

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**ROTAÇÃO DE CULTURAS E PROPRIEDADES FÍSICAS E MATÉRIA ORGÂNICA
DE UM LATOSSOLO**

RODRIGO ARROYO GARCIA

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu,
para obtenção do título de Doutor em
Agronomia (Agricultura).

BOTUCATU - SP

Julho - 2010

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**ROTAÇÃO DE CULTURAS E PROPRIEDADES FÍSICAS E MATÉRIA ORGÂNICA
DE UM LATOSSOLO**

RODRIGO ARROYO GARCIA

Orientador: Prof. Dr. Ciro Antonio Rosolem

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia (Agricultura).

BOTUCATU - SP

Julho - 2010

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

A778r Arroyo Garcia, Rodrigo, 1982-
Rotação de culturas e propriedades físicas e matéria orgânica de um latossolo / Rodrigo Arroyo Garcia.- Botucatu : [s.n.], 2010.
xv, 146 f.: il., color., grafs., tabs.

Tese (Doutorado)-Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu, 2010.

Orientador: Ciro Antonio Rosolem

Inclui bibliografia.

1. *Glycine max*. 2. Plantas de cobertura. 3. Solo - Qualidade. 4. Carbono orgânico. 5. Latossolo. I. Rosolem, Ciro Antonio. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu).Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu. III. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS

CAMPUS DE BOTUCATU

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

**TÍTULO: "ROTAÇÃO DE CULTURAS E PROPRIEDADES FÍSICAS E MATÉRIA
ORGÂNICA DE UM LATOSSOLO"**

ALUNO: RODRIGO ARROYO GARCIA

ORIENTADOR: PROF. DR. CIRO ANTONIO RO SOLEM

Aprovado pela Comissão Examinadora




PROF. DR. CIRO ANTONIO RO SOLEM



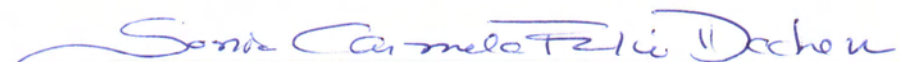
PROF.ª DR.ª MARIA HELENA MORAES



PROF. DR. JULIANO CARLOS CALONEGO



PROF. DR. SANDRO ROBERTO BRANCALIÃO



PROF.ª DR.ª SÔNIA CARMELA FALCCI DECHEN

Data da Realização: 05 de julho de 2010.

BIOGRAFIA DO AUTOR

Rodrigo Arroyo Garcia, filho de José Carlos Garcia Ortega e Rosa Maria Arroyo Garcia, nasceu na cidade de São Caetano do Sul, Estado de São Paulo, no dia 07 de setembro de 1982.

Diplomou-se em Agronomia pela Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, campus de Botucatu, em 2005.

Em março de 2006, iniciou o curso de Doutorado em Agronomia área de concentração Agricultura, no Departamento de Produção Vegetal – Agricultura, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, campus de Botucatu, obtendo o título de doutor em Julho de 2010.

*Aos meus pais, José Carlos e Rosa,
os quais são exemplos de conduta
e que servem de orientação em tudo
que faço na minha vida*

DEDICO

*À minha noiva Mariana,
pela amizade, companheirismo
e grande contribuição
na realização do trabalho*

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

À Faculdade de Ciências Agronômicas, pela formação agronômica no curso de Graduação e toda estrutura oferecida na realização do trabalho.

Ao Prof. Dr. Ciro Antonio Rosolem, pela orientação, amizade, ensinamentos e churrascos oferecidos de fim de ano.

À coordenação do curso de Pós-Graduação em Agricultura, pela dedicação e qualidade de ensino.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pela concessão da bolsa de estudos durante o curso.

À Monsanto, pelo fornecimento das sementes de Cober crop.

Ao Prof. Dr. Li Yuncong, pelo auxílio nas análises de matéria orgânica e receptividade na Universidade da Flórida.

Às funcionárias Guigin e Laura do laboratório da Universidade da Flórida, pelo apoio e amizade.

Ao Prof. Dr. Juliano Carlos Calonego, pela amizade e pelo suporte na determinação do intervalo hídrico ótimo.

Ao Dr. Dácio Olibone, pelo suporte na determinação do intervalo hídrico ótimo.

Aos Professores Dr. Carlos Alexandre Costa Crusciol, Dr. Rogério Peres Soratto e Dr. Leonardo Theodoro Büll, pela atenção e amizade.

Aos funcionários de campo do Departamento de Produção Vegetal – Agricultura, pela amizade e auxílio na condução do experimento.

Aos funcionários do Departamento de Produção Vegetal – Agricultura, em especial à Vera, Lana e Dorival.

Ao estagiário Rodrigo Werle, pela amizade e ajuda em diversas etapas do experimento.

Ao Dr. José Salvador Simoneti Foloni, pela amizade e ensinamentos desde o curso de Graduação.

Aos amigos, Gustavo, Konrad, Eduardo, Rafael, Alexandre, Fernando, Leonard e Cesar, pelos bons momentos e companheirismo desde o curso de Graduação.

Aos amigos do curso de Pós graduação Gustavo, Émerson Borghi, Maurício, Jayme, Cláudio, Fábio e Júlio.

Aos meus pais, irmã e toda família, que sempre estiveram ao meu lado.

Aos meus sogros Gilce Magali e Antonio Lourenço, pela amizade.

À Mariana, pela amizade, fundamental ajuda durante toda condução do trabalho e muita paciência para lavar minhas calças sujas de terra.

