidade do solo	Porosidade							
				Macro	Micro	Total					
(m)	(MPa)	(g g ⁻¹)	(g cm ⁻³)	----- (cm ³ cm ⁻³) -----							
0,00-0,05	1,24	0,235	1,68	9,71	35,70	45,41					
0,05-0,10	3,83	0,243	1,74	9,56	37,53	47,08					
0,10-0,20	3,73	0,257	1,75	8,35	38,25	46,61					
0,20-0,40	2,73	0,263	1,70	10,47	38,63	49,10					
0,40-0,60	1,99	0,267	1,66	10,08	39,09	49,17					
Características granulométricas											
Camada	Areia	Argila	Silte	Textura							
(m)	----- (g kg ⁻¹) -----										
0,00-0,05	376	483	141	Argilosa							
0,05-0,10	357	495	148	Argilosa							
0,10-0,20	338	508	154	Argilosa							
0,20-0,40	296	555	149	Argilosa							
0,40-0,60	314	538	148	Argilosa							
Estabilidade de Agregados											
Camada	Agregados > 2 mm	DMG	DMP	IEA							
(m)	(%)	----- (mm) -----									
0,05-0,10	70,81	1,16	2,25	85,89							
0,10-0,20	59,38	1,01	1,95	79,93							

⁽¹⁾ Umidade gravimétrica do solo no momento do teste de resistência à penetração.

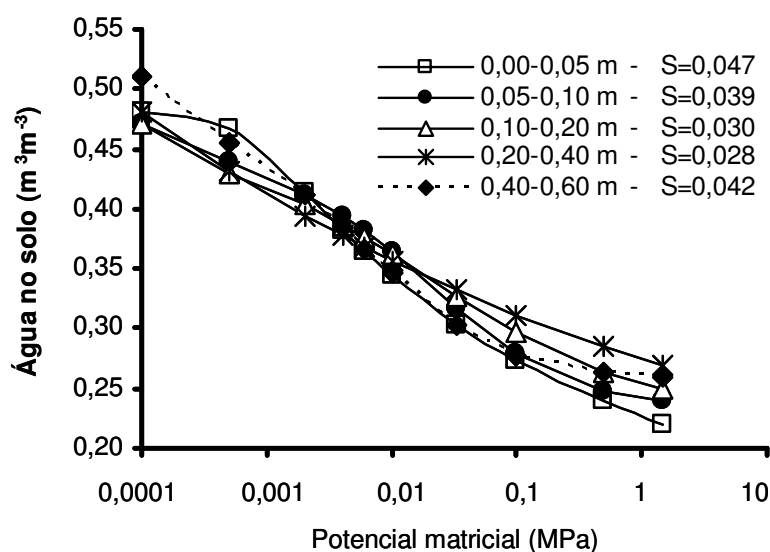


Figura 1. Curvas características da água no solo e índices S (Dexter, 2004a), referentes a amostragem realizada para caracterização da área, nas profundidades de 0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m.

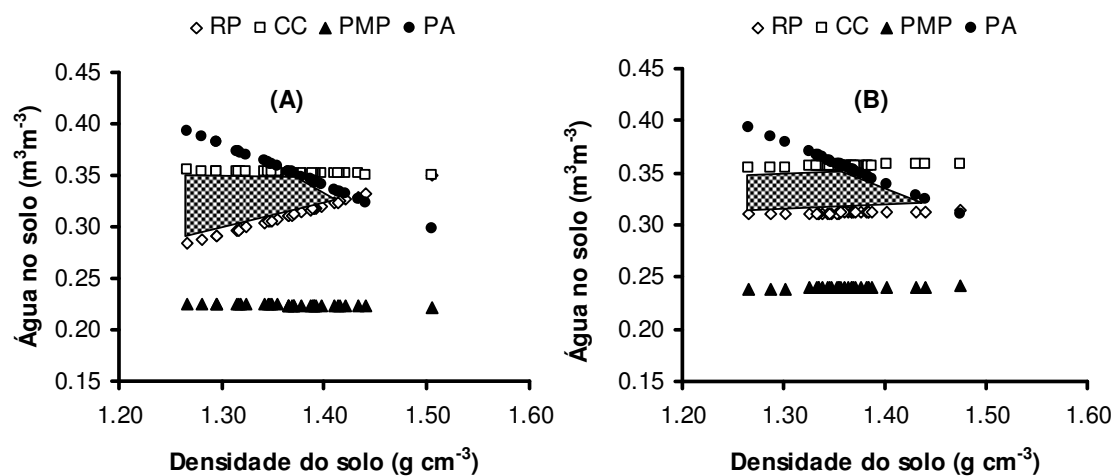


Figura 2. Variação do conteúdo de água em função da densidade do solo nos níveis críticos da capacidade de campo (CC = -0,01 MPa), ponto de murcha permanente (PMP = -1,5 MPa), porosidade de aeração (PA = 10 %) e resistência do solo à penetração (RP = 2 MPa), no centro das camadas 0,05-0,10 m (A) e 0,10-0,20 m (B).

5.3. Características climáticas da área experimental

O clima de Botucatu, baseado no sistema de classificação de Wilhelm Köppen, foi incluído no tipo Cfa, caracterizado como clima Temperado (Mesotérmico), com precipitação média anual em torno de 1514 mm e temperatura média do mês mais quente superior a 23,3 °C e a do mês mais frio 17,1 °C.

Os dados climáticos da região foram obtidos junto a uma Estação Meteorológica localizada ao lado da área experimental e estes se referem ao período entre 08/2005 a 07/2008 (Figura 3).

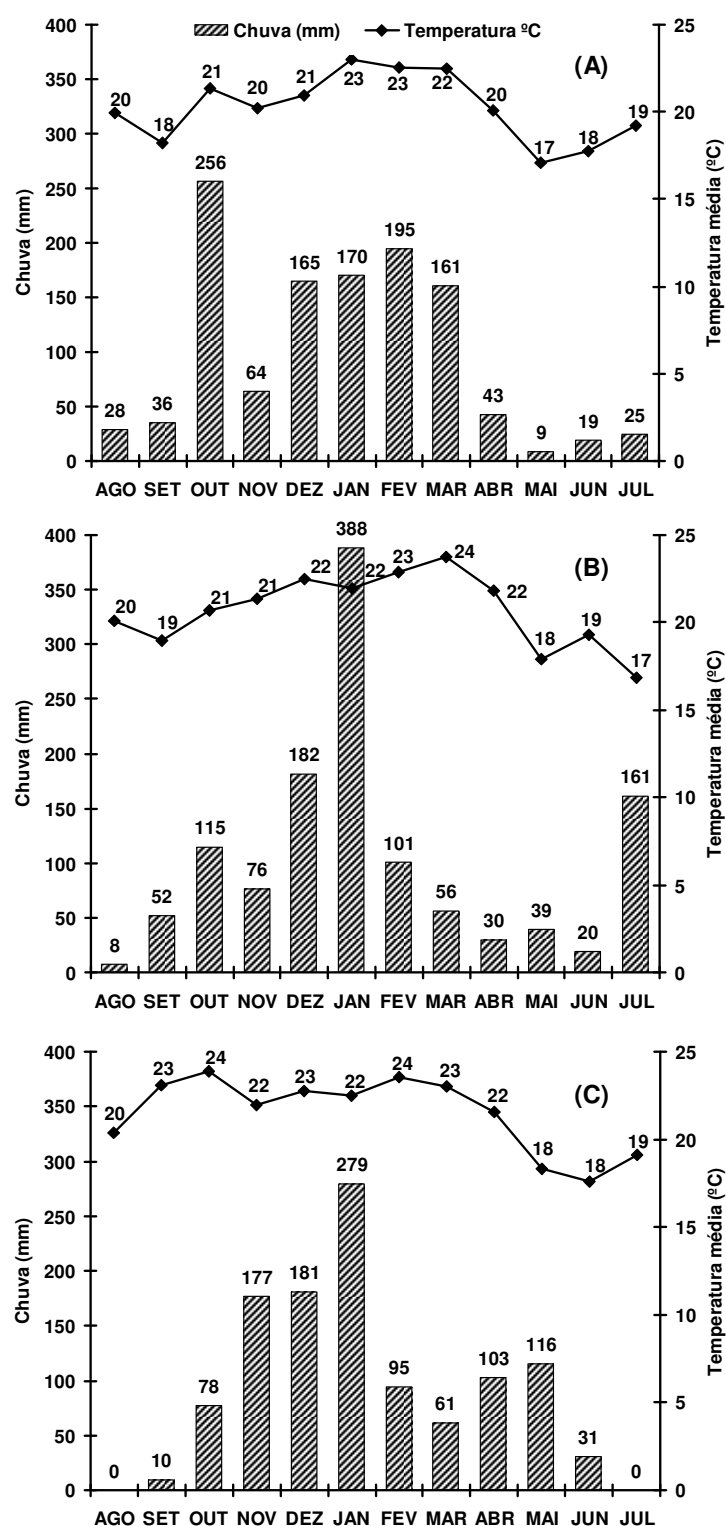


Figura 3. Total de chuva mensal (mm) e temperatura média mensal (°C) referente aos anos agrícolas 2005/2006 (A), 2006/2007 (B) e 2007/2008 (C), na Fazenda Experimental Lageado, em Botucatu-SP.

5.4. Tratamentos e delineamento experimental

Os tratamentos foram constituídos por Sistema de Semeadura Direta (SSD) e Escarificação (ESC) inicial, onde foram implantados 3 sistemas de rotação de culturas como mostra o Quadro 2. Inicialmente toda a área foi cultivada com milheto (*Pennisetum glaucum* L. Leek, var. ADR 500) como cobertura do solo na primavera. Em seguida foi cultivada a soja (*Glycine max* L. (Merril) no verão, e a partir desse momento, cada tratamento começou a se diferenciar com as culturas subseqüentes, como esta apresentado no Quadro 2.

As culturas para o sistema de rotação foram: a *Brachiaria* (*Brachiaria ruziziensis*), o sorgo (*Sorghum vulgare*), o milheto (*Pennisetum glaucum* L. Leek), o milho (*Zea mays* L.) e a mamona (*Ricinus communis* L.).

O delineamento experimental foi o de blocos ao acaso com quatro repetições em esquema de parcelas subdivididas. Os tratamentos principais foram constituídas de SSD, com e sem escarificação inicial, e os tratamentos secundários os 3 sistemas de rotação apresentados no Quadro 2.

As duas safras de soja e uma de milho foram cultivadas como safras de verão em todas as parcelas. As demais culturas foram cultivadas no período de outono-inverno e início da primavera. A escarificação do solo foi realizada somente antes da instalação dos tratamentos (08/2005).

Quadro 2. Sistema de rotação de culturas implantado sob Sistema de Semeadura Direta com e sem Escarificação inicial.

Manejo	Estação	Safras		
		2005/2006	2006/2007	2007/2008
C/ESC	Outono		Sorgo	Sorgo
	Inverno		Sorgo	Sorgo
	Primavera	Milheto	Sorgo	Sorgo
	Verão	Soja	Milho	Soja
C/ESC	Outono		<i>Brachiaria</i>	<i>Brachiaria</i>
	Inverno		<i>Brachiaria</i>	<i>Brachiaria</i>
	Primavera	Milheto	<i>Brachiaria</i>	<i>Brachiaria</i>
	Verão	Soja	Milho + <i>Brachiaria</i>	Soja
C/ESC	Outono		<i>Brachiaria</i> + Mamona	<i>Brachiaria</i> + Mamona
	Inverno		<i>Brachiaria</i> + Mamona	<i>Brachiaria</i> + Mamona
	Primavera	Milheto	<i>Brachiaria</i> + Mamona	<i>Brachiaria</i> + Mamona
	Verão	Soja	Milho + <i>Brachiaria</i>	Soja
S/ESC	Outono		Sorgo	Sorgo
	Inverno		Sorgo	Sorgo
	Primavera	Milheto	Sorgo	Sorgo
	Verão	Soja	Milho	Soja
S/ESC	Outono		<i>Brachiaria</i>	<i>Brachiaria</i>
	Inverno		<i>Brachiaria</i>	<i>Brachiaria</i>
	Primavera	Milheto	<i>Brachiaria</i>	<i>Brachiaria</i>
	Verão	Soja	Milho + <i>Brachiaria</i>	Soja
S/ESC	Outono		<i>Brachiaria</i> + Mamona	<i>Brachiaria</i> + Mamona
	Inverno		<i>Brachiaria</i> + Mamona	<i>Brachiaria</i> + Mamona
	Primavera	Milheto	<i>Brachiaria</i> + Mamona	<i>Brachiaria</i> + Mamona
	Verão	Soja	Milho + <i>Brachiaria</i>	Soja

ESC – escarificação inicial; **SSD** – Sistema de Semeadura Direta.

5.5. Instalação e condução do experimento (08/2005)

A área foi dividida em quatro blocos com 12 m de comprimento por 30 m de largura cada um. Cada parcela foi demarcada com a área útil de 180 m² (dimensões de 12 x 15 m), espaçadas uma das outras pela distância de 2,5 m. Em cada subparcela a área útil foi de 60 m² (dimensões de 12 x 5 m), espaçadas umas das outras por 1 m.

Os carregadores entre os blocos foram dimensionados com 12 m de largura para possibilitar as manobras com maquinário. Portanto, o experimento ocupou uma área total de 2340 m² (72 x 32,5 m).

5.5.1. Aplicação de corretivos de acidez (08/2005)

Com os resultados da análise química do solo (Quadro 1), verificou-se a necessidade de correção da acidez e a elevação da saturação por bases. Para tanto, considerou-se a camada de 0,00-0,20 m de profundidade e procederam-se os cálculos para atingir um $V\%=60$. Desta forma, procedeu-se no dia 16/08/2005 a aplicação de 2 t ha^{-1} de calcário dolomítico (PRNT 87%), aplicado com o auxílio de um equipamento específico (Nevoeiro 5002 S) para distribuição uniforme de corretivos na forma de pó, na superfície do solo, sem incorporação.

5.5.2. Escarificação do solo (08/2005)

Os resultados apresentados pela análise de caracterização física do solo confirmaram que o solo apresentava uma camada compactada, o que deu respaldo para no dia 17/08/2005 realizar a escarificação do respectivo tratamento. A escarificação do solo foi realizada com escarificador de sete hastes, montadas em duas barras paralelas sobre um quadro porta-ferramenta. As hastes, inclinadas para frente formando um ângulo de 25° , foram espaçadas entre si a 0,60 m, em cada barra, resultando em um espaçamento efetivo entre sulcos de 0,30 m, com profundidade aproximada de descompactação de 0,30 m. Essa operação foi efetuada com o solo apresentando consistência friável. Acoplado ao equipamento havia um rolo destorroador para quebrar os torrões maiores, diminuindo a rugosidade do terreno.

5.5.3. Semeadura e cultivo de milho (safra 2005/2006)

A semeadura do milho foi realizada no dia 13/09/2005 sem a aplicação de fertilizantes, pois supõem-se que o sistema de rotação forneça a quantidade de nutrientes suficientes ao desenvolvimento da cultura. Foi utilizada uma semeadora-adubadora de fluxo contínuo desenvolvida para semeadura direta, da marca Semeato, modelo THM 13 (Personale Drill), de arrasto, com 13 linhas espaçadas de 0,17 m, equipada com discos de corte de 16" de diâmetro, com discos duplos concêntricos sulcadores de 13" para adubo e sementes.

Utilizaram-se 40 kg ha⁻¹ de sementes de milho cultivar ADR 500 (Germinação = 85%). A densidade de semeadura foi definida em, aproximadamente, 450 sementes m⁻², as quais foram tratadas com os fungicidas Carboxin – Thiram (100 mL 50 kg⁻¹ de sementes, do produto comercial Vitavax - SC).

Aos 65 dias após a emergência (DAE) das plantas de milho, em 18/11/2005, fez-se à dessecação química das plantas com herbicida pós-emergente não seletivo Glyphosate (dose de 1,0 kg ha⁻¹), aplicado com pulverizador de barras motomecanizado, munido com bicos tipo leque, modelo 110-03, marca Teejet, espaçados em 0,5 m, com pressão de trabalho de 50 lbf cm⁻², e com volume de calda de 120 L ha⁻¹.

Também no dia 18/11/2005, antecedendo a dessecação da cultura do milho, foi realizado a amostragem aleatória de 6 pontos por subparcela para determinação da massa seca das plantas de milho e plantas daninhas utilizando-se um quadro de madeira com 0,25 m² (0,50 x 0,50 m). O material coletado foi seco em estufa de ventilação forçada à temperatura de 65°C por 72 horas, efetuando-se posteriormente a pesagem das amostras. Em seguida, as amostras de milho foram moídas, passadas por peneiras de 1 mm de malha, acondicionada em sacos de papel e armazenada para posterior análise química.

5.5.4. Semeadura e cultivo da soja (safra 2005/2006)

No dia 22/11/2005, após a dessecação do milho, semeou-se a soja, cultivar Embrapa 48, utilizando-se uma Semeadora-adubadora (descrita no item 5.5.3) com linhas espaçadas à 0,45 m. As sementes foram depositadas a 0,05 m de profundidade, sendo o adubo depositado logo abaixo, a 0,07 m.

Utilizou-se uma densidade de semeadura de, aproximadamente, 18 sementes m⁻¹ (Germinação=90%). As sementes foram tratadas com os fungicidas Cruiser (50 g) + Carboxin- Thiran e o inoculante (Biomax) na quantidade de 250 g para cada 50 kg de sementes. Além disso, as sementes receberam 200 mL de Cobalto + Molibdênio, para cada 50 kg de sementes.

A adubação de semeadura foi realizada com a formulação 4-20-20 na quantidade de 300 kg ha⁻¹. As adubações da soja foram feitas de acordo com a análise do solo (Raij et al., 1996) e seguiram as recomendações de espaçamentos e tratos fitossanitários.

O manejo das plantas daninhas, pragas e doenças foi realizado conforme a necessidade da cultura e aos 135 DAE, no dia 05/04/2006, efetuou-se a colheita de 3 linhas centrais (16,2 m²) com uma colhedora de parcelas automotriz.

5.5.5. Semeadura e cultivo da *Brachiaria* (safra 2005/2006)

A *Brachiaria* foi sobre-semeada na cultura da soja em 22/02/2006 quando a mesma se encontrava em estágio fisiológico de R7. A quantidade de sementes foi calculada de acordo com o valor cultural (V.C.) das sementes de *Brachiaria ruzizienses*, o qual considera-se a percentagem de germinação e a pureza das sementes. Neste caso, foram utilizados 600 pontos de V.C. ha⁻¹. O laudo da análise laboratorial das sementes, fornecido pelo produtor, apresentava 90% de germinação e 43,6 % de pureza. Assim, pelas equações 1 e 2 foi obtido a quantidade de sementes necessária para atingir 600 pontos de V.C.

$$\text{Pontos V.C. (para 1 kg de sementes)} = \{ \text{germinação (\%)} \times \text{pureza (\%)} \} / 100 \quad \text{(Equação 1)}$$

$$\text{Quantidade de Sementes ha}^{-1} \text{ (kg)} = (600 / \text{Pontos VC}) \quad \text{(Equação 2)}$$

Desta forma, utilizaram-se 15,3 kg de sementes ha⁻¹, as quais foram distribuídas manualmente na superfície do solo em linhas individuais para evitar a barreira proporcionada pelas folhas da cultura da soja, o que poderia promover má distribuição das sementes.

A *Brachiaria* permaneceu na área até sua dessecação química, em 27/11/2006 com a aplicação de Glyphosate (1 kg ha⁻¹ do produto comercial Roundup WG, Monsanto do Brasil Ltda.), aplicado com pulverizador de barras motomecanizado, munido com bicos tipo leque, modelo 110-03, marca Teejet, espaçados em 0,5 m, com pressão de trabalho de 40 lbf cm⁻², e com volume de calda de 190 L ha⁻¹ para semeadura do milho.

5.5.6. Semeadura e cultivo da mamona (safra 2006)

No dia 06/04/2006, após a colheita da soja, semeou-se a mamona, cultivar Lyra sobre a *Brachiaria* semeada anteriormente, utilizando-se uma Semeadora-adubadora (descrita no item 5.5.3), com 5 linhas espaçadas de 0,45 m. As sementes foram depositadas a 0,05 m de profundidade e não utilizou-se adubação.

Utilizou-se uma densidade de semeadura de, aproximadamente, 3,8 sementes m^{-1} (Germinação=70%). As sementes foram tratadas com o fungicida Carboxin e Thiran (150 ml para cada 50 kg de sementes).

A cultura permaneceu na área como planta de cobertura, pois devido ao período prolongado de baixas precipitações (Figura 3 A e B), ela não atingiu a maturação reprodutiva no momento do manejo químico (descrito no item 5.5.5) para a semeadura do milho.

5.5.7. Semeadura e cultivo do sorgo (safra 2006)

No dia 06/04/2006, após a colheita da soja, semeou-se o sorgo, híbrido Pionner 8118, utilizando-se a mesma Semeadora-adubadora (descrita no item 5.5.3) com 5 linhas espaçadas a 0,45 m. As sementes foram depositadas 0,04 m de profundidade sem adubação.

Utilizou-se uma densidade de semeadura de, aproximadamente, 8 sementes m^{-1} (Germinação=90%). As sementes foram tratadas com os fungicidas Carboxin e Thiran (150 ml por 50 kg de sementes) com o objetivo de atender um stand final de 178000 pl ha^{-1} .

A cultura foi a que mais sofreu os efeitos do período seco durante o inverno, não sendo possível a colheita de grãos. Após o início do período chuvoso (10/2006), a cultura rebrotou, mas não houve tempo suficiente para a produção de grãos, pois a mesma teve que ser dessecada quimicamente para semeadura do milho.

5.5.8. Semeadura e cultivo do milho + *Brachiaria* (2006/2007)

No dia 27/12/2006, após 1 semana da dessecação química das plantas de cobertura (sorgo, *Brachiaria* e *Brachiaria* + mamona), semeou-se o milho, cultivar DOW 2B710, utilizando-se a Semeadora-adubadora (descrita no item 5.5.3) com linhas espaçadas de 0,90 m. As sementes foram depositadas a 0,06 m de profundidade, sendo o adubo depositado logo abaixo, a 0,08 m.

Utilizou-se uma densidade de semeadura de, aproximadamente, 5,7 sementes m^{-1} (Germinação=98%) visando atingir 63000 plantas ha^{-1} .

A adubação de semeadura foi realizada com a formulação 8-28-16 na quantidade de 400 $kg\ ha^{-1}$. Na mesma operação, foi realizada a semeadura da *Brachiaria* na linha de semeadura do milho, na quantidade de sementes de 10% do peso de adubo, misturados em uma betoneira.

No dia 10/01/2007 foram aplicados 150 $kg\ ha^{-1}$ de Sulfato de Amônia (20% N e 23% S) visando suprir as necessidades iniciais da cultura, pois ela encontrava-se com clorose, devido ao período de intensas precipitações ocorridas no início de janeiro de 2007 (Figura 4 B).

O manejo das plantas daninhas e pragas foram realizados conforme a necessidade. Em 01/02/2007 fez-se a última aplicação de N em cobertura (60 $kg\ ha^{-1}$, fonte Uréia) e a aplicação de 30 $kg\ ha^{-1}$ de K_2O (Fonte KCl).

Aos 120 DAE, em 02/05/2007, colheu-se manualmente o milho em 3 linhas centrais de cada subparcela, numa área útil de 32,4 m^2 acondicionando as espigas em sacos de ráfia para posterior trilha. Após a trilha das espigas, foi pesada a massa de grãos e retirado amostras para determinação do teor de água. A produtividade foi corrigida para 13% de umidade nos grãos, através da equação 3.

$$\text{Produtividade} = (100 - \%U)/87 \times \text{produção} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde: produtividade = $kg\ ha^{-1}$ a 13 % de umidade; % U = umidade de colheita; produção = kg colhidos.

5.6.9. Semeadura e cultivo do sorgo e da mamona (safra 2007)

As baixas precipitações que ocorreram, após a semeadura do sorgo e da mamona na safra 2006, levaram a alteração da época de semeadura destas culturas na safra 2007, a qual foi realizada em 26/07/2007, após uma precipitação de 86 mm ocorrida entre os dias 23 e 25/07.

A semeadura foi realizada usando-se as mesmas cultivares utilizadas na safra anterior (descrito no item 5.6.6 e 5.6.7).

5.5.10. Semeadura e cultivo da soja (safra 2007/2008)

No dia 13/12/2007 fez-se a dessecação das plantas de cobertura utilizando 1,0 kg ha⁻¹ de Glifosato em 180 L de calda (Produto comercial Roundup WG, Monsanto S.A). No dia 15/12/2007, semeou-se a soja, cultivar Embrapa 48, utilizando-se uma Semeadora-adubadora (descrita no item 5.5.3) com linhas espaçadas de 0,45 m (Figura 17). As sementes foram depositadas a 0,05 m de profundidade, sendo o adubo depositado logo abaixo, a 0,07 m. No dia 17/12/2007, foi feita a aplicação de 2,0 L ha⁻¹ de Paraquat com o objetivo de evitar a competição entre a soja e a *Brachiaria*, que ainda não estava totalmente seca, devido ao efeito sistêmico do Glyphosate. Assim, o Paraquat, com seu efeito mais rápido, promoveu a seca das plantas sem que estas competissem com as plantas de soja, principalmente por luz e espaço físico.

Utilizou-se uma densidade de semeadura de, aproximadamente, 21 sementes m⁻¹ (Germinação=88%). As sementes foram tratadas da mesma forma e com os mesmos produtos utilizados na safra 2005/2006 (descrito no item 4.6.4)

A adubação de semeadura foi realizada com a formulação 4-14-08 na quantidade de 400 kg ha⁻¹. Esta formulação não é a mais indicada para a cultura da soja, por conter N, no entanto, ela foi utilizada, pois na época havia problemas de disponibilidade de adubos na Fazenda Experimental. A dose utilizada não forneceu a quantidade recomendada para a cultura (80 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 50 kg ha⁻¹ de K₂O), pois esperava-se que os sistemas de rotação, pelos de processos de ciclagem, fornecessem os nutrientes necessários à cultura.

Para o manejo de plantas daninhas, pragas e doenças, seguiram as recomendações de produtos para a cultura e aos 118 DAE, no dia 11/04/2008, efetuou-se a colheita de 3 linhas centrais (16,2 m²) com uma colhedora de parcelas automotriz.

5.6. Avaliações

5.6.1. Teor de matéria orgânica

Amostras foram coletadas com trado nas camadas de 0,00-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m antecedendo a semeadura do milho em agosto de 2005 (as quais serviram para caracterização da área), em novembro de 2006 e em novembro de 2007. Após secagem, as amostras foram destorroadas e passadas em peneira com malha de 2 mm, antes de serem submetidas às análises químicas. A matéria orgânica (MO) foi determinada pelo método Colorimétrico (Raij et al. 2001).

Foram determinados, para a caracterização da área, os atributos tais como o pH em CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹, Ca, Mg, K, Al, H + Al, P e MO do solo, de acordo com Raij et al. (2001).

5.6.2. Coleta, preparo das amostras e análise de raízes

Foram coletadas amostras de raízes nas camadas de 0,00-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m. As raízes das plantas de cobertura foram amostradas antes da dessecação química, no dia 26/11/2006 e em 28/11/2007, sendo coletadas 4 subamostras aleatórias em cada subparcela.

As raízes de milho e soja foram amostradas na linha e na entrelinha de semeadura, quando as culturas apresentavam-se em pleno florescimento, no dia 05/03/2007, aos 60 DAE e no dia 14/02/2008, aos 60 DAE, respectivamente. As amostras foram compostas por 4 subamostras, coletadas aleatoriamente em cada subparcela, sendo 2 na linha e 2 na entrelinha.

Para amostragem nas camadas de 0,00-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 utilizou-se um trado coletor de raízes confeccionado em aço com caneca coletora de solo + raiz com diâmetro interno de 0,067 m. Para amostragem das camadas de 0,20-0,40 e de 0,40-0,60 m foi utilizado outro trado com diâmetro interno de 0,047 m.

Após a coleta, o solo contendo as raízes foi acondicionado em sacos plásticos e congeladas a -4°C , para serem posteriormente lavadas e analisadas.

Precedendo a lavagem das raízes, as amostras foram colocadas em recipientes (baldes plásticos) contendo água para acelerar o descongelamento e amolecer o solo para facilitar o processo de lavagem. Após o descongelamento dos torrões, as amostras foram colocadas sob peneiras com malha de 1 mm e lavadas com jatos de água dirigidos para a retirada de todo o solo das amostras. Utilizaram-se pinças para separar as raízes das impurezas e dos restos culturais. Em seguida, as raízes, ainda contendo impurezas, foram colocadas em bacias com água, para que os fragmentos mais leves flutuassem e com isso fossem facilmente retirados com a pinça. Em seguida, as amostras foram acondicionadas em recipientes plásticos, submersas em solução aquosa contendo 30 % de álcool etílico para aumentar o tempo de conservação, e armazenadas sob refrigeração a 2°C .

As amostras de raízes foram submetidas a um “scanner” de leitura ótica (modelo Scanjet 4C/T, marca HP), na resolução de 250 dpi, e tiveram suas imagens digitalizadas e analisadas pelo programa “Win Mac Rhizo” versão 3.8-b (Regente Instrument Inc., Quebec, Canadá), para determinar a densidade de comprimento radicular ($\text{cm de raiz cm}^{-3}$ de solo), baseado no método de Tennant (1975) e o diâmetro médio radicular (mm). Em seguida as amostras de raízes foram colocadas em sacos de papel e secas em estufa de aeração forçada a 65°C por 48 horas, para determinação da massa seca radicular.

5.6.3. Coleta e preparo das amostras não deformadas

Para determinar a densidade do solo (D_s), a macro (M_p) e a microporosidade (m_p), a porosidade total (P_t) e a curva de retenção da água no solo (CR), foram coletadas amostras não deformadas de solo, por meio de anéis volumétricos com 0,050 m de altura por 0,048 m de diâmetro interno, nas camadas de 0,00-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, sendo uma amostra por profundidade. Para determinar o intervalo

hídrico ótimo (IHO), foram retiradas 8 amostras por ponto de amostragem, nas profundidades de 0,05-0,10 e de 0,10-0,20 m.

As amostras foram retiradas antes de iniciar o experimento (em agosto de 2005) para caracterização da área, no manejo das espécies de cobertura (25/11/2006), antes da semeadura do milho, e em 27/11/2007 (antes da semeadura da soja), em trincheiras abertas com dimensões aproximadas de 0,40 m de largura por 0,70 m de comprimento e 0,60 m de profundidade, utilizando um suporte de aço (“castelinho”) para os anéis que foram lubrificados com óleo comestível para evitar compactação do solo e marreta de 1 kg.

Após a coleta das amostras, ainda no campo, foi retirado o excesso de solo dos bordos dos anéis, com o auxílio de um estilete. Em seguida, os anéis volumétricos foram vedados com tampas plásticas para evitar possíveis danos e deformações, e armazenados em local protegido, até serem processados.

5.6.3.1. Propriedades físicas e físico-hídricas do solo

Para determinar a macroporosidade (Mp), microporosidade (mp), porosidade total (Pt), densidade do solo (Ds) e a curva característica de água no solo (CR) foi utilizada a metodologia proposta por Kiehl (1979) e Embrapa (1997).

As amostras não deformadas foram colocadas para saturar em bandejas plásticas com água até 2/3 da altura dos anéis. Para evitar perda de solo, foi colocado um tecido de poliéster, que permite apenas a passagem de água, no fundo de cada anel e fixado com atilho de borracha. Após 120 horas de imersão das amostras, tempo para que todos os poros do solo estivessem ocupados pela água, iniciou-se a drenagem das amostras, submetendo-as às tensões de -0,002; -0,004; -0,006; -0,01; -0,033; -0,1; -0,5 e -1,5 MPa.

Para obter os potenciais matriciais (Ψ_m) de -0,002, -0,004 e -0,006 MPa utilizou-se uma mesa de tensão adaptada de Topp & Zebtchuck (1979). Os potenciais mátricos de -0,01, -0,033, -0,1, -0,5 e de -1,5 MPa foram obtidos por meio de pressões aplicadas às amostras colocadas sobre placas porosas em câmara de Richards (KLUTE, 1986). A extração de água das amostras nas câmaras de Richards foi realizada por meio de um compressor com capacidade para 20 bar.

A água retida no solo em cada potencial foi determinada pesando as amostras no ponto de saturação, ou seja, no ponto de maior Ψ_m ($\Psi_m = 0$) e após aplicação de cada tensão. Após extração de água com tensão de -1,5 MPa e pesagem, as amostras foram colocadas para secar a 105 °C, por 48 horas, em estufa de circulação forçada, para em seguida serem determinados os pesos secos das amostras com volume de solo conhecido. De posse da umidade volumétrica, obtida em cada potencial matricial, a CR foi determinada por meio de ajuste dos dados originais, utilizando a função (Equação 4) proposta por van Genuchten (1980), e o software SWRC, desenvolvido por Dourado Neto et al. (1990). A equação considera o potencial matricial (Ψ_m), como variável independente e a umidade volumétrica (θ_v), como variável dependente.

$$\theta_v = \theta_r + ((\theta_s - \theta_r) / (1 + (\alpha\Psi)^n))^m \quad \text{(Equação 4)}$$

Onde: θ_v = umidade volumétrica do solo em cada potencial matricial ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); θ_r = umidade volumétrica do solo no potencial matricial de -1,5 MPa ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); θ_s = umidade volumétrica do solo saturado ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); Ψ = potencial matricial (MPa); α , n , m = coeficientes da equação.

A P_t foi calculada com a diferença entre a massa das amostras saturadas com água e secas a 105°C, e com volume conhecido das amostras.

O volume de microporos foi determinado como sendo o volume de água contida nas amostras saturadas após a aplicação do potencial matricial de -0,006 MPa (EMBRAPA, 1997). Desta forma, foi possível calcular o volume de macroporos pela diferença entre o volume de poros totais e de microporos ($M_p = P_t - m_p$).

Para calcular a D_s dividiu-se a massa das amostras secas a 105 °C pelo volume do anel volumétrico (BLAKE & HARTGE, 1986).

Após o ajuste das curvas de retenção utilizando a equação proposta por Genuchten (1980) (Equação 4), foi possível determinar o índice S para cada curva de retenção de água no solo, de acordo Dexter (2004), utilizando a equação 5.

$$S = (-n(\theta_s - \theta_r))((1 + 1/m)^{-(1+m)}) \quad \text{(Equação 5)}$$

Onde: S = coeficiente angular da curva de retenção de água no ponto de inflexão; θ_r = umidade volumétrica do solo no potencial matricial de -1,5 MPa ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); θ_s = umidade volumétrica do solo saturado ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); n , m = coeficientes da curva de retenção de água no solo (Equação 4).

5.6.3.2. Intervalo hídrico ótimo (IHO)

As amostras para a determinação do IHO foram coletadas em agosto de 2005, em 26/11/2006 e 27/11/2007, desenvolvendo-se a metodologia proposta por Silva et al. (1994) e Tormena et al. (1998) nas profundidades de 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m. Foi necessário coletar uma amostra para cada potencial da curva de retenção de umidade, para formar um gradiente de umidade entre as amostras, para realizar os testes de resistência mecânica à penetração e a determinação dos limites do IHO.

Os valores críticos de umidade do solo foram associados quanto ao potencial mátrico, resistência do solo à penetração (RP) e porosidade de aeração (PA), representados, respectivamente, pelo teor de água na capacidade de campo, ou teor de água do solo no potencial matricial de -0,01 MPa (θ_{cc}) (HAISE et al., 1955 e REICHARDT, 1988); pelo teor de água no ponto de murcha permanente, ou teor de água do solo no potencial de -1,5 MPa (θ_{PMP}) (RICHARDS, 1965 e SAVAGE et al., 1996); pelo teor de água do solo em que a resistência à penetração (θ_{RP}) atinge 2 MPa (TAYLOR et al., 1966); e pelo teor de água do solo em que a porosidade de aeração (θ_{PA}) é de $0,10 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ (GRABLE & SIEMER, 1968 e MEYER & BARRS, 1991).