A todos aqueles que, de alguma maneira, contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	viii
LISTA DE FIGURAS.....	xi
LISTA DE APÊNDICES.....	xiv
RESUMO.....	1
SUMMARY.....	3
1. INTRODUÇÃO.....	5
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	7
2.1. Sistema de Semeadura Direta.....	7
2.2. Compactação do solo.....	8
2.3. Efeito da compactação nas propriedades físicas do solo.....	9
2.3.1. Densidade do solo.....	9
2.3.2. Porosidade do solo.....	10
2.3.3. Estrutura do solo.....	11
2.3.4. Resistência à penetração.....	12
2.4. IHO na avaliação da qualidade física do solo em SSD.....	13
2.5. Uso de plantas de cobertura em SSD.....	15
2.6. Caracterização e influência da M.O. em solo manejado em SSD.....	17
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	20
3.1. Localização da área experimental e características climáticas da região.....	20
3.2. Características do solo, histórico e caracterização da área experimental.....	22
3.3. Tratamentos e delineamento do experimento.....	26
3.4. Cultivo de outono-inverno no primeiro ano agrícola (Abril-Setembro/2006).....	27
3.5. Cultivo das espécies de cobertura no primeiro ano agrícola (Setembro- Novembro/2006).....	28
3.6. Cultivo da soja no primeiro ano agrícola (2006/2007).....	29
3.7. Cultivo de outono-inverno no segundo ano agrícola (Abril-Setembro/2007).....	30
3.8. Cultivo das espécies de cobertura no segundo ano agrícola (Outubro- Dezembro/2007).....	31

3.9. Cultivo da soja no segundo ano agrícola (2007/2008).....	31
3.10. Cultivo de outono-inverno no terceiro ano agrícola (Abril-Setembro/2008).....	32
3.11. Cultivo das espécies de cobertura no terceiro ano agrícola (Setembro-Dezembro/2008).....	33
3.12. Cultivo da soja no terceiro ano agrícola (2008/2009).....	33
3.13. Coleta, preparo e avaliação das amostras de raízes.....	34
3.14. Coleta, preparo e análise de amostras de terra para avaliação da fertilidade do solo.....	36
3.15. Determinação de frações lábeis de carbono orgânico.....	37
3.15.1. Carbono da biomassa microbiana.....	37
3.15.2. Carbono solúvel em água e extraído em água quente.....	38
3.16. Determinação de carbono orgânico particulado e associado aos minerais.....	39
3.17. Coleta, preparo e determinação de carbono orgânico em diferentes frações separadas por classes de tamanho.....	40
3.18. Coleta, preparo e análise da estabilidade de agregados do solo.....	42
3.19. Coleta e preparo das amostras com estrutura preservada.....	43
3.19.1. Determinação da curva de retenção da água no solo, densidade e porosidade do solo.....	44
3.19.2. Determinação do intervalo hídrico ótimo (IHO).....	46
3.20. Análise estatística.....	48
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	50
4.1. Produção de matéria seca e grãos no outono-inverno.....	50
4.2. Matéria seca das plantas de cobertura antecedentes à soja.....	52
4.3. Raiz.....	54
4.3.1. Raízes das plantas de cobertura cultivadas na primavera.....	54
4.3.2. Raízes da soja em estágio de florescimento pleno.....	57
4.4. Estabilidade de agregados.....	61
4.5. Matéria orgânica do solo.....	66
4.6. Frações lábeis da matéria orgânica do solo.....	69
4.7. Carbono orgânico particulado.....	74
4.8. Carbono orgânico nas diferentes classes de tamanho de agregados.....	77

4.9. Densidade e porosidade do solo.....	83
4.10. Curva de retenção de água no solo.....	93
4.11. Intervalo hídrico ótimo.....	98
4.12. Produtividade da soja.....	109
5. CONCLUSÕES.....	112
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	114
7. APÊNDICES.....	138

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1.** Análise granulométrica, estabilidade de agregados e atributos físicos do solo, por ocasião da caracterização da área experimental. Março/2006.....23
- Tabela 2.** Atributos químicos no perfil do solo, por ocasião da caracterização da área experimental. Março/2006.....23
- Tabela 3.** Espécies utilizadas na composição dos tratamentos conduzidos nos três anos agrícolas do experimento. Botucatu-SP.....26
- Tabela 4.** Produção de matéria seca de braquiária, sorgo e consórcio de sorgo + braquiária, no primeiro ano do experimento. Setembro/2006.....51
- Tabela 5.** Matéria seca de braquiária, sorgo e consórcio de sorgo + braquiária, em função da rotação de culturas, nos anos de 2007 e 2008.....51
- Tabela 6.** Produtividade de grãos de sorgo em sistema solteiro e consorciado com braquiária, no primeiro ano do experimento. Setembro/2006.....52
- Tabela 7.** Produtividade de grãos de sorgo em sistema solteiro e consorciado com braquiária, em função da rotação de culturas, nos anos de 2007 e 2008.....52
- Tabela 8.** Produção de matéria seca das plantas de cobertura cultivadas em sucessão aos cultivos de outono-inverno, nos três anos agrícolas. Botucatu-SP.....53
- Tabela 9.** Correlação entre densidade de comprimento radicular (DCR) e matéria seca de raízes (MSR) coletadas por ocasião do manejo das espécies de cobertura com a densidade de comprimento radicular e matéria seca de raízes de soja amostradas em sucessão, respectivamente.....61