Para determinar o IHO, as amostras foram divididas em 8 grupos de 48 (2 profundidades x 24 subparcelas). Cada grupo foi submetido a uma das seguintes tensões: -0,002, -0,004, e -0,006 MPa numa mesa de tensão adaptada de Topp & Zebtchuk (1979); e -0,01, -0,033, -0,1, -0,5 e -1,5 MPa, utilizando pressões aplicadas em câmaras com placas porosas, conforme Klute (1986).

Cessada a drenagem e atingido o equilíbrio hidráulico aparente, tempo que variou de 48 para a menor tensão, até 40 dias para a maior tensão, as amostras foram pesadas e, em seguida, foi determinada a resistência do solo à penetração, utilizando um

penetrógrafo eletrônico, conforme método descrito por Tormena et al. (1998). Em seguida, as amostras foram secas em estufa a $\pm 105^{\circ}\text{C}$, por 48 horas, para a determinação do conteúdo de água (umidade gravimétrica) (EMBRAPA, 1997). A umidade volumétrica (θ_v) foi obtida multiplicando-se a umidade gravimétrica pela densidade do solo (REICHARDT & TIMM, 2004).

Para obter os valores de θ_{CC} e θ_{PMP} utilizou-se o modelo matemático referente à equação 6, proposta por Silva et al. (1994), para ajuste dos dados originais, a qual incorpora a variável D_s na função empregada por Ross et al. (1991).

$$\theta_v = \exp(d + e D_s) \Psi^f \quad \text{(Equação 6)}$$

Onde: θ_v = umidade volumétrica do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); D_s = densidade do solo (g cm^{-3}); Ψ = potencial matricial; d , e , f = coeficientes da equação.

O penetrógrafo utilizado (Marconi-modelo MA 933) é composto por uma célula de carga, com capacidade nominal de 20 kg, acoplada na extremidade de um braço mecânico, movimentado verticalmente por uma rosca-sem-fim. Uma haste metálica, com diâmetro de 6 mm e com ponteira cônica com semi-ângulo de 30° e área da base de $0,1256 \text{ cm}^2$ foi utilizada para penetrar as amostras. A velocidade de deslocamento vertical da haste foi de $1,0 \text{ cm min}^{-1}$ até a profundidade de 0,04 m. As medidas obtidas a partir da superfície da amostra até 0,01 m de profundidade foram descartadas, pois a resistência aumenta até determinada profundidade e depois se torna constante (TORMENA et al., 1998). Foi obtido um valor de RP a cada segundo de penetração da ponteira, num total de 180 valores (0,03 m por amostra), dos quais foi retirado um valor médio da RP por amostra. As leituras foram obtidas por meio de um sistema automatizado de aquisição de dados e armazenados em arquivos de extensão “txt”.

O valor crítico de umidade do solo (θ) para que a RP não ultrapasse 2,0 MPa (θ_{RP}), para cada amostra com densidade conhecida foi obtido pela relação funcional entre a RP, teor volumétrico de água (θ_v) e a densidade do solo (D_s), ajustando os dados originais por meio da equação 7, proposta por Busscher (1990).

$$RP = a\theta_v^b Ds^c \quad \text{(Equação 7)}$$

Onde: RP = resistência à penetração (MPa); θ_v = teor volumétrico de água da amostra ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); Ds = densidade do solo (g cm^{-3}); a, b, c = coeficientes da equação.

Assim, para obter-se o valor de θ_{RP} , substitui-se RP, na equação 7, pelo valor de 2,0 MPa, considerado como limitante para efeito de cálculo do IHO.

Por fim, o valor de θ_{PA} foi obtido por meio da equação 8.

$$\theta_{PA} = \theta_{SAT} - 0,1 \quad \text{(Equação 8)}$$

Onde: θ_{PA} = teor de água do solo em que a porosidade de aeração é igual a 10% ($0,1 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$); $\theta_{SAT} = (1 - Ds/2,65)$, sendo Ds o valor da densidade do solo (g cm^{-3}) e 2,65 o valor da densidade média das partículas em solos argilosos (g cm^{-3}) (Imhoff et al., 2001).

O IHO foi calculado utilizando a planilha eletrônica do Excel, proposta por Leão & Silva (2004), pela diferença entre o limite superior e inferior dos teores de água em que ocorrem os parâmetros físicos considerados, sendo o limite superior o menor valor θ_v entre θ_{CC} e θ_{PA} , e o limite inferior o maior valor entre θ_{PMP} e θ_{RP} . Para o ajuste das equações 6 e 7 e obtenção dos coeficientes a, b, c, d, e, f, utilizou-se o software estatístico SigmaPlot 8.0.

5.6.4. Coleta, preparo e análise das amostras de agregados do solo

Nas trincheiras abertas para coleta dos anéis volumétricos, foram retirados, com o auxílio de espátula, torrões de solo com dimensões aproximadas de 0,05 m de altura por 0,15 m de comprimento e 0,10 m de largura, nas profundidades de 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos sendo posteriormente secas ao ar. Após secas, foram passadas por 2 peneiras sobrepostas, tendo a superior e a inferior malha de 8 e 4 mm, respectivamente. Para a avaliação da estabilidade dos agregados utilizou-se a porção que passou pela malha de 8 mm e ficou retida na de 4 mm.

Os agregados do solo foram avaliados quanto à estabilidade de agregados via seca, conforme Kemper & Chepil (1965). O conjunto foi composto por 6 peneiras com as seguintes malhas: 2,0, 1,0, 0,5, 0,25, 0,10 e 0,05 mm.

O tamisamento mecânico foi realizado por 15 minutos. Após esse tempo de peneiramento, supõe-se que os falsos agregados se desfaçam inteiramente e vão passando para as peneiras inferiores, onde serão retidos pelas malhas menores que suas dimensões. Finalmente, o material contido em cada peneira é pesado em balança com precisão de centésimo de grama. Uma sexta classe de agregados foi considerada como agregados menores 0,05 mm, ou seja, que passaram pela peneira de malha 0,05 mm e ficaram retidos no fundo do conjunto.

Obtido o peso do solo de cada classe de agregados, os valores de DMP (diâmetro médio ponderado) e DMG (diâmetro médio geométrico) foram calculados através das equações 9 e 10, respectivamente. Calculou-se, também, o índice de estabilidade dos agregados (IEA), utilizando a equação 11 (CASTRO FILHO et al., 1998).

Quanto maior for a porcentagem de agregados grandes, retidos nas peneiras com malhas maiores, maior será o DMP. O DMG representa uma estimativa da classe de agregados de maior ocorrência. O IEA representa a medida de agregação total do solo e não considera a distribuição por classe de agregados. Quanto maior a quantidade de agregados menores que 0,05 mm, tão menores serão os IEA. Essas propriedades foram calculadas por meio das seguintes equações.

$$\text{DMP} = \sum (x_i \cdot w_i) \quad (\text{Equação 9})$$

Onde: x_i = diâmetro médio das classes; w_i = proporção de cada classe em relação ao total.

$$\text{DMG} = \exp \frac{\sum w_p \cdot \log x_i}{\sum w_i} \quad (\text{Equação 10})$$

Onde: w_p = peso dos agregados de cada classe (g).

$$\text{IEA} = ((\text{peso da amostra} - \text{wp25})/\text{peso da amostra}) \cdot 100 \quad (\text{Equação 11})$$

Onde: wp25 = peso dos agregados menores que 0,25 mm.

5.6.5. Resistência do solo à penetração (RP)

Foi determinada utilizando-se um penetrômetro hidráulico-eletrônico desenvolvido por Santos e Lanças (1999) seguindo normas da ASAE, (1995). As medidas foram efetuadas antes da instalação do experimento (agosto/2005) para caracterização inicial da área experimental, em novembro de 2006 e em novembro de 2007.

O penetrômetro utilizado é acionado por pistão hidráulico com haste de 1" de diâmetro e 0,60 m de curso, com duplo comando, e estão ligadas ao trator através de mangueiras e engates rápidos. Para garantir a velocidade de penetração constante da haste, independente da resistência encontrada na penetração do solo, uma válvula hidráulica de regulação de vazão (velocidade de $1,82 \text{ m min}^{-1}$, ASAE S 313,2) foi instalada no circuito hidráulico.

A haste do penetrômetro possui diâmetro de 5/8" (15,875 mm) e ponteira na forma de um cone com ângulo sólido de 30° e diâmetro da base de 3/4" (19,05 mm). Uma célula de carga, com capacidade para 5000 N, instalada entre a haste do pistão e a haste do penetrômetro fornece a força de penetração.

Para registro dos dados utilizou-se um MicroLogger 21 X e acessórios que recebem as informações (em milivolts) da célula de carga e de um potenciômetro elétrico instalado em uma polia para determinar a profundidade de penetração. Os dados são descarregados em um computador, utilizando uma planilha do Excel para transformação dos dados (milovolts para Newtons e milovolts para metros) e cálculo da resistência do solo a penetração.

5.6.6. Produtividade de grãos

A produtividade média de grãos foi determinada colhendo-se plantas da área útil de cada subparcela. O teor de água dos grãos foi corrigido para 13 % pela equação 3.

5.7. Análises estatísticas

Os dados foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste t (LSD) no nível de 5% de probabilidade de acordo com procedimentos propostos por Gomes (1990) e de Mischon & Pinho (1996) utilizando o software Sisvar.

O ajuste do modelo matemático para determinar a curva característica da água no solo foi realizado utilizando o software SWRC (Soil Water Retention Curve – versão 3.00 beta) desenvolvido por Dourado Neto et al. (1990). Os limites do IHO referentes à curva de retenção e a resistência à penetração foram ajustados utilizando o software Sigma Plot 8.0. O IHO foi calculado utilizando planilha eletrônica do Excel desenvolvida por Leão & Silva (2004).

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Teor de matéria orgânica no solo

A análise da variância para os teores de matéria orgânica na avaliação inicial mostrou diferença significativa entre os manejos do solo apenas na camada superficial do solo (0,00-0,05) (Quadro 3), onde o sistema sem escarificação inicial apresentou maior teor de MO (Figura 4 A).

Após o primeiro ano de avaliação não foram constatadas diferenças significativas dos teores de MO entre os sistemas de manejo, havendo sim, uma redução dos teores quando comparado com a avaliação inicial de caracterização. Como era esperado, houve concentração dos teores de MO nas camadas superficiais, o que é reflexo do sistema de semeadura e aporte de material vegetal deixado pelos cultivos anteriores, que neste caso, não sofreram ação o escarificador, o que pode acelerar o processo de decomposição dos resíduos na superfície do solo.

Segundo Tormena et al. (2004), essa concentração da MO na superfície é importante para a qualidade do solo, uma vez que diferentes tipos de estresses relacionados com aplicação de agroquímicos, fertilizantes, chuva e tráfego de máquinas incidem diretamente sobre o solo. De acordo com Franzluebber (2002), a concentração de MO nas camadas superficiais, em SSD, permite maior estabilidade do sistema poroso. Segundo Dias Júnior (2000), a MO aumenta a capacidade do solo em suportar cargas sem sofrer compactação adicional, pois aumenta a força de união entre as partículas, aumentando a

estabilidade dos agregados, a porosidade total e a capacidade do solo reter água, além de diluir a carga sobre o solo, diminuindo a compactação.

Após o primeiro e o segundo ano de experimento, não houve diferença significativa entre os teores de MO (Quadro 3) para o manejo do solo (Figura 4) e sistemas de rotação (Figura 5). No entanto, houve aumento significativo do teor de MO quando se compararam os resultados da segunda (11/2006) e terceira (11/2007) avaliações com a primeira (11/2005). Desta forma, os resultados mostraram que os sistemas de manejo do solo e a rotação de culturas utilizadas proporcionaram aumentos no estoques de MO no solo de maneira similar, independentemente da espécie usada na rotação ou manejo do solo realizado inicialmente. O aumento da MO pode promover expressivas melhorias na qualidade do solo, o que resulta na retirada de CO₂ da atmosfera (BAYER, 2000), contribuindo para a mitigação do efeito estufa (SAMPSON & SCHOLLES, 2000). Segundo Follett (2001), o SSD constitui uma prática agrícola que promove o aumento do teor de carbono orgânico no solo (COS), tanto pelo aporte constante de material vegetal, como pela redução da taxa de decomposição da MO.

Os incrementos do teor de MO entre a caracterização da área (Figura 4 A) e a última coleta (Figura 4 C), ou seja, com três anos de repetição das rotações, em SSD, ocorreram em todos os tratamentos, o que está de acordo com Reeves (1997), que afirmou que nos sistemas com mínimo revolvimento do solo, verifica-se aumento dos teores de MO, principalmente na superfície.

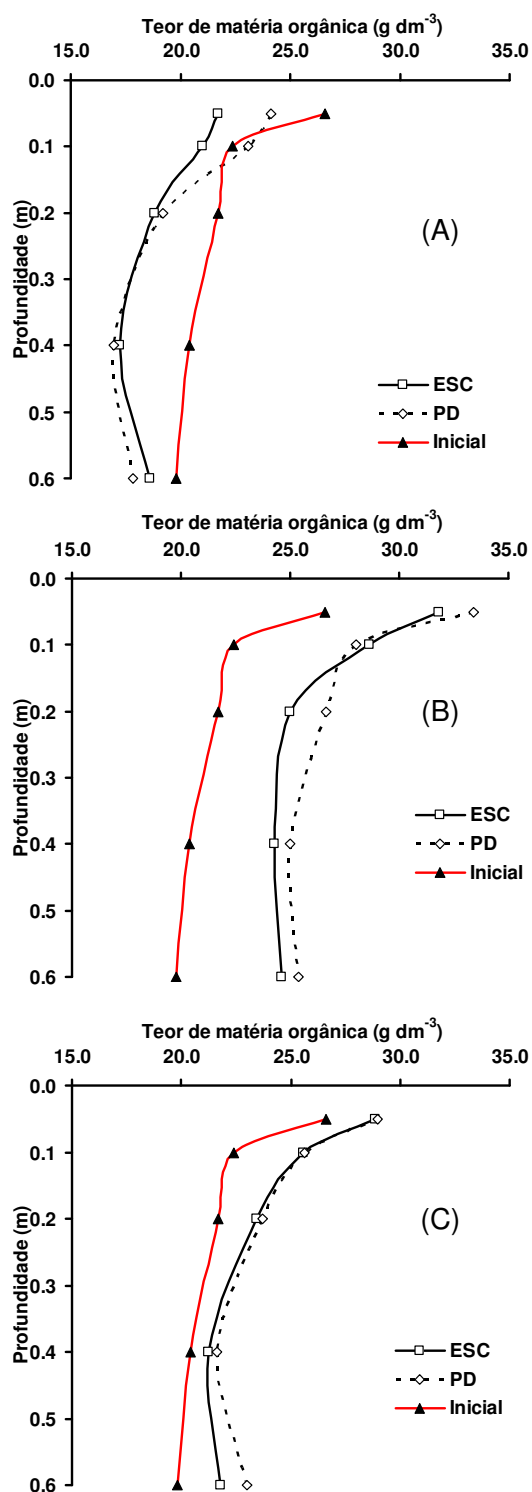


Figura 4. Teores médios de matéria orgânica no solo para os sistemas de manejo, referentes às amostras coletadas em (A – 11/2005); após primeiro ano (B – 11/2006) e após segundo ano (C – 11/2007).

Quadro 3. Análise da variância para os teores de MO no solo referente à amostragem em 11/2005, após primeiro ano (11/2006) e após segundo ano de experimento (11/2007).

Causas de variação	Profundidade do solo (m)				
	0,00-0,05	0,05-0,10	0,10-0,20	0,20-0,40	0,40-0,60
11/2005					
Valor de F					
Manejo do solo (M)	11,22 **	0,49 ns	0,16 ns	0,14 ns	1,14 ns
Sistemas rotação (R)	1,16 ns	0,36 ns	0,54 ns	0,56 ns	0,01 ns
M x R	0,16 ns	1,24 ns	0,35 ns	1,16 ns	0,57 ns
D.M.S.					
Manejo do solo (M)	1,54	3,25	2,11	1,50	1,64
Sistemas rotação (R)	1,89	3,98	2,59	1,83	2,00
11/2006					
Valor de F					
Manejo do solo (M)	1,85 ns	0,33 ns	2,21 ns	0,45 ns	0,35 ns
Sistemas rotação (R)	0,43 ns	1,38 ns	0,80 ns	0,03 ns	0,72 ns
M x R	0,48 ns	2,26 ns	2,33 ns	1,04 ns	1,03 ns
D.M.S.					
Manejo do solo (M)	2,46	2,19	2,32	2,35	2,72
Sistemas rotação (R)	3,02	2,68	2,84	2,87	3,33
11/2007					
Valor de F					
Manejo do solo (M)	0,01 ns	0,01 ns	0,08 ns	0,55 ns	3,68 ns
Sistemas rotação (R)	0,66 ns	0,11 ns	0,05 ns	1,16 ns	1,16 ns
M x R	0,83 ns	0,45 ns	0,04 ns	2,33 ns	1,51 ns
D.M.S.					
Manejo do solo (M)	2,66	2,35	2,13	1,02	1,35
Sistemas rotação (R)	3,26	2,88	2,60	1,25	1,66

ns – não significativo e ** significativo ao teste t (LSD) a 1% de probabilidade. M/S/So – milho / soja / sorgo; M/S/B – milho / soja / *Brachiaria* e M/S/B+Ma – milho / soja / *Brachiaria* + mamona.

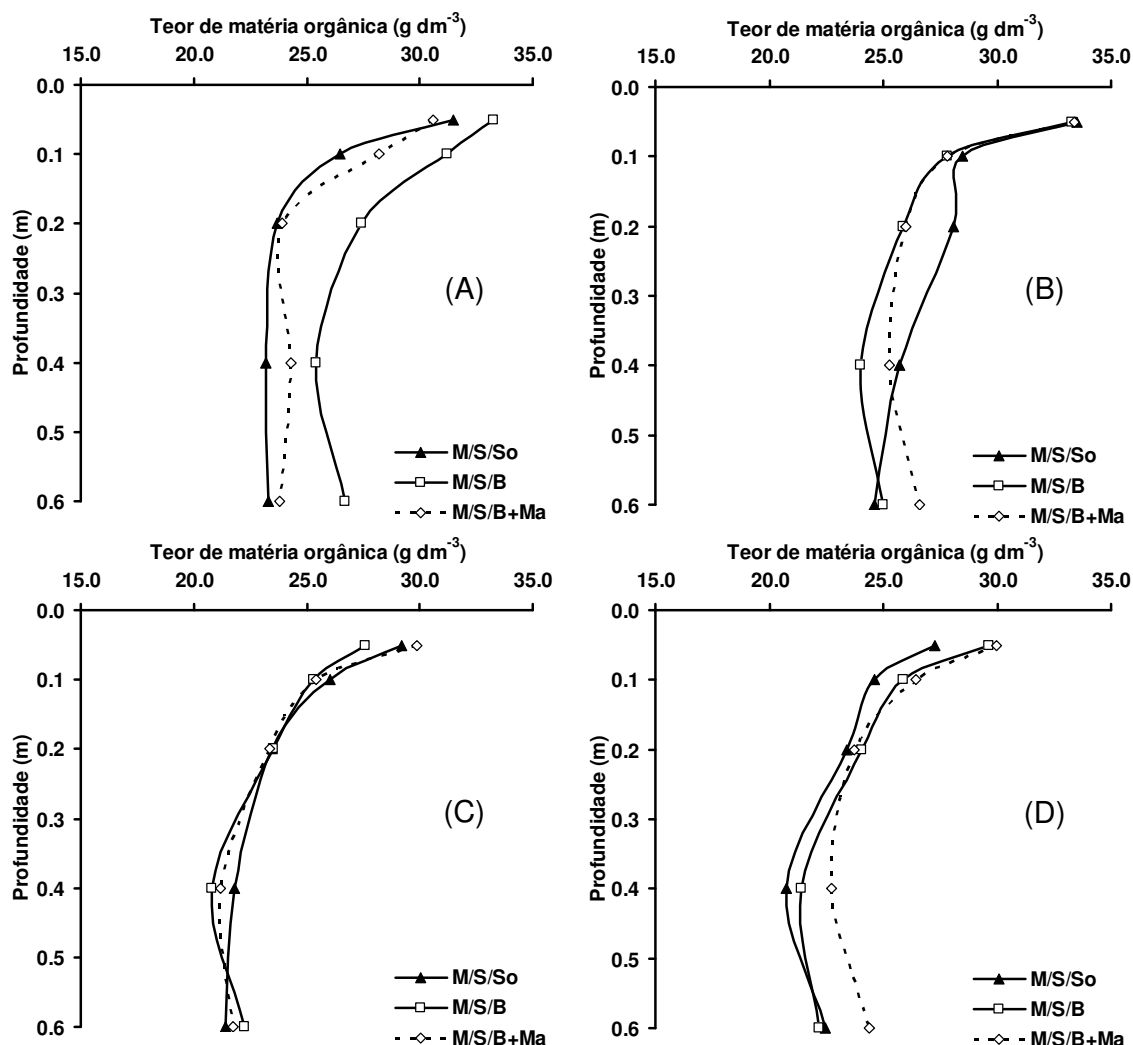


Figura 5. Teores médios de matéria orgânica no solo, referente às amostras coletadas após um ano (A e B – 11/2006) e após segundo ano de experimento (C e D – 11/2007) sob sistemas de produção com (A e C) e sem escarificação inicial (B e D). M/S/So – milho / soja / sorgo; M/S/B – milho / soja / *Brachiaria* e M/S/B+Ma – milho / soja / *Brachiaria* + mamona.

6.2. Quantidade de raízes

6.2.1. Raízes das plantas de cobertura (11/2006)

A análise da variância e os valores de massa seca radicular, comprimento radicular e diâmetro médio radicular das plantas de cobertura, após um ano de

experimento, antecedendo o cultivo do milho (amostragem em 11/2006), estão apresentados no Quadro 4 e Figura 6, respectivamente.

No primeiro ano de experimento, observa-se que nos tratamentos M/S/B e M/S/B+Ma houve a maior produção de matéria seca e comprimento radicular, independentemente do manejo utilizado para as camadas 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m (Quadro 5). De maneira geral, o sistema sem escarificação inicial do solo proporcionou a menor produção de raízes das plantas de cobertura, principalmente até a profundidade de 0,40 m. Abaixo dessa camada não houve diferença entre os manejos do solo e os sistemas de rotação (Quadro 4). Considerando que as raízes colonizando o perfil do solo é uma forma de aumentar o teor de MO em subsuperfície a médio ou longo prazo, visando a estruturação de solos degradados, além de facilitar a infiltração de água por canais deixados pelas mesmas e o crescimento radicular em solos compactados, ressalta-se a importância do sistema de rotação com a *Brachiaria*, a qual possui um sistema radicular bastante agressivo e vigoroso, em condições de déficit hídrico.

A concentração das raízes nas camadas até 0,20 m, para o sistema sem escarificação, e até 0,40 m, para o sistema com escarificação, evidenciou o efeito do manejo com escarificador, o qual rompe a camada compactada do solo, promovendo melhor exploração do solo pelo sistema radicular, principalmente de culturas que possuem raízes fasciculadas e vigorosas (Quadro 5).

Por outro lado, na presença de camada compactada, haverá contribuição para o confinamento das raízes nos primeiros centímetros do perfil do solo (Figura 6 A e D), mesmo após a escarificação do solo. Com melhorias da qualidade do solo, neste caso, principalmente a física, os solos mais bem estruturados normalmente favorecem o desenvolvimento radicular, pois o caminho natural do crescimento das raízes no solo é através dos macroporos ou espaços vazios entre os agregados, que em solos não compactados são interligados (VEPRASKAS, 1994).

O diâmetro médio radicular sofre influência da camada compactada do solo, como pode ser observado na (Figura 6 C e F) que apresenta raízes mais finas na camada de 0,10-0,20 m e ao passo que as raízes atravessam essa camada tornam-se mais grossas.

Quadro 4. Análise de variância para os parâmetros radiculares de plantas de cobertura referente à amostragem em 11/2006.

Causas de variação	Profundidade do solo (m)				
	0,00-0,05	0,05-0,10	0,10-0,20	0,20-0,40	0,40-0,60
Massa seca radicular (g dm ⁻³)					
Valor de F					
Manejo do solo (M)	0,30 ns	16,78 **	8,83 **	0,04 ns	1,88 ns
Sistemas rotação (R)	2,87 ns	13,00 **	8,77 **	1,52 ns	2,18 ns
M x R	0,31 ns	2,07 ns	2,56 ns	0,20 ns	2,15 ns
D.M.S.					
Manejo do solo (M)	0,36	0,16	0,09	0,04	0,02
Sistemas rotação (R)	0,44	0,19	0,10	0,05	0,03
Comprimento radicular (cm cm ⁻³)					
Valor de F					
Manejo do solo (M)	0,10 ns	12,46 **	8,44 **	0,48 ns	1,09 ns
Sistemas rotação (R)	2,61 ns	10,01 **	5,51 **	2,10 ns	2,86 ns
M x R	0,88 ns	2,60 ns	1,15 ns	0,25 ns	2,18 ns
D.M.S.					
Manejo do solo (M)	2,18	1,13	0,47	0,25	0,14
Sistemas rotação (R)	2,67	1,39	0,58	0,31	0,17
Diâmetro médio radicular (mm x 10 ⁻⁴)					
Valor de F					
Manejo do solo (M)	0,05 ns	0,57 ns	0,01 ns	5,88 **	0,30 ns
Sistemas rotação (R)	1,18 ns	0,56 ns	4,78 *	10,73 **	5,21 *
M x R	0,86 ns	0,15 ns	2,30 ns	0,46 ns	0,02 ns
D.M.S.					
Manejo do solo (M)	3,30	2,10	2,20	1,80	4,80
Sistemas rotação (R)	4,10	2,60	2,70	2,20	5,80

ns – não significativo; * e ** significativo ao teste t (LSD) a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente. M/S/So – milheto / soja / sorgo; M/S/B – milheto / soja / *Brachiaria* e M/S/B+Ma – milheto / soja / *Brachiaria* + mamona.

Quadro 5. Valores de massa seca radicular (g dm^{-3}), comprimento radicular (cm cm^{-3}) e diâmetro médio radicular ($\text{mm} \times 10^{-4}$) de plantas de cobertura referente à amostragem em 11/2006.

Sistemas de Rotação	C/ESC	S/ESC	Média
-----Massa seca radicular (g dm^{-3})-----			
0,05-0,10			
M/S/So	0,65	0,30	0,48
M/S/B	0,59	0,49	0,54
M/S/B+Ma	1,14	0,67	0,90
Média	0,79	0,49	-
0,10-0,20			
M/S/So	0,17	0,14	0,16
M/S/B	0,23	0,15	0,19
M/S/B+Ma	0,47	0,23	0,35
Média	0,42	0,17	-
----Comprimento radicular (cm cm^{-3})----			
0,05-0,10			
M/S/So	4,23	2,16	3,19
M/S/B	4,40	4,08	4,24
M/S/B+Ma	7,78	4,45	6,11
Média	5,47	3,56	-
0,10-0,20			
M/S/So	1,44	1,15	1,29
M/S/B	1,91	1,35	1,63
M/S/B+Ma	2,74	1,64	2,19
Média	2,03	1,38	-
--Diâmetro médio radicular ($\text{mm} \times 10^{-4}$)--			
0,10-0,20			
M/S/So	48	51	49
M/S/B	48	48	48
M/S/B+Ma	53	51	52
0,20-0,40			
M/S/So	54	57	55
M/S/B	50	51	51
M/S/B+Ma	52	55	53
Média	52	54	-
0,40-0,60			
M/S/So	58	57	58
M/S/B	52	51	51
M/S/B+Ma	50	49	49

M/S/So – milho / soja / sorgo; M/S/B – milho / soja / *Brachiaria* e M/S/B+Ma – milho / soja / *Brachiaria* + mamona.

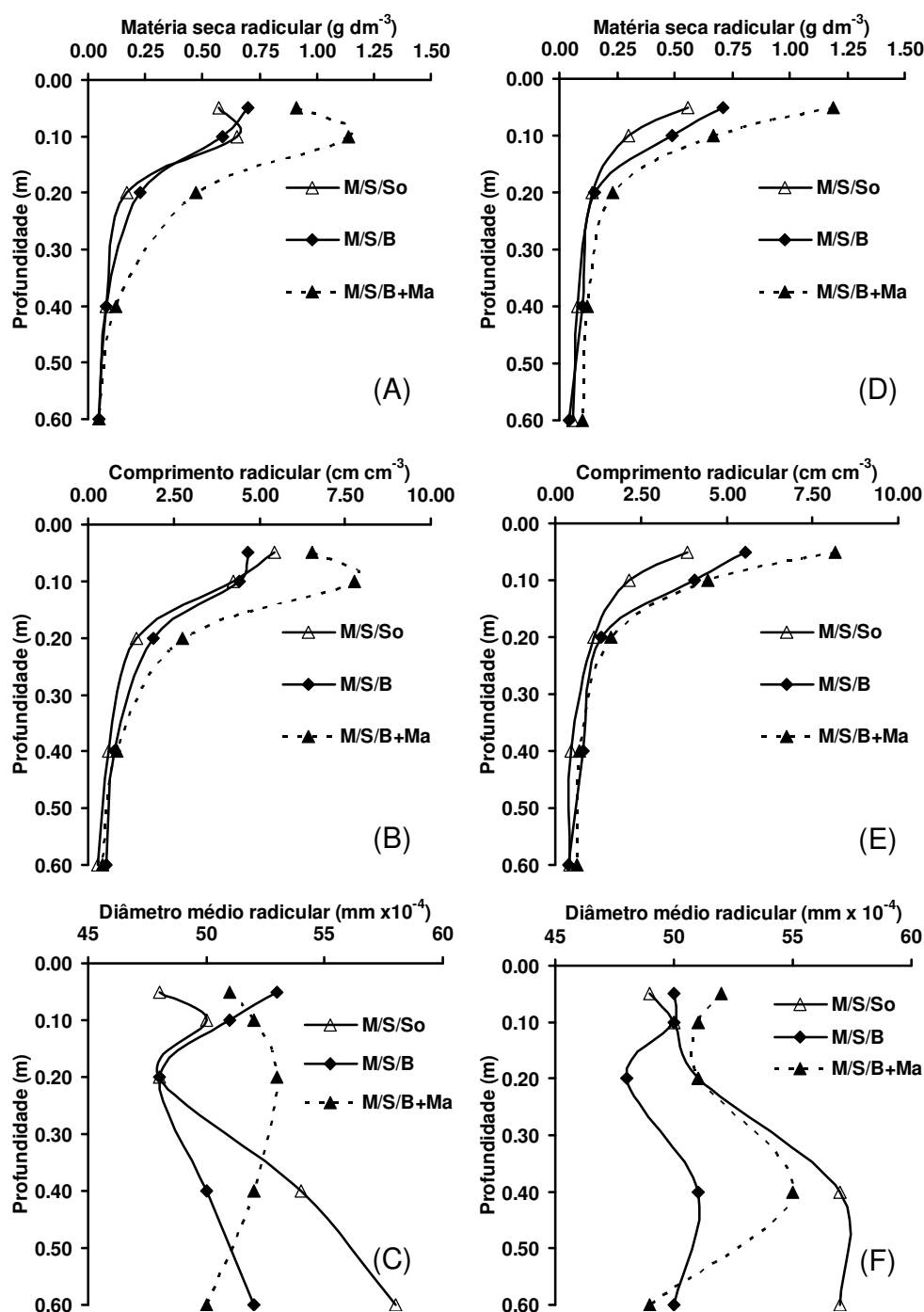


Figura 6. Massa seca de raízes, comprimento radicular e diâmetro médio radicular das plantas de cobertura, referente às amostragens no primeiro ano nos sistemas de rotação com (A, B e C) e sem escarificação inicial (D, E e F), respectivamente. M/S/So – milho / soja / sorgo; M/S/B – milho / soja / *Brachiaria* e M/S/B+Ma – milho / soja / *Brachiaria* + mamona.

6.2.2. Raízes das plantas de milho (02/2007)

A análise da variância e os valores da massa seca radicular, comprimento radicular e diâmetro médio radicular das plantas de milho, após um ano de experimento, estão apresentados no Quadro 6 e Figura 8, respectivamente.

Em geral, a escarificação inicial do solo promoveu o maior crescimento das raízes de milho, até 0,30 m de profundidade, coincidindo com o limite de atuação das hastes do escarificador. Uma das explicações para esse resultado no sistema sem escarificação seria que, com a compactação do solo, ocorreu a proliferação de raízes laterais e o engrossamento destas, comum quando há limitações físicas à penetração das raízes no perfil do solo (ZONTA et al., 2006), como pode ser constatado no Quadro 7 e Figura 7.

Contudo, o bom desenvolvimento radicular do milho, exceto na camada 0,05–0,10 m, no sistema sem escarificação (Figura 7), similar ao escarificado, deve-se, provavelmente, ao crescimento radicular das culturas anteriores, que ao morrerem deixaram canais no solo, orientando o crescimento em profundidade das raízes da cultura sucessora, promovendo a exploração mais uniforme do perfil do solo (RUSSEL, 1981; TORRES & SARAIVA, 1999). Ehlers et al. (1983) também afirmaram que em SSD os canais verticais contínuos servem como rotas, ligando a superfície do solo às camadas mais profundas, proporcionando maior colonização das raízes em profundidade. Esses bioporos, além do efeito físico, apresentam um microclima favorável ao crescimento das raízes, na medida em que há maior teor de MO, seja oriunda de exsudados radiculares ou mesmo do processo de decomposição das raízes mortas. A MO do solo exerce um importante papel no desenvolvimento das raízes, pois funciona como fonte e reserva de nutrientes e na complexação de metais como o Al e Mn, reduzindo o efeito tóxico para a planta (SANTOS & CAMARGO, 1999).

Assim, pode-se dizer que a utilização isolada da escarificação do solo não é suficiente para proporcionar maior crescimento radicular, fato também argumentado por Torres & Saraiva (1999), os quais enfatizaram que o aumento da Pt promovida pelos implementos mecânicos de mobilização do solo e de rompimento da compactação não garantem o maior crescimento das raízes, pois destroem a continuidade dos poros. Assim, o

cultivo de plantas de cobertura após a escarificação serve para retardar a acomodação das partículas do solo.

Dessa forma, a alternativa mais viável seria o uso da rotação de culturas com espécies que tenham sistema radicular agressivo e vigoroso, com capacidade de crescer em solos com alta resistência à penetração, tal como o evidenciado pela *Brachiaria*.

Quadro 6. Análise de variância para os parâmetros radiculares de plantas de milho referente à amostragem em 02/2007.

Causas de variação	Profundidade do solo (m)				
	0,00-0,05	0,05-0,10	0,10-0,20	0,20-0,40	0,40-0,60
-----Massa seca radicular (g dm ⁻³)-----					
Valor de F					
Manejo do solo (M)	0,38 ns	15,45 **	0,04 ns	0,09 ns	1,30 ns
Sistemas rotação (R)	0,19 ns	1,69 ns	0,34 ns	1,26 ns	2,21 ns
M x R	1,36 ns	2,82 ns	0,51 ns	2,05 ns	0,68 ns
D.M.S.					
Manejo do solo (M)	0,20	0,23	0,11	0,04	0,02
Sistemas rotação (R)	0,24	0,29	0,13	0,06	0,03
-----Comprimento radicular (cm cm ⁻³)-----					
Valor de F					
Manejo do solo (M)	1,13 ns	6,11 *	0,07 ns	0,13 ns	2,03 ns
Sistemas rotação (R)	0,03 ns	0,48 ns	1,72 ns	2,55 ns	2,36 ns
M x R	0,40 ns	1,38 ns	0,19 ns	1,34 ns	1,10 ns
D.M.S.					
Manejo do solo (M)	1,20	0,65	0,55	0,29	0,18
Sistemas rotação (R)	1,47	0,80	0,67	0,36	0,22
-----Diâmetro médio radicular (mm x 10 ⁻⁴)-----					
Valor de F					
Manejo do solo (M)	0,22 ns	0,96 ns	0,02 ns	0,52 ns	1,08 ns
Sistemas rotação (R)	0,18 ns	1,13 ns	1,71 ns	6,56**	2,77 ns
M x R	0,22 ns	1,35 ns	0,73 ns	0,91 ns	0,28 ns
D.M.S.					
Manejo do solo (M)	1,80	5,19	4,69	2,66	3,04
Sistemas rotação (R)	2,15	6,35	5,74	3,26	3,72

ns – não significativo; * e ** significativo ao teste t (LSD) a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente. M/S/So – milheto / soja / sorgo; M/S/B – milheto / soja / *Brachiaria* e M/S/B+Ma – milheto / soja / *Brachiaria* + mamona.