Tabela 10. Análise de variância e valores médios de diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG), agregados maiores que 2 mm e índice de estabilidade de agregados (IEA), em função dos cultivos de outono-inverno e primavera, nas amostras coletadas após manejo das plantas de cobertura de primavera, no primeiro ano do experimento. Dezembro/2006.....64

Tabela 11. Análise de variância e valores médios de diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG), agregados maiores que 2 mm e índice de estabilidade de agregados (IEA), em função dos cultivos de outono-inverno e primavera, nas amostras coletadas após manejo das plantas de cobertura de primavera, no terceiro ano do experimento. Dezembro/2008.....65

Tabela 12. Teores de matéria orgânica (g dm^{-3}) no perfil do solo em função dos cultivos de outono-inverno e primavera, após o manejo das plantas de cobertura de primavera, nos anos de 2006, 2007 e 2008.....68

Tabela 13. Teores (mg kg^{-1}) de carbono orgânico solúvel em água ($\text{C}_{\text{solúvelH}_2\text{O}}$), carbono orgânico extraído com água quente ($\text{C}_{\text{extH}_2\text{O}}$ quente) e carbono da biomassa microbiana (CBM) nas camadas de 0-5 e 5-10 cm, após o manejo das plantas de cobertura conduzidas na primavera no terceiro ano do experimento.....72

Tabela 14. Teores (g kg^{-1}) de carbono orgânico total (COT), carbono orgânico particulado (COP) e carbono orgânico associado aos minerais (CAM) nas camadas de 0-5 e 5-10 cm, após o manejo das plantas de cobertura conduzidas na primavera no terceiro ano do experimento. Dezembro/2008.....76

Tabela 15. Porcentagem (%) de agregados distribuídos nas frações maiores que 2 mm, entre 2-0,25 mm, 0,25-0,05 mm e menores que 0,05 mm, em função dos cultivos de outono-inverno e primavera, no terceiro ano do experimento. Dezembro/2008.....80

Tabela 16. Carbono orgânico do solo (COS) de agregados livres de areia, nas frações maiores que 2 mm, entre 2-0,25 mm, 0,25-0,05 mm e menores que 0,05 mm, em função dos cultivos de outono-inverno e primavera, no terceiro ano do experimento. Dezembro/2008.....81

Tabela 17. Carbono orgânico do solo (COS) nas frações maiores que 2 mm, entre 2-0,25 mm, 0,25-0,05 mm e menores que 0,05 mm, considerando os teores (g kg^{-1} de agregados livres de areia) e a porcentagem (%) de cada fração, em função dos cultivos de outono inverno e primavera, no terceiro ano do experimento. Dezembro/2008.....82

Tabela 18. Análise de variância e valores médios de densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), microporosidade (micro) e macroporosidade (macro), em função dos cultivos de outono-inverno e primavera, nas amostras coletadas após manejo das plantas de cobertura de primavera, no primeiro ano do experimento. Dezembro/2006.....86

Tabela 19. Análise de variância e valores médios de densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), microporosidade (micro) e macroporosidade (macro), em função dos cultivos de outono-inverno e primavera, nas amostras coletadas após manejo das plantas de cobertura de primavera, no terceiro ano do experimento. Dezembro/2008.....89

Tabela 20. Correlação entre os teores de carbono orgânico em diferentes frações e propriedades físicas do solo, nas camadas de 0-5 e 5-10 cm de profundidade, em amostras de solo coletadas 3 anos após início de diferentes rotações de culturas. Botucatu-SP.....92

Tabela 21. Análise de variância e produtividade média dos grãos de soja (kg ha^{-1}) em função dos cultivos de outono-inverno e primavera, nos anos agrícolas de 2006/2007, 2007/2008 e 2008/2009. Botucatu-SP.....111

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Temperaturas médias mensais e quantidade de chuvas durante a condução do experimento. Botucatu-SP.....21
- Figura 2.** Resistência do solo à penetração (MPa) medida no campo e umidade gravimétrica no momento do teste, nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm, por ocasião da caracterização da área experimental. Março/2006.....24
- Figura 3.** Curvas características da água no solo por ocasião da caracterização da área, nas profundidades de 0-5; 7,5-12,5; 15-20; 27,5-32,5 e 47,5-52,5 cm.....24
- Figura 4.** Variação do conteúdo volumétrico de água com a densidade do solo, para limites críticos da porosidade de aeração (PA), capacidade de campo (CC), resistência do solo à penetração (RP) e ponto de murcha permanente (PMP), por ocasião da caracterização da área experimental, nas camadas de 7,5-12,5 cm e 27,5-32,5 cm. IHO: intervalo hídrico ótimo. Março/2006.....25
- Figura 5.** Esquema para determinação dos teores de carbono solúvel em água ($C_{sol. H_2O}$) e carbono extraído em água quente ($C_{ext. H_2O \text{ quente}}$).....39
- Figura 6.** Densidade de comprimento radicular e matéria seca de raízes coletadas por ocasião do manejo das espécies de cobertura conduzidas na primavera, nas diferentes rotações de culturas, nos anos de 2006 (A), 2007 (B) e 2008 (C). B: braquiária; S: sorgo; B+S: braquiária + sorgo; CC: cober crop; C: crotalária; M: milho; P: pousio.....56
- Figura 7.** Densidade de comprimento radicular e matéria seca de raízes de soja em estágio R2 de desenvolvimento, nas diferentes rotações de culturas, nos anos de 2007 (A), 2008 (B) e 2009 (C). B: braquiária; S: sorgo; B+S: braquiária + sorgo; CC: cober crop; C: crotalária; M: milho; P: pousio.....60

Figura 8. Teores de carbono orgânico solúvel em água, carbono orgânico extraído com água quente e carbono da biomassa microbiana nas camadas de 0-5 e 5-10 cm, nas diferentes rotações de culturas, após o manejo das plantas de cobertura conduzidas na primavera, no terceiro ano do experimento. B: brachiaria ruziziensis; CC: cober crop; C: crotalária juncea; M: milho; P: pousio; S: sorgo.....73

Figura 9. Curvas características da água no perfil do solo no primeiro ano do experimento, em função de diferentes rotações de culturas. Dezembro/2006. B: braquiária; S:sorgo; B+S: braquiária + sorgo; CC: cober crop; C: crotalária; M: milho; P: pousio.....96

Figura 10. Curvas características da água no perfil do solo no terceiro ano do experimento, em função de diferentes rotações de culturas. Dezembro/2008. B: braquiária; S:sorgo; B+S: braquiária + sorgo; CC: cober crop; C: crotalária; M: milho; P: pousio.....97

Figura 11. Variação do conteúdo de água volumétrico com a densidade do solo, para limites críticos da porosidade de aeração (PA), capacidade de campo (CC), resistência do solo à penetração de 2 MPa (RP) e ponto de murcha permanente (PMP), na camada de 7,5-12,5 cm, três anos após diferentes rotações de culturas. IHO: intervalo hídrico ótimo. Dezembro/2008.....102

Figura 12. Variação do conteúdo de água volumétrico com a densidade do solo, para limites críticos da porosidade de aeração (PA), capacidade de campo (CC), resistência do solo à penetração de 2 MPa (RP) e ponto de murcha permanente (PMP), na camada de 7,5-12,5 cm, três anos após diferentes rotações de culturas. IHO: intervalo hídrico ótimo. Dezembro/2008.....103

Figura 13. Variação do conteúdo de água volumétrico com a densidade do solo, para limites críticos da porosidade de aeração (PA), capacidade de campo (CC), resistência do solo à penetração de 2 MPa (RP) e ponto de murcha permanente (PMP), na camada de 27,5-32,5 cm, três anos após diferentes rotações de culturas. IHO: intervalo hídrico ótimo. Dezembro/2008.....104

Figura 14. Variação do conteúdo de água volumétrico com a densidade do solo, para limites críticos da porosidade de aeração (PA), capacidade de campo (CC), resistência do solo à penetração de 2 MPa (RP) e ponto de murcha permanente (PMP), na camada de 27,5-32,5 cm, três anos após diferentes rotações de culturas. IHO: intervalo hídrico ótimo. Dezembro/2008.....105

Figura 15. Densidade do solo crítica (IHO=0) nas camadas de 7,5-12,5 e 27,5-32,5 cm de profundidade, no terceiro ano do experimento. B: brachiaria ruziziensis; CC: cober crop; C: crotalária juncea; M: milheto; P: pousio; S: sorgo. Dezembro/2008.....106

LISTA DE APÊNDICES

- Apêndice 1.** Coeficientes de determinação e parâmetros calculados da curva característica da água no solo, no primeiro ano do experimento, nas profundidades de 0-5; 7,5-12,5; 15-20; 27,5-32,5 e 47,5-52,5 cm. Dezembro/2006.....138
- Apêndice 2.** Coeficientes de determinação e parâmetros calculados da curva característica da água no solo, no terceiro ano do experimento, nas profundidades de 0-5; 7,5-12,5; 15-20; 27,5-32,5 e 47,5-52,5 cm. Dezembro/2008.....140
- Apêndice 3.** Estimativa dos parâmetros de regressão para a resistência do solo à penetração em função do conteúdo volumétrico da água e densidade do solo, no terceiro ano do experimento ($RP = d_v^e Ds^f$). Dezembro/2008.....142
- Apêndice 4.** Estimativa dos parâmetros de regressão para o conteúdo volumétrico de água no solo em função da densidade e do potencial mátrico, no terceiro ano do experimento ($\theta_v = \exp(a + b Ds) \Psi^c$). Dezembro/2008.....143
- Apêndice 5.** Valores de pH (A) e teores de H+Al (B), matéria orgânica (C), cálcio (D), magnésio (E), potássio (F) e fósforo (G) no perfil do solo, após manejo das plantas de cobertura conduzidas na primavera, no primeiro ano agrícola. Dezembro/2006. B: braquiária; S:sorgo; B+S: braquiária + sorgo; CC: cober crop; C: crotalária; M: milheto; P: pousio.....144
- Apêndice 6.** Valores de pH (A) e teores de H+Al (B), matéria orgânica (C), cálcio (D), magnésio (E), potássio (F) e fósforo (G) no perfil do solo, após manejo das plantas de cobertura conduzidas na primavera, no segundo ano agrícola. Dezembro/2007. B: braquiária; S:sorgo; B+S: braquiária + sorgo; CC: cober crop; C: crotalária; M: milheto; P: pousio.....145

Apêndice 7. Valores de pH (A) e teores de H+Al (B), matéria orgânica (C), cálcio (D), magnésio (E), potássio (F) e fósforo (G) no perfil do solo, após manejo das plantas de cobertura conduzidas na primavera, no terceiro ano agrícola. Dezembro/2008. B: braquiária; S:sorgo; B+S: braquiária + sorgo; CC: cober crop; C: crotalaria; M: milho; P: pousio.....146