Quadro 7. Desdobramento da interação para massa seca radicular (g dm^{-3}), comprimento radicular (cm cm^{-3}) e diâmetro médio radicular ($\text{mm x } 10^{-4}$) de plantas de milho referente à amostragem em 02/2007.

Sistemas de Rotação	C/ESC	S/ESC	Média
-----Massa seca radicular (g dm^{-3})-----			
0,05-0,10			
Média	0,81	0,37	-
-----Comprimento radicular (cm cm^{-3})-----			
0,05-0,10			
Média	2,58	1,82	-
--- Diâmetro médio radicular ($\text{mm x } 10^{-4}$)--			
0,20-0,40			
M/S/So	56	58	57
M/S/B	53	51	52
M/S/B+Ma	52	54	53

M/S/So – milho / soja / sorgo; M/S/B – milho / soja / *Brachiaria* e M/S/B+Ma – milho / soja / *Brachiaria* + mamona.

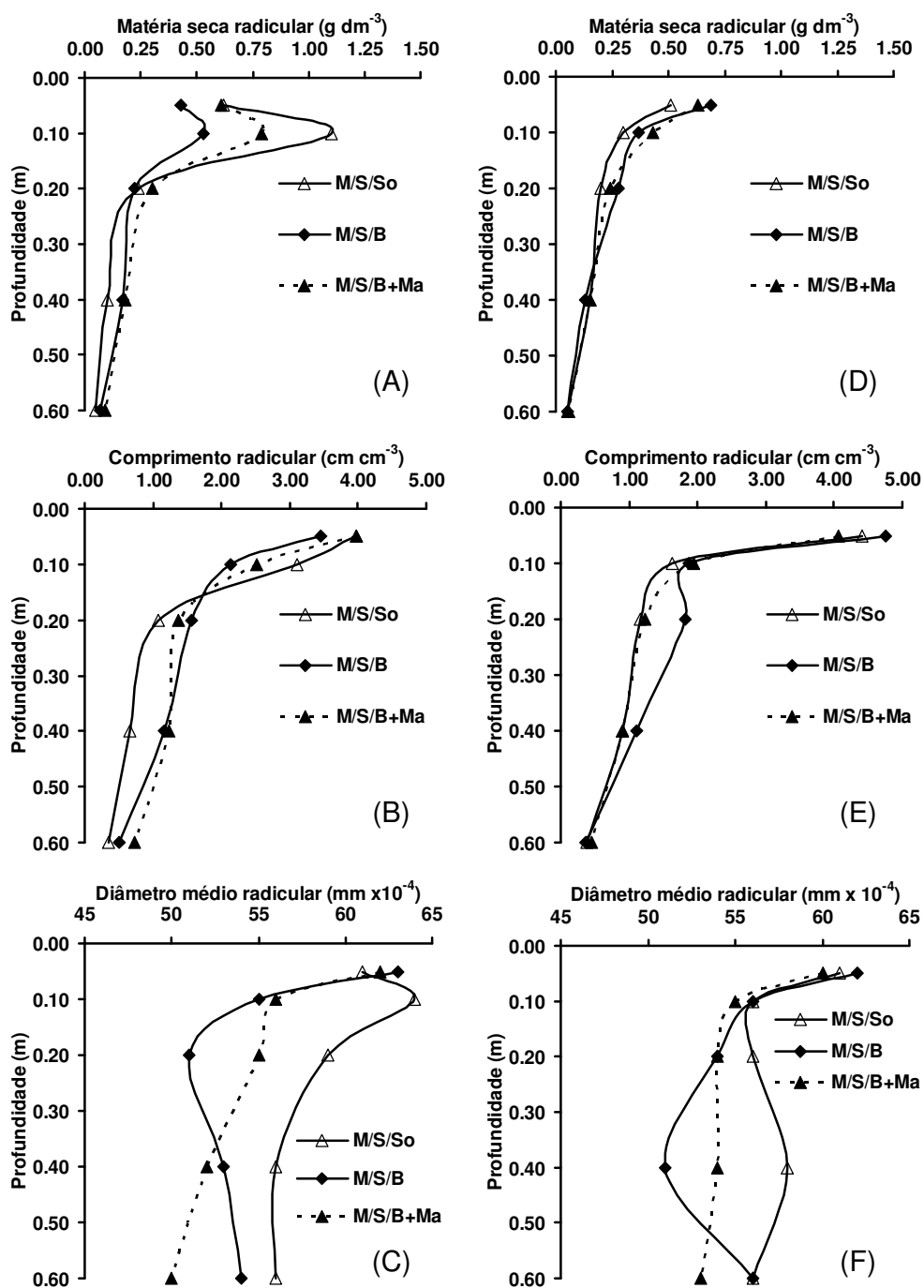


Figura 7. Massa seca de raízes, comprimento radicular e diâmetro médio radicular do milho, referente às amostragens no primeiro ano nos sistemas de rotação com (A, B e C) e sem escarificação inicial (D, E e F), respectivamente. M/S/So – milho / soja / sorgo; M/S/B – milho / soja / *Brachiaria* e M/S/B+Ma – milho / soja / *Brachiaria* + mamona.

6.2.3. Raízes das plantas de cobertura (11/2007)

A análise da variância e os valores de massa seca radicular, comprimento radicular e diâmetro médio radicular das plantas de cobertura, após o segundo ano de experimento, antecedendo o cultivo da soja (amostragem em 11/2007) estão apresentados no Quadro 8 e Figura 8, respectivamente.

Semelhante aos resultados obtidos na primeira avaliação para plantas de cobertura, os tratamentos onde a *Brachiaria* fez parte do sistema de rotação apresentaram a maior massa seca radicular e comprimento médio radicular (Quadro 9). No entanto, nesta avaliação houve diferença significativa em todas as camadas estudadas, o que sugere um efeito cumulativo favorável deixado pelos canais “bioporos” proporcionado pela morte das raízes dos cultivos anteriores. Contudo, a cultura do sorgo teve seu desenvolvimento muito prejudicado pelo período de baixas precipitações que ocorreram entre abril e outubro de 2007. Por sua vez, a *Brachiaria* mostrou-se mais tolerante ao período prolongado de estiagem, comum para essa época e região, produzindo quantidade satisfatória de massa seca aérea e radicular, bem como de comprimento médio radicular, conferindo uma maior exploração do solo.

A maior exploração das raízes das plantas de cobertura em profundidade, no último ano (Figura 8) em relação à primeira amostragem (Figura 6), pode ser explicada em parte, pela menor umidade do solo em superfície devido aos menores índices pluviométricos (Figura 3 C) e em parte pelas melhorias das condições estruturais do solo proporcionadas pelas rotações de culturas. Este fato evidencia as melhorias nas propriedades físicas do solo após alguns anos de rotação de culturas sob SSD, pois solos mais bem estruturados normalmente favorecem o desenvolvimento radicular em profundidade, pois o caminho natural do crescimento das raízes no solo é através dos macroporos ou espaços vazios entre os agregados.

Contudo, a planta também se adapta às condições de maior resistência à penetração de suas raízes, aumentando o diâmetro médio de suas raízes, como pode ser observado no quadro 9 onde este foi significativamente maior na camada de 0,05 a 0,20 m para o sistema de manejo sem escarificação inicial.

Além disso, a maior exploração das raízes de plantas de cobertura no perfil do solo é responsável pelo aumento da ciclagem de nutrientes que às vezes encontram-se indisponíveis ou inacessíveis à absorção pelas raízes de culturas produtoras de grãos.

Quadro 8. Análise da variância para os parâmetros radiculares de plantas de cobertura referente à amostragem em 11/2007.

Causas de variação	Profundidade do solo (m)				
	0,00-0,05	0,05-0,10	0,10-0,20	0,20-0,40	0,40-0,60
Massa seca radicular (g dm⁻³)					
Valor de F					
Manejo do solo (M)	1,22 ns	1,28 ns	0,37 ns	0,01 ns	0,06 ns
Sistemas rotação (R)	9,61 **	26,20 **	35,42 **	11,88 **	7,86 **
M x R	0,19 ns	0,56 ns	0,44 ns	0,11 ns	0,39 ns
D.M.S.					
Manejo do solo (M)	0,48	0,30	0,08	0,06	0,02
Sistemas rotação (R)	0,59	0,37	0,09	0,08	0,03
Comprimento radicular (cm cm⁻³)					
Valor de F					
Manejo do solo (M)	0,27 ns	0,17 ns	0,57 ns	0,13 ns	0,00 ns
Sistemas rotação (R)	16,39 **	15,89 **	12,70 **	14,05 **	4,40 *
M x R	0,11 ns	0,66 ns	0,02 ns	0,15 ns	0,05 ns
D.M.S.					
Manejo do solo (M)	2,52	2,08	0,74	0,40	0,21
Sistemas rotação (R)	3,09	2,56	0,91	0,49	0,26
Diâmetro médio radicular (mm x 10⁻⁴)					
Valor de F					
Manejo do solo (M)	1,72 ns	5,35 *	5,60 *	1,18 ns	0,30 ns
Sistemas rotação (R)	27,57 **	10,06 **	5,76 *	0,71 ns	1,45 ns
M x R	0,26 ns	1,09 ns	3,60 *	0,73 ns	0,84 ns
D.M.S.					
Manejo do solo (M)	2,40	2,42	2,22	9,33	4,49
Sistemas rotação (R)	2,94	2,97	2,71	11,42	5,49

ns – não significativo; * e ** significativo ao teste t (LSD) a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente. M/S/So – milho / soja / sorgo; M/S/B – milho / soja / *Brachiaria* e M/S/B+Ma – milho / soja / *Brachiaria* + mamona.

Quadro 9. Valores da massa seca radicular (g dm^{-3}), comprimento radicular (cm cm^{-3}) e diâmetro médio radicular ($\text{mm} \times 10^{-4}$) de plantas de cobertura referente à amostragem em 11/2007.

Sistemas de rotação	C/ESC	S/ESC	Média
Massa seca radicular (g dm^{-3})			
0,00-0,05			
M/S/So/Mi/So	0,60	0,18	0,39
M/S/B/Mi+B/B	1,47	1,20	1,34
M/S/B+Ma/Mi+B/B+Ma	1,57	1,50	1,54
0,05-0,10			
M/S/So/Mi/So	0,19	0,14	0,16
M/S/B/Mi+B/B	1,11	1,35	1,23
M/S/B+Ma/Mi+B/B+Ma	1,13	1,43	1,28
0,10-0,20			
M/S/So/Mi/So	0,12	0,09	0,10
M/S/B/Mi+B/B	0,42	0,44	0,43
M/S/B+Ma/Mi+B/B+Ma	0,44	0,38	0,41
0,20-0,40			
M/S/So/Mi/So	0,05	0,03	0,04
M/S/B/Mi+B/B	0,16	0,17	0,16
M/S/B+Ma/Mi+B/B+Ma	0,20	0,21	0,21
0,40-0,60			
M/S/So/Mi/So	0,02	0,02	0,02
M/S/B/Mi+B/B	0,06	0,08	0,07
M/S/B+Ma/Mi+B/B+Ma	0,07	0,06	0,07
Comprimento radicular (cm cm^{-3})			
0,00-0,05			
M/S/So/Mi/So	2,54	3,33	2,93
M/S/B/Mi+B/B	10,03	9,91	9,97
M/S/B+Ma/Mi+B/B+Ma	9,87	11,06	10,47
0,05-0,10			
M/S/So/Mi/So	2,17	1,56	1,86
M/S/B/Mi+B/B	7,88	7,72	7,80
M/S/B+Ma/Mi+B/B+Ma	6,81	8,80	7,80
0,10-0,20			
M/S/So/Mi/So	1,31	1,12	1,21
M/S/B/Mi+B/B	3,47	3,23	3,35
M/S/B+Ma/Mi+B/B+Ma	2,80	2,44	2,62
0,20-0,40			
M/S/So/Mi/So	0,49	0,30	0,39
M/S/B/Mi+B/B	1,62	1,56	1,59
M/S/B+Ma/Mi+B/B+Ma	1,19	1,24	1,22

continua...

Quadro 9. Continuação...

Sistemas de rotação	C/ESC	S/ESC	Média
Comprimento radicular (cm cm⁻³)			
0,40-0,60			
M/S/So/Mi/So	0,24	0,21	0,22
M/S/B/Mi+B/B	0,55	0,59	0,57
M/S/B+Ma/Mi+B/B+Ma	0,50	0,48	0,49
Diâmetro médio radicular (mm x 10⁻⁴)			
0,00-0,05			
M/S/So/Mi/So	42	39	40
M/S/B/Mi+B/B	50	49	49
M/S/B+Ma/Mi+B/B+Ma	50	49	49
0,05-0,10			
M/S/So/Mi/So	46	47	46
M/S/B/Mi+B/B	50	55	52
M/S/B+Ma/Mi+B/B+Ma	49	51	50
Média	48	51	-
0,10-0,20			
M/S/So/Mi/So	48	46	47
M/S/B/Mi+B/B	46	51	49
M/S/B+Ma/Mi+B/B+Ma	49	53	51
Média	48	50	-

M/S/So/Mi/So – milheto / soja / sorgo / milho / sorgo; M/S/B/Mi+B/B – milheto / soja / *Brachiaria* / Milho + *Brachiaria* / *Brachiaria* e M/S/B+Ma/Mi+B/B+Ma – milheto / soja / *Brachiaria* + mamona / Milho + *Brachiaria* / *Brachiaria* + mamona.

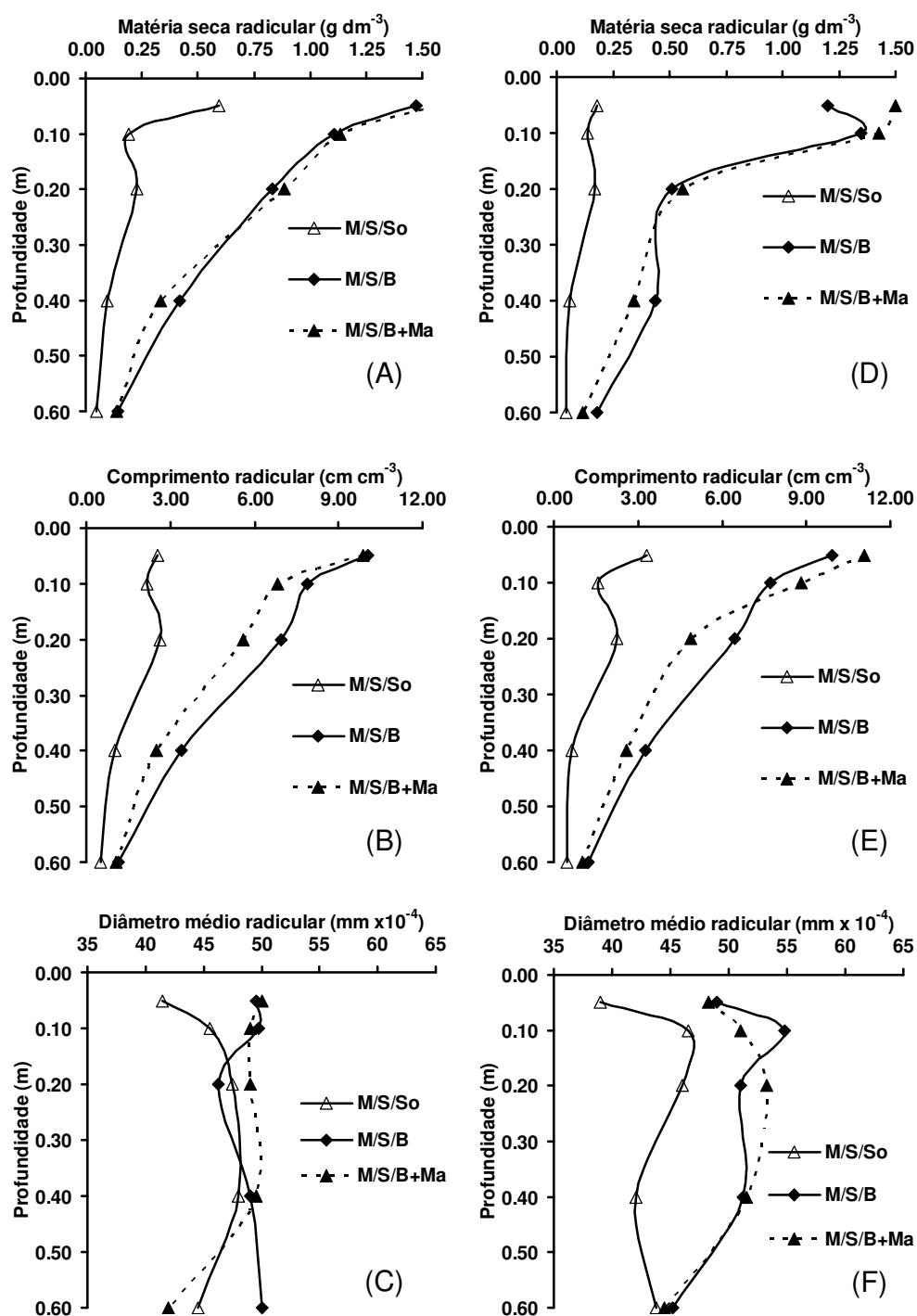


Figura 8. Massa seca de raízes, comprimento radicular e diâmetro médio radicular de plantas de cobertura, referente a amostragem em 11/2007 nos sistemas de rotação com (A, B e C) e sem escarificação inicial (D, E e F), respectivamente. M/S/So – milho / soja / sorgo; M/S/B – milho / soja / *Brachiaria* e M/S/B+Ma – milho / soja / *Brachiaria* + mamona.

6.2.4. Raízes das plantas de soja (02/2008)

A análise da variância e os valores da massa seca radicular, comprimento radicular e diâmetro médio radicular das plantas de soja, após o segundo ano de experimento (amostragem em 02/2008) estão apresentados no Quadro 10 e Figura 9, respectivamente.

A análise da variância não mostrou efeito significativo da massa seca radicular para o manejo do solo, sistemas de rotação e interação entre eles. Isto pode ser explicado em parte, pela melhoria das propriedades físicas do solo, proporcionando o desenvolvimento radicular da soja semelhante entre os manejos do solo e rotações de culturas (Quadro 10) e em parte, pela regularidade de distribuição de chuvas para o cultivo da soja (Figura 3 C).

O maior crescimento das raízes da soja nas camadas de 0,20-0,40 e a 0,40-0,60 m, envolvendo o manejo do solo sem escarificação, deve-se, provavelmente, ao maior teor de umidade, MO e ao crescimento radicular das culturas anteriores, que ao morrerem deixaram canais no solo, orientando o crescimento em profundidade das raízes da cultura sucessora, promovendo a exploração mais uniforme do perfil do solo (RUSSEL, 1981; TORRES & SARAIVA, 1999).

Comparando os tratamentos de manejo do solo e rotação de culturas durante o período de experimento, observa-se que, na camada de 0,00-0,40 m, ocorreu maior crescimento radicular para todas as culturas nos primeiros cultivos no sistema de manejo escarificado. No entanto, as diferenças foram diminuindo gradativamente e, ao final deste experimento, quanto ao desenvolvimento radicular, pode-se dizer que as diferenças foram nulas.

Quadro 10. Análise de variância para os parâmetros radiculares de plantas de soja referente à amostragem em 02/2008.

Causas de variação	Profundidade do solo (m)				
	0,00-0,05	0,05-0,10	0,10-0,20	0,20-0,40	0,40-0,60
Massa seca radicular (g dm ⁻³)					
Valor de F					
Manejo do solo (M)	0,82 ns	0,02 ns	0,22 ns	1,89 ns	0,00 ns
Sistemas rotação (R)	2,04 ns	0,79 ns	1,69 ns	2,81 ns	1,55 ns
M x R	0,92 ns	1,11 ns	0,30 ns	2,04 ns	2,46 ns
D.M.S.					
Manejo do solo (M)	0,34	0,38	0,08	0,06	0,01
Sistemas rotação (R)	0,42	0,46	0,10	0,07	0,02
Comprimento radicular (cm cm ⁻³)					
Valor de F					
Manejo do solo (M)	3,71 ns	0,11 ns	1,64 ns	3,06 ns	1,94 ns
Sistemas rotação (R)	1,03 ns	0,69 ns	1,55 ns	3,86 *	5,45 *
M x R	1,56 ns	1,15 ns	0,48 ns	2,83 ns	0,81 ns
D.M.S.					
Manejo do solo (M)	3,43	2,49	0,62	0,40	0,08
Sistemas rotação (R)	4,20	3,05	0,76	0,49	0,10
Diâmetro médio radicular (mm x 10 ⁻⁴)					
Valor de F					
Manejo do solo (M)	0,00 ns	0,08 ns	0,86 ns	0,40 ns	11,41 **
Sistemas rotação (R)	4,16 *	5,20 *	0,49 ns	0,79 ns	1,10 ns
M x R	0,79 ns	1,97 ns	0,22 ns	2,12 ns	7,37 **
D.M.S.					
Manejo do solo (M)	1,77	1,84	2,82	9,65	4,20
Sistemas rotação (R)	2,17	2,26	3,46	11,82	5,14

ns – não significativo; * e ** significativo ao teste t (LSD) a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente.

Quadro 11. Valores do comprimento radicular (cm cm^{-3}) e diâmetro médio radicular ($\text{mm x } 10^{-4}$) de plantas de soja referente à amostragem em 02/2008.

Sistemas de Rotação	C/ESC	S/ESC	Média
Comprimento radicular (cm cm^{-3})			
0,20-0,40			
M/S/So/Mi/So/S	0,17	0,27	0,22
M/S/B/Mi+B/B/S	0,38	1,34	0,87
M/S/B+Ma/Mi+B/B+Ma/S	0,61	0,54	0,58
Média	0,39	0,72	-
0,40-0,60			
M/S/So/Mi/So/S	0,14	0,17	0,16
M/S/B/Mi+B/B/S	0,25	0,39	0,32
M/S/B+Ma/Mi+B/B+Ma/S	0,23	0,24	0,23
Média	0,21	0,26	-
Diâmetro médio radicular ($\text{mm x } 10^{-4}$)			
0,00-0,05			
M/S/So/Mi/So/S	49	48	49
M/S/B/Mi+B/B/S	50	52	51
M/S/B+Ma/Mi+B/B+Ma/S	52	51	51
Média	50	50	-
0,05-0,10			
M/S/So/Mi/So/S	53	51	52
M/S/B/Mi+B/B/S	51	51	51
M/S/B+Ma/Mi+B/B+Ma/S	54	55	54
Média	53	52	-
0,40-0,60			
M/S/So/Mi/So/S	51	54	52
M/S/B/Mi+B/B/S	54	47	50
M/S/B+Ma/Mi+B/B+Ma/S	62	46	54

M/S/So/Mi/So/S – milheto / soja / sorgo / milho / sorgo / soja; M/S/B/Mi+B/B/S – milheto / soja / *Brachiaria* / Milho + *Brachiaria* / *Brachiaria* / Soja e M/S/B+Ma/Mi+B/B+Ma/S – milheto / soja / *Brachiaria* + mamona / Milho + *Brachiaria* / *Brachiaria* + mamona / Soja.

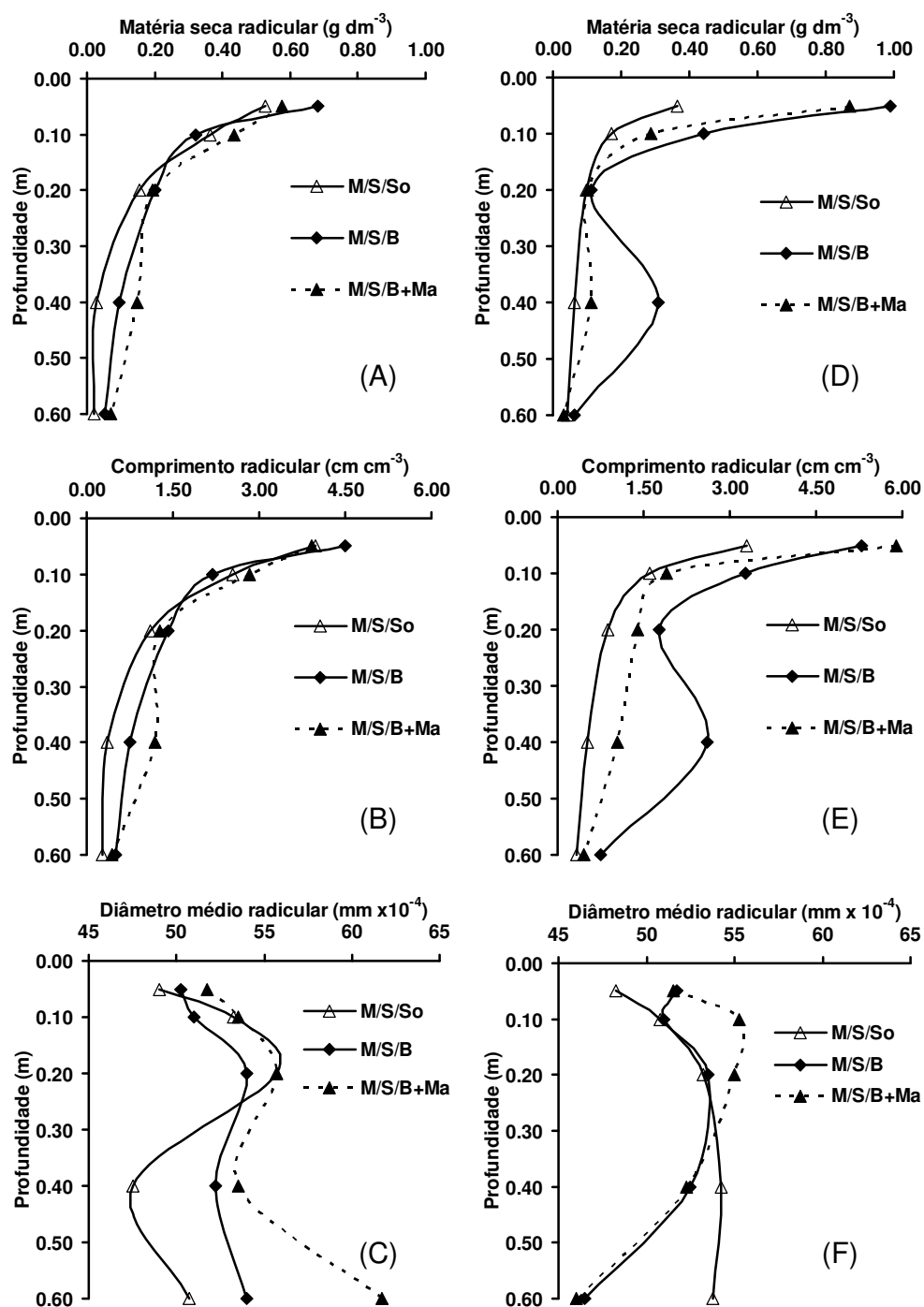


Figura 9. Massa seca de raízes, comprimento radicular e diâmetro médio radicular de plantas de soja, referente a amostragem em 02/2008 nos sistemas de rotação com (A, B e C) e sem escarificação inicial (D, E e F), respectivamente. M/S/So – milho / soja / sorgo; M/S/B – milho / soja / *Brachiaria* e M/S/B+Ma – milho / soja / *Brachiaria* + mamona.

6.3. Propriedades físico-hídricas do solo

6.3.1. Densidade do solo, macroporosidade, microporosidade e porosidade total (11/2006)

Os resultados referentes à porosidade total (Pt), macroporosidade (Mp) e microporosidade (mp), além da densidade do solo (Ds), das amostras coletadas após o primeiro ano do experimento (11/2006), estão apresentados no quadro 12.

Após o primeiro ano de experimento, não se observou diferença significativa entre os manejos do solo, sistema de rotação e muito menos interação entre manejo x sistema de rotação. No entanto, ao comparar estes dados com os obtidos na análise de caracterização, houve um aumento significativo da Mp e Pt com conseqüente diminuição da mp (Quadro 1 e Quadro 12), devido ao aumento do teor de matéria orgânica.

Dessa forma, quanto à porosidade, este solo não pode ser considerado ideal, pois de acordo com Azevedo & Dalmolin (2004), os solos devem apresentar 50 % de espaço poroso (20 a 30 % ar e 20 a 30% água) e 50 % de sólidos (45% minerais e 5% matéria orgânica) e que geralmente devem ocorrer um equilíbrio entre a distribuição da Mp e mp, principalmente se estes solos forem bem estruturados.

Em trabalhos semelhantes, Secco et al. (2005) observaram menor Mp em SSD contínuo por vários anos, na camada de 0,07-0,14 m, em solo de textura argilosa, em relação a área escarificada ou cultivada em sistema de cultivo convencional, com aração e gradagem. Por sua vez, Tormena et al. (2002) também observaram diferenças da Mp entre áreas mantidas em SSD e escarificadas, na camada de 0,00-0,10 m, em um solo de textura argilosa. Os autores constataram a Mp média de 14 e 8 % como resultado da escarificação e da manutenção da área em SSD sem intervenção mecânica, respectivamente. Segundo Torres & Saraiva (1999), em solos de textura argilosa é comum encontrar reduzida Mp, ou seja, abaixo de 10 %, devido à menor superfície específica das partículas. A probabilidade do volume de macroporos atingir valores críticos aumenta em solos argilosos conduzidos em SSD devido à ausência de mobilização do solo, e pela acomodação das partículas seja naturalmente ou por forças exercidas na superfície do solo (RICHART et al., 2005).

Em todos os tratamentos e camadas estudadas observou-se que a Mp foi superior ao limite de 10 % (ou seja, $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) estabelecido por Grable & Siemer (1968) como limite crítico de porosidade de aeração para o ótimo desenvolvimento radicular das plantas. O aumento dos valores de Mp e Pt refletiu-se de maneira geral na diminuição da Ds em relação aos valores iniciais, em todos os tratamentos, porém não houve diferenças significativas entre os manejos do solo e sistemas de rotação após o primeiro ano. Por sua vez, Abreu et al. (2004) também não constatarem efeito significativo da escarificação do solo na redução da Ds. Segundo Evans et al. (1996), a Ds, determinada pela técnica do anel volumétrico, é uma medida relativamente não sensível aos efeitos da escarificação sobre o solo.

Quadro 12. Macroporosidade, micro, porosidade total e densidade do solo, referente à amostragem realizada após o primeiro ano (11/2006).

Tratamento	Camada (m)				
	0,00-0,05	0,05-0,10	0,10-0,20	0,20-0,40	0,40-0,60
-----Macroporosidade (%)-----					
Manejo do solo					
Com escarificação	13,80	10,77	14,02	10,70	13,11
Sem escarificação	13,08	10,75	12,48	10,81	13,56
Sistemas rotação					
M/S/So	13,03	10,57	13,85	10,31	13,44
M/S/B	11,96	10,30	13,47	9,90	12,88
M/S/B+Ma	15,33	11,43	12,42	12,05	13,69
Valor de F ⁽¹⁾					
Manejo do solo (M)	0,11 ns	0,00 ns	0,85 ns	0,01 ns	0,23 ns
Sistemas rotação (R)	0,80 ns	0,25 ns	0,26 ns	1,31 ns	0,26 ns
M x R	0,77 ns	0,76 ns	0,95 ns	0,06 ns	3,83 *
D.M.S.					
Manejo do solo	4,66	2,89	3,52	2,42	1,97
Sistemas de rotação	5,71	3,54	4,31	2,97	2,41

continua...

Quadro 12. Continuação...

Tratamento	Camada (m)				
	0,00-0,05	0,05-0,10	0,10-0,20	0,20-0,40	0,40-0,60
-----Microporosidade (%)-----					
Manejo do solo					
Com escarificação	41,00	40,53	39,43	43,17	41,59
Sem escarificação	40,45	40,63	39,60	42,40	41,05
Sistemas rotação					
M/S/So	41,08	40,83	39,15	43,19	41,53
M/S/B	41,66	40,82	39,17	43,15	41,20
M/S/B+Ma	39,44	40,10	40,24	42,01	41,25
Valor de F⁽¹⁾					
Manejo do solo (M)	0,17 ns	0,01 ns	0,03 ns	0,83 ns	0,80 ns
Sistemas rotação (R)	0,98 ns	0,24 ns	0,46 ns	0,82 ns	0,11 ns
M x R	0,50 ns	0,22 ns	0,46 ns	0,15 ns	3,64 *
D.M.S.					
Manejo do solo	2,82	2,08	2,23	1,80	1,28
Sistemas de rotação	3,45	2,54	2,73	2,20	1,56
-----Porosidade total (%)-----					
Manejo do solo					
Com escarificação	54,80	51,31	53,45	53,87	54,71
Sem escarificação	53,53	51,39	52,08	53,21	54,61
Sistemas rotação					
M/S/So	54,11	51,39	53,01	53,51	54,97
M/S/B	53,62	51,12	52,64	53,06	54,07
M/S/B+Ma	54,76	51,53	52,66	54,06	54,94
Valor de F⁽¹⁾					
Manejo do solo (M)	0,81 ns	0,00 ns	1,30 ns	0,30 ns	0,01 ns
Sistemas rotação (R)	0,22 ns	0,05 ns	0,04 ns	0,23 ns	0,37 ns
M x R	0,63 ns	0,50 ns	2,21 ns	0,25 ns	0,51 ns
D.M.S.					
Manejo do solo	2,97	2,42	2,52	2,55	2,04
Sistemas de rotação	3,63	2,97	3,09	3,13	2,50

continua...

Quadro 12. Continuação

Tratamento	Camada (m)				
	0,00-0,05	0,05-0,10	0,10-0,20	0,20-0,40	0,40-0,60
	-----Densidade (g cm ⁻³)-----				
Manejo do solo					
Com escarificação	1,29	1,43	1,35	1,32	1,24
Sem escarificação	1,32	1,45	1,42	1,36	1,24
Sistemas rotação					
M/S/So	1,31	1,45	1,39	1,35	1,23
M/S/B	1,35	1,44	1,39	1,35	1,25
M/S/B+Ma	1,25	1,42	1,39	1,33	1,23
Valor de F ⁽¹⁾					
Manejo do solo (M)	0,95 ns	0,43 ns	3,27 ns	1,35 ns	0,00 ns
Sistemas rotação (R)	2,31 ns	0,40 ns	0,01 ns	0,08 ns	0,11 ns
M x R	1,06 ns	0,89 ns	1,56 ns	0,18 ns	1,91 ns
D.M.S.					
Manejo do solo	0,08	0,06	0,08	0,08	0,07
Sistemas de rotação	0,09	0,08	0,09	0,10	0,08

⁽¹⁾ ns e * não significativo e significativo a 5 % de probabilidade pelo teste t (LSD). M/S/So – milho / soja / sorgo; M/S/B – milho / soja / *Brachiaria* e M/S/B+Ma – milho / soja / *Brachiaria* + mamona.

6.3.2. Densidade do solo, macroporosidade, microporosidade e porosidade total (11/2007)

Os resultados referentes à porosidade total (Pt), macroporosidade (Mp) e microporosidade (mp), além da densidade do solo (Ds), das amostras coletadas após o segundo ano do experimento (11/2007), estão apresentados no quadro 13.

Após o segundo ano de experimento houve diferença significativa para Mp e Pt entre os manejos do solo somente na camada 0,05-0,10 m. O manejo do solo com escarificação apresentou a maior macroporosidade, efeito atribuído a escarificação inicial. Ainda para Mp, houve efeito significativo na camada 0,05-0,10 m para os sistemas de rotação, sendo esta maior quando da presença do sorgo no sistema. Este fato pode ser explicado em parte pelo maior diâmetro radicular do sorgo na camada superficial, principalmente da safra 2006 (Figura 7), o qual possivelmente tenha contribuído para formação de um número maior de macroporos.

Quando são comparados os resultados do segundo ano com a análise do primeiro ano, novamente observa-se que houve um aumento significativo da Mp e Pt com conseqüente diminuição da mp (Quadro 12 e Quadro 13). Na camada de 0,05 – 0,10 m, o manejo de solo sem escarificação inicial apresentou maior Ds, o que é explicado, pois nessa camada se concentra a maior resistência a penetração de raízes, além de mostrar o efeito positivo da ESC na camada compactada.

Mesmo não sendo considerado o solo ideal fisicamente, em nenhuma das avaliações foram observados valores de Mp abaixo de 10 %, valor este considerado crítico por Torres & Saraiva (1999) para o desenvolvimento de raízes da maioria das culturas de interesse agrônômico (Grable & Siemer, 1968). Dessa forma, o equilíbrio entre Mp e mp preconizado por Azevedo & Dalmolin (2004) esta longe de ser alcançado. Acredita-se que para este tipo de solo, de textura argilosa, seja praticamente impossível, principalmente quando é realizada alguma pratica agrícola, seja ela de qualquer natureza.

O aumento dos valores de Mp e Pt refletiu-se na diminuição da Ds em relação aos valores iniciais, em todos os tratamentos. Contudo, para a camada de 0,05 -0,10, ainda foi observado após 3 safras, efeito significativo da escarificação, onde o manejo do solo sem escarificação apresentou uma maior Ds (Quadro 13). Porém, para Evans et al. (1996), a Ds determinada pela técnica do anel volumétrico, é uma medida relativamente não sensível aos efeitos da escarificação sobre o solo, pois segundo Abreu et al. (2004), o efeito da mobilização do solo sobre a Mp não persiste devido à reconsolidação ocorrida em solos mobilizados e que recebem sucessivos ciclos de umedecimento e secagem.

Por outro lado, com três anos de cultivo de plantas de cobertura, independentemente da espécie e do manejo do solo utilizados, houve incremento do volume de macroporos. Assim, fica evidente o efeito benéfico do cultivo de plantas de cobertura na estruturação do solo e na recuperação, a médio ou longo prazo, de solos compactados, enquanto que a ação mecânica proporciona resultados a curto e médio prazo. Preocupados com isso, Tavares Filho et al. (2006) atentaram quanto à necessidade de se fazer um estudo minucioso da relação custo/benefício antes de realizar essa operação mecanizada para resolver supostos problemas de compactação em áreas em SSD, já que o custo é relativamente alto em função da maior potência requerida de trator.

Por sua vez, Kochhann et al. (2000) ressaltaram que a persistência dos efeitos da escarificação na descompactação do solo está relacionada com o cultivo de plantas com sistema radicular abundante, que ocupam as fendas geradas no solo pela operação mecânica, assegurando a estabilidade de agregados.

A diminuição da Ds provavelmente está relacionada com o incremento do teor de MO, entre a primeira e a terceira avaliações do experimento, que foi maior nos tratamentos envolvendo o manejo do solo com escarificação inicial e o cultivo de plantas de cobertura, principalmente com a utilização da *Brachiaria*. Segundo KIEHL (1979), a MO exerce influência direta na Ds por possuir menor densidade de partículas, e indireta na medida em que favorece a estruturação de solos compactados, pois, devido ao seu efeito cimentante, une as partículas individualizadas do solo em macroagregados, reduzindo a obstrução do espaço poroso. Além disso, a maior Mp está relacionada com a colonização de raízes, principalmente na camada superficial do solo, pois, ao morrerem, as raízes deixam canais no solo, também conhecidos como bioporos, que favorecem a difusão de oxigênio, as trocas gasosas e a infiltração de água (ABREU et al., 2004).

Quadro 13. Macroporosidade, micro, porosidade total e densidade do solo, referente à amostragem realizada após o primeiro ano (11/2007).

Tratamento	Camada (m)				
	0,00-0,05	0,05-0,10	0,10-0,20	0,20-0,40	0,40-0,60
-----Macroporosidade (%)-----					
Manejo do solo					
Com escarificação	16,37	13,22	13,60	13,33	14,53
Sem escarificação	17,89	9,20	11,99	14,10	13,45
Sistemas rotação					
M/S/So/Mi/So	20,39	11,60	12,98	12,70	12,43
M/S/B/Mi+B	16,08	11,11	11,62	13,52	13,36
M/S/B+Ma/Mi+B/B+Ma	14,92	10,92	13,78	14,93	16,18
Valor de F ⁽¹⁾					
Manejo do solo (M)	0,47 ns	10,92 **	1,43 ns	0,69 ns	0,71 ns
Sistemas rotação (R)	2,22 ns	0,11 ns	0,88 ns	2,02 ns	3,12 ns
M x R	3,93 *	0,56 ns	2,02 ns	1,64 ns	2,97 ns
D.M.S.					
Manejo do solo	4,69	2,55	2,83	1,93	2,68
Sistemas de rotação	5,74	3,13	3,47	2,37	3,29

continua...

Quadro 13. Continuação.

Tratamento	Camada (m)				
	0,00-0,05	0,05-0,10	0,10-0,20	0,20-0,40	0,40-0,60
-----Microporosidade (%)-----					
Manejo do solo					
Com escarificação	41,33	39,11	37,74	42,92 a	42,53
Sem escarificação	39,25	39,44	38,14	41,51 b	42,77
Sistemas rotação					
M/S/So/Mi/So	37,78	38,48	37,74	41,77	42,68
M/S/B/Mi+B	40,66	40,18	38,65	42,54	42,70
M/S/B+Ma/Mi+B/B+Ma	42,44	39,17	37,61	42,33	42,56
Valor de F ⁽¹⁾					
Manejo do solo (M)	3,95 ns	0,30 ns	0,27 ns	7,85 *	0,16 ns
Sistemas rotação (R)	6,71 **	2,61 ns	1,61 ns	0,83 ns	0,02 ns
M x R	8,47 **	0,98 ns	0,11 ns	3,38 ns	5,82 *
D.M.S.					
Manejo do solo	2,20	1,28	1,09	1,06	1,31
Sistemas de rotação	2,70	1,57	1,33	1,29	1,60
-----Porosidade total (%)-----					
Manejo do solo					
Com escarificação	57,70	52,33	51,46	56,25	57,06
Sem escarificação	57,14	48,33	50,12	55,61	56,22
Sistemas rotação					
M/S/So/Mi/So	58,17	50,08	50,73	54,47	55,11
M/S/B/Mi+B	56,74	51,28	50,20	56,06	56,07
M/S/B+Ma/Mi+B/B+Ma	57,35	50,09	51,39	57,27	58,75
Valor de F ⁽¹⁾					
Manejo do solo (M)	0,18 ns	15,32 **	1,26 ns	0,44 ns	0,63 ns
Sistemas rotação (R)	0,39 ns	0,72 ns	0,30 ns	2,78 ns	4,33 *
M x R	1,12 ns	1,01 ns	2,29 ns	1,47 ns	0,45 ns
D.M.S.					
Manejo do solo	2,78	1,98	2,51	2,04	2,20
Sistemas de rotação	3,41	2,42	3,07	2,50	2,69

continua...

Quadro 13. Continuação.

Tratamento	Camada (m)				
	0,00-0,05	0,05-0,10	0,10-0,20	0,20-0,40	0,40-0,60
Manejo do solo					
Com escarificação	1,28	1,36	1,36	1,36	1,32
Sem escarificação	1,29	1,44	1,41	1,36	1,34
Sistemas rotação					
M/S/So/Mi/So	1,23	1,41	1,40	1,38	1,35
M/S/B/Mi+B	1,28	1,39	1,39	1,36	1,35
M/S/B+Ma/Mi+B/B+Ma	1,35	1,40	1,37	1,34	1,29
Valor de F ⁽¹⁾					
Manejo do solo (M)	0,02 ns	14,52 **	2,86 ns	0,08 ns	0,81 ns
Sistemas rotação (R)	2,85 ns	0,22 ns	0,53 ns	0,65 ns	1,88 ns
M x R	4,28 *	0,49 ns	1,93 ns	5,29 *	3,24 ns
D.M.S.					
Manejo do solo	0,08	0,05	0,06	0,05	0,06
Sistemas de rotação	0,10	0,06	0,07	0,06	0,07

⁽¹⁾ ns e * não significativo e significativo a 5 % de probabilidade pelo teste t (LSD). M/S/So/Mi/So – milho / soja / sorgo / milho / sorgo; M/S/B/Mi+B – milho / soja / *Brachiaria* / milho + *Brachiaria* e M/S/B+Ma/Mi+B/B+Ma – milho / soja / *Brachiaria* + mamona / milho + *Brachiaria* / *Brachiaria* + mamona.

6.3.3. Curva de retenção de água no solo e Índice S (11/2006)

Após o primeiro ano de avaliação do experimento não foi possível identificar na figura 10, diferenças entre os manejos do solo e sistemas de rotação para as camadas estudadas.

No entanto, ao comparar com a curva característica de retenção de água realizada para a caracterização da área (Figura 1), pôde-se observar que houve um aumento na retenção de água, em todas as camadas estudadas, o que pode estar relacionado com o aumento do teor de MO. Dessa forma, solos com essa característica apresentam a curva de retenção de água com maior coeficiente angular (*S*), ou seja, maior ângulo formado pela tangente que passa pelo ponto de inflexão (DEXTER, 2004a).

O comportamento da curva de retenção de água referente ao sistema M/S/B+Ma sob manejo não escarificado do solo, na camada de 0,00-0,05 m, segundo REICHARDT & TIMM, (2004) é atribuído a solos menos compactados, apresentando o maior valor de S ($S=0,11$) entre os tratamentos avaliados (Figura 11 A).

A maior retenção de água para a rotação M/S/B+Ma no manejo não escarificado pode ser atribuída a manutenção da MO na superfície do solo, já que no sistema escarificado, esta pode ter sido incorporada ao solo, por menor que tenha sido a movimentação (Figura 5 B). Dessa forma, Dexter (2004), estudando o coeficiente angular no ponto de inflexão da curva de retenção, concluiu que o valor do índice S apresenta relação direta e indireta com a MO e com a compactação do solo, respectivamente. Assim, maiores valores de S indicam a existência de solos com melhor qualidade estrutural, o que possivelmente, neste caso, foi proporcionado pelo maior desenvolvimento radicular no sistema M/S/B+Ma (Figura 6 D).

Nas curvas de retenção de água na camada 0,05-0,10 m se destacaram os sistemas com a *Brachiaria*, pela maior retenção de água independente do manejo do solo. A maior retenção de água no ponto de murcha permanente (PMP), ou seja, no potencial matricial de -1,5 MPa, nas camadas superficiais (Figura 10 A, B e C) indicam ser nestas camadas onde existe um maior grau de adensamento, pois segundo Brady & Weil, (1999) e Cavalieri et al. (2006), o aumento da água retida no PMP, é devido a água restante, após ser submetida a tensão de -1,5 MPa, apresenta-se em um fino filme, retida por adsorção (com alta energia), ao redor dos colóides do solo. Assim, quanto maior o adensamento, maior será a quantidade de partículas por unidade de volume, aumentando a superfície de adsorção e, conseqüentemente, a umidade volumétrica do solo (BERG et al., 1997).

Na camada de 0,10-0,20 m ocorreram as maiores diferenças na curva de retenção nas baixas tensões, até -0,01 MPa, entre os manejo do solo e sistemas de rotação, indicando a maior variação no volume de macroporos, o qual passou em média, de 8,35 para 13,25 % nessa camada. Nas camadas de 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m (Figura 11 D e E) não houve efeito dos tratamentos, não sendo possível identificar diferenças quanto a retenção de água, após um ano de experimento. Fato que evidencia a ausência de efeito da escarificação e ação das raízes em profundidade, reduzindo o efeito das plantas de cobertura na estruturação do solo. Além disso, ocorre menor reorganização das partículas do solo nessa camada, devido as

cargas aplicadas em superfície ser dissipadas nos primeiros centímetros do perfil, além da menor intensidade dos ciclos de umedecimento e secagem, já que nessa profundidade o solo se mantém úmido por período de tempo maior.

O manejo de solo escarificado foi o que promoveu a curva de retenção de água com características de solo menos compactado, pois proporcionou a maior umidade do solo saturado, significando maior P_t , além de resultar em menor retenção de água em médias e altas tensões (maiores que $-0,01$ MPa), revelando redução na proporção de m_p . Outro indício de redução da compactação com esse tratamento foi a menor retenção de água no ponto de murcha permanente (PMP), ou seja, no potencial matricial de $-1,5$ MPa (Figura 10 C). Contudo, os valores de S foram considerados satisfatórios, pois segundo Dexter (2004), valores inferiores a $0,02$ estão claramente associados a solos com propriedades físicas muito pobres e o valor igual a $0,035$ é o limite mínimo para caracterizar o solo como tendo boa qualidade estrutural. Após o primeiro ano de experimento, pode-se afirmar, com base no índice S , que todos os tratamentos melhoraram as condições hídricas do solo para o aumento da retenção de água.

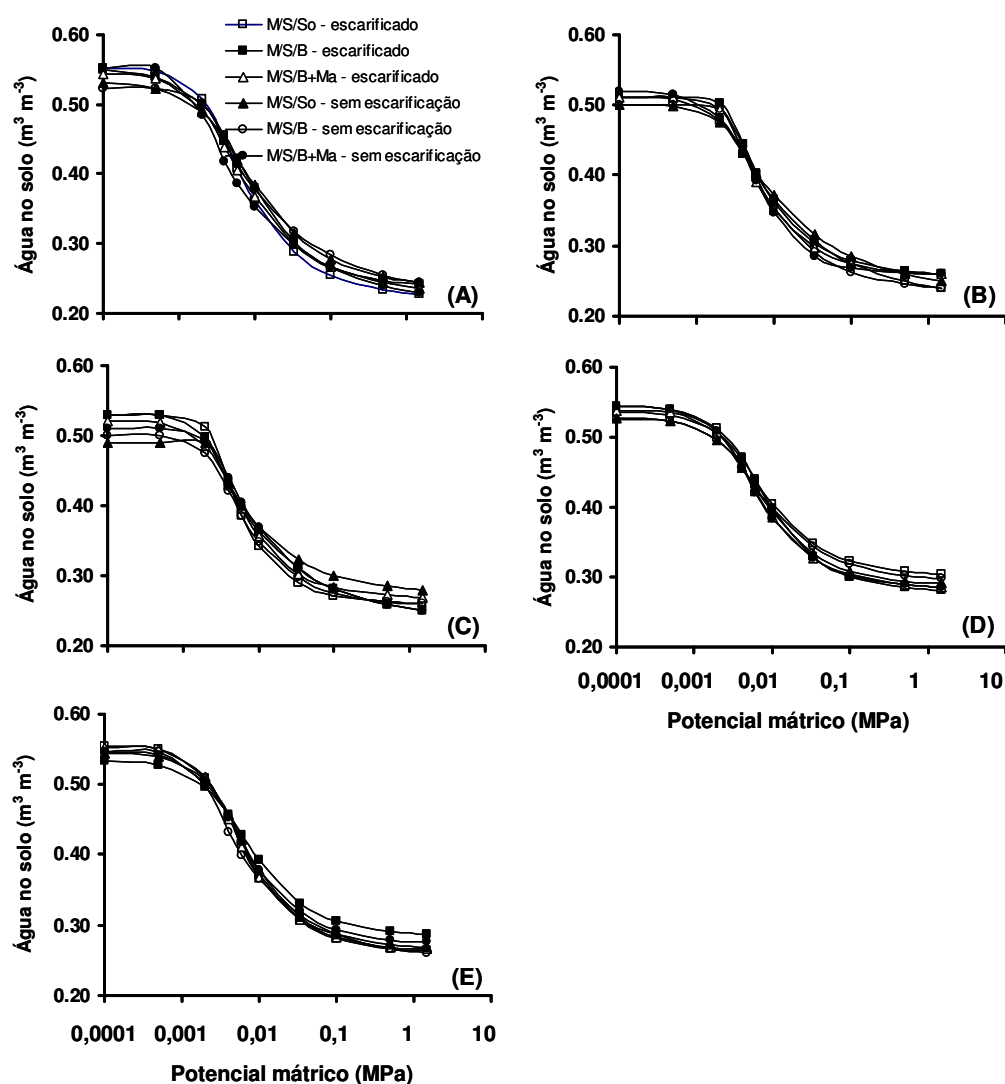


Figura 10. Curvas características da água no solo, referentes à amostragem realizada após o primeiro ano do experimento (11/2006), nos diferentes tratamentos envolvendo os sistemas de rotação de culturas e escarificação, nas camadas de 0,00-0,05 m (A); 0,05-0,10 m (B); 0,10-0,20 m (C); 0,20-0,40 m (D) e 0,40-0,60 m (E). M/S/So – milho / soja / sorgo; M/S/B – milho / soja / *Brachiaria* e M/S/B+Ma – milho / soja / *Brachiaria* + mamona.

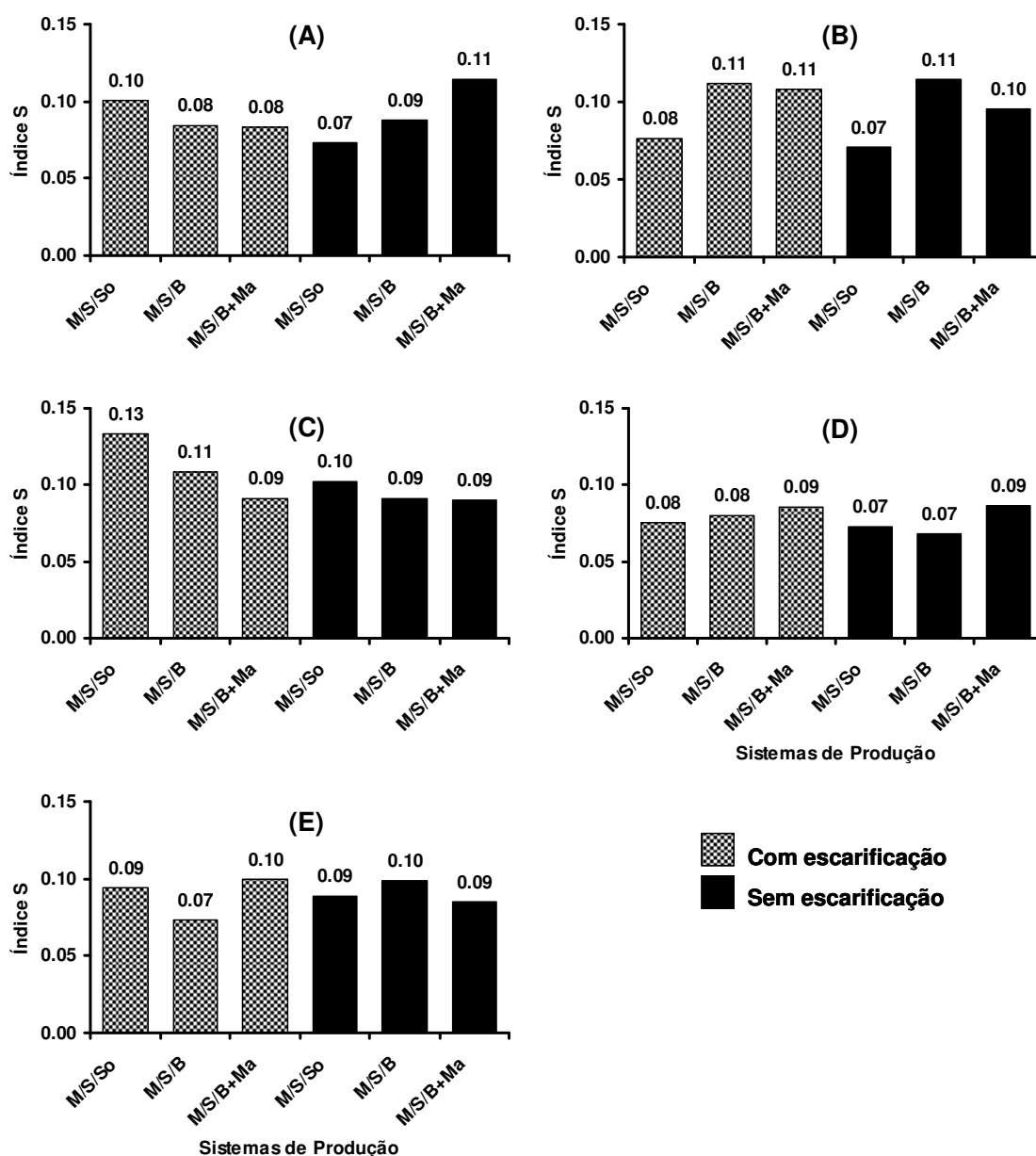


Figura 11. Valores de S para as amostras coletadas após o primeiro ano do experimento (11/2006), nos diferentes tratamentos envolvendo os sistemas de rotação de culturas e escarificação, nas camadas de 0,00-0,05 m (A); 0,05-0,10 m (B); 0,10-0,20 m (C); 0,20-0,40 m (D) e 0,40-0,60 m (E). M/S/So – milho / soja / sorgo; M/S/B – milho / soja / *Brachiaria* e M/S/B+Ma – milho / soja / *Brachiaria* + mamona.

Quadro 14. Parâmetros calculados para ajuste da curva de retenção de água no solo na amostragem de 11/2006.

Manejo do solo	Rotação	Parâmetro					
		α	n	m	θ_r	θ_s	r^2
0,00-0,05 m							
Escarificação	M/S/So	0.037	1.932	0.333	0.222	0.552	0.99**
	M/S/B	0.024	1.340	0.553	0.237	0.549	0.99**
	M/S/B+Ma	0.044	1.736	0.307	0.225	0.543	0.99**
Sem Escarificação	M/S/So	0.030	1.462	0.379	0.233	0.530	0.99**
	M/S/B	0.049	3.849	0.111	0.227	0.523	1.00**
	M/S/B+Ma	0.085	8.085	0.051	0.210	0.552	1.00**
0,05-0,10 m							
Escarificação	M/S/So	0.049	2.476	0.178	0.224	0.510	0.97**
	M/S/B	0.038	5.002	0.132	0.256	0.510	0.98**
	M/S/B+Ma	0.041	3.989	0.177	0.257	0.510	0.98**
Sem Escarificação	M/S/So	0.048	2.687	0.156	0.233	0.500	0.99**
	M/S/B	0.037	5.468	0.114	0.235	0.500	0.99**
	M/S/B+Ma	0.023	1.675	0.675	0.260	0.520	0.99**
0,10-0,20 m							
Escarificação	M/S/So	0.042	4.444	0.186	0.259	0.530	0.99**
	M/S/B	0.064	8.531	0.054	0.237	0.530	0.99**
	M/S/B+Ma	0.037	2.202	0.361	0.268	0.520	0.99**
Sem Escarificação	M/S/So	0.044	14.037	0.040	0.274	0.490	0.98**
	M/S/B	0.041	2.837	0.244	0.257	0.500	0.99**
	M/S/B+Ma	0.045	4.070	0.120	0.239	0.510	0.98**
0,20-0,40 m							
Escarificação	M/S/So	0.033	1.887	0.364	0.301	0.543	0.99**
	M/S/B	0.023	1.664	0.470	0.279	0.535	0.99**
	M/S/B+Ma	0.036	2.132	0.330	0.283	0.538	0.99**
Sem Escarificação	M/S/So	0.026	1.609	0.479	0.289	0.527	0.99**
	M/S/B	0.034	1.797	0.354	0.294	0.526	0.99**
	M/S/B+Ma	0.039	2.156	0.321	0.282	0.543	0.99**
0,40-0,60 m							
Escarificação	M/S/So	0.035	1.833	0.411	0.261	0.555	0.99**
	M/S/B	0.024	1.451	0.562	0.286	0.534	0.99**
	M/S/B+Ma	0.039	2.165	0.340	0.263	0.552	0.99**
Sem Escarificação	M/S/So	0.029	1.742	0.454	0.267	0.544	0.99**
	M/S/B	0.065	3.720	0.135	0.250	0.547	1.00**
	M/S/B+Ma	0.036	1.806	0.396	0.273	0.547	0.99**

M/S/So: milho/soja/sorgo; M/S/B: milho/soja/*Brachiaria*; M/S/B+Ma: milho/soja/*Brachiaria* + Mamona.

6.3.4. Curva de retenção de água no solo e Índice S (11/2007)

Nas curvas de retenção de água da segunda avaliação do experimento pode-se observar que, na camada de 0,00-0,05 m (Figura 12 A), os tratamentos com escarificação inicial do solo proporcionaram a maior retenção de água com o solo saturado ($\Psi = 0$), até o potencial matricial de -0,006 MPa, indicando a presença de maior volume de poros totais e de macroporos (REICHARDT & TIMM, 2004), apesar de essas diferenças não serem estatisticamente significativas, conforme apresentado no quadro 13.

Segundo Reeve & Carter (1991), solos compactados caracterizam-se por apresentar menor retenção de água nas baixas tensões (0 a -0,01 MPa), devido à redução promovida na porosidade, principalmente no volume de macroporos, que ficam preenchidos com água gravitacional nos maiores potenciais matriciais (potenciais menos negativos). Em compensação, é comum o aumento na retenção de água nos menores potenciais (potenciais mais negativos) devido ao incremento na mp, aumentando o volume de água capilar. Portanto, solos com essa característica apresentam a curva de retenção de água com menor coeficiente angular (S), ou seja, menor ângulo formado pela tangente que passa pelo ponto de inflexão (DEXTER, 2004a), como pode ser observado na figura 14 quando o solo não sofreu a escarificação inicial.

Nas curvas de retenção de água das camadas 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m (Figura 12 B e C), todos os tratamentos proporcionaram menor retenção de água com o solo saturado ($\Psi = 0$), até o potencial matricial de -0,006 MPa, quando comparada as demais camadas, indicando a presença de menor volume de poros totais e de macroporos, principalmente no tratamento com sorgo e sem ESC. Além disso, houve a maior retenção de água nos menores potenciais (potenciais mais negativos) devido ao incremento na mp, aumentando o volume de água capilar. Isto pode ser atribuído a maior resistência do solo a penetração que geralmente ocorre nessa camada de solo (0,05-0,20 m).

A menor retenção de água nessas camadas pode ser comprovada pela observação do índice S (Figura 13 B e C) que foi menor quando comparada as demais camadas (Figura 13 A, D e E).

A maior retenção de água na camada superficial do solo, comum em solos menos degradado (REICHARDT & TIMM, 2004; DEXTER, 2004) pode estar relacionado à maior concentração de raízes, as quais atuam na estruturação do solo.

Através do conceito do índice S foi possível identificar os tratamentos com solo mais ou menos degradados estruturalmente, sendo o comportamento das curvas de retenção de água referentes aos tratamentos com escarificação inicial, nas camadas de 0,00-0,20 m, os que apresentaram a melhor qualidade física, pois proporcionaram os maiores valores de S (Figura 13 A, B e C).

Quanto às curvas de retenção de água para as rotações de culturas, os tratamentos que continham a *Brachiaria* solteira ou consorciada com mamona promoveram valores de S superiores aos calculados, quando comparada a rotação sem *Brachiaria*, e isto ficou mais evidenciado nos sistema de manejo sem escarificação (Figura 13 B e C). Na camada de 0,40-0,60 m, ocorreu menor efeito dos tratamentos na diferenciação das curvas de retenção de água (Figura 13 E), sendo que os valores S se concentraram acima de 0,07 sendo assim, acima do limite mínimo de 0,035 preconizado por DEXTER (2004).

O incremento no teor de MO em todos os tratamentos (Figura 5), principalmente na camada superficial, pode ter influenciado no aumento na capacidade máxima de retenção de água em relação a avaliação inicial. Segundo Kiehl (1979), a MO apresenta alta capacidade de reter água por possuir elevada superfície específica, podendo reter até 20 vezes o seu peso. O efeito da MO na estruturação do solo também contribui na dinâmica de retenção de água, já que atua na formação de agregados estáveis, reduzindo a obstrução do espaço poroso, aumentando e diminuindo a proporção de macroporos e microporos, respectivamente.

Desta forma, pode-se afirmar que, todos os tratamentos envolvendo os manejos do solo e os cultivos rotacionados de plantas de cobertura proporcionaram curvas de retenção de água com característica de solo mais bem estruturado, em relação ao início, pois maiores valores de S foram obtidos com os tratamentos.

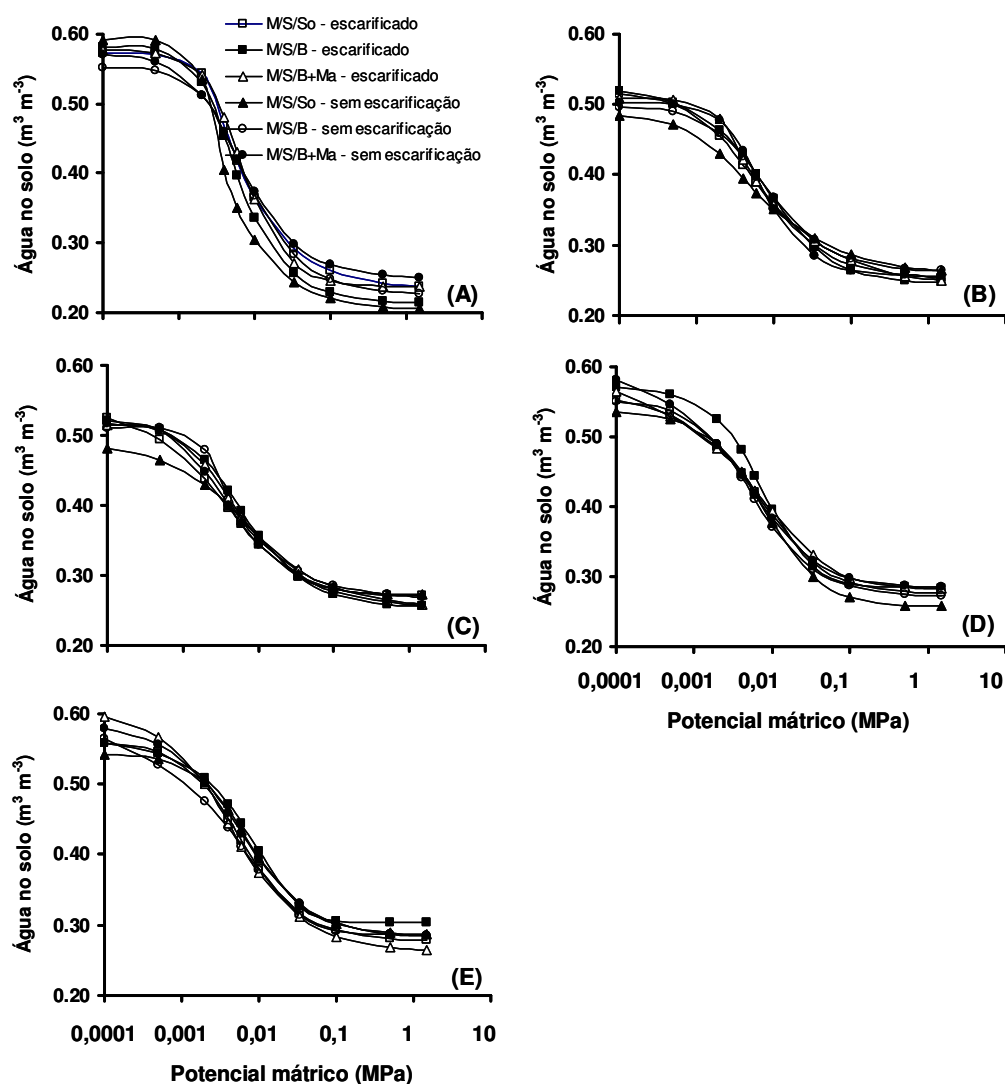


Figura 12. Curvas características da água no solo, referentes à amostragem realizada após o segundo ano do experimento (11/2007), nos diferentes tratamentos envolvendo os sistemas de rotação de culturas e manejo do solo, nas camadas de 0,00-0,05 m (A); 0,05-0,10 m (B); 0,10-0,20 m (C); 0,20-0,40 m (D) e 0,40-0,60 m (E). M/S/So – milho / soja / sorgo; M/S/B – milho / soja / *Brachiaria* e M/S/B+Ma – milho / soja / *Brachiaria* + mamona.

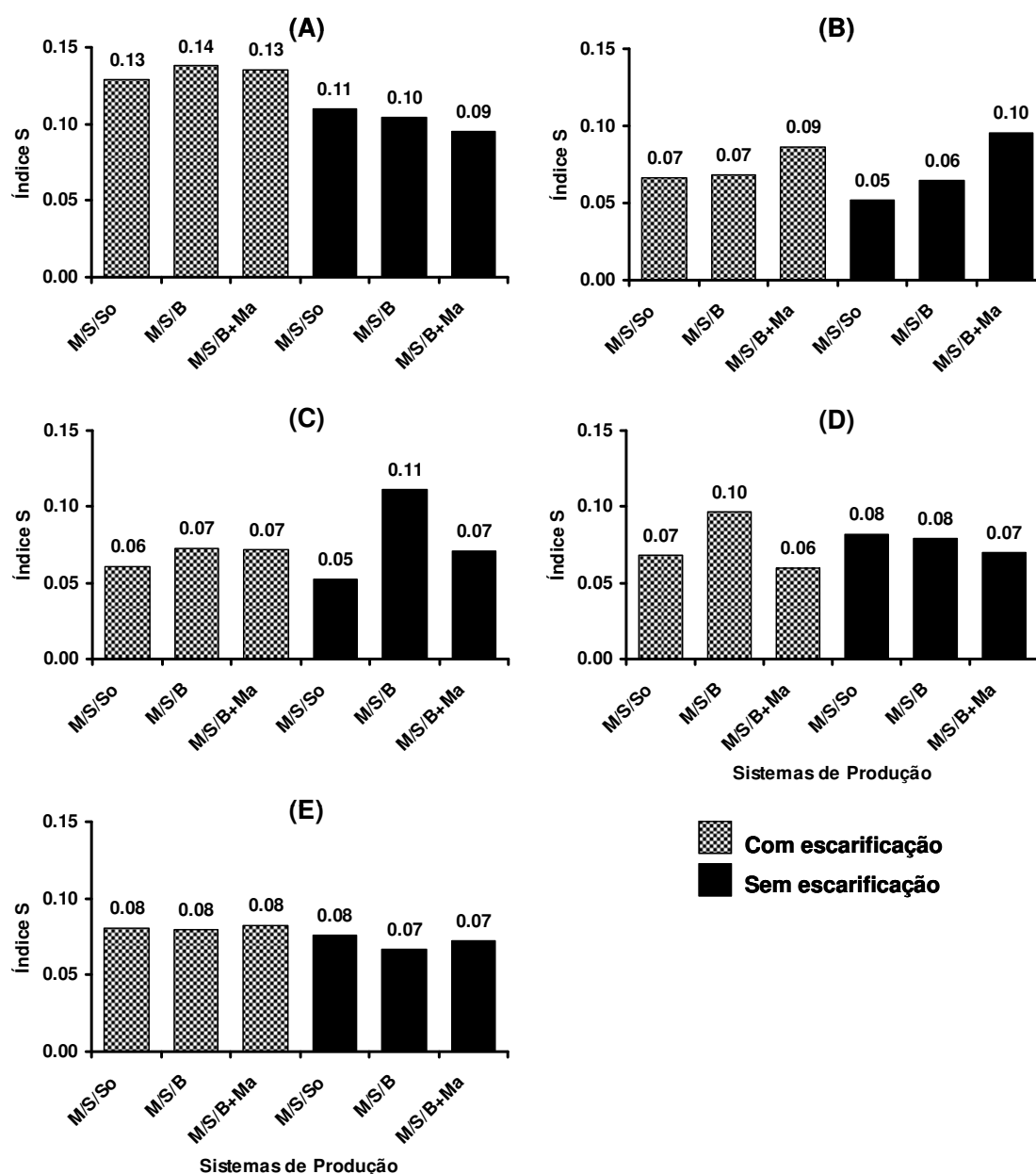


Figura 13. Valores de S para as amostras coletadas após o segundo ano do experimento (11/2007), nos diferentes tratamentos envolvendo os sistemas de rotação de culturas e escarificação, nas camadas de 0,00-0,05 m (A); 0,05-0,10 m (B); 0,10-0,20 m (C); 0,20-0,40 m (D) e 0,40-0,60 m (E). M/S/So – milho / soja / sorgo; M/S/B – milho / soja / *Brachiaria* e M/S/B+Ma – milho / soja / *Brachiaria* + mamona.