RESUMO

O manejo inadequado do solo ocasiona a formação de camadas compactadas que prejudicam o desenvolvimento radicular das plantas, diminuindo a disponibilidade de água e nutrientes, enquanto que o acúmulo de carbono pode melhorar a qualidade do solo. Em sistemas com semeadura direta (SSD), com a menor mobilização do solo, pode-se usar, em rotação, plantas com sistema radicular vigoroso, capaz de crescer em condições adversas. Este trabalho teve como objetivo avaliar a ação de espécies de cobertura, gramíneas e uma leguminosa, em rotação com a cultura da soja, nos atributos físicos de um Latossolo, no acúmulo de carbono, nas diferentes frações da matéria orgânica e na produção da soja, em semeadura direta, ao longo de três anos. O experimento foi conduzido em um Latossolo Vermelho distroférico de textura argilosa, na Fazenda Experimental Lageado, Unesp/Botucatu, nos anos agrícolas de 2006/2007, 2007/2008 e 2008/2009. No outono-inverno foram estabelecidas parcelas com braquiária (*Brachiaria ruziziensis*), sorgo granífero (*Sorghum bicolor*) e sorgo consorciado com braquiária. Na primavera, foram cultivados, em subparcelas, milho (*Pennisetum glaucum*), cober crop [*Sorghum bicolor* (L.) Moench x *Sorghum sudanense* Piper Stapf], crotalária (*Crotalaria juncea*) ou pousio. A soja foi cultivada como safra de verão. Em março do primeiro ano foram retiradas amostras para caracterização da área experimental. Após o manejo das espécies cultivadas na primavera, no primeiro e terceiro ano, foram retiradas amostras indeformadas nas camadas de 0-5; 7,5-12,5; 15-20; 27,5-32,5 e 47,5-52,5 cm para determinação da densidade do solo, porosidade e curva de

retenção de água no solo. Nas mesmas épocas, a estabilidade de agregados foi avaliada em amostras coletadas nas camadas de 0-5 e 5-10 cm. No terceiro ano do experimento, o intervalo hídrico ótimo (IHO) foi determinado nas profundidades de 7,5-12,5 e 27,5-32,5 cm. Assim como para o IHO, as avaliações para caracterização da matéria orgânica foram realizadas apenas no terceiro ano, nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm. As raízes das plantas de cobertura de primavera foram amostradas no dia anterior ao manejo químico, nos três anos agrícolas, nas profundidades de 0-5; 5-10; 10-20; 20-40 e 40-60 cm. As raízes de soja foram coletadas nas mesmas profundidades, quando a lavoura encontrava-se em estágio R2, nos três anos agrícolas. A produtividade de grãos de sorgo safrinha e da soja safra também foi avaliada. As melhorias proporcionadas pelas rotações de culturas nas propriedades físicas do solo se estendem para camadas mais profundas com a sucessão dos cultivos. As espécies de cobertura conduzidas na primavera apresentam efeitos mais rápidos e consistentes do que o cultivo de outono-inverno. A produção de fitomassa e o crescimento vigoroso das raízes das espécies utilizadas em rotação têm influência positiva na formação de macroagregados num solo com estrutura degradada, com reflexos em outras características físicas do solo, como a porosidade e a retenção de água. A rotação das culturas soja e crotalária, apesar da maior oferta de nitrogênio, não acumula matéria orgânica no solo comparada ao uso só de gramíneas. O cultivo da braquiária e das plantas de cobertura cober crop ou milho tem efeito positivo nas frações de carbono do solo. O IHO e a densidade do solo crítica na camada de 7,5-12,5 cm foram influenciados somente pelo cultivo de primavera, de forma geral, na seguinte ordem: cober crop = milho > crotalária > pousio. A melhoria das condições físicas do Latossolo ocorre com aportes de matéria seca, em média, menores do que os preconizados na literatura para viabilizar o SSD. O fracionamento da matéria orgânica demonstra grande sensibilidade em avaliar o efeito positivo do cultivo da braquiária e das plantas de cobertura nas frações de carbono do solo, as quais atuam nas propriedades físicas do solo.

Palavras chave: *Glycine max*, intervalo hídrico ótimo, qualidade física do solo, carbono orgânico, plantas de cobertura.

CROP ROTATION AND SOIL PHYSICAL PROPERTIES AND ORGANIC MATTER OF AN OXISOL. Botucatu, 2010. 146p. Tese (Doutorado em Agronomia/Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