Quadro 15. Parâmetros calculados para ajuste da curva de retenção de água no solo na amostragem de 11/2007.

Manejo do solo	Rotação	Parâmetro					
		α	n	m	θ_r	θ_s	r^2
0,00-0,05 m							
Escarificação	M/S/So	0.041	3.2113	0.205	0.232	0.572	1.00**
	M/S/B	0.031	2.027	0.458	0.214	0.582	0.99**
	M/S/B+Ma	0.020	1.839	0.661	0.237	0.576	1.00**
Sem Escarificação	M/S/So	0.059	7.807	0.097	0.204	0.591	0.99**
	M/S/B	0.025	1.691	0.471	0.224	0.552	0.99**
	M/S/B+Ma	0.026	1.414	0.601	0.249	0.571	0.99**
0,05-0,10 m							
Escarificação	M/S/So	0.028	1.199	0.620	0.251	0.514	0.99**
	M/S/B	0.011	0.969	1.130	0.247	0.519	0.99**
	M/S/B+Ma	0.055	3.739	0.127	0.238	0.508	0.99**
Sem Escarificação	M/S/So	0.055	1.398	0.354	0.255	0.483	0.99**
	M/S/B	0.020	1.286	0.639	0.262	0.497	0.99**
	M/S/B+Ma	0.021	1.866	0.587	0.256	0.503	0.99**
0,10-0,20 m							
Escarificação	M/S/So	0.025	0.958	0.994	0.269	0.524	0.99**
	M/S/B	0.027	1.288	0.631	0.254	0.521	0.99**
	M/S/B+Ma	0.065	2.147	0.230	0.250	0.514	0.99**
Sem Escarificação	M/S/So	0.008	0.886	1.656	0.273	0.482	0.99**
	M/S/B	0.062	8.561	0.068	0.263	0.510	0.99**
	M/S/B+Ma	0.064	1.740	0.317	0.251	0.516	0.99**
0,20-0,40 m							
Escarificação	M/S/So	0.010	0.908	1.332	0.277	0.553	0.99**
	M/S/B	0.011	1.266	1.242	0.284	0.570	1.00**
	M/S/B+Ma	0.005	0.725	1.945	0.282	0.564	0.99**
Sem Escarificação	M/S/So	0.013	1.168	1.010	0.257	0.536	0.99**
	M/S/B	0.027	1.295	0.676	0.271	0.551	0.99**
	M/S/B+Ma	0.011	0.844	1.496	0.285	0.581	1.00**
0,40-0,60 m							
Escarificação	M/S/So	0.023	1.263	0.749	0.278	0.558	1.00**
	M/S/B	0.003	0.953	3.924	0.304	0.558	1.00**
	M/S/B+Ma	0.033	1.127	0.690	0.262	0.595	0.99**
Sem Escarificação	M/S/So	0.017	1.298	0.766	0.286	0.543	0.99**
	M/S/B	0.001	0.710	5.525	0.286	0.564	0.99**
	M/S/B+Ma	0.020	1.013	0.880	0.283	0.580	1.00**

M/S/So: milho/soja/sorgo; M/S/B: milho/soja/*Brachiaria*; M/S/B+Ma: milho/soja/*Brachiaria* + Mamona. ** significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

6.3.5. Intervalo Hídrico Ótimo x Manejo do Solo (11/2006)

Os coeficientes da equação (a, b, c) que ajustam os valores de resistência à penetração (RP) em função da umidade volumétrica (θ_v) e da densidade do solo (Ds) (equação 7), para a variável manejo do solo, referentes às amostras coletadas no primeiro ano de avaliação, nas camadas de 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m estão apresentados no quadro 16.

Quadro 16. Estimativa dos parâmetros da regressão para resistência à penetração do solo (RP = MPa) em função do conteúdo volumétrico da água ($\theta_v = m^3 m^{-3}$) e densidade do solo (Ds = $g cm^{-3}$) na camada de 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m de profundidade, referente à amostragem realizada em 11/2006: $RP = a \theta_v^b Ds^c$ para os sistemas de manejo do solo.

Manejo do solo	Parâmetro	Valor	Erro Padrão	t	P>t
0,05-0,10 m					
Escarificação	a	0,0020	0,0018	1,1444	0,2618
	b	-4,3655	0,5055	-8,6359	<0,0001
	c	4,5493	0,9266	4,9094	<0,0001
	r ² = 0,86**				
Sem escarificação	a	0,0567	0,0948	0,5981	0,5544
	b	-3,4147	0,6739	-5,0670	<0,0001
	c	-1,0713	3,9710	-0,2698	0,7892
	r ² = 0,65**				
0,10-0,20 m					
Escarificação	a	0,0045	0,0048	0,9480	0,3510
	b	-4,6109	0,6811	-6,7697	<0,0001
	c	1,7634	2,0789	0,8482	0,4033
	r ² = 0,80**				
Sem escarificação	a	0,0300	0,0265	1,1334	0,2663
	b	-2,7226	0,4248	-6,4085	<0,0001
	c	3,2831	2,9175	1,1253	0,2697
	r ² = 0,75**				

** Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste F.

Os sinais positivos e negativos dos coeficientes demonstram que a RP variou positivamente com a Ds, exceto para o tratamento sem ESC (0,05-0,10 m) e negativamente com a θ_v , respectivamente, estando em concordância com os resultados encontrados na literatura (SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 1998; IMHOFF, 2002; MÜLLER, 2002; ARAÚJO et al., 2004). A elevação da resistência com a redução da θ_v e

aumento da Ds pode ser atribuída ao aumento na coesão e fricção entre as partículas de argila (SOJKA et al., 2001).

No quadro 17 encontram-se os coeficientes (d, e, f) resultantes do ajuste da θ_v em função da Ds e do Ψ (Equação 6), das amostras coletadas no primeiro ano de avaliação, das camadas de 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente.

Quadro 17. Estimativa dos parâmetros da regressão para o conteúdo volumétrico da água no solo ($\theta_v = \text{m}^3 \text{m}^{-3}$) em função da densidade ($D_s = \text{g cm}^{-3}$) e do potencial mátrico ($\Psi = \text{MPa}$) na camada de 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m de profundidade, referente à amostragem realizada em 11/2006: $\theta_v = \exp(d + e D_s) \Psi^f$ para os diferentes sistemas de manejo do solo.

Manejo do solo	Parâmetro	Valor	Erro Padrão	t	P>t
0,05-0,10 m					
Escarificação	d	-2,4127	0,3758	-6,4202	<0,0001
	e	0,6648	0,2595	2,5621	0,0159
	f	-0,1108	0,0083	-13,2705	<0,0001
	r ² = 0,87**				
Sem escarificação	d	-2,7430	1,0368	-2,6458	0,0130
	e	0,8728	0,7185	1,2148	0,2343
	f	-0,1108	0,0095	-11,6142	<0,0001
	r ² = 0,85**				
0,10-0,20 m					
Escarificação	d	-2,4826	0,6734	-3,6866	0,0009
	e	0,7519	0,4856	1,5484	0,1324
	f	-0,1095	0,0105	-10,4707	<0,0001
	r ² = 0,81**				
Sem escarificação	d	-2,1653	0,7965	-2,7185	0,0110
	e	0,5263	0,5455	0,9649	0,3426
	f	-0,0980	0,0084	-11,7070	<0,0001
	r ² = 0,84**				

** Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste F.

Os coeficientes indicam que tanto a θ_{CC} como θ_{PMP} variaram positivamente com a Ds e negativamente com o Ψ . Esses resultados estão de acordo com os encontrados por Tormena et al. (1998), que argumentam que a Ds influencia a retenção de água decorrente de sua influência na Pt e na distribuição dos tamanhos dos poros. Segundo Kertzman (1996), o aumento da retenção de água na CC com o aumento da Ds deve-se à

redução do diâmetro dos macroporos entre os agregados, resultando em redução da PA e aumento na retenção de água devido ao incremento na mp.

O aumento do conteúdo de água no PMP em resposta ao aumento da Ds não está relacionado com a porosidade do solo, mas sim com a textura muito argilosa. Em condições de altas tensões (PMP) a água fica retida com muita energia em películas muito finas ao redor das partículas individuais do solo (BRADY & WEIL, 1999). Assim, com o aumento da Ds, aumenta o número de partículas disponíveis para a retenção de água por unidade de volume de solo (BERG et al., 1997), que terá seu efeito intensificado em textura argilosa devido à elevada superfície de contato das partículas de argila em relação às outras frações granulométricas.

A Ds teve uma relação negativa com PA (Figura 14 e 15), como também foi observado por Silva et al. (1994) e Tormena et al. (1998). Com o adensamento do solo ocorre a acomodação das partículas nos macroporos, ocupando o espaço que seria ocupado pelo ar. De acordo com Tormena et al. (1998), em solos com textura muito argilosa é comum a ocorrência de estresse em plantas por aeração insuficiente. Como era esperado, após o primeiro ano de experimento, o manejo do solo com escarificação inicial, apresentou aumento da amplitude do IHO, em relação à avaliação inicial, nas camadas de 0,05-0,10 m (Figura 14) e 0,10-0,20 m (Figura 15). Independentemente da camada avaliada, o IHO teve como limite inferior o teor de água para manter a RP em 2 MPa (θ_{RP}) em 100 % das amostras, superando a θ_{PMP} em toda a amplitude de Ds. Esta condição implica em dizer que este solo se apresenta compactado, mesmo após a escarificação, e que necessita estar com a umidade elevada para que a RP não atinja o valor limitante de 2 MPa, estando de acordo com os relatos de Topp et al. (1994), Silva et al. (1994), Müller (2002), Beutler et al. (2006), nos quais a RP foi o fator que mais frequentemente reduziu o IHO em solos sob diferentes condições de textura e manejo, mesmo nos mais baixos valores de Ds.

Segundo Carter et al. (1999), o IHO em SSD é inferior ao encontrado em cultivos convencionais em decorrência da RP atingir 2 MPa em valores elevados de umidade, devido à elevada Ds encontrada no sistema conservacionista. Betz et al. (1998) e Cavalieri et al. (2006) também verificaram maiores valores do IHO em solo sob preparo

convencional e escarificado, possibilitando um ambiente físico favorável ao crescimento das raízes.

Tormena et al. (1998), ao determinarem o IHO em um Latossolo Vermelho com 800 g kg^{-1} de argila, observaram que a θ_{RP} foi o limite inferior de água no solo a partir de valores de D_s acima de $1,10 \text{ g cm}^{-3}$ e com umidade do solo superior a $0,24 \text{ cm cm}^{-3}$. Contudo, neste experimento, a menor D_s foi igual ou superior a $1,40 \text{ g cm}^{-3}$ e com θ_{RP} muito superiores a relatada anteriormente (igual ou maiores que $0,31 \text{ g cm}^{-3}$), principalmente na camada de 0,10-0,20 m, onde há maior teor de argila.

Mesmo no tratamento com escarificação, onde se observou a menor D_s , a θ_{RP} foi o limite inferior do IHO. Dessa forma, comparando com os resultados obtidos por Tormena et al. (1998), em que a θ_{RP} passou a ser o limite inferior do IHO com D_s de $1,10 \text{ g cm}^{-3}$ e com umidade volumétrica de $0,24 \text{ cm cm}^{-3}$, pode-se admitir que, logo após a escarificação do solo, esse manejo foi eficiente em aumentar o IHO para alcançar os valores encontrados na literatura. Calonego, (2007) também constatou a eficiência da escarificação no aumento do IHO, logo após a sua realização.

Quanto ao limite superior do IHO nas camadas 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, a θ_{PA} foi o limite máximo de água no solo das amostras contidas dentro do IHO, em todos os manejos de solo avaliados, nos valores de $D_s \geq 1,34$ e $1,32 \text{ g cm}^{-3}$, no tratamento escarificado inicialmente e $\geq 1,39$ e $1,38 \text{ g cm}^{-3}$, para o tratamento sem escarificação, respectivamente.

Nesses valores de D_s a umidade volumétrica do solo máxima para permitir o mínimo de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de PA, considerada como limitante para o desenvolvimento das plantas, foi de, aproximadamente, $0,36$ e $0,37 \text{ cm cm}^{-3}$ no tratamento escarificado e $0,34$, e $0,35 \text{ cm cm}^{-3}$ para o tratamento sem escarificação, respectivamente para as duas camadas.

Por sua vez, Tormena et al. (1998) obtiveram resultados diferentes em solo de textura muito argilosa, ou seja, a θ_{PA} foi o limite superior do IHO, substituindo a θ_{cc} , com a D_s $1,28 \text{ g cm}^{-3}$, com a umidade volumétrica do solo em torno de $0,42 \text{ cm cm}^{-3}$.

A densidade do solo crítica, em IHO, é a densidade do solo em que o IHO iguala-se a zero, ou seja, em que o limite inferior de água no solo iguala-se ao limite superior (SILVA et al., 1994). No tratamento sem escarificação, as densidades críticas foram

as mais elevadas na camada 0,05-0,10 m (Figuras 14). Nos tratamentos com e sem escarificação, na camada de 0,05-0,10 m, essa densidade foi de 1,48 e 1,50 g cm⁻³, respectivamente. Na camada 0,10-0,20 m, a densidade crítica foi de 1,45 e 1,43 g cm⁻³, respectivamente.

Esses valores de Dsc são superiores aos encontrados por Müller (2002) em NITOSSOLO VERMELHO com 590 g cm⁻³ de argila na camada de 0,10-0,20 m (Dsc = 1,33 g cm⁻³), e Tormena et al. (1998) em LATOSSOLO VERMELHO, com 800 g cm⁻³ de argila na camada de 0,00-0,10 m (Dsc de 1,28 g cm⁻³).

Considerando os valores de Dsc, após o primeiro ano, pode-se dizer que os sistemas de manejo do solo com e sem escarificação não ampliaram os “limites” em que o limite inferior de água no solo se iguala ao limite superior.

Contudo, após o primeiro ano de experimento, no manejo do solo onde foi escarificado, houve menor probabilidade da planta permanecer em condições de déficit hídrico.

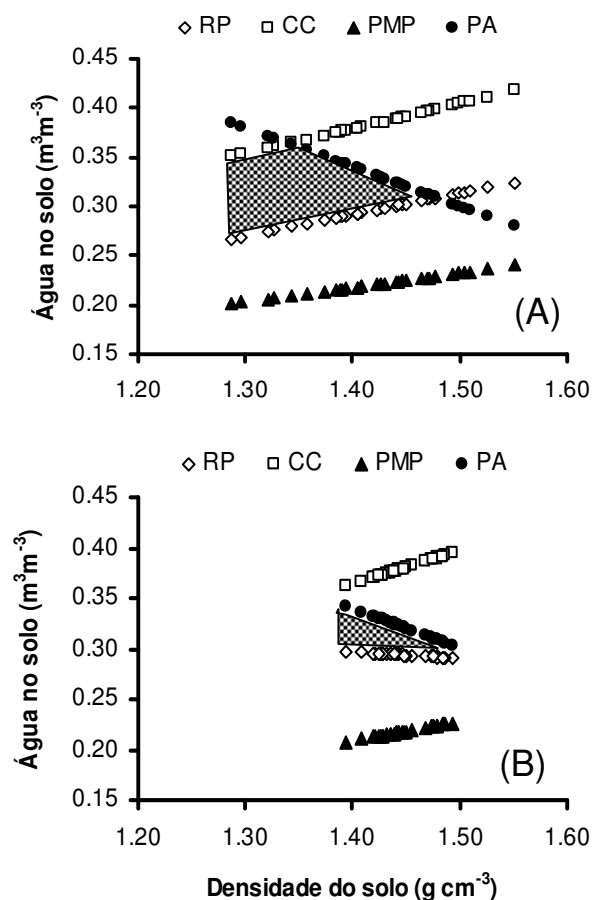


Figura 14. Variação do conteúdo de água em função da densidade do solo, nos níveis críticos da capacidade de campo (CC = -0,01 MPa), ponto de murcha permanente (PMP = -1,5 MPa), porosidade de aeração (PA = 10%) e resistência à penetração (RP = 2 MPa), referente às amostras coletadas na camada de 0,05-0,10 m, com escarificação (A) e sem escarificação inicial (B) em 11/2006. A área hachurada representa o IHO.

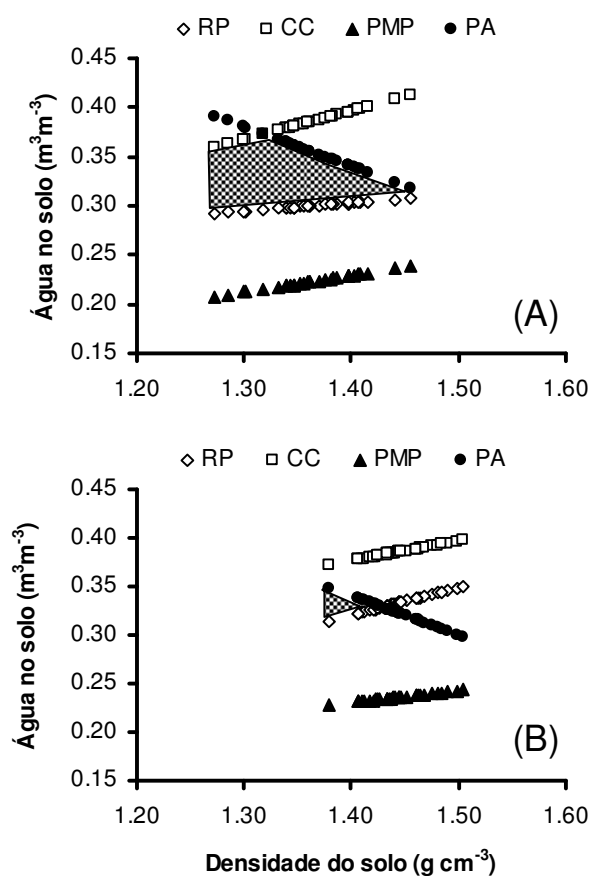


Figura 15. Variação do conteúdo de água em função da densidade do solo, nos níveis críticos da capacidade de campo (CC = -0,01 MPa), ponto de murcha permanente (PMP = -1,5 MPa), porosidade de aeração (PA = 10%) e resistência à penetração (RP = 2 MPa), referente às amostras coletadas na camada de 0,10-0,20 m, com escarificação (A) e sem escarificação inicial (B) em 11/2006. A área hachurada representa o IHO.

6.3.6. Intervalo Hídrico Ótimo x Manejo do Solo (11/2007)

No quadro 18 estão apresentados os coeficientes da equação (a, b, c) que ajustam os valores de resistência à penetração (RP) em função da umidade volumétrica (θ_v) e da densidade do solo (Ds) (equação 7), referentes às amostras coletadas após o segundo ano de avaliação do experimento com manejo do solo, nas camadas de 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m. Após o segundo ano, os coeficientes (d, e, f) resultantes do ajuste da θ_v em função da Ds e do Ψ (Equação 6), das camadas de 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m estão apresentados no quadro 19.

Quadro 18. Estimativa dos parâmetros da regressão para resistência à penetração do solo (RP = MPa) em função do conteúdo volumétrico da água ($\theta_v = \text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e densidade do solo ($D_s = \text{g cm}^{-3}$) na camada de 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m de profundidade, referente à amostragem realizada em 11/2007: $RP = a \theta_v^b D_s^c$ para os sistemas de manejo do solo.

Manejo do solo	Parâmetro	Valor	Erro Padrão	t	P>t
0,05-0,10 m					
Escarificação	a	0,0143	0,0083	1,7174	0,0966
	b	-3,0169	0,1648	-18,3054	<0,0001
	c	4,5573	1,5046	3,0289	0,0051
	$r^2 = 0,95^{**}$				
Sem escarificação	a	0,0497	0,0189	2,6334	0,0134
	b	-2,7200	0,1633	-16,6550	<0,0001
	c	2,0332	0,9101	2,2341	0,0334
	$r^2 = 0,94^{**}$				
0,10-0,20 m					
Escarificação	a	0,0205	0,0119	1,7172	0,0966
	b	-3,0655	0,2406	-12,7422	<0,0001
	c	3,4505	1,3897	2,4829	0,0191
	$r^2 = 0,91^{**}$				
Sem escarificação	a	0,1049	0,0641	1,6385	0,1121
	b	-2,8815	0,2332	-12,3543	<0,0001
	c	-0,6130	1,7025	-0,3601	0,7214
	$r^2 = 0,89^{**}$				

** Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste F.

Quadro 19. Estimativa dos parâmetros da regressão para o conteúdo volumétrico da água no solo ($\theta_v = \text{m}^3 \text{m}^{-3}$) em função da densidade ($D_s = \text{g cm}^{-3}$) e do potencial mátrico ($\Psi = \text{MPa}$) na camada de 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m de profundidade, referente à amostragem realizada em 11/2007: $\theta_v = \exp(d + e D_s) \Psi^f$ para os sistemas de manejo do solo.

Manejo do solo	Parâmetro	Valor	Erro Padrão	t	P>t
0,05-0,10 m					
Escarificação	d	-1,6928	0,6020	-2,8121	0,0087
	e	0,2907	0,4331	0,6712	0,5074
	f	-0,0714	0,0051	-14,1364	<0,0001
	$r^2 = 0,90^{**}$				
Sem escarificação	d	-1,5233	0,4906	-3,1051	0,0042
	e	0,1672	0,3387	0,4936	0,6253
	f	-0,0685	0,0044	-15,5010	<0,0001
	$r^2 = 0,91^{**}$				
0,10-0,20 m					
Escarificação	d	-1,2166	0,4636	-2,6242	0,0137
	e	-0,1631	0,3360	-0,4852	0,6312
	f	-0,0958	0,0057	-16,9335	<0,0001
	$r^2 = 0,92^{**}$				
Sem escarificação	d	-2,0160	0,5418	-3,7213	0,0008
	e	0,4252	0,3823	1,1121	0,2752
	f	-0,0912	0,0059	-15,5679	<0,0001
	$r^2 = 0,90^{**}$				

** Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste F.

De acordo com a argumentação de Tormena et al. (1998), a D_s influencia a retenção de água devido a sua influência na P_t e na distribuição dos tamanhos dos poros. Contrariando Kertzman (1996), o aumento da retenção de água na CC, com a diminuição da D_s , só poderá estar associado ao aumento do diâmetro dos macroporos entre os agregados, resultando em redução da PA e aumento na retenção de água.

Quanto ao aumento do conteúdo de água no PMP, em resposta a diminuição da D_s , acredita-se que esta relacionada com a textura muito argilosa do solo (Quadro 19). Em condições de altas tensões (PMP) a água fica retida com muita energia em películas muito finas ao redor das partículas individuais do solo (BRADY & WEIL, 1999). Assim, mesmo com a diminuição da D_s , o número de partículas disponíveis para a retenção de água por unidade de volume de solo é enorme em solos de textura argilosa devido à elevada superfície de contato das partículas de argila.

A D_s teve uma relação negativa com PA (figuras 16 e 17), como também foi observado por Silva et al. (1994) e Tormena et al. (1998). Após o segundo ano de experimento, o manejo do solo com escarificação inicial apresentou a maior amplitude do IHO, porém menor que a anterior (11/2006), em relação ao tratamento sem escarificação, nas camadas de 0,05-0,10 m (Figura 16) e 0,10-0,20 m (Figura 17). Em ambas as camadas avaliadas, o IHO teve como limite inferior o teor de água para manter a RP em 2 MPa (θ_{RP}) em 100 % das amostras, superando a θ_{PMP} em toda a amplitude de D_s . Dessa forma, mesmo após 2 anos de experimento, este solo ainda se apresentou com algum nível de compactação. Assim, quando cultivado, este solo irá necessitar que sua umidade esteja elevada para que a RP não atinja o valor limitante de 2 MPa, o qual poderá não ser favorável ao crescimento das raízes.

Quanto ao limite superior do IHO nas camadas 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, a θ_{PA} foi o limite máximo de água no solo das amostras contidas dentro do IHO, em todos os manejos de solo avaliados, nos valores de $D_s \geq 1,31$ e $1,30 \text{ g cm}^{-3}$, no tratamento escarificado inicialmente, e $\geq 1,37$ e $1,35 \text{ g cm}^{-3}$, para o tratamento sem escarificação, respectivamente. Nesses valores de D_s , a umidade volumétrica do solo máxima, para permitir o mínimo de 10 % de PA, considerada como limitante para o desenvolvimento das plantas, foi de, aproximadamente, $0,38$ e $0,38 \text{ cm cm}^{-3}$ no tratamento escarificado e $0,36$, e $0,36 \text{ cm cm}^{-3}$ para o tratamento sem escarificação, respectivamente para as duas camadas.

A densidade do solo crítica reduziu após o segundo ano de experimento em todos os manejos e camadas estudadas. Portanto, significa dizer que diminuiu a amplitude do IHO, ou seja, o limite inferior de água no solo igualou-se ao limite superior com uma D_s menor. No tratamento com escarificação a D_{sc} foi mais elevada somente na camada 0,05-0,10 m (Figuras 16). Nos tratamentos com e sem escarificação, na camada de 0,05-0,10 m, essa densidade foi de $1,43$ e $1,41 \text{ g cm}^{-3}$, respectivamente. Na camada 0,10-0,20 m, a densidade crítica foi de $1,40$ e $1,40 \text{ g cm}^{-3}$, respectivamente.

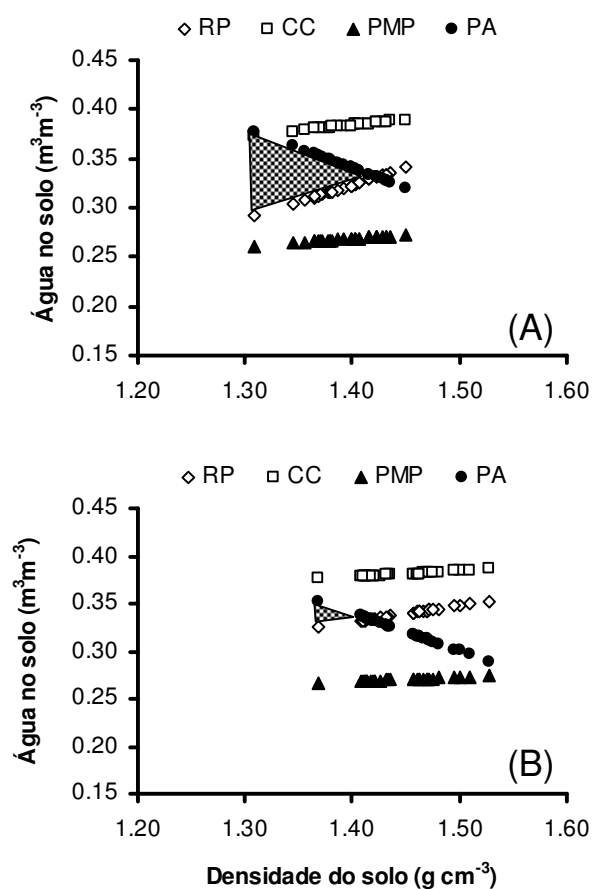


Figura 16. Variação do conteúdo de água em função da densidade do solo, nos níveis críticos da capacidade de campo (CC = -0,01 MPa), ponto de murcha permanente (PMP = -1,5 MPa), porosidade de aeração (PA = 10%) e resistência à penetração (RP = 2 MPa), referente às amostras coletadas na camada de 0,05-0,10 m, com escarificação (A) e sem escarificação inicial (B) em 11/2007. A área hachurada representa o IHO.

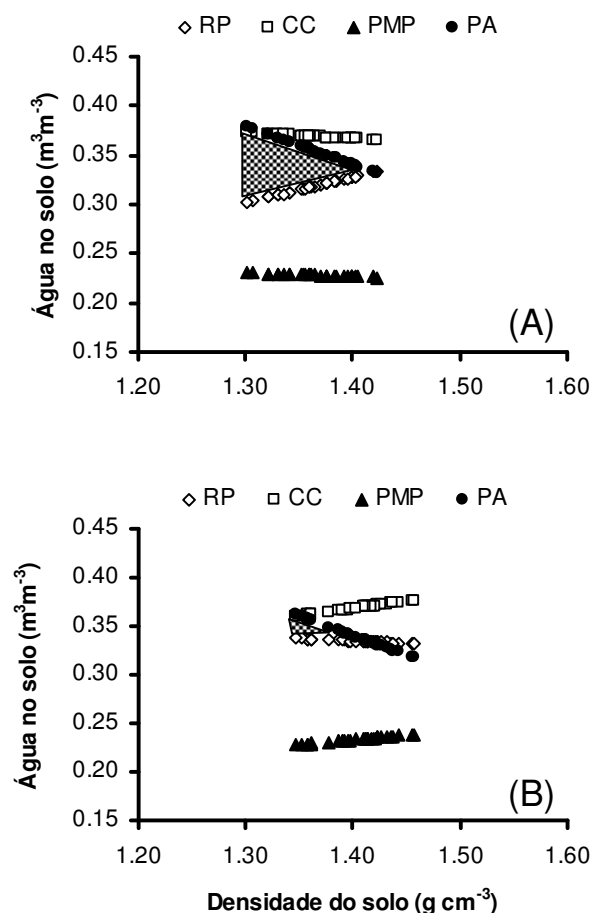


Figura 17. Variação do conteúdo de água em função da densidade do solo, nos níveis críticos da capacidade de campo (CC = -0,01 MPa), ponto de murcha permanente (PMP = -1,5 MPa), porosidade de aeração (PA = 10%) e resistência à penetração (RP = 2 MPa), referente às amostras coletadas na camada de 0,10-0,20 m, com escarificação (A) e sem escarificação inicial (B) em 11/2007. A área hachurada representa o IHO.

6.3.7. Intervalo Hídrico Ótimo x Rotações de Culturas (11/2006)

Após o primeiro ano de avaliação do experimento observou-se aumento da amplitude do IHO, em todos os tratamentos, principalmente para os sistemas com escarificação inicial, nas camadas de 0,05-0,10 m (Figura 18) e de 0,10-0,20 m (Figura 19). Na camada de 0,10-0,20 m, o cultivo de milho/soja/sorgo em SSD, promoveu IHO igual a zero (Figura 19 D), já que o limite inferior de água no solo igualou, ou até mesmo superou, o limite superior, em todas as amostras com D_s determinada.

Após o primeiro ano, em todas as camadas para as rotações de culturas, o IHO teve como limite inferior o teor de água para manter a RP em 2 MPa (θ_{RP}) em 100 % das amostras, superando a θ_{PMP} em toda a amplitude de Ds, o que supõe que o solo esta com nível de compactação elevado, mesmo após a escarificação inicial. Para tanto, este solo necessita estar com a umidade elevada para que a RP não atinja o valor limitante de 2 MPa e prejudique o crescimento de raízes. Até mesmo no tratamento com escarificação inicial, onde foram observados as menores Ds, de 1,21, 1,25 e 1,28 g cm⁻³ (“milheto / soja / sorgo; milheto / soja / *Brachiaria* e milheto / soja / *Brachiaria* + mamona”, respectivamente), a θ_{RP} foi o limite inferior do IHO.

Dessa forma, comparando com os resultados obtidos por Tormena et al. (1998), em que a θ_{RP} passou a ser o limite inferior do IHO com Ds de 1,10 g cm⁻³ e com umidade volumétrica de 0,24 cm cm⁻³, pode-se admitir que após a escarificação inicial, todas as rotações de culturas foram eficientes em manter ou aumentar o IHO. Calonego, (2007) também constatou a eficiência da escarificação inicial no aumento do IHO, logo após a sua realização, independentemente da sucessão de cultura utilizada. Contudo, em SSD com o cultivo de plantas de cobertura de sistema radicular agressivo e vigoroso, como a *Brachiaria*, a RP limitante para o crescimento das plantas pode ser superior à RP limitante em sistemas convencionais, em que a mobilização do solo causa a interrupção da continuidade dos macroporos e dos canais. Assim, se fosse considerada uma RP limitante superior a 2 MPa para os manejos envolvendo o cultivo dessa planta, certamente aumentaria o IHO.

Quanto ao limite superior do IHO nas duas camadas avaliadas, a θ_{PA} foi o limite máximo de água no solo na maioria das amostras contidas dentro do IHO, em todos os tratamentos avaliados. Para a camada de 0,05-0,10m, os valores de Ds foram $\geq$ a 1,32, 1,35 e 1,30 g cm⁻³, nos tratamentos com escarificação (milheto / soja / sorgo; milheto / soja / *Brachiaria* e milheto / soja / *Brachiaria* + mamona, respectivamente) e 1,30, 1,38 e 1,36 g cm⁻³, para os mesmos tratamentos, respectivamente, no sistema sem escarificação (Figura 18).

Nesses valores de Ds a umidade volumétrica do solo máxima para permitir o mínimo de 10 % de PA, considerada como limitante para o desenvolvimento das plantas, foi de, aproximadamente, 0,37, 0,36 e 0,37 cm cm⁻³ nos tratamentos com escarificação

(milheto / soja / sorgo; milheto / soja / *Brachiaria* e milheto / soja / *Brachiaria* + mamona, respectivamente) e 0,37, 0,34 e 0,35 cm cm⁻³ para os mesmos tratamentos sem escarificação, respectivamente (Figura 18).

Para a camada de 0,10-0,20 m, seguindo a mesma seqüência de tratamentos, os valores de Ds foram $\geq$ a 1,30, 1,29 e 1,30 g cm⁻³ e 1,38, 1,33 e 1,28 g cm⁻³, para os mesmos tratamentos, respectivamente, no sistema sem escarificação. Na mesma seqüência, os valores de umidade volumétrica, foram de aproximadamente, 0,38, 0,38 e 0,38 cm cm⁻³ e 0,34, 0,36 e 0,39 cm cm⁻³ (Figura 19).

Em relação a densidade crítica do solo, os valores para as rotações “milheto / soja / sorgo; milheto / soja / *Brachiaria* e milheto / soja / *Brachiaria* + mamona” no solo sem escarificação inicial, na camada 0,05-0,10 m, foram de 1,44, 1,48 e 1,45 g cm⁻³, respectivamente. No tratamento com escarificação inicial, as mesmas rotações apresentaram Dsc de 1,45, 1,42 e 1,40 g cm⁻³, respectivamente.

Para a camada de 0,10-0,20 m, nos tratamentos sem escarificação a Dsc foi de 1,39, 1,43 e 1,38 g cm⁻³, para as mesmas rotações. Quando da escarificação inicial, as Dsc foram de 1,47, 1,40 e 1,39 g cm⁻³, respectivamente.

Resultados de literatura mostraram valores menores de Dsc. Müller (2002) trabalhando em Nitossolo Vermelho com 590 g cm⁻³ de argila na camada de 0,10-0,20 m encontrou uma Dsc igual a 1,33 g cm⁻³, e Tormena et al. (1998) com um Latossolo Vermelho, com 800 g cm⁻³ de argila na camada de 0,00-0,10 m uma Dsc de 1,28 g cm⁻³.

Quadro 20. Estimativa dos parâmetros da regressão para resistência à penetração do solo (RP = MPa) em função do conteúdo volumétrico da água ($\theta_v = \text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e densidade do solo ($D_s = \text{g cm}^{-3}$) na camada de 0,05-0,10 m de profundidade, referente à amostragem realizada em 11/2006: $RP = a \theta_v^b D_s^c$

Manejo do solo	Parâmetro	Valor	Erro Padrão	t	P>t
Escarificação	Milheto/soja/sorgo				
	a	0,0003	0,0003	0,9243	0,3629
	b	-4,7684	0,6015	-7,9271	<0,0001
	c	8,8972	1,0510	8,4657	<0,0001
	$r^2 = 0,86^{**}$				
	Milheto/soja/Brachiaria				
	a	0,0001	0,0001	1,2217	0,2317
	b	-5,2526	0,4402	-11,9327	<0,0001
	c	11,2819	0,8837	12,7663	<0,0001
	$r^2 = 0,93^{**}$				
	Milheto/soja/Brachiaria+ mamona				
	a	0,0232	0,0132	1,7536	0,0901
Sem escarificação	b	-3,3428	0,3967	-8,4254	<0,0001
	c	2,4768	0,6587	3,7599	0,0008
	$r^2 = 0,84^{**}$				
	Milheto/soja/sorgo				
	a	0,0094	0,0068	1,3818	0,1776
	b	-3,4338	0,3301	-10,4009	<0,0001
	c	3,9177	1,3270	2,9523	0,0062
	$r^2 = 0,88^{**}$				
	Milheto/soja/Brachiaria				
	a	0,0027	0,0013	2,1318	0,0416
	b	-3,7612	0,2274	-14,0641	<0,0001
	c	5,6818	0,0174	6,9511	<0,0001
	$r^2 = 0,94^{**}$				
	Milheto/soja/Brachiaria + mamona				
	a	0,0002	0,0001	1,1583	0,2562
	b	-4,7749	0,4339	-11,0049	<0,0001
	c	10,1937	1,3094	7,7848	<0,0001
	$r^2 = 0,91^{**}$				

** Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste F

Analisando os valores de Dsc (Figura 20), após o primeiro ano, pode-se dizer que nos sistemas em que a cultura da *Brachiaria* faz parte do sistema de rotação, principalmente quando não houve escarificação inicial, há menor probabilidade das plantas permanecerem em déficit hídrico. Na camada de 0,10-0,20 m, independente do manejo e

rotação estudada, o IHO apresentou-se menor em comparação à camada 0,05-0,10 m, devido ao efeito restritivo da RP, alcançando o valor limite de 2 MPa em elevados teores de umidade, mesmo nos menores valores de Ds ($\theta_{RP} \geq 0,30 \text{ cm cm}^{-3}$).

Quadro 21. Estimativa dos parâmetros da regressão para resistência à penetração do solo (RP = MPa) em função do conteúdo volumétrico da água ($\theta_v = \text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) e densidade do solo (Ds = g cm^{-3}) na camada de 0,10-0,20 m de profundidade, referente à amostragem realizada em 11/2006: $RP = a \theta_v^b Ds^c$

Manejo do solo	Parâmetro	Valor	Erro Padrão	t	P>t
Escarificação	Milheto/soja/sorgo				
	a	0,0011	0,0010	1,0863	0,2863
	b	-6,1032	0,7531	-8,0953	<0,0001
	c	0,7400	1,0837	0,6829	0,5001
	$r^2 = 0,87^{**}$				
	Milheto/soja/Brachiaria				
	a	0,0002	0,0002	0,8981	0,3765
	b	-4,7497	0,6545	-7,2570	<0,0001
	c	11,8948	1,7359	6,8521	<0,0001
	$r^2 = 0,86^{**}$				
	Milheto/soja/Brachiaria + mamona				
	a	0,0039	0,0038	1,0294	0,3118
	b	-4,1029	0,6075	-6,7532	<0,0001
	c	5,3993	0,9038	5,9741	<0,0001
	$r^2 = 0,77^{**}$				
Sem escarificação	Milheto/soja/sorgo				
	a	0,0223	0,0120	1,8544	0,0739
	b	-2,7154	0,3152	-8,6152	<0,0001
	c	4,6462	0,8858	5,2450	<0,0001
	$r^2 = 0,84^{**}$				
	Milheto/soja/Brachiaria				
	a	0,0099	0,0066	1,5152	0,1405
	b	-4,1196	0,4841	-8,5105	<0,0001
	c	1,5834	1,2172	1,3009	0,2035
	$r^2 = 0,86^{**}$				
	Milheto/soja/Brachiaria + mamona				
	a	0,0189	0,0159	1,1915	0,2431
	b	-3,8889	0,4642	-8,3777	<0,0001
	c	1,3073	1,1901	1,0985	0,2810
	$r^2 = 0,83^{**}$				

** Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste F

Quadro 22. Estimativa dos parâmetros da regressão para o conteúdo volumétrico da água no solo ($\theta_v = \text{m}^3 \text{m}^{-3}$) em função da densidade ($D_s = \text{g cm}^{-3}$) e do potencial mátrico ($\Psi = \text{MPa}$) na camada de 0,05-0,10 m de profundidade, referente à amostragem realizada em 11/2006: $\theta_v = \exp(d + e D_s) \Psi^f$

Manejo do solo	Parâmetro	Valor	Erro Padrão	t	P>t
Escarificação	Milheto/soja/sorgo				
	d	-1,6842	0,2505	-6,7235	<0,0001
	e	0,1532	0,1768	0,8662	0,3935
	f	-0,1087	0,0085	-12,7688	<0,0001
	$r^2 = 0,88^{**}$				
	Milheto/soja/Brachiaria				
	d	-2,7161	0,2920	-9,3004	<0,0001
	e	0,8731	0,1982	4,4047	0,0001
	f	-0,1154	0,0084	-13,6888	<0,0001
	$r^2 = 0,88^{**}$				
	Milheto/soja/Brachiaria+ mamona				
	d	-1,5912	0,3122	-5,0963	<0,0001
Sem escarificação	e	0,1129	0,2117	0,5332	0,5980
	f	-0,1025	0,0104	-9,8403	<0,0001
	$r^2 = 0,79^{**}$				
	Milheto/soja/sorgo				
	d	-1,8702	0,3407	-5,4894	<0,0001
	e	0,2792	0,2272	1,2288	0,2290
	f	-0,1097	0,0070	-15,5931	<0,0001
	$r^2 = 0,91^{**}$				
	Milheto/soja/Brachiaria				
	d	-3,1880	0,4538	-7,0256	<0,0001
	e	1,1468	0,3147	3,6442	0,0010
	f	-0,1197	0,0073	-16,4131	<0,0001
	$r^2 = 0,92^{**}$				
	Milheto/soja/Brachiaria + mamona				
	d	-2,8005	0,4783	-5,8551	<0,0001
	e	0,9323	0,3393	2,7474	0,0102
	f	-0,1069	0,0102	-10,4351	<0,0001
	$r^2 = 0,84^{**}$				

** Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste F

Quadro 23. Estimativa dos parâmetros da regressão para o conteúdo volumétrico da água no solo ($\theta_v = \text{m}^3 \text{m}^{-3}$) em função da densidade ($D_s = \text{g cm}^{-3}$) e do potencial mátrico ($\Psi = \text{MPa}$) na camada de 0,10-0,20 m de profundidade, referente à amostragem realizada em 11/2006: $\theta_v = \exp(d + e D_s) \Psi^f$

Manejo do solo	Parâmetro	Valor	Erro Padrão	t	P>t
Escarificação	Milheto/soja/sorgo				
	d	-1,9577	0,3523	-5,5568	<0,0001
	e	0,3480	0,2465	1,4119	0,1686
	f	-0,1151	0,0121	-9,5476	<0,0001
	$r^2 = 0,78^{**}$				
	Milheto/soja/Brachiaria				
	d	-2,0893	0,3540	-5,9027	<0,0001
	e	0,4677	0,2558	1,8283	0,0778
	f	-0,1117	0,0102	-10,9011	<0,0001
	$r^2 = 0,82^{**}$				
	Milheto/soja/Brachiaria + mamona				
	d	-1,7194	0,2505	-6,8636	<0,0001
Sem escarificação	e	0,2306	0,1791	1,2875	0,2081
	f	-0,0965	0,0092	-10,4508	<0,0001
	$r^2 = 0,81^{**}$				
	Milheto/soja/sorgo				
	d	-2,4745	0,4078	-6,0687	<0,0001
	e	0,7451	0,2652	2,8095	0,0088
	f	-0,0937	0,0072	-12,9616	<0,0001
	$r^2 = 0,87^{**}$				
	Milheto/soja/Brachiaria				
	d	-2,1234	0,4495	-4,7242	<0,0001
	e	0,4729	0,3112	1,5194	0,1395
	f	-0,1008	0,0075	-13,4568	<0,0001
	$r^2 = 0,87^{**}$				
	Milheto/soja/Brachiaria + mamona				
	d	-1,3333	0,2847	-4,6824	<0,0001
	e	-0,0727	0,2000	-0,3637	0,7187
	f	-0,1066	0,0082	-13,0170	<0,0001
	$r^2 = 0,87^{**}$				

** Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste F

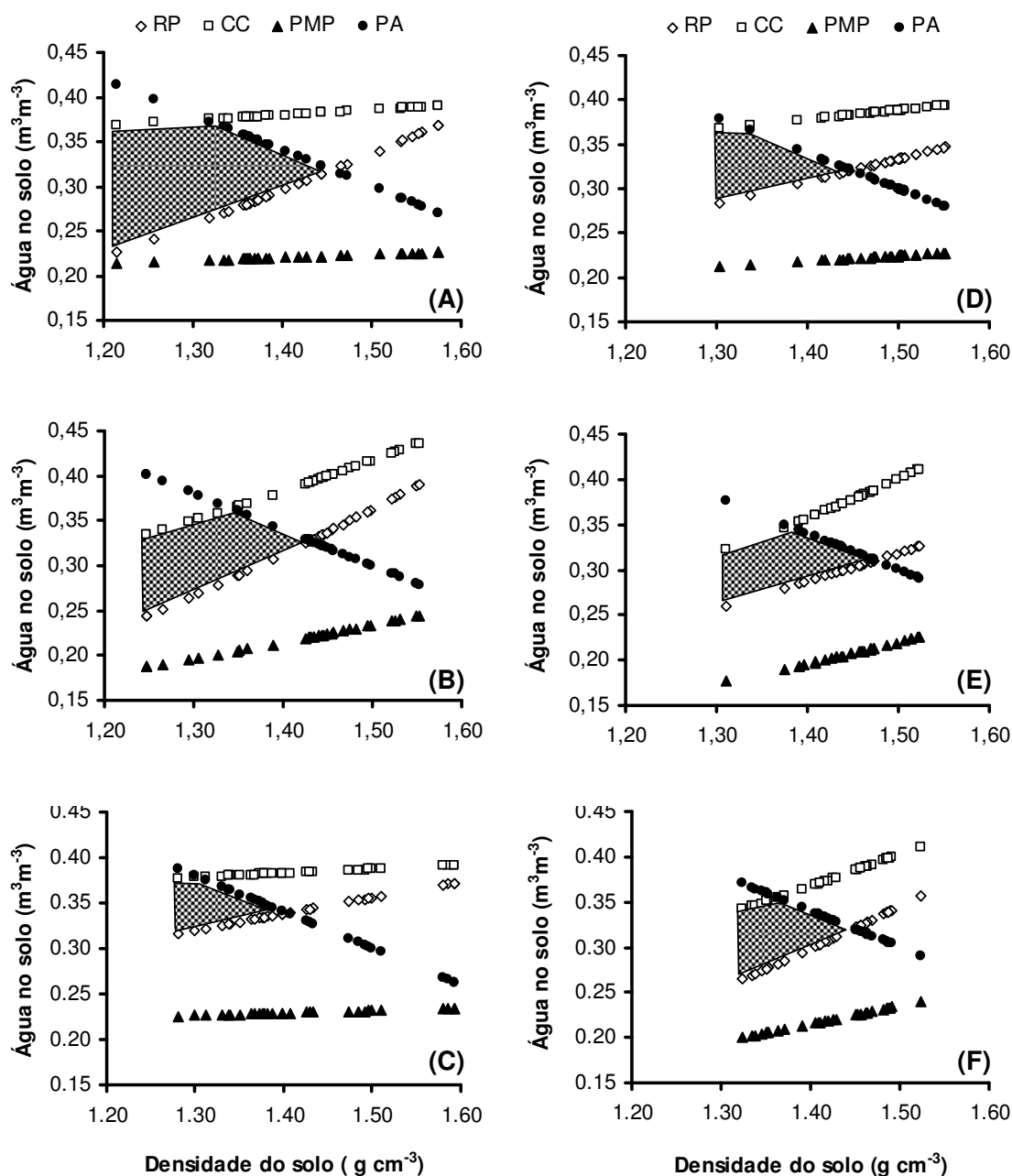


Figura 18. Variação do conteúdo de água em função da densidade do solo, nos níveis críticos da capacidade de campo ($\text{CC} = -0,01 \text{ MPa}$), ponto de murcha permanente ($\text{PMP} = -1,5 \text{ MPa}$), porosidade de aeração ($\text{PA} = 10\%$) e resistência à penetração ($\text{RP} = 2 \text{ MPa}$), referente às amostras coletadas na camada de 0,05-0,10 m, após o primeiro ano do experimento. A área hachurada representa o IHO. (A) escarificação - milheto / soja / sorgo; (B) escarificação - milheto / soja / *Brachiaria*; (C) escarificação - milheto / soja / *Brachiaria* + mamona; (D) sem escarificação - milheto / soja / sorgo; (E) sem escarificação - milheto / soja / *Brachiaria*; (F) sem escarificação - milheto / soja / *Brachiaria* + mamona.

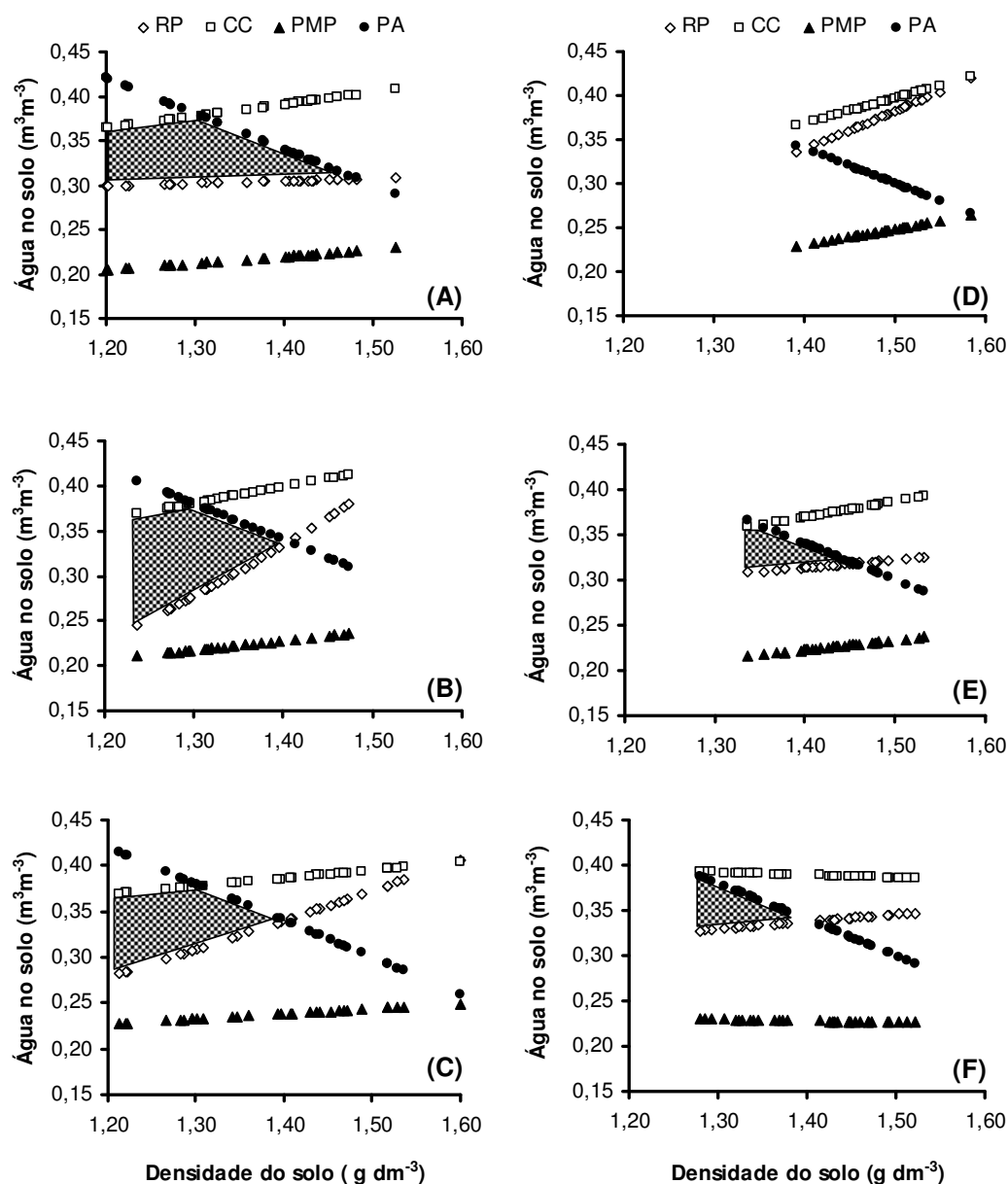


Figura 19. Variação do conteúdo de água em função da densidade do solo, nos níveis críticos da capacidade de campo (CC = -0,01 MPa), ponto de murcha permanente (PMP = -1,5 MPa), porosidade de aeração (PA = 10%) e resistência à penetração (RP = 2MPa), referente às amostras coletadas na camada de 0,10-0,20 m, após o primeiro ano do experimento. A área hachurada representa o IHO. (A) escarificação - milheto / soja / sorgo; (B) escarificação - milheto / soja / *Brachiaria*; (C) escarificação - milheto / soja / *Brachiaria* + mamona; (D) sem escarificação - milheto / soja / sorgo; (E) sem escarificação - milheto / soja / *Brachiaria*; (F) sem escarificação - milheto / soja / *Brachiaria* + mamona.

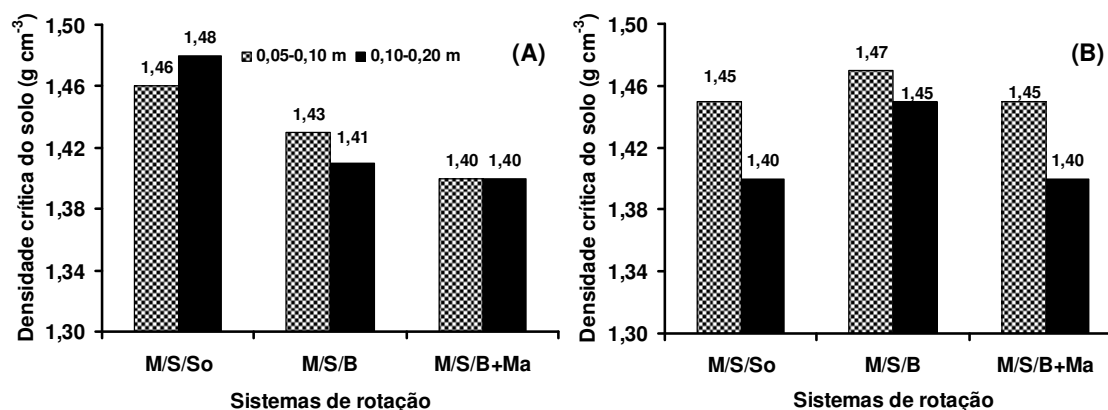


Figura 20. Densidade crítica do solo nas camadas de 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, no primeiro ano dos tratamentos com (A) e sem escarificação (B) sob os sistemas de rotação. M/S/So – milho / soja / sorgo; M/S/B – milho / soja / *Brachiaria* e M/S/B+Ma – milho / soja / *Brachiaria* + mamona.

6.3.8. Intervalo Hídrico Ótimo x Rotações de Culturas (11/2007)

De maneira geral, após o segundo ano de avaliação do experimento, na camada 0,05-0,10 m, houve uma diminuição da amplitude do IHO, principalmente para sistema sem escarificação inicial (Figura 21). No entanto, a rotação que recebeu a *Brachiaria* em consórcio com a mamona em sistema sem escarificação, foi a que manteve a mesma amplitude do IHO do ano anterior. Isto pode ser atribuído ao crescimento radicular mais agressivo dessa espécie, principalmente quando consorciada com mamona, o que promoveu alteração significativa na Pt e Mp do solo. Na camada de 0,10-0,20 m, as rotações M/S/So e M/S/B em sistema escarificado, reduziram a amplitude de IHO e a rotação M/S/B+Ma ampliou o IHO. Em todas as rotações em sistema sem escarificação inicial houve aumento da amplitude de IHO, principalmente quando se usou a *Brachiaria* solteira ou em consórcio com mamona.

Como limite inferior do IHO teve-se o teor de água para manter a RP em 2 MPa (θ_{RP}) em todas as amostras, sugerindo que este solo, por sua própria natureza física, possui elevada compactação, necessitando estar sempre com alta umidade para não haver danos ao crescimento radicular. Quanto ao limite superior, a θ_{PA} foi o limite máximo de água no solo com Ds para a camada de 0,05-0,10m, de $\geq$ a 1,34, 1,34 e 1,29 g cm⁻³, nos tratamentos com escarificação (milho / soja / sorgo; milho / soja / *Brachiaria* e milho / soja /

Brachiaria + mamona, respectivamente) e 1,38, 1,36 e 1,29 g cm⁻³, para os mesmos tratamentos, respectivamente, no sistema sem escarificação (Figura 21). Suas respectivas umidades volumétricas, máximas para permitir o mínimo de 10 % de PA, foram de 0,36, 0,37 e 0,39 cm cm⁻³ nos tratamentos com escarificação (milheto / soja / sorgo; milheto / soja / *Brachiaria* e milheto / soja / *Brachiaria* + mamona, respectivamente) e 0,36, 0,36 e 0,39 cm cm⁻³ para os mesmos tratamentos sem escarificação, respectivamente (Figura 21).

Seguindo a mesma sequência de tratamentos, para a camada de 0,10-0,20 m, os valores de Ds foram $\geq$ a 1,36, 1,29 e 1,33 g cm⁻³ e 1,31, 1,30 e 1,36 g cm⁻³, respectivamente, no sistema com e sem escarificação inicial. Seus valores de umidade volumétrica, foram de 0,35, 0,37 e 0,37 cm cm⁻³ e 0,37, 0,39 e 0,36 cm cm⁻³ (Figura 22).

De maneira geral, a Dsc diminuiu após o segundo ano de experimento, apresentando valores na camada 0,05-0,10 m de 1,41, 1,40 e 1,40 g cm⁻³ para as rotações “milheto / soja / sorgo; milheto / soja / *Brachiaria* e milheto / soja / *Brachiaria* + mamona” no solo sem escarificação inicial, respectivamente. No tratamento com escarificação inicial, as mesmas rotações apresentaram Dsc de 1,42, 1,40 e 1,40 g cm⁻³, respectivamente (Figura 23).

Na camada de 0,10-0,20 m, nos tratamentos sem escarificação a Dsc foi de 1,36, 1,41 e 1,40 g cm⁻³, para as mesmas rotações. Quando da escarificação inicial, as Dsc foram de 1,47, 1,40 e 1,41 g cm⁻³, respectivamente.

Através da Dsc (Figura 23), após o segundo ano de experimento, pode-se inferir que todos os tratamentos promoveram uma diminuição da amplitude de IHO, exceto quando se usou a *Brachiaria* solteira ou em consórcio, principalmente na camada de 0,10-0,20 m. Isto mostra o maior efeito de espécies com sistema radicular agressivo e vigoroso nas camadas mais compactadas (0,10-0,20 m), que possivelmente atuam na formação de macroporos de maior estabilidade.

Considerando os valores de Dsc como ferramenta para avaliar o efeito dos tratamentos na qualidade estrutural do solo por 3 anos agrícolas consecutivos, pode-se afirmar que os tratamentos envolvendo as rotações de culturas, não foram suficientes para obter incrementos nos valores de Dsc. Dessa forma, pode-se afirmar que se essas rotações forem repetidas por mais alguns anos, talvez ocorram, em futuras avaliações, resultados mais favoráveis. Isto se reforça devido aos aumentos nos resultados de Mp, Pt, Ds, curvas de retenção de água (índice *S*) e de MO discutidos anteriormente.

Quadro 24 . Estimativa dos parâmetros da regressão para resistência à penetração do solo (RP = MPa) em função do conteúdo volumétrico da água ($\theta_v = \text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e densidade do solo ($D_s = \text{g cm}^{-3}$) na camada de 0,05-0,10 m de profundidade, referente à amostragem realizada em 11/2007: $RP = a \theta_v^b D_s^c$

Manejo do solo	Parâmetro	Valor	Erro Padrão	t	P>t
Escarificação	Milheto/soja/sorgo				
	a	0,0117	0,0061	1,9140	0,0655
	b	-3,1016	0,2916	-10,6371	<0,0001
	c	4,5315	0,9634	4,7036	<0,0001
	$r^2 = 0,86^{**}$				
	Milheto/soja/Brachiaria				
	a	0,0275	0,0146	1,8816	0,0700
	b	-2,9272	0,2878	-10,1707	<0,0001
	c	3,2892	0,9082	3,6218	0,0011
	$r^2 = 0,86^{**}$				
	Milheto/soja/Brachiaria + mamona				
	a	0,0523	0,0275	1,9055	0,0667
Sem escarificação	b	-2,3280	0,2116	-11,0007	<0,0001
	c	3,0887	1,0884	2,8378	0,0082
	$r^2 = 0,85^{**}$				
	Milheto/soja/sorgo				
	a	0,0688	0,0216	3,1832	0,0035
	b	-2,6842	0,1535	-17,4869	<0,0001
	c	1,0248	0,5974	1,7155	0,0969
	$r^2 = 0,93^{**}$				
	Milheto/soja/Brachiaria				
	a	0,1408	0,0699	2,0152	0,0532
	b	-2,1724	0,1819	-11,9462	<0,0001
	c	0,7545	1,1682	0,6459	0,5234
	$r^2 = 0,87^{**}$				
	Milheto/soja/Brachiaria + mamona				
	a	0,0565	0,0294	1,9198	0,0648
	b	-2,4218	0,2519	-9,6547	<0,0001
	c	2,4950	1,1816	2,1115	0,0435
	$r^2 = 0,85^{**}$				

** Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste F

Quadro 25. Estimativa dos parâmetros da regressão para resistência à penetração do solo (RP = MPa) em função do conteúdo volumétrico da água ($\theta_v = \text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e densidade do solo ($D_s = \text{g cm}^{-3}$) na camada de 0,10-0,20 m de profundidade, referente à amostragem realizada em 11/2007: $RP = a \theta_v^b D_s^c$

Manejo do solo	Parâmetro	Valor	Erro Padrão	t	P>t
Escarificação	Milheto/soja/sorgo				
	a	0,0460	0,0275	1,6706	0,1056
	b	-3,6506	0,4875	-7,4890	<0,0001
	c	-1,8427	1,2374	-1,4891	0,1473
	$r^2 = 0,79^{**}$				
	Milheto/soja/Brachiaria				
	a	0,0563	0,0398	1,4162	0,1674
	b	-2,6335	0,2904	-9,0682	<0,0001
	c	2,1257	1,6285	1,3053	0,2011
	$r^2 = 0,82^{**}$				
	Milheto/soja/Brachiaria + mamona				
	a	0,0072	0,0044	1,6109	0,1180
Sem escarificação	b	-3,2354	0,3903	-8,2907	<0,0001
	c	5,9616	0,9265	6,4340	<0,0001
	$r^2 = 0,82^{**}$				
	Milheto/soja/sorgo				
	a	0,0832	0,0266	3,1256	0,0040
	b	-3,2244	0,2428	-13,2777	<0,0001
	c	-0,7359	0,5905	-1,2461	0,2227
	$r^2 = 0,90^{**}$				
	Milheto/soja/Brachiaria				
	a	0,0111	0,0121	0,9175	0,3664
	b	-3,3923	0,4586	-7,3976	<0,0001
	c	4,1741	2,4331	1,7155	0,0969
	$r^2 = 0,78^{**}$				
	Milheto/soja/Brachiaria + mamona				
	a	0,0661	0,0459	1,4394	0,1607
	b	-2,3370	0,3536	-6,6099	<0,0001
	c	2,6320	1,4021	1,8772	0,0706
	$r^2 = 0,68^{**}$				

** Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste F

Quadro 26. Estimativa dos parâmetros da regressão para o conteúdo volumétrico da água no solo ($\theta_v = \text{m}^3 \text{m}^{-3}$) em função da densidade ($D_s = \text{g cm}^{-3}$) e do potencial mátrico ($\Psi = \text{MPa}$) na camada de 0,05-0,10 m de profundidade, referente à amostragem realizada em 11/2007: $\theta_v = \exp(d + e D_s) \Psi^f$

Manejo do solo	Parâmetro	Valor	Erro Padrão	t	P>t
Escarificação	Milheto/soja/sorgo				
	d	-1,9918	0,2656	-7,4999	<0,0001
	e	0,3925	0,1932	2,0317	0,0514
	f	-0,0985	0,0057	-17,2463	<0,0001
	$r^2 = 0,93^{**}$				
	Milheto/soja/Brachiaria				
	d	-1,8748	0,2607	-7,1901	<0,0001
	e	0,2820	0,1867	1,5103	0,1418
	f	-0,1116	0,0059	-18,9164	<0,0001
	$r^2 = 0,94^{**}$				
	Milheto/soja/Brachiaria + mamona				
	d	-1,3870	0,3185	-4,3553	0,0002
Sem escarificação	e	-0,0713	0,2265	-0,3148	0,7552
	f	-0,1116	0,0076	-14,7461	<0,0001
	$r^2 = 0,90^{**}$				
	Milheto/soja/sorgo				
	d	-1,8542	0,2900	-6,3939	<0,0001
	e	0,2951	0,1979	1,4914	0,1467
	f	-0,0872	0,0045	-19,5104	<0,0001
	$r^2 = 0,94^{**}$				
	Milheto/soja/Brachiaria				
	d	-1,4097	0,3222	-4,3752	0,0001
	e	-0,0494	0,2238	-0,2208	0,8268
	f	-0,1108	0,0052	-21,2087	<0,0001
	$r^2 = 0,95^{**}$				
	Milheto/soja/Brachiaria + mamona				
	d	-1,5160	0,3836	-3,9526	0,0005
	e	0,0345	0,2649	0,1304	0,8972
	f	-0,1081	0,0079	-13,7016	<0,0001
	$r^2 = 0,88^{**}$				

** Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste F

Quadro 27. Estimativa dos parâmetros da regressão para o conteúdo volumétrico da água no solo ($\theta_v = \text{m}^3 \text{m}^{-3}$) em função da densidade ($D_s = \text{g cm}^{-3}$) e do potencial mátrico ($\Psi = \text{MPa}$) na camada de 0,10-0,20 m de profundidade, referente à amostragem realizada em 11/2007: $\theta_v = \exp(d + e D_s) \Psi^f$

Manejo do solo	Parâmetro	Valor	Erro Padrão	t	P>t
Escarificação	Milheto/soja/sorgo				
	d	-0,9729	0,2366	-4,1118	0,0003
	e	-0,3380	0,1742	-1,9408	0,0621
	f	-0,0869	0,0070	-12,4472	<0,0001
	$r^2 = 0,86^{**}$				
	Milheto/soja/Brachiaria				
	d	-1,4508	0,4913	-2,9530	0,0062
	e	-0,0063	0,3539	-0,0178	0,9860
	f	-0,1040	0,0068	-15,2922	<0,0001
	$r^2 = 0,90^{**}$				
	Milheto/soja/Brachiaria + mamona				
	d	-1,6695	0,2556	-6,5312	<0,0001
Sem escarificação	e	0,1677	0,1808	0,9272	0,3615
	f	-0,0974	0,0068	-14,3144	<0,0001
	$r^2 = 0,89^{**}$				
	Milheto/soja/sorgo				
	d	-1,1911	0,2470	-4,8229	<0,0001
	e	-0,1249	0,1703	-0,7334	0,4692
	f	-0,0791	0,0049	-16,1668	<0,0001
	$r^2 = 0,91^{**}$				
	Milheto/soja/Brachiaria				
	d	-0,6421	0,5739	-1,1187	0,2724
	e	-0,5493	0,3991	-1,3764	0,1792
	f	-0,0927	0,0093	-9,9816	<0,0001
	$r^2 = 0,83^{**}$				
	Milheto/soja/Brachiaria + mamona				
	d	-2,1474	0,3143	-6,8320	<0,0001
	e	0,5158	0,2289	2,2537	0,0319
	f	-0,0917	0,0064	-14,2453	<0,0001
	$r^2 = 0,89^{**}$				

** Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste F

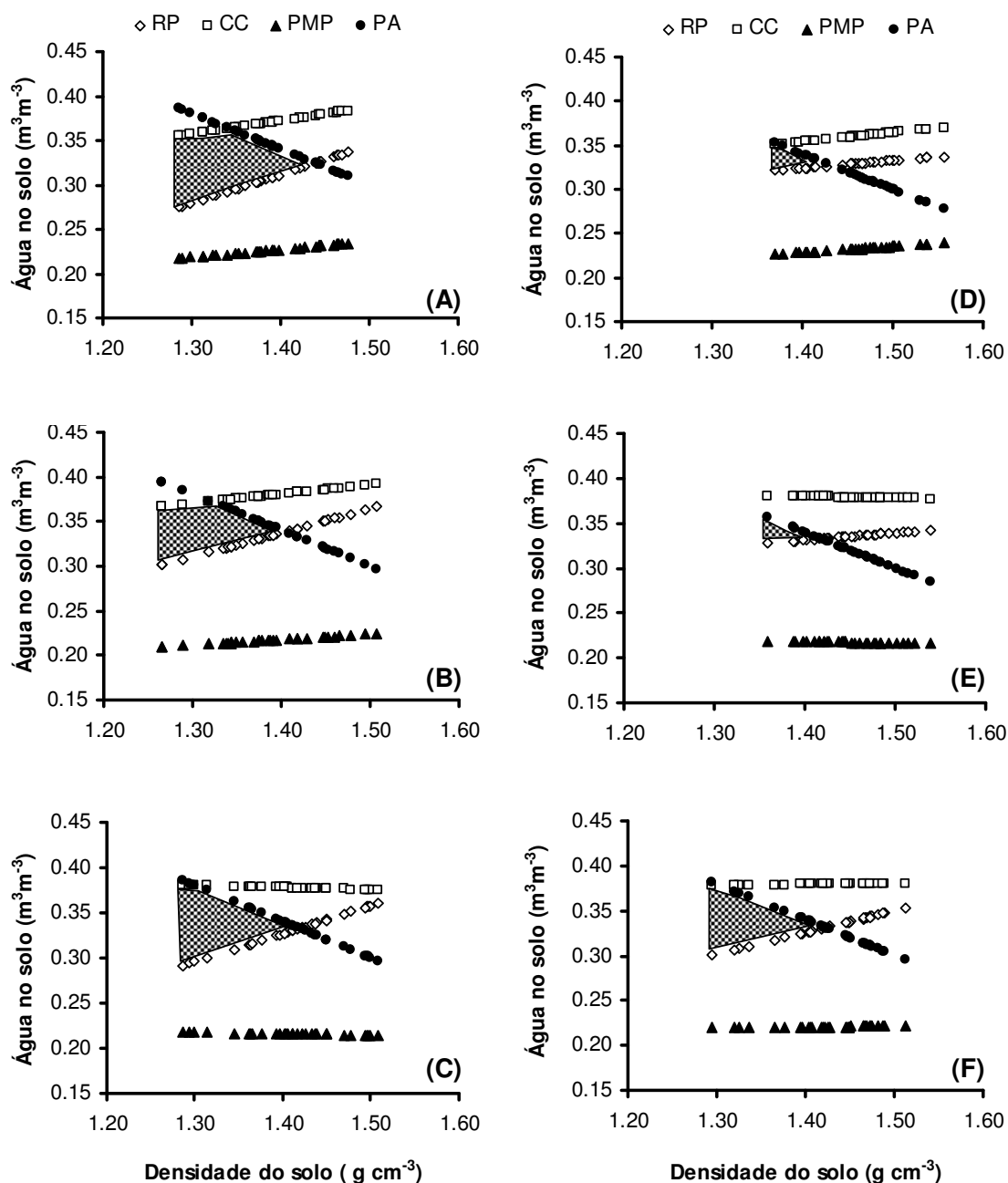


Figura 21. Variação do conteúdo de água em função da densidade do solo, nos níveis críticos da capacidade de campo (CC = -0,01 MPa), ponto de murcha permanente (PMP = -1,5 MPa), porosidade de aeração (PA = 10%) e resistência à penetração (RP = 2MPa), referente às amostras coletadas na camada de 0,05-0,10 m, após o segundo ano do experimento. A área hachurada representa o IHO. (A) escarificação - milho / soja / sorgo; (B) escarificação - milho / soja / *Brachiaria*; (C) escarificação - milho / soja / *Brachiaria* + mamona; (D) sem escarificação - milho / soja / sorgo; (E) sem escarificação - milho / soja / *Brachiaria*; (F) sem escarificação - milho / soja / *Brachiaria* + mamona.