Author: RODRIGO ARROYO GARCIA

Adviser: CIRO ANTONIO ROSOLEM

SUMMARY

Compacted layers resulting from inappropriate soil management may impair root growth, thus decreasing water and nutrient acquisition by crops. Conversely, soil quality is improved with soil carbon accumulation. In areas under no-till, crop rotation with plants with vigorous root systems may alleviate soil compaction, as well as increase soil carbon. In this experiment the effects of cover crops on soil physical properties, carbon accumulation, organic matter quality and soybean production under no-till in a compacted soil were studied for three years. The experiment was conducted on a clayey Rhodic Ferralsol, Lageado Experimental Farm, Unesp/Botucatu, in 2006/2007, 2007/2008 and 2008/2009. Congo grass (*Brachiaria ruziziensis*), grain sorghum (*Sorghum bicolor*) and a mix of both were cropped during fall-winter. Then, in the spring, pear millet (*Pennisetum glaucum*), cober crop [*Sorghum bicolor* (L.) Moench x *Sorghum sudanense* Piper Stapf] and indian hemp (*Crotalaria juncea*) were cropped and a treatment under fallow was set on sub-plots. Soybean was cropped as a summer crop. In March of the first year, samples were taken for characterization of the area. Right after spring crops were chemically desiccated in 2006 and 2008, undisturbed soil samples were taken from the layers 0-5; 7.5-12.5; 15-20; 27.5-32.5 and 47.5-52.5 cm to determine bulk density, porosity and water retention curve. At the same time, samples taken from the depths 0-5 and 5-10 cm were used to determine aggregate stability. In the third year, least limiting water range (LLWR) was evaluated in the 7.5-12.5 and 27.5-32.5 cm soil layers. Organic matter characterization was done in the third year, in the depths of 0-5 and 5-10 cm. Roots of spring crops were sampled in the layers 0-5; 5-10; 10-20; 20-40 and 40-60 cm, one day before chemical desiccation in all growing seasons. Soybean roots were

sampled in the same depths at R2 each year. Sorghum and soybean yields in winter and summer, respectively, were also evaluated. Crop rotation improves soil physical properties deeper in the profile as the experiment progressed. Cover crops grown in spring affect soil properties faster and more consistently than species cropped in fall/winter. Phytomass production and vigorous root growth of the species in rotation increase macro-aggregate formation in a degraded soil. Hence, other physical attributes can be improved such as porosity and water retention capacity. In soybean rotations including indian hemp, the higher N supply does not increase soil organic matter accumulation as compared with grasses. Cultivating congo grass and the cover crops cober crop or millet positively affects soil carbon fractions. Both the least limiting water range and critical soil porosity in the depth 7.5-12.5 cm are affected only by spring crops, according to the following order: cober crop = millet > indian hemp > fallow. Physical attributes of the oxisol are improved by amounts of phytomass lower than those reported in the literature as required for no tillage success. Organic matter fractionation is very sensitive to detect positive effects of congo grass and other cover crops on soil carbon fractions, which affect soil physical properties.

Key words: *Glycine max*, least limiting water range, soil physical quality, organic carbon, cover crops.

1. INTRODUÇÃO

O Sistema de Semeadura Direta (SSD) está consolidado em todas as regiões agrícolas do Brasil, devido aos inúmeros benefícios econômicos e ambientais proporcionados pelas suas práticas conservacionistas, podendo também influenciar positivamente os atributos físicos, químicos e biológicos do solo. No entanto, a exploração intensiva do solo, em condições inadequadas de umidade e com baixo aporte de resíduos vegetais na superfície, acaba proporcionando camadas compactadas no solo, já que não há revolvimento mecânico da camada superficial. Esse impedimento mecânico do solo influencia negativamente o crescimento radicular das espécies cultivadas, assim como o armazenamento de água disponível para as plantas, proporcionando quedas na produtividade, principalmente em condições ambientais adversas.

A escolha de espécies vegetais na composição da rotação de culturas com as espécies comerciais, é uma alternativa para manter ou melhorar a qualidade física do solo, pelo uso de plantas com crescimento radicular volumoso e agressivo, além de elevada produção de fitomassa da parte aérea. Desse modo não haveria a necessidade de revolvimento mecânico do solo para descompactá-lo, sendo mantidos os benefícios oriundos do sistema de semeadura direta, que visa manter o solo coberto ao longo do ano e sem revolvimento. As raízes, após penetrarem em camadas compactadas do solo e sofrerem o processo de decomposição, criam bioporos no perfil do solo, facilitando o crescimento de raízes das culturas sucessoras assim como o movimento de água, ar e fertilizantes.

A matéria orgânica do solo, proveniente do crescimento radicular e do constante aporte de palha na superfície do solo, tem papel fundamental na melhoria de suas propriedades físicas, atuando na maior agregação. A partir de seu efeito sobre a agregação do solo, indiretamente são afetadas as demais características físicas, como a densidade, a porosidade, a aeração, a capacidade de retenção e a infiltração de água, entre outras, que são fundamentais à capacidade produtiva do solo. A manutenção de resíduos vegetais na superfície do solo também é de fundamental importância na capacidade do solo em receber cargas sem sofrer deformação.

Assim, uma rotação de culturas adequada pode melhorar as características físicas do solo e propiciar um ambiente mais favorável para o crescimento radicular. Esses efeitos estão direta ou indiretamente ligados às modificações da matéria orgânica do solo que, por sua vez, depende do aporte de carbono e nitrogênio no sistema.

Este trabalho teve como objetivo avaliar a ação de espécies de cobertura, gramíneas e uma leguminosa, em rotação com a cultura da soja, nos atributos físicos de um Latossolo, no acúmulo de carbono, nas diferentes frações da matéria orgânica e na produtividade da soja, em semeadura direta, ao longo de três anos.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Sistema de Semeadura Direta

Um dos maiores avanços no processo produtivo da agricultura brasileira foi a introdução do Sistema de Semeadura Direta (SSD) no sul do Brasil, a partir do início da década de 1970 (LOPES et al., 2004). Este sistema é caracterizado pelo não revolvimento do solo, exceto nos sulcos de semeadura, e manutenção dos restos culturais sobre a superfície do solo (AMARAL et al., 2004). Seu objetivo básico inicial foi controlar a erosão hídrica. Em solos de igual declividade, o SSD pode reduzir em até 75% as perdas de solo e em 20% as perdas de água, em relação às áreas onde há revolvimento do solo (OLIVEIRA et al., 2002). Ainda quanto aos aspectos ambientais, o SSD tem recebido grande atenção à maior capacidade desse sistema em armazenar carbono de forma mais estável no solo, contribuindo na menor emissão de gases causadores do efeito estufa (ABDALLA et al., 2010).

Atualmente, a área manejada sob esse sistema de cultivo é crescente, sendo difundida em todas as regiões produtoras de grãos no Brasil. Tal sucesso do sistema baseia-se nos inúmeros benefícios provenientes dessa prática conservacionista, como o menor gasto com combustível, quando comparado ao excessivo consumo pelas máquinas agrícolas no processo de revolvimento do solo em sistema convencional de cultivo (CAIRES, 2003). Os efeitos de boas práticas conservacionistas, através do SSD, também podem ser constatados nas

propriedades físico-hídricas, químicas e biológicas do solo. Quanto aos atributos físico-hídricos, destaca-se o maior armazenamento de água no perfil do solo (BENJAMIN et al., 2003). Nos atributos químicos do solo, a reciclagem de nutrientes é intensa, diminuindo as perdas por lixiviação (GARCIA et al., 2008; REDDY et al., 2009). Alterações provocadas pelo plantio direto e sistemas de rotação de culturas podem afetar as populações de bactérias fixadoras de N_2 e também de outros microrganismos do solo, dada a grande variação na incorporação dos resíduos, afetando diretamente a mineralização da matéria orgânica do solo (WANG et al., 2007; SIMMONS & COLEMAN, 2008;).

O sistema de produção integrado entre lavoura e pecuária é uma atividade crescente, em grande parte, devido à maior demanda mundial por alimentos, sem que haja abertura de novas fronteiras agrícolas. Portanto, através da recuperação de pastos degradados pela agricultura, o SSD também vem ganhando espaço nessa modalidade de produção. Além do mais, há um melhor aproveitamento das chuvas de verão pelas forrageiras (BALBINOTI JUNIOR et al., 2009). O sistema integrado agrosilvipastoril, ou seja, com produção de floresta, gado e lavoura, na mesma área de produção, segue mesma tendência, devido à maior sustentabilidade do sistema quanto aos aspectos ambientais e maior diversificação de atividades na propriedade (NEVES et al., 2004).

2.2. Compactação do solo

O termo compactação do solo refere-se ao processo que descreve o decréscimo de volume ocupado por uma certa massa de solo não saturado quando uma determinada pressão externa é aplicada, a qual pode ser causada pelo tráfego de máquinas agrícolas, equipamentos de transporte ou animais (LIMA, 2004). Para a pedologia, a compactação do solo é definida como uma alteração no arranjo de partículas constituintes do solo (CAMARGO & ALLEONI, 1997). Em solos compactados, o desenvolvimento das plantas é menor e isto tem sido atribuído ao impedimento mecânico ao crescimento radicular, o qual resulta em menor volume de solo explorado, menor absorção de água e nutrientes e, conseqüentemente, menor produção das culturas (KAISER et al., 2009).

O processo de compactação depende de fatores externos e internos. Os fatores externos são caracterizados pelo tipo, intensidade e frequência de carga aplicada,

enquanto que os fatores internos são: a umidade, textura, estrutura, densidade inicial do solo e matéria orgânica (DIAS JUNIOR et al., 1999).

A gota de chuva é considerada uma fonte natural de compactação, pois quando cai sobre o solo descoberto, poderá compactá-lo e desagregá-lo aos poucos. A formação do selamento superficial deve-se a dois mecanismos: (1) fragmentação física dos agregados do solo e seu adensamento; (2) dispersão físico-química e migração das partículas de argila em profundidade, onde se alojam, obstruindo os poros (BORTOLOZZO & SANS, 2001).

Outra fonte de compactação do solo é o peso do veículo agindo sobre a superfície do solo, o qual origina uma força externa que causa reorganização das suas partículas, que passam a ocupar menor volume. Nos atuais sistemas de produção o trânsito de máquinas é intenso, sendo que em alguns cultivos anuais são necessárias mais de 20 aplicações de agrotóxicos (SAXON et al, 1988). Além disso, a intensa mobilização dos solos tropicais traz como consequência sua desagregação superficial, sujeita à formação de uma fina crosta resultante da dispersão das partículas do solo, e ainda outra camada subsuperficial compactada, resultante tanto da pressão exercida pelo peso dos implementos agrícolas, como pela ação direta dos pneus. Esses efeitos são acentuados com baixo aporte de resíduos vegetais na superfície do solo e em condições inadequadas de umidade, nas quais o solo apresenta maior plasticidade (SWAN et al., 1987).

No sistema de integração lavoura pecuária também pode ocorrer compactação das camadas superficiais do solo pelo pisoteio animal, principalmente quando o pastejo é realizado em condições de alta umidade do solo (GUIMARÃES et al., 2009).

2.3. Efeito da compactação nas propriedades físicas do solo

2.3.1. Densidade do solo

A presença de uma estrutura maciça e adensada nas camadas superficial e subsuperficial são comuns na maioria dos solos cultivados intensivamente, com valores de densidade do solo (Ds) mais elevados e, aeração, penetração e proliferação de raízes também prejudicadas. Assim, a Ds pode variar consideravelmente, dependendo da

textura, dos teores de M.O e da frequência de cultivo (LIPIEC & HATANO, 2003). Para solucionar o problema de altos valores de densidade, alguns agricultores têm utilizado a subsolagem nas operações de preparo do solo para a semeadura, precedendo a outras operações convencionalmente utilizadas com a finalidade de aliviar a compactação (CASTRO FILHO et al., 1993).

Não existe consenso sobre o nível crítico da densidade do solo, ou seja, o valor acima do qual o solo é considerado compactado. A D_s varia de acordo com as características do solo, sendo que em solos argilosos varia de 1,0 a 1,45 $Mg\ m^{-3}$ para condições de mata e muito compactados, respectivamente, e para solos arenosos apresentam D_s variáveis entre 1,25 a 1,70 $Mg\ m^{-3}$ (TORRES & SARAIVA, 1999). Torres et al. (1998) compararam o desempenho da soja em um Nitossolo Vermelho com diferentes níveis de compactação na camada de 8 a 16 cm, e constataram que o efeito da compactação variou entre os anos. Nos anos de melhor distribuição de chuvas, não ocorreu efeito da compactação sobre a produtividade da soja. No entanto, nos anos mais secos o rendimento da soja foi afetado entre valores de densidade do solo de 1,27 a 1,33 $g\ dm^{-3}$.

2.3.2. Porosidade do solo

A porosidade do solo é uma propriedade física do solo que sofre grandes alterações com a compactação. Pesquisas realizadas em várias regiões apontam alterações significativas com a compactação no decréscimo da porosidade, da continuidade, do número e tamanho dos poros, e da difusão de gases, com reduções significativas principalmente no volume dos macroporos (NOVAK et al., 1992). Com relação à distribuição e tamanho dos poros, a microporosidade é responsável pela capacidade de retenção de água e solutos no solo, enquanto que a macroporosidade influencia diretamente a capacidade de infiltração, a drenabilidade do solo e sua capacidade de aeração (ABID & LAL, 2008).

A redução da porosidade, e em especial da macroporosidade, dificulta a infiltração de água, aumentando o escoamento superficial e as perdas de água e de terra, levando ao empobrecimento da fertilidade da camada arável. Assim, o crescimento superficial das raízes em solo compactado, ou seja, confinada nos primeiros centímetros do perfil, dificulta o abastecimento hídrico e nutricional das plantas (STEINHARDT, 1983; MORAES

et al., 1995), ocasionando perda de produtividade. Portanto, a compactação do solo tem seu efeito na produtividade das culturas agravado em anos de baixos índices pluviométricos (TORRES & SARAIVA, 1999). Segundo Hatano et al. (1988), existe uma estreita relação entre porosidade do solo e crescimento radicular. Vomocil & Flocker (1966) sugerem uma macroporosidade mínima ao redor de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para o crescimento e o desenvolvimento satisfatório das plantas.

No SSD, em geral, os solos apresentam após três a quatro anos, maiores valores de densidade e microporosidade na camada superficial, e menores valores de macroporosidade e porosidade total, quando comparado com o preparo convencional. Isto ocorre, sobretudo pelo arranjo natural do solo não mobilizado, e pela pressão provocada pelo trânsito de máquinas e implementos agrícolas, em particular quando realizado em solos argilosos e com teores elevados de umidade (SILVEIRA & STONE, 2003). No entanto, em um estudo de longo prazo (20 anos), Siqueira et al. (2009) constataram valores de densidade e porosidade do solo satisfatórios.

2.3.3. Estrutura do solo

Segundo Resende et al. (1995), a estrutura do solo pode ser definida como sendo o arranjo das partículas, ou seja, das frações argila, silte e areia, tendo a M.O papel fundamental nesse processo. Na avaliação da estrutura do solo, o fator primordial a ser considerado diz respeito à estabilidade dos agregados, a qual é dependente das forças que ligam as partículas e também, da natureza e magnitude das forças desagregantes aplicadas nesta avaliação (BEARE & BRUCE, 1993).

Albuquerque et al. (1995) afirmam que dentre as propriedades físicas do solo, a estrutura é uma das propriedades mais sensíveis ao manejo e sua qualidade pode ser analisada segundo variáveis relacionadas com sua forma e com sua estabilidade. Um dos efeitos da compactação é a modificação da estrutura do solo, podendo limitar a adsorção e a absorção de nutrientes, a infiltração e a distribuição de água, resultando em problemas no estabelecimento e no crescimento das raízes (FLOWERS & LAL, 1998; KLEIN et al., 1998; IMHOFF, 2002). Richart et al. (2005) afirmaram que a estrutura do solo é modificada em função da compactação, sendo que os macroagregados são destruídos e o solo apresenta

estrutura degradada, podendo impedir o crescimento de raízes e diminuir o volume de solo explorado pelo sistema radicular.

Geralmente, as práticas de manejo têm maior impacto sobre os agregados de solos arenosos do que de solos argilosos. Silva & Mielniczuk (1997) verificaram redução do diâmetro médio ponderado (DMP) dos agregados de 71% num Argissolo Vermelho (220 g kg⁻¹ de argila) e de 47% num Latossolo Roxo (680 g kg⁻¹ argila), quando passaram de uma condição de campo nativo para preparo convencional com culturas anuais, submetidos à aração e gradagem. Por outro lado, os mesmos autores