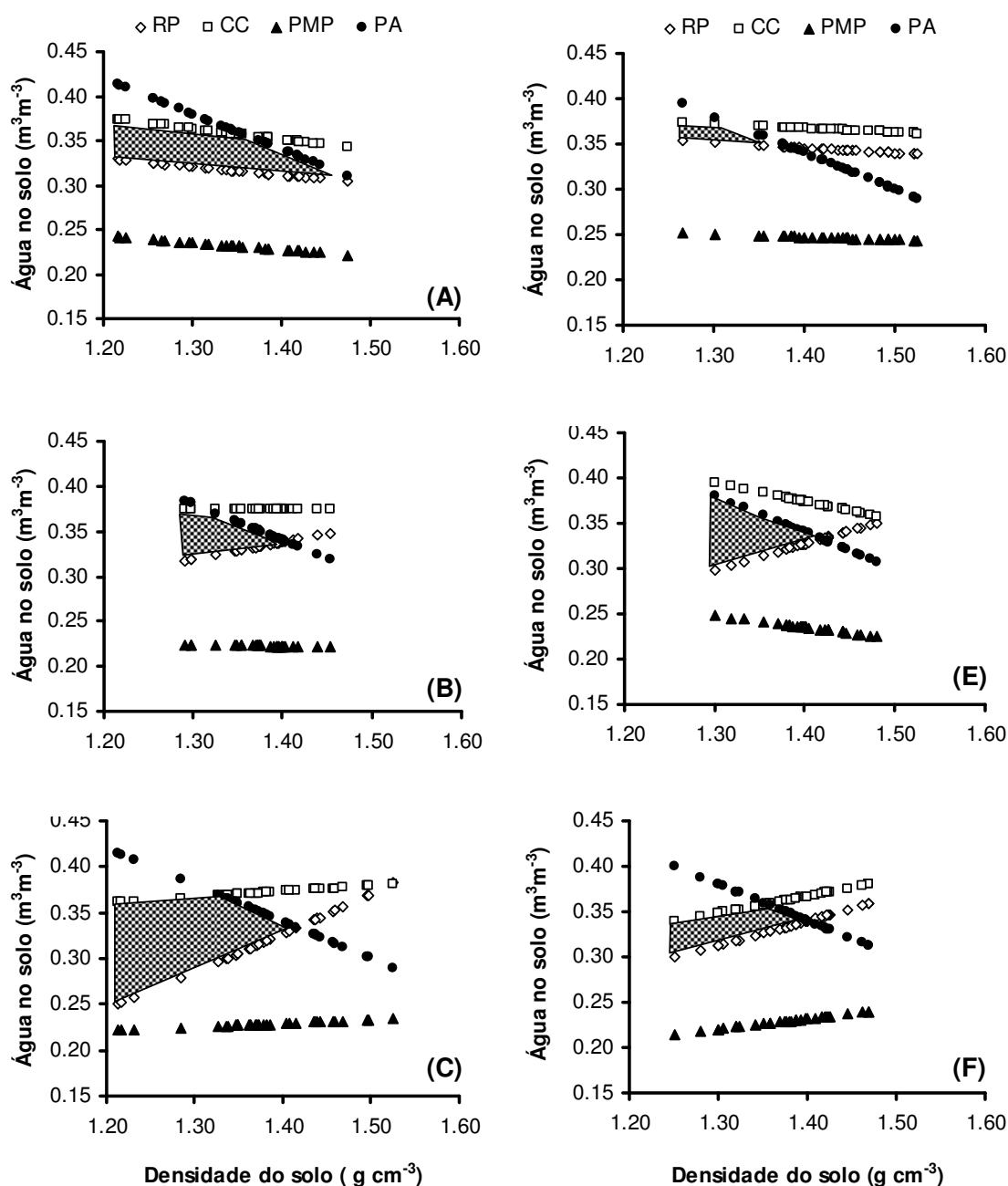


Figura 22. Variação do conteúdo de água em função da densidade do solo, nos níveis críticos da capacidade de campo (CC = -0,01 MPa), ponto de murcha permanente (PMP = -1,5 MPa), porosidade de aeração (PA = 10%) e resistência à penetração (RP = 2MPa), referente às amostras coletadas na camada de 0,10-0,20 m, após o segundo ano do experimento. A área hachurada representa o IHO. (A) escarificação - milho / soja / sorgo; (B) escarificação - milho / soja / *Brachiaria*; (C) escarificação - milho / soja / *Brachiaria* + mamona; (D) sem escarificação - milho / soja / sorgo; (E) sem escarificação - milho / soja / *Brachiaria*; (F) sem escarificação - milho / soja / *Brachiaria* + mamona.

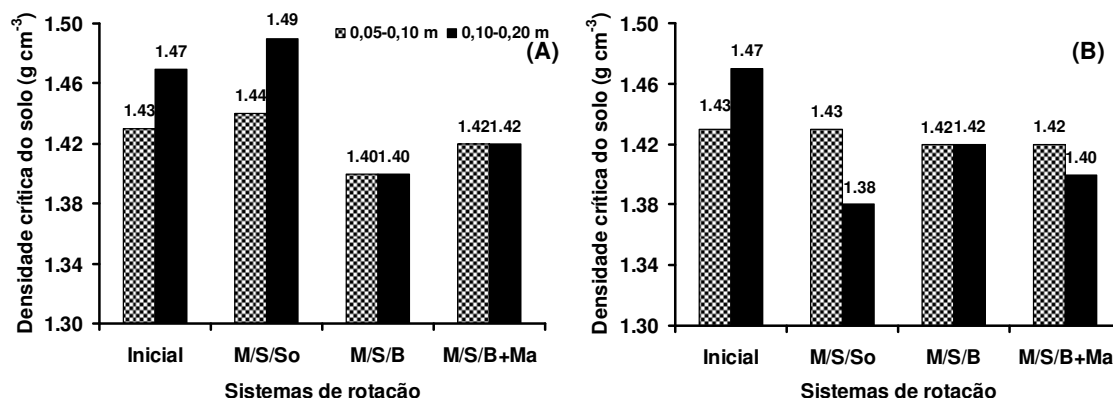


Figura 23. Densidade crítica do solo nas camadas de 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, no segundo ano dos tratamentos com (A) e sem escarificação (B) sob os sistemas de rotação. M/S/So – milho / soja / sorgo; M/S/B – milho / soja / *Brachiaria* e M/S/B+Ma – milho / soja / *Brachiaria* + mamona.

6.3.9. Estabilidade de agregados (EA)

A estabilidade de agregados após o primeiro ano do experimento (Quadro 28) revelou que o manejo do solo escarificado inicialmente resultou em maior porcentagem de agregados maiores que 2 mm, maior DMG e maior DMP, na camada de 0,05-0,10 m, indicando uma melhor estruturação do solo quando submetido a esta prática mecânica. Fato que não era de se esperar, pois a ação mecânica das hastes do escarificador, apesar de não revolver o solo, promove a ruptura da sua estrutura, que tem ação desagregadora intensificada com a utilização do rolo destorroador, que quebra os torrões para diminuir a rugosidade do terreno.

No entanto, essa ação desagregadora foi minimizada, provavelmente, devido ao aumento do teor de MO do solo, auxiliando na estabilidade dos agregados. Em contrapartida, há na literatura relatos apontando alguns inconvenientes da escarificação do solo, como a redução dos teores de MO, a qual reflete na redução da estabilidade da estrutura e em recompactação do solo (BUSSCHER et al., 2002). Além disso, esses resultados podem ser atribuídos ao melhor desenvolvimento radicular das culturas neste manejo (Figura 6), o qual pode promover uma maior agregação do solo pela ação intensificada e uniforme de exsudados radiculares no solo (MIELNICZUK, 1999), principalmente porque neste experimento foi utilizada gramínea nos sistemas de rotação (milho, sorgo e *Brachiaria*), família na qual foi constatado por Castro Filho et al. (1998) ser mais eficiente na agregação do solo, devido seu sistema radicular fasciculado, comparada com a família das leguminosas, de raízes pivotantes.

Para a camada de 0,10-0,20 m não houve diferença significativa entre manejo do solo e sistemas de rotação, possivelmente devido ao menor incremento de MO e ao menor crescimento radicular comparado a camada 0,05-0,10m.

Quadro 28. Valores da estabilidade de agregados referente a amostragem em 11/2006.

Tratamentos	Agregados > 2mm	DMP ⁽²⁾	DMG ⁽³⁾	IEA ⁽⁴⁾
	------(%)-----	------(mm)-----		(%)
0,05-0,10 m				
Manejo do solo				
Com escarificação	74,04	2,52	1,37	94,65
Sem escarificação	67,74	2,38	1,30	92,63
Sistema de rotação				
M/S/So	70,62	2,45	1,33	93,57
M/S/B	73,41	2,49	1,35	93,77
M/S/B+Ma	68,63	2,41	1,32	93,59
Valor F ⁽¹⁾				
Manejo do solo (M)	5,74 *	5,82 *	4,89 *	4,12 ns
Sistema de rotação (R)	1,11 ns	0,66 ns	0,22 ns	0,02 ns
M x R	1,13 ns	0,86 ns	0,64 ns	0,34 ns
D.M.S.				
Manejo do solo	5,53	0,12	0,07	2,09
Sistema de rotação	6,77	0,15	0,08	2,56
0,10-0,20 m				
Manejo do solo				
Com escarificação	74,14	2,52	1,37	94,70
Sem escarificação	76,10	2,57	1,41	95,77
Sistema de rotação				
M/S/So	77,49	2,59	1,41	95,69
M/S/B	74,12	2,53	1,38	95,04
M/S/B+Ma	73,75	2,52	1,38	94,97
Valor F ⁽²⁾				
Manejo do solo (M)	0,49 ns	0,59 ns	0,76 ns	1,07 ns
Sistema de rotação (R)	0,72 ns	0,50 ns	0,47 ns	0,20 ns
M x R	0,98 ns	0,57 ns	0,37 ns	0,28 ns
D.M.S.				
Manejo do solo	5,88	0,14	0,07	2,18
Sistema de rotação	7,21	0,17	0,09	2,67

⁽¹⁾ ns e * não significativo e significativo a 5 % de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

⁽²⁾ Diâmetro médio ponderado. ⁽³⁾ Diâmetro médio geométrico. ⁽⁴⁾ Índice de estabilidade de agregados. M/S/So – milho / soja / sorgo; M/S/B – milho / soja / *Brachiaria* e M/S/B+Ma – milho / soja / *Brachiaria* + mamona.

Na avaliação realizada após o segundo ano de experimento (Quadro 29), constatou-se a diminuição do número de agregados > 2 mm, DMP e DMG em todos os tratamentos, comparado com os resultados obtidos anteriormente.

Quadro 29. Valores de estabilidade de agregados referente a amostragem em 11/2007.

Tratamentos	Agregados > 2mm	DMP ⁽²⁾	DMG ⁽³⁾	IEA ⁽⁴⁾
	------(%)-----	------(mm)-----		(%)
0,05-0,10 m				
Manejo do solo				
Com escarificação	65,75	2,16	1,30	97,97
Sem escarificação	53,04	1,91	1,19	90,54
Sistema de rotação				
M/S/So	60,46	2,10	1,28	96,46
M/S/B	58,22	1,99	1,22	92,40
M/S/B+Ma	59,50	2,02	1,23	93,91
Valor F ⁽¹⁾				
Manejo do solo (M)	2,06 ns	2,49 ns	2,24 ns	2,46 ns
Sistema de rotação (R)	0,02 ns	0,19 ns	0,23 ns	0,25 ns
M x R	0,35 ns	0,24 ns	0,39 ns	0,71 ns
D.M.S.				
Manejo do solo	18,61	0,33	0,15	9,94
Sistema de rotação	22,79	0,40	0,18	12,18
0,10-0,20 m				
Manejo do solo				
Com escarificação	65,31	2,22	1,23	93,85
Sem escarificação	62,42	2,20	1,23	95,71
Sistema de rotação				
M/S/So	62,59	2,21	1,23	97,03
M/S/B	56,39	2,04	1,15	88,93
M/S/B+Ma	72,62	2,38	1,30	98,37
Valor F ⁽²⁾				
Manejo do solo (M)	0,12 ns	0,03 ns	0,01 ns	0,27 ns
Sistema de rotação (R)	1,35 ns	1,55 ns	1,49 ns	2,70 *
M x R	0,56 ns	0,93 ns	1,22 ns	0,32 ns
D.M.S.				
Manejo do solo	17,13	0,32	0,15	7,54
Sistema de rotação	20,97	0,40	0,18	9,23

⁽¹⁾ ns e * não significativo e significativo a 5 % de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

⁽²⁾ Diâmetro médio ponderado. ⁽³⁾ Diâmetro médio geométrico. ⁽⁴⁾ Índice de estabilidade de agregados. M/S/So – milho / soja / sorgo; M/S/B – milho / soja / *Brachiaria* e M/S/B+Ma – milho / soja / *Brachiaria* + mamona.

No entanto, o IEA se manteve com valores muito semelhantes aos anteriores, indicando que houve uma reorganização do tamanho e distribuição dos macroporos, sem alterar o IEA. Essa manutenção da estruturação do solo está associada, em parte com o aporte de MO, pois segundo resultados apresentados por Oliveira et al. (2004), há correlação altamente significativa entre o aumento no teor de MO e o aumento da estabilidade de agregados e em parte, ao sistema radicular que reestrutura esses agregados maiores, pelo do crescimento fasciculado de suas raízes.

Entre as rotações de culturas, observaram-se, após o segundo ano de experimento (Quadro 29), diferenças significativas apenas em relação ao cultivo de *Brachiaria* solteira em sucessão a cultura principal, em que esta rotação proporcionou menor IEA na camada de 0,10-0,20 m.

6.3.10. Resistência do solo a penetração (RP)

No sistema escarificado (Figura 24 A) observa-se que os sistemas de rotações que continham a *Brachiaria* como parte do sistema, a RP foi menor comparado ao sistema M/S/So, até 0,25 m, profundidade esta que provavelmente sofreu a ação do escarificador. No sistema sem escarificação, foram obtidos os maiores valores de RP, independentemente do sistema de rotação usado. O SSD conhecidamente promove uma redução de espaços vazios, com acréscimo da resistência ao cisalhamento e redução da compressibilidade e permeabilidade (BUENO & VILAR, 1998).

Os valores apresentaram-se elevados (avaliação 11/2006) em todos os tratamentos, fato atribuído à baixíssima umidade do solo quando se realizaram as avaliações (Quadro 30). A RP aumenta com a compactação do solo, mas principalmente tem função direta com quantidade de água no solo, sendo restritiva ao crescimento radicular acima de certos valores que, conforme Grant e Lanfond (1993), variam de 1,5 a 3,0 MPa. Porém, Arshad et al., (1996) apontam os valores restritivos para o crescimento das raízes entre 2,0 a 4,0 MPa. Contudo são admitidos valores superiores em SSD, na ordem de 5,0 MPa (EHLERS et al., 1983). Rosolem et al., (1994a) constataram para a cultura do milho redução de 50 % no crescimento radicular com RP de 1,42 MPa, embora não tendo sido completamente inibido mesmo com resistência de 4,0 MPa (ROSOLEM et al., 1994b).

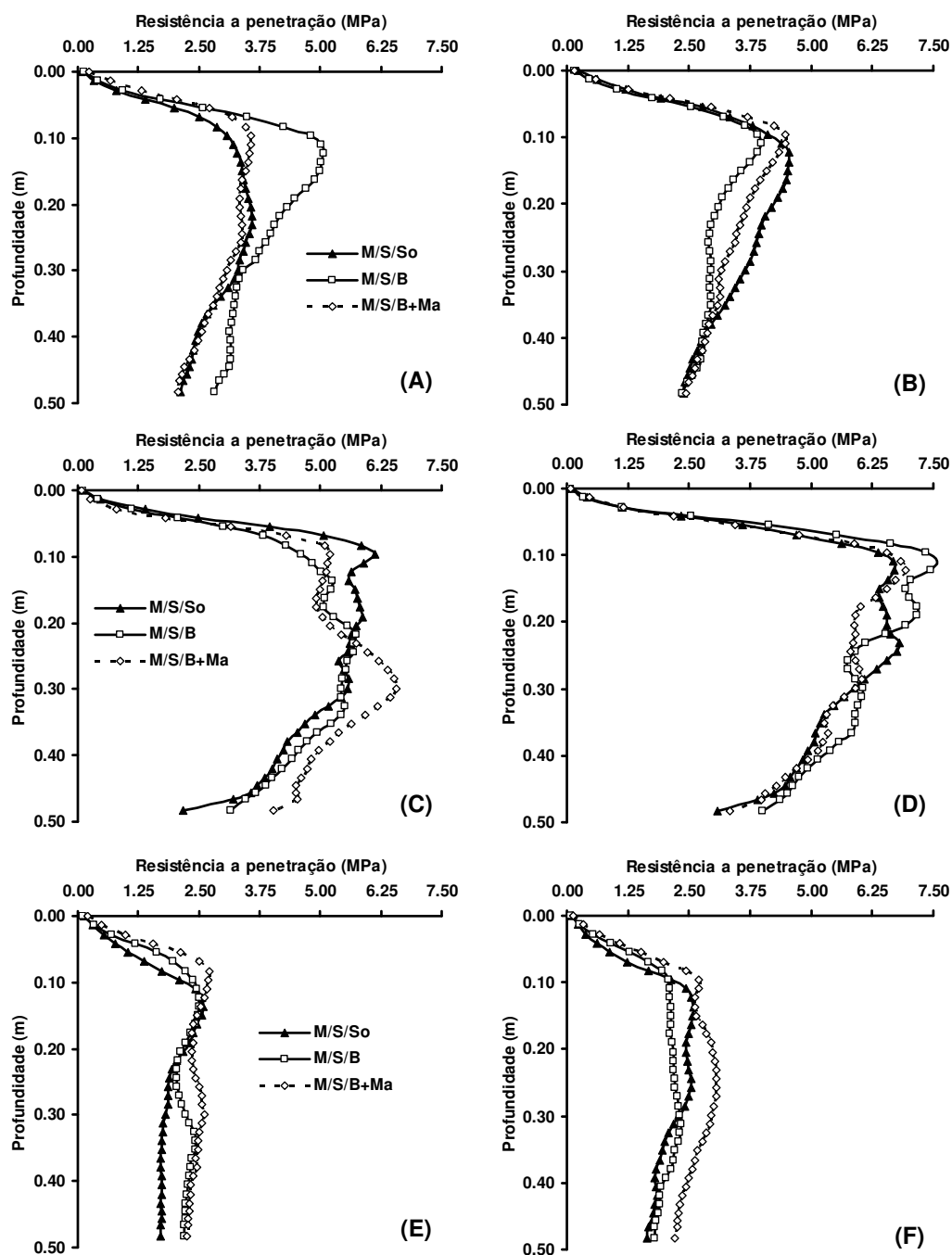


Figura 24. Resistência do solo a penetração nas camadas estudadas em 08/2005 (A e B), em 11/2006 (C e D) e 11/2007 (E e F) com e sem escarificação inicial do solo, respectivamente, sob os sistemas de rotação. M/S/So – milho / soja / sorgo; M/S/B – milho / soja / *Brachiaria* e M/S/B+Ma – milho / soja / *Brachiaria* + mamona.

Quadro 30. Valores de umidade gravimétrica do solo em amostras coletadas simultaneamente ao teste de RP em 08/2005, 11/2006 e 11/2007.

Sistema de rotação	Com escarificação	Sem escarificação
08/2005		
-----0,00-0,05 m-----		
M/S/So	0,219	0,235
M/S/B	0,227	0,237
M/S/B+Ma	0,235	0,248
-----0,05-0,10 m-----		
M/S/So	0,229	0,252
M/S/B	0,245	0,244
M/S/B+Ma	0,251	0,238
-----0,10-0,20 m-----		
M/S/So	0,247	0,256
M/S/B	0,256	0,265
M/S/B+Ma	0,265	0,257
-----0,20-0,40 m-----		
M/S/So	0,257	0,254
M/S/B	0,262	0,265
M/S/B+Ma	0,275	0,277
-----0,40-0,60 m-----		
M/S/So	0,258	0,258
M/S/B	0,268	0,259
M/S/B+Ma	0,277	0,278
11/2006		
-----0,00-0,05 m-----		
M/S/So	0,119	0,119
M/S/B	0,097	0,091
M/S/B+Ma	0,112	0,128
-----0,05-0,10 m-----		
M/S/So	0,141	0,152
M/S/B	0,145	0,144
M/S/B+Ma	0,151	0,138
-----0,10-0,20 m-----		
M/S/So	0,149	0,153
M/S/B	0,156	0,155
M/S/B+Ma	0,157	0,161
-----0,20-0,40 m-----		
M/S/So	0,157	0,164
M/S/B	0,162	0,165
M/S/B+Ma	0,165	0,167
-----0,40-0,60 m-----		
M/S/So	0,176	0,178
M/S/B	0,178	0,177
M/S/B+Ma	0,177	0,178

Quadro 30. Continuação...		
Sistema de rotação	Umidade gravimétrica (g g ⁻¹)	
	Com escarificação	Sem escarificação
11/2007		
	-----0,00-0,05 m-----	
M/S/So	0,261	0,252
M/S/B	0,255	0,264
M/S/B+Ma	0,271	0,278
	-----0,05-0,10 m-----	
M/S/So	0,281	0,285
M/S/B	0,285	0,289
M/S/B+Ma	0,297	0,298
	-----0,10-0,20 m-----	
M/S/So	0,285	0,297
M/S/B	0,287	0,293
M/S/B+Ma	0,301	0,308
	-----0,20-0,40 m-----	
M/S/So	0,294	0,295
M/S/B	0,291	0,298
M/S/B+Ma	0,299	0,301
	-----0,40-0,60 m-----	
M/S/So	0,314	0,309
M/S/B	0,319	0,328
M/S/B+Ma	0,329	0,331

M/S/So – milho / soja / sorgo; M/S/B – milho / soja / *Brachiaria* e M/S/B+Ma – milho / soja / *Brachiaria* + mamona.

Nas camadas 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m (avaliação 11/2006) todas as umidades estão abaixo do IHO, portanto o problema não é só aumentar o IHO, mas sim manter a umidade do solo dentro do IHO. Na avaliação em 11/2007, a umidade do solo esteve mais próxima do IHO.

6.4. Produtividade das culturas

6.4.1. Massa seca de plantas de cobertura (11/2005)

A produtividade média de massa seca de milho no momento do manejo aos 65 DAE foi significativamente superior no tratamento escarificado inicialmente comparado ao não escarificado, os quais produziram 4145 e 2240 kg ha⁻¹, respectivamente

(Quadro 31). Além disso, o tratamento não escarificado apresentou maior número de plantas daninhas, 3,4 pl m⁻² contra 2,4 pl m⁻² no escarificado e maior produtividade de massa seca (2934 kg ha⁻¹) comparada ao tratamento escarificado (805 kg ha⁻¹). Isto indica que no manejo sem escarificação as plantas daninhas estavam maiores pelo fato de não terem sido submetidas ao processo de escarificação, o qual eliminou as plantas existentes. No entanto, vale ressaltar que a soma da produtividade de massa seca de milho e plantas daninhas para ambos os tratamentos são equivalentes, com ligeira vantagem para o manejo sem escarificação inicial (224 kg ha⁻¹) o que pode também ter contribuído para a inexistência de efeito significativo dos tratamentos quanto à produtividade de soja, (Quadro 32).

Quadro 31. Produtividade média de matéria seca de milho ADR 500 e de plantas daninhas no momento do manejo de milho aos 65 DAE ⁽¹⁾.

Sistema de rotação	Escarificação	
	Com	Sem
	-----matéria seca milho (kg ha ⁻¹)-----	
Média	4145	2240
Valor de F		
Manejo do solo (M)	71,77**	
D.M.S		
Manejo do solo (M)	479	
	----- matéria seca de plantas daninhas (kg ha ⁻¹)-----	
Média	805	2934
Valor de F		
Manejo do solo (M)	5, 24 **	
D.M.S		
Manejo do solo (M)	198	

ns – não significativo; * significativo a 5% e ** significativo a 1%. M/S/So – milho / soja / sorgo; M/S/B – milho / soja / *Brachiaria* e M/S/B+Ma – milho / soja / *Brachiaria* + mamona.

6.4.2. Produtividade da cultura da soja (safra 2005/2006)

Na safra (2005/2006) não houve diferença significativa quanto à produtividade de soja entre os tratamentos avaliados, como mostra a análise da variância (Quadro 32).

Trabalhos encontrados na literatura, como o de Bertol & Fischer (1997) relataram que o preparo do solo por meio de um escarificador com rolo destorroador proporciona maior produtividade de grãos de soja em relação aos demais tratamentos, incluindo o SSD. Os autores atribuem esse ganho de produtividade em virtude das melhores condições do espaço poroso. No entanto, este experimento mostra que produtividades semelhantes às obtidas em área escarificada podem ser alcançadas em áreas manejadas em SSD, com o cultivo de planta de cobertura com sistema radicular agressivo e vigoroso (neste caso milheto), capaz de melhorar a qualidade estrutural do solo. Câmara & Klein (2005) também verificaram ausência de resposta na produtividade de grãos de soja com o manejo envolvendo escarificação solo, em comparação aos tratamentos mantidos em semeadura direta sem a intervenção mecânica, mesmo havendo redução da resistência à penetração com a utilização do escarificador.

Quadro 32. Produtividade média de grãos de soja, cultivar Embrapa 48, corrigidos a 13 % de umidade, safra 2005/2006.

Sistema de rotação	Escarificação	
	Com	Sem
	-----Produtividade (kg ha ⁻¹)-----	
Média	3370	3284
Valor de F		
Manejo do solo (M)	0,59 ns	
D.M.S		
Manejo do solo (M)	295	

ns - não significativo a 5% de probabilidade, pelo teste t (LSD). M/S/So – milheto / soja / sorgo; M/S/B – milheto / soja / *Brachiaria* e M/S/B+Ma – milheto / soja / *Brachiaria* + mamona.

6.4.3. Massa seca de plantas de cobertura (11/2006)

A produtividade de massa seca das plantas de cobertura na amostragem realizada em novembro de 2006, está apresentada no quadro 33. A análise de variância não mostrou efeito significativo do manejo do solo com escarificação sobre a produtividade de massa seca. Houve diferença significativa somente entre os sistemas de rotação, onde no sistema M/S/So foi significativamente maior a produtividade de massa seca.

A menor produtividade da massa seca no sistema SSD para os sistemas com *Brachiaria*, pode ser atribuída ao crescimento lento dessa cultura, comparada à cultura do sorgo, e a maior RP do solo neste sistema (Figura 24 B).

Quadro 33. Produtividade média de massa seca de plantas de cobertura em 11/2006.

Sistema de rotação	Escarificação		Média
	Com	Sem	
	-----Produtividade (kg ha ⁻¹)-----		
M/S/So	7369	7147	7258
M/S/B	5103	3639	4371
M/S/B+Ma	5136	4361	4749
Valor de F			
Manejo do solo (M)		1,57 ns	
Sistemas de rotação (R)		7,14 **	
M x R		0,28 ns	
D.M.S			
Manejo do solo (M)		1424	
Sistemas de rotação (R)		1744	

** e ns – significativo a 1% de probabilidade e não significativo, respectivamente. Letras iguais na coluna não diferem entre si pelo teste t, (LSD). M/S/So – milho / soja / sorgo; M/S/B – milho / soja / *Brachiaria* e M/S/B+Ma – milho / soja / *Brachiaria* + mamona.

As culturas do sorgo e da mamona foram extremamente prejudicadas pelo período de inverno seco que ocorreu na região (Figura 3 A), tendo seu desenvolvimento restabelecido somente após as primeiras chuvas de setembro de 2006 (Figura 3 B), não havendo tempo hábil para as suas respectivas colheitas. Portanto, após este período, estas obtiveram um desenvolvimento satisfatório até quando foi realizada a amostragem, sendo estas contabilizadas como plantas de cobertura, para a produtividade de massa seca.

6.4.4. Produtividade da cultura do milho (safra 2006/2007)

Para a produtividade de milho (safra 2006/2007) não houve diferença significativa entre os tratamentos avaliados, como mostra a análise de variância (Quadro 34). Todas as melhorias obtidas até então, como o aumento da Mp, Pt, retenção de água e MO, não foram suficientes para garantir uma boa produtividade diante da severa estiagem que ocorreu

durante o pleno estágio de florescimento e, principalmente durante o enchimento de grãos da cultura do milho (Figura 3 B).

Quadro 34. Produtividade média de grãos de milho, cultivar DOW 2B710, safra 2006/2007.

Quadro 3.1 Produtividade média de grãos de milho, cultivar DSW 23718, safra 2006/2007		
Sistema de rotação	Escarificação	
	Com	Sem
	-----Produtividade (kg ha ⁻¹)-----	
M/S/So/Mi	4296	4401
M/S/B/B+Mi	4449	4273
M/S/B+Ma/Mi+B	4609	4596
Valor de F		
Manejo do solo (M)	0,11 ns	
Sistemas de rotação (R)	0,01 ns	
M x R	0,03 ns	
D.M.S		
Manejo do solo (M)	1067	
Sistemas de rotação (R)	1307	

ns - não significativo a 5% de probabilidade, pelo teste t (LSD). M/S/So/Mi – milheto / soja / sorgo / milho; M/S/B/B+Mi– milheto / soja / *Brachiaria* / *Brachiaria* + milho e M/S/B+Ma/Mi+B – milheto / soja / *Brachiaria* + mamona / milho + *Brachiaria*.

6.4.5. Massa seca das plantas de cobertura (11/2007)

No quadro 35 esta apresentada a produtividade de massa seca das plantas de cobertura para a safra 2007/2008. A análise de variância não apresentou diferença significativa entre os manejos do solo com e sem escarificação inicial.

Para as rotações, houve diferença entre elas, sendo que naquela que continha a *Brachiaria* solteira, ou em consórcio com mamona houve maior produção massa seca em relação à rotação M/S/So.

A maior produtividade dessas rotações deve-se ao melhor desenvolvimento dessa espécie em condições de outono-inverno seco e, conseqüentemente ao melhor desenvolvimento radicular, como foi observado para massa seca radicular e comprimento médio radicular. Assim, supõe-se que a *Brachiaria* se beneficia mais quanto a

absorção de água e nutrientes ao ultrapassar camadas de maior grau de compactação, quando comparada a espécies com sistema radicular menos agressivo (MIELNICZUK, 1996).

Quadro 35. Produtividade média de massa de matéria seca de plantas de cobertura em 11/2007.

Sistema de rotação	Escarificação		Média
	Com	Sem	
	-----Produtividade (kg ha ⁻¹)-----		
M/S/So/Mi/So	3297	3051	3174 b
M/S/B/Mi+B/B	5404	4480	4942 ab
M/S/B+Ma/Mi+B/Ma+B	5659	6559	6109 a
Valor de F			
Manejo do solo (M)		0,02 ns	
Sistemas de rotação (R)		8,40 **	
M x R		0,82 ns	
D.M.S			
Manejo do solo (M)		1236	
Sistemas de rotação (R)		1514	

** e ns – significativo a 1% de probabilidade e não significativo, respectivamente. Letras iguais na coluna não diferem entre si pelo teste t, (LSD). M/S/So/Mi/So – milho / soja / sorgo / milho / sorgo; M/S/B/Mi+B/B – milho / soja / *Brachiaria* / milho + *Brachiaria* / *Brachiaria* e M/S/B+Ma/Mi+B/Ma+B – milho / soja / *Brachiaria* + mamona / milho + *Brachiaria* / mamona + *Brachiaria*.

6.4.6. Produtividade da cultura da soja (safra 2007/2008)

Quando são comparados os resultados atuais com os resultados obtidos na safra 2005/2006, se observa que houve uma queda acentuada na produtividade de grãos de soja em todos os tratamentos utilizados. Este fato pode ser atribuído a má distribuição das chuvas durante o ciclo da cultura na safra 2007/2008 (Figura 4C) e pode ser confirmadas através dos resultados de IHO (Figuras 22 e 23), que submeteram a cultura a uma frequência maior sob condições de estresse hídrico.

A produtividade da soja na safra 2007/2008 foi diferente entre as rotações quando o solo não sofreu a escarificação inicial (Quadro 36). A maior produtividade foi observada na rotação M/S/B+Ma (média de 2691 kg ha⁻¹), comparada as demais rotações. Para o manejo de solo sem escarificação inicial, a rotação M/S/B+Ma apresentou a maior

porcentagem de cobertura do solo e aporte de MO, influenciam no comportamento do solo quanto às propriedades físico-hídricas.

7. CONCLUSÕES

A escarificação inicial do solo promoveu melhores condições físico-hídricas logo após sua realização, porém, com efeito, pouco duradouro, de no máximo 2 anos.

O sistema de manejo de solo mantido sem escarificação inicial e com rotação de culturas melhora suas condições físico-hídricas a partir do segundo ano, igualando-se ao sistema que recebeu a escarificação.

Em condições de solo úmido, a produtividade de grãos não é limitada, mesmo quando há altos níveis de compactação do solo. A rotação de culturas, mesmo melhorando as condições físico-hídricas do solo não é suficiente para sobrepujar os efeitos do regime hídrico durante o ciclo das culturas.

Em condições de déficit hídrico, a rotação com *Brachiaria* solteira ou em consórcio com mamona foi a que proporcionou os melhores resultados, tanto para estruturação do solo, quanto para produtividade de massa seca, fator importantíssimo para o sucesso do sistema de semeadura direta.

A variação dos valores de IHO observados após o segundo ano de experimento, não resultaram em perdas ou ganhos de produtividade de soja, o que deixa clara a necessidade de avaliar a frequência com que a umidade do solo permanece dentro do IHO durante o ciclo da cultura.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

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

ACHARYA, C.L. & SHARMA, P.D. Tillage and mulch effects on soil physical environment, root growth, nutriente uptake and yeld of maize and wheat on an Alfisol in north-west India. **Soil Tillage Research.**, 32:291-302, 1994.

ALVARENGA, R.C.; COSTA, L.M.; MOURA FILHO, W.; REGAZZI, A.J. Produção de matéria seca e absorção de nutrientes por leguminosas, em resposta à compactação do solo. **Revista Ceres.** 44:421-431, 1997.

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**, 28:495-504, 2004.

ARSHAD, M.A.; LOWERY, B., GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J.W. JONES, A.J. **Methods for assessing soil quality**. Madison: Soil Science Society of America. 1996. p. 123-141 (SSA Special publication 49).

ASAE, Standard. ASAE S 313.2. **Soil Cone Penetrometer**. St. Jph, MI, p. 591. 1995.

AZEVEDO, A.C. de.& DALMOLIN, S.D. **Solos e Ambiente: uma introdução**. Santa Maria:Ed. Pallotti, 2004, 100p.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; MARTIN NETO, L. Efeito 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**, 24:599-607, 2000.

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

BENNIE, A.T.P. Growth and mechanical impedance. In: WAISEL, Y.; ESHEL, A.; KAFKAFI, U. **Plants Roots: the hidden half**. 2. ed. New York: MARCEL DEKKER, 1996. p. 453-470.

BERG, M. van der; KLAMT, E.; van REEUWIJK & SOMBROEK, W.G. Pedotransfer functions for the estimation of moisture retention characteristics of Ferralsols and related soils. **Geoderma**, 78:161-180, 1997.

BERTOL, O.J. & FISCHER, I.I. Semeadura direta versus sistemas de preparo reduzido: efeito na cobertura do solo e no rendimento da cultura da soja. **Engenharia Agrícola**, 17: 87-96, 1997.

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

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SILVA, A.P.; CENTURION, M. A.P.C.; LEONEL, C. L. & FREDDI, O. S. Soil compaction by machine traffic and least limiting water range related to soybean yield. **Pesquisa Agropecuária brasileira**, Brasília, v.43, n.11, p.1591-1600, 2008.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SILVA, A.P. da; BARBOSA, J.C. Intervalo hídrico ótimo e produtividade de cultivares de soja. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 10:639–645, 2006.

BEULTER, A.N.; CENTURION, J.F. Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 39:581-588, 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**, 25:167-177, 2001.

BLAKE, G.R. & HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods*. 2.ed. Madison, **America Society of Agronomy**, p.363-375. 1986.

BORGES, E.N.; LOMBARDI NETO, F.; CORRÊA, G.F.; BORGES, E.V.S. Alterações físicas introduzidas por diferentes níveis de compactação em latossolo vermelho-escuro textura média. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 34:1663-1667, 1999.

BRADY, N.C.; WEIL, R.R. **The nature and properties of soils**. 12.ed. New Jersey: Prentice Hall, 1999. 881p.

BUENO, B.S. ; VILAR, O.M. **Mecânica dos solos**. São Carlos: USP, EESC, 1998, v. 1, 131p.

BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to common water content. Trans. **American Society Agriculture Engenieer**, 3:19-524, 1990.

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

CALONEGO, J.C. **Uso de plantas de cobertura na recuperação de solo compactado**. Botucatu, 2007, 140 f. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas.

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

CAMARGO, O.A. e ALLEONI, L.R.F. **Compactação do Solo e o Desenvolvimento de Plantas**. Piracicaba: ESALQ, 1997. 132p.

CANALLI, L. B.; ROLOFF, G. Influência do preparo do solo e da correção do solo na condição hídrica de latossolo vermelho escuro sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas (SP), 21:99-104, 1997.

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

CARVALHO Jr., O.S.; GASCÓ, J.M.; LOPEZ, F.G. & REQUEJO, A.S. Variabilidade espacial de algumas propriedades químicas e físicas de um solo submetido a diferentes sucessões de cultivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 22:497-503, 1998.

CASSEL, D.K.; NIELSEN, D.R. Field capacity and available water capacity. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis**. 2 ed. Madison: ASA – SSSA, p. 901-926, 1986.

CASTRO, O.M. de. Compactação do solo em plantio direto. In: FANCELLI, A.L. **Plantio direto no estado de São Paulo**. Piracicaba: FEALQ/ESALQ, 1989. p. 129-139.

CASTRO, O.M.; CAMARGO, O.A.de; VIEIRA, S.R.; DECHEN, S.C.F.; CANTARELLA, H. Caracterização química e física de dois latossolos em plantio direto e convencional. Campinas: Instituto Agrônômico. **Boletim Científico**, 11:1-23, 1987.

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

CAVALIERI, K.M.V.; TORMENA, C.A.; VIDIGAL FILHO, P.S., GONÇALVES, A.C.A.; COSTA, A.C.S. da. Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um latossolo vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 30:137-147, 2006.

CENTURION, J.F.; DEMATTÊ, J.L.I. Efeito de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um solo sob cerrado cultivado com soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 9:263-266, 1985.

CINTRA, F.L.D.; MIELNICZUK, J. Potencial de algumas espécies vegetais para a recuperação de solos com propriedades físicas degradadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 7:197-201, 1983.

CUNHA, E. Q.; BALBINO, L.C.; LEANDRO, W. M.; STONE, L. F.; ALVES, H. M.; SEVERIANO, E. C. Resistência mecânica do solo à penetração afetada pela presença de *Brachiaria* em sistemas de rotação de culturas. XV Reunião Brasileira de Manejo e Conservação de Solo e Água, 2004, Santa Maria – RS, **Anais...** Santa Maria, 2004. 1 CD-ROOM.

DAO, T.H. Tillage system and crop residue effects on surface compaction of a paleustoll. **Agronomy Journal**, 88:141-148, 1996.

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

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

DEXTER, A.R. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, Amsterdam, 120:201-214, 2004a.

DEXTER A.R. Soil physical quality: Part II. Friability, tillage, tilth and hard-setting. **Geoderma**, 120:215-225, 2004b.

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

DIAS JÚNIOR, M. S. . Compactação do Solo. In: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. (Org.). **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1:55-94. 2000

DOURADO NETO, D.; van LIER, Q.J.; BOTREL, T.A.; LIBARDI, P.L. Programa para confecção da curva de retenção de água no solo utilizando o modelo de van Genuchten. **Engenharia Rural**, Piracicaba, 1:92-102, 1990.

DUTRA, A. C.; GIAROLA, N. F. B.; BRACHTVOGEL, E. L. Qualidade física de um latossolo vermelho muito argiloso sob pastagem perene na região oeste do Paraná. XV

Reunião Brasileira de Manejo e Conservação de Solo e Água, 2004, Santa Maria – RS, **Anais...** Santa Maria, 2004. 1 CD-ROOM.

EHLERS, W.; KOPKE, V.; HESSE, F. & BOHM, W. Penetration resistance and root growth of oats tilled and untilled loess soil. **Soil Tillage Research**. 3:261-275, 1983.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro, 1999. 412p.

EMBRAPA. Serviço Nacional de Pesquisa do Solo. **Manual de métodos de análises de solo**. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

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

FIGUEIREDO, L.H.A.; DIAS JUNIOR, M.S.; FERREIRA, M.M. Umidade crítica de compactação e densidade do solo máxima em resposta a sistemas de manejo num latossolo roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 24:487-493, 2000.

FIORIN, J.E. Plantas recuperadoras da fertilidade do solo. In: **Curso sobre aspectos básicos de fertilidade e microbiologia do solo em plantio direto**: resumos de palestras. Passo Fundo: Aldeia Norte, 1999. p. 39-55.

FOLLETT, R.F. Soil Management concepts and carbon sequestration in cropland soils. **Soil Tillage Research**, 61:77-92, 2001.

FRANZLUEBBERS, A.J. Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth. **Soil Tillage Research**, 66:197-205, 2002.

FREDDI, O.S.; CENTURION, J.F.; BEUTLER, A.N.; ARATANI, R.G.; LEONEL, C.L.; SILVA, A.P. Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo no crescimento e na produtividade da cultura do milho. **Bragantia**, Campinas, v.66, n.3, p.477-486, 2007.

GENUCHTEN, M.T. van. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, 44:892-897, 1980.

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

GILL, K.S.; GAJRI, P.R.; CHOUDHARY, J. Tillage, mulch and irrigation effects on corn (*Zea mays* L.) in relation to evaporative demand. **Soil Tillage Research**. 39:213-227, 1996.

GOMES, F.P. **Curso de Estatística Experimental**. 13 ed. Piracicaba: Livraria Nobel, 1990. 468 p.

GONÇALVES, W. G.; JIMENEZ, R. L.; ARAUJO FILHO, J. V.; CONTI, M. S.; ASSIS, R. L.; SILVA, G. P.; ORDEÑEZ, G. A. P. Crescimento de plantas de cobertura do solo em camadas compactadas artificialmente: densidade de comprimento radicular. XV Reunião Brasileira de Manejo e Conservação de Solo e Água, 2004, Santa Maria – RS, **Anais...** Santa Maria, 2004. 1 CD-ROOM.

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

GRANT, C.A. & LAFOND, G.P. The effects of tillage systems and crop sequences on soil bulk density and penetration resistance on clay soil in southern Saskatchewan. Canada: **Journal of Soil Science**. 73:223-232, 1993.

GUIMARÃES, C.M.; MOREIRA, J.A.A. Compactação do solo na cultura do arroz de terras altas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 36:703-707, 2001.

GUPTA, S.C.; SCHNEIDER, E.C; LARSON, W.E.; HADAS, A. Influence of corn residue on compression and compaction behavior of soils. **Soil Science Society American Journal**, 51:207-212, 1987.

HAISE, H.R.; HASS, H.J.; JENSEN, L.R. Soil moisture studies of some great plains soils. II. Field capacity as related to 1/3 atmosphere percentage, and “minimum point” as related to 15- and 26- atmosphere percentage. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, 34:20-25, 1955.

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

HAKOYAMA, S.; YOSHIDA, K.; NAKAGAWA, J.; MORAES, M.H.; IWAMA, H.; IGUITA, K.; NAKAGAWA, J. Efeitos da semeadura direta e do preparo convencional em algumas propriedades físicas do solo. São Paulo: **Científica**. 23:17-30, 1995.

HENDERSON, C.W. Lupin as biological plough: evidence for, and effects on wheat growth and yield. Australia: **Journal of Experimental Agriculture**, 29:99-102, 1989.

HENKLAIN, J.C. Influência do tempo no manejo do SSD e suas implicações nas propriedades físicas do solo. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 26., 1997, Rio de Janeiro. Resumos. Rio de Janeiro: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 1997. 1 CD.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P. da; TORMENA, C.A. Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 35:1493-1500, 2000.

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**, 25:11-18, 2001.

JONES, A. J. **Soil Compaction Tips**. IANR. Nebraska Cooperative Extension. University of Nebraska-Lincoln, 1995.

JORGE, J.A. **Física e manejo dos solos tropicais**. Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1985. p. 89-118.

KEMPER, W.D.; CHEPIL, W.S. Size distribution of aggregation. In: BLACK, C.A.; EVANS, D.D.; ENSMINGER, L.E.; WHITE, J. L.; CLARK, F. E. (Ed.). *Methods of soil analysis*. Madison: **American Society of Agronomy**, 1:499-510, 1965.

KERTZMANN, F. F. **Modificações na estrutura e no comportamento de um Latossolo Vermelho eutrófico provocados pela compactação**. 1996. 153 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

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

KIRKEGAARD, J.A.; SO, H.B.; TROEDSON, R.J.; WALLIS, E.S. The effect of compaction on the growth of pigeon pea on clay soils. In: *Mechanisms of crop response and seasonal effects on a vertisol in a sub-humid enviroment*. **Soil Tillage Research**, 24:107-127, 1992.

KLUTE, A. Water retention: Laboratory Methods. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis - physical and mineralogical methods*. Madison, **America Society of Agronomy**, 635-660, 1986.

KLUTHCOUSKI, J.; FANCELLI, A.L.; DOURADO NETO, D.; RIBEIRO, C.M.; FERRARO, L.A. Manejo do solo e o rendimento de soja, milho, feijão e arroz em plantio direto. **Scientia Agrícola**. 57:97-104, 2000.

KOCHHANN, R.A.; DENARDIN, J.E.; BERTON, A.L. **Compactação e descompactação de solos**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2000. 20 p. (Embrapa Trigo. Documentos, 19).

LEÃO, T.P.; SILVA, A.P. A simplified Excel[®] algorithm for estimating the least limiting water range of soils. **Science Agrícola**, 61:649-654. 2004.

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

LEVIEN, R. **Condições de cobertura e métodos de preparo do solo para implantação da cultura do milho**. Botucatu, 1999. 305p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, UNESP Botucatu.

LIBARDI, P.L. et al., Variabilidade da umidade gravimétrica de um solo hidromórfico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 20:1-12, 1996.

LIMA, C.L.R., SILVA, A.P.; IMHOFF, S.; LEÃO, T.P.; Compressibilidade de um solo sob sistemas de pastejo rotacionado intensivo irrigado e não irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 28:945-951, 2004.

MANTOVANI, E Compactação do solo. **Informe Agropecuário** 13 (147): 52-55, 1987.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2 ed. London, Academic Press, 1995. p. 508-536.

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: 144:297-303, 1992.

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

MEYER, W.S.; BARRS, H.D. Roots in irrigated clay soils: Measurement techniques and responses to rootzones conditions. **Irrigation Science**, New York, 12:125-134, 1991.

MIELNICZUK, J.; CARPENEDO, V.; PEDÓ, F. Desenvolvimento de raízes em solos compactados. **Lavoura Arrozeira**. Porto Alegre: Instituto Rio Grandense do Arroz. 38:357-358, 1985.

MIELNICZUK, J. Desenvolvimento de raízes, como método de avaliação das práticas de manejo do solo. In: CASTRO FILHO, C. & MUZILLI, O., eds. Manejo integrado de solos em microbacias hidrográficas. Londrina, IAPAR/SBCS, 1996. p. 219-224.

MIELNICZUK, J. **Matéria orgânica e sustentabilidade de sistemas agrícolas**. In: Gabriel A. Santos; Flávio Anastácio de Oliveira Camargo. (Org.). Fundamentos da matéria orgânica do solo - ecossistemas tropicais e subtropicais. 1ª ed. Porto Alegre: Genesis, 1999, p. 1-8.

MISCHAN, M.M., PINHO, S.Z. **Experimentação agrônômica**: dados não balanceados. Botucatu: FUNDIBIO, 1996. 456p.

MORAES, M.H.; BENEZ, S.H.; LIBARDI, P.L. Efeitos da compactação em algumas propriedades físicas do solo e seu reflexo no desenvolvimento das raízes de plantas de soja. **Bragantia**, 54:393-403, 1995.

MULLER, M.M.L.; CECCON, G.; ROSOLEM, C.A. Influência da compactação do solo em subsuperfície sobre o crescimento aéreo e radicular de plantas de adubação verde. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 25:531-538, 2001.

MÜLLER, M.M.L. **Influência do monocultivo na cana-de-açúcar e nas propriedades físicas e químicas de um Nitossolo Vermelho e um Neossolo Quartzarênico**. Botucatu, 2002, 120 f. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas.

NUERNBERG, N. J.; STAMMEL, J. G.; CABEDA, M. S. V. Efeito de sucessão de culturas e tipos de adubação em características físicas de um solo da encosta basáltica sul-rio-grandense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 10:185-190, 1986.

OLIVEIRA JÚNIOR, J. P.; LEANDRO, W. M.; CARVALHO, M. C. S.; ALENCAR, N. E.; OLIVEIRA, K.G.B.; VIEIRA, V. G. efeito de palhadas de cobertura na resistência mecânica à penetração em solo com algodoeiro em goiânia, Goiás. XV Reunião Brasileira de Manejo e Conservação de Solo e Água, 2004, Santa Maria – RS, **Anais...** Santa Maria, 2004. 1 CD-ROOM.

OLIVEIRA, G.C.; DIAS JÚNIOR, M.S.; RESCK, D.V.S.; CURI, N. Alterações estruturais e comportamento compressivo de um Latossolo Vermelho distrófico argiloso sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, 38:291-299, 2003.

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**, 25:443-450, 2001.

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

PECHE FILHO, A. Critérios para avaliar a qualidade do plantio direto. **O Agrônomo**. IAC.Campinas. 51: 1-, 1999.

PEDROTTI, A.; PAULETTO, E.A.; GOMES, A.S.; TURATTI, A.L.; CRESTANA, S. Sistemas de cultivo de arroz irrigado e a compactação de um planossolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. 36:709-715, 2001.

QUEIROZ-VOLTAN, R.B.; NOGUEIRA, S.S.S.; MIRANDA, M.A.C. Aspectos da estrutura da raiz e do desenvolvimento de plantas de soja em solos compactados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. 35:929-938, 2000.

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

REEVE, J.M.; CARTER, A.D. Water release characteristics. In: SMITH, K.A.; MULLINS, C.E. (Eds.). **Soil analysis: physical methods**. New York: M. Dekker, 1991. p.111-160.

REEVES, D.W. The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. **Soil Tillage Research**, 43:131-167, 1997.

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

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

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

RICHARDS, L.A. **Physical conditions of water in soil.** In: BLACK, C.A., EVANS, D.D., WHITE, J.L., ENSMINGER, L.E.; CLARK, F.E., (Ed). Methods of soil analysis - Physical and mineralogical properties, including statistics of measurements and sampling. Madison, ASASSSA, 1965. p.128-152.

RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; BRITO, O.R.; LLANILLO, R.F.; FERREIRA, R. **Compactação de solo: Causas e efeitos.** Semina Ciência Agrária, Londrina, 26:321-344, 2005.

ROSOLEM, C.A.; ALMEIDA, A.C.S.; SACRAMENTO; L.V.S. Sistema Radicular e nutrição da soja em função da compactação do solo. **Bragantia**. 53:259-266, 1994a.

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**, 34:821-828, 1999.

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

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

ROSS, P.J.; WILLIAMS, J. & BRISTOW, K.L. Equations for extending water-retention curves to dryness. **Soil Science Society American Journal**, 55:923-927, 1991.

RUSSEL, R.S.; GOSS, M.J. Physical aspects of soil fertility – The response of roots to mechanical impedance. **Netherlands Journal of Agricultural Science**. 22:305-318, 1974.

RUSSEL, R.S. Plant root systems – their function and interaction with the soil. In: Symposium on the soil / root system, 1981, Londrina. **Proceedings...** Londrina: Instituto Agronômico do Paraná – IAPAR, 1981.

SANTOS, C.A. dos; LANÇAS, K.P. Projeto e construção de um penetrômetro hidráulico-eletrônico. **Revista Energia na Agricultura**, 14:55-61, 1999.

SAMPSON, R.N., SCHOLLES, R.J. Additional human-induced activities – Article 3.4. In.: WATSON, R.T.; NOBLE, I.R.; BOLIN, B.; RAVINDRANATH, N.H.; VERARDO, D.J.; DOKKEN, D.J. (Eds.), **Land Use, Land-use Change, and Forestry, A Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press, 377 p. 2000.

SANTOS, G; CAMARGO, F. 1999. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Gênese, 1999. p. 69-90.

SAVAGE, M.J.; RITCHIE, J.T.; BLAND, W.L. & DUGAS, W.A. Lower limit of soil water availability. **Agronomy Journal**, 88:844- 851, 1996.

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

SÉGUY, L.; BOUZINAC, S. **O plantio direto no cerrado úmido**. Piracicaba: Instituto da Potassa e Fosfato, 1995, p. 1-2. (Informações agronômicas, v. 69).

SILVA, A.P.; KAY, B.D. Effect of soil water content variation on the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**. 61:884-888, 1997.

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

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

SILVA, R.H.; ROSOLEM, C.A. Crescimento radicular de soja em razão da sucessão de cultivos e da compactação do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. 37:855-860, 2002.

SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Resistência mecânica do solo à penetração influenciada pelo tráfego de uma colhedora em dois sistemas de manejo do solo. **Ciência Rural**, 30:795-801, 2000.

SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; SOARES, J.M. Fatores controladores da compressibilidade de um argissolo vermelho-amarelo distrófico arênico e de um latossolo vermelho distrófico típico. I – Estado inicial de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 26:1-8, 2002.

SOJKA, R.E.; BUSSCHER, W.J.; LEHRSCHE, G.A. In situ strength, bulky density, and water content relations of a Durinodic xeric haplocalcid soil. **Soil Science**, 166:520-529, 2001.

STEINHARDT, G.C. **Compactação do solo: um problema oculto**. Piracicaba: Instituto da Potassa e Fosfato, 1983. 3p. (Informações Agronômicas, v.21)

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

TAVARES-FILHO, J.; FONSECA, I.C. de B.; RIBON, A.A.; BARBOSA, G.M. de C. Efeito da escarificação na condutividade hidráulica saturada de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, 36:996-999, 2006.

TAYLOR, H.M. Root behavior as affected by soil structure and strength. In: CARSON, E.W. **The plant root and its environment**. Charlottesville: University Press of Virginia, 1974. p. 271-291.

TAYLOR, H.M.; ROBERSON, G.M.; PARKER Jr., J.J. Soil strength-root penetration relations to medium to coarse-textured soil materials. **Soil Science**, 102:18-22, 1966.

TENNANT, D.A. A test of a modified line intersect method of estimating root length. **Journal of Ecology**. 63:995-1.001, 1975.

TOPP, G.C. & ZEBTCHUK, W. The determination of soil water desorption curves for soil cores. **Canadian Journal Soil Science**, 59:19-26, 1979.

TOPP, G.C.; GALGANOV, Y.T.; WIRES, K.C.; CULLEY, J.L.B. **Non limiting water range (NLWR): an approach for assessing soil structure**. Soil Quality Evaluation Program. Ottawa, Agriculture and Agr-Food Canada, 1994. 36p. (Technical report, 2).

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; IMHOFF, S.D.C.; DEXTER, A.R. Quantification of the soil physical quality of a tropical oxisol using the s index **Sci. Agric.** Piracicaba, v.65, n.1, p.56-60, 2008.

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

TORMENA, C.A.; BARBOSA, M.C.; COSTA, A.C.S.; GONÇALVES, A.C.A. Densidade, porosidade e resistência à penetração em latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Scientia Agrícola**., 59:795-801, 2002.

TORRES, E.; SARAIVA, O. F. **Camadas de impedimento do solo em sistema agrícola com a soja**. Londrina: Embrapa Soja, 1999. 58p. (Embrapa Soja. Circular Técnico, 23).

TORMENA, C.A.; SIVA, A.P.; LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um latossolo roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 22:573-581, 1998.

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

VEPRASKAS, M.J. Plant response mechanisms to soil compaction. In: WILKINSON, R. (Ed.). **Plant environment interactions**. New York : M. Dekker, 1994. p.263-287.

VERNETTI JUNIOR, F. de J.; GOMES, A. da S. **Plantio direto: uma opção de manejo para a produção agrícola sustentável**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 1999. 69p. (Embrapa Clima Temperado. Documentos, 58).

WHITELEY, G.M.; DEXTER, A.R. Root development and growth of oilseed, wheat and pea crops on tilled and notilled soil. **Soil Tillage Research**. 2:379-393, 1982.

WHITELEY, G.M.; DEXTER, A.R. The behavior of roots encountering cracks in soil. I. Experimental methods and results. **Plant and Soil**, 77:141-149, 1984.

ZONTA, E.; BRASIL, F. da; GOI, S.R.; ROSA, M.M.T. da. O sistema radicular e suas interações com o ambiente edáfico. In: FERNANDES, M.S. (Ed.). **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p. 7-52.

APÊNDICE

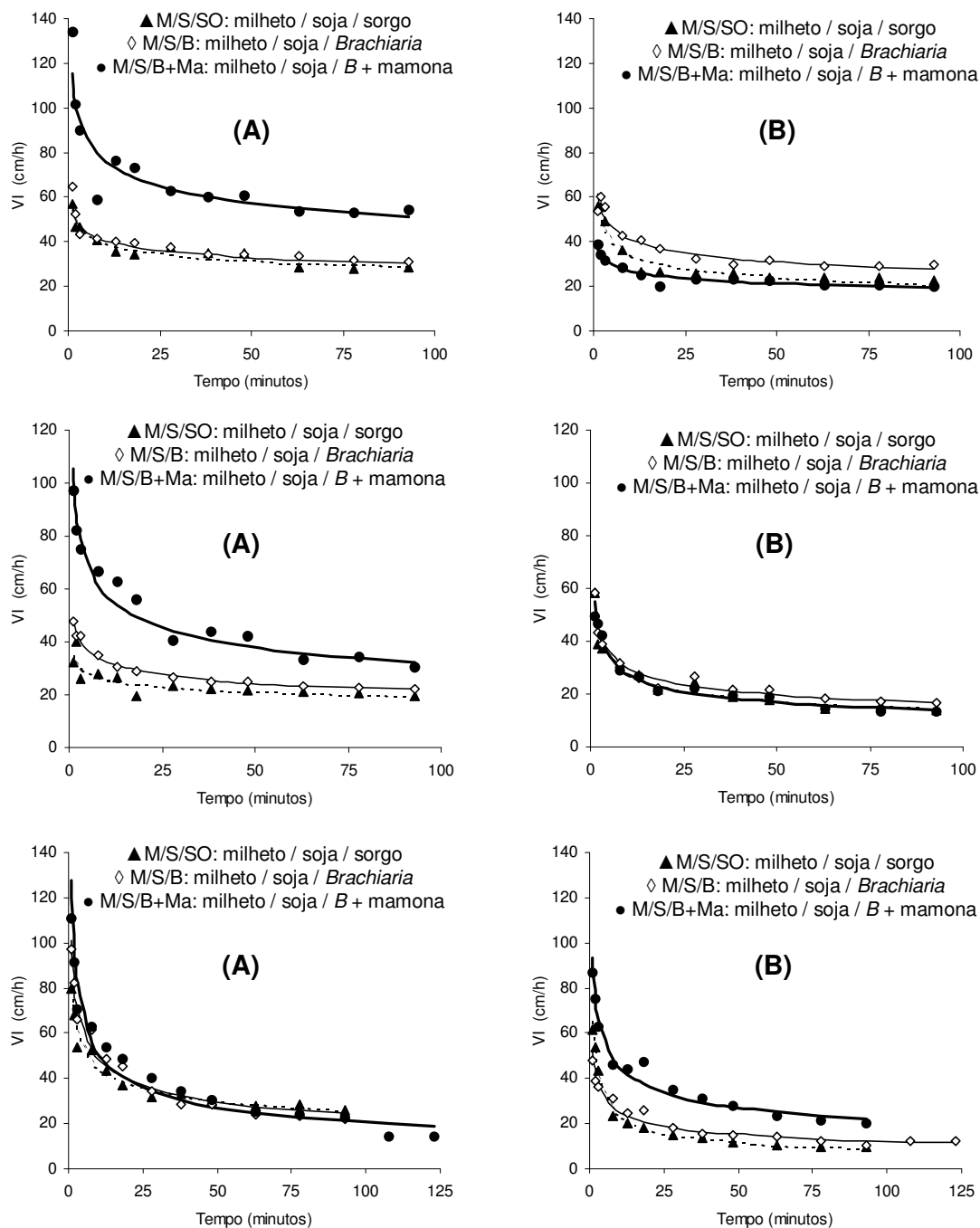


Figura 26. Velocidade de infiltração (VI) em cm h^{-1} na camada superficial, a 0,10 e 0,20 m de profundidade, respectivamente, em 2006: A) com escarificação inicial do solo; B) sem escarificação inicial do solo.

Quadro 37. Médias de umidade do solo (%) no momento das avaliações de infiltração (10/2006).

Sistema de rotação	Sem escarificação	Com escarificação
	-----0 cm-----	
M/S/SO	11,93	11,89
M/S/B	9,10	9,76
M/S/B+MA	12,83	11,23
	-----10 cm-----	
M/S/SO	15,16	14,15
M/S/B	14,43	14,55
M/S/B+MA	13,84	15,12
	-----20 cm-----	
M/S/SO	15,31	14,92
M/S/B	15,54	15,61
M/S/B+MA	16,06	15,68

M/S/SO: milho/soja/sorgo; M/S/B: milho/soja/ *Brachiaria*; M/S/B+MA: milho/soja/ *Brachiaria* + mamona.

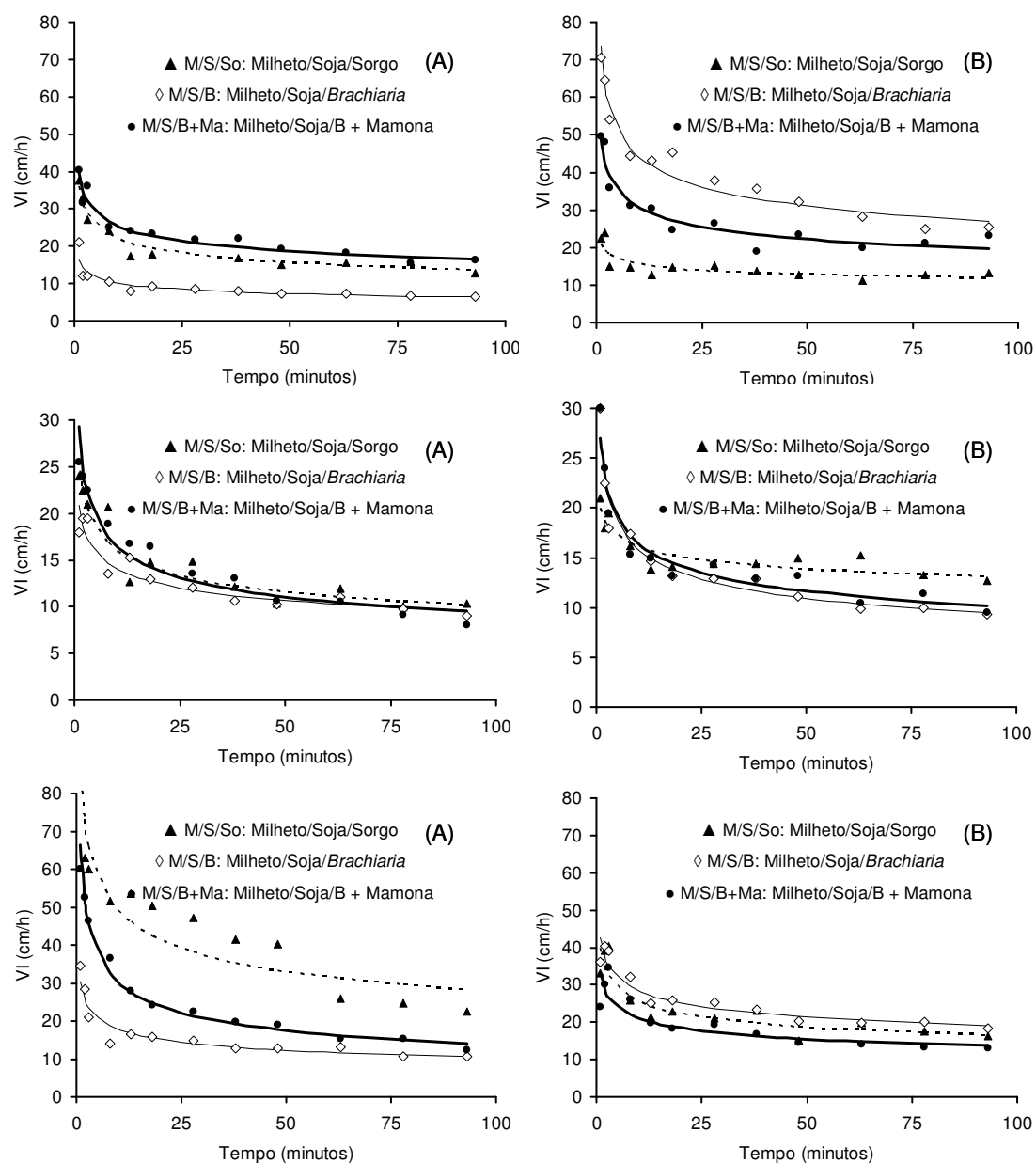


Figura 27. Velocidade de infiltração (VI) em cm h^{-1} na camada superficial, a 0,10 e 0,20 m de profundidade, respectivamente, em 2007: **A)** com escarificação inicial do solo; **B)** sem escarificação inicial do solo.

Quadro 38. Médias de umidade do solo (%) no momento das avaliações de infiltração (10/2007).

Sistema de rotação	Sem escarificação	Com escarificação
	-----0 cm-----	
M/S/SO	10,14	14,66
M/S/B	15,95	17,63
M/S/B+MA	14,76	14,48
	-----10 cm-----	
M/S/SO	17,94	19,44
M/S/B	18,99	18,87
M/S/B+MA	20,29	20,90
	-----20 cm-----	
M/S/SO	21,11	19,42
M/S/B	21,46	19,64
M/S/B+MA	20,33	21,16

M/S/SO: milho/soja/sorgo; M/S/B: milho/soja/ *Brachiaria*; M/S/B+Ma: milho/soja/ *Brachiaria* + mamona.

Quadro 39. Teores médios de matéria orgânica, fósforo, potássio, cálcio e magnésio no solo após o cultivo da soja (abril 2008).

Tratamento	Camada (m)				
	0,00-0,05	0,05-0,10	0,10-0,20	0,20-0,40	0,40-0,60
-----Matéria Orgânica (g dm ⁻³)-----					
Inicial	27,0	22,0	22,0	20,0	20,0
Manejo do solo					
Com escarificação	28,9	25,6	23,5	21,3	21,8
Sem escarificação	28,9	25,7	23,7	21,6	23,0
Sistema de rotação					
M/S/So	28,2	25,3	23,4	21,3	21,9
M/S/B	28,6	25,6	23,8	21,1	22,2
M/S/B+Ma	29,9	25,9	23,5	21,9	23,1
Valor F ⁽¹⁾					
Manejo do solo (M)	0,0 ns	0,0 ns	0,1 ns	0,6 ns	3,7 ns
Sistema rotação (R)	0,7 ns	0,1 ns	0,1 ns	1,2 ns	1,2 ns
M x R	0,8 ns	0,5 ns	0,0 ns	2,3 ns	1,5 ns
D.M.S.					
Manejo do solo	2,7	2,4	2,1	1,0	1,4
Sistema de rotação	3,3	2,9	2,6	1,3	1,7
-----Fósforo (mg dm ⁻³)-----					
Inicial	4,6	2,5	3,0	1,1	0,7
Manejo do solo					
Com escarificação	30,0	61,0	11,4	7,8	5,9
Sem escarificação	40,7	52,6	11,8	7,8	7,9
Sistema de rotação					
M/S/So	32,7	62,8	10,5	9,5	7,2
M/S/B	29,1	63,8	12,8	6,7	6,3
M/S/B+Ma	44,4	43,9	11,4	7,2	7,3
Valor F ⁽¹⁾					
Manejo do solo (M)	0,9 ns	0,4 ns	0,1 ns	0,0 ns	3,9 ns
Sistema rotação (R)	0,7 ns	0,8 ns	0,4 ns	0,5 ns	0,5 ns
M x R	2,6 ns	0,7 ns	0,1 ns	0,8 ns	0,2 ns
D.M.S.					
Manejo do solo	23,5	30,1	4,8	5,4	2,1
Sistema de rotação	28,8	36,9	5,8	6,6	2,6

continua...

Quadro 39. Continuação

-----Potássio (mmol _c dm ⁻³)-----					
Inicial	1,60	0,60	0,40	0,30	0,30
Manejo do solo					
Com escarificação	1,84	1,04	0,90	0,50	0,30
Sem escarificação	1,73	0,95	0,77	0,34	0,24
Sistema de rotação					
M/S/So	1,54	0,91	0,72	0,49	0,30
M/S/B	1,99	1,07	0,86	0,36	0,20
M/S/B+Ma	1,83	1,00	0,91	0,42	0,32
Valor F ⁽¹⁾					
Manejo do solo (M)	0,08 ns	0,58 ns	0,72 ns	2,50 ns	1,48 ns
Sistema rotação (R)	0,47 ns	0,71 ns	0,57 ns	0,54 ns	2,33 ns
M x R	0,23 ns	1,76 ns	1,15 ns	2,31 ns	4,29*
D.M.S.					
Manejo do solo	0,82	0,23	0,32	0,21	0,10
Sistema de rotação	1,00	0,29	0,39	0,26	0,12
-----Cálcio (mmol _c dm ⁻³)-----					
Inicial	16,0	10,0	9,0	4,0	1,0
Manejo do solo					
Com escarificação	30,6	24,8	16,9	16,4	15,6
Sem escarificação	27,3	18,4	18,4	17,1	17,2
Sistema de rotação					
M/S/So	31,3	23,6	18,5	15,5	13,8
M/S/B	23,9	20,4	17,2	15,3	14,9
M/S/B+Ma	31,8	20,8	17,2	19,5	20,6
Valor F ⁽¹⁾					
Manejo do solo (M)	0,5 ns	5,7*	0,2 ns	0,1 ns	0,1 ns
Sistema rotação (R)	1,2 ns	0,6 ns	0,1 ns	0,6 ns	0,6 ns
M x R	1,4 ns	1,2 ns	0,3 ns	0,1 ns	0,8 ns
D.M.S.					
Manejo do solo	9,6	5,6	6,7	7,5	11,7
Sistema de rotação	11,8	6,8	8,2	9,1	14,3

continua...

Quadro 39. Continuação

-----Magnésio (mmol _c dm ⁻³)-----					
Inicial	8,6	5,8	6,1	3,2	2,1
Manejo do solo					
Com escarificação	7,8	11,6	9,2	9,5	8,3
Sem escarificação	11,3	8,5	9,9	10,1	9,1
Sistema de rotação					
M/S/So	9,3	11,5	9,9	9,3	8,4
M/S/B	9,9	8,3	9,3	9,6	8,3
M/S/B+Ma	9,3	10,4	9,4	10,5	9,4
Valor F ⁽¹⁾					
Manejo do solo (M)	2,3 ns	5,3*	0,2 ns	0,2 ns	0,3 ns
Sistema rotação (R)	0,0 ns	1,9 ns	0,1 ns	0,2 ns	0,2 ns
M x R	5,7 ns	2,8 ns	0,2 ns	0,1 ns	1,2 ns
D.M.S.					
Manejo do solo	4,8	2,9	3,3	3,4	3,1
Sistema de rotação	5,9	3,5	4,1	4,1	3,8

⁽¹⁾ ns e * não significativo e significativo a 5 % de probabilidade pelo teste t (LSD). M/S/So – milho / soja / sorgo; M/S/B – milho / soja / *Brachiaria* e M/S/B+Ma – milho / soja / *Brachiaria* + mamona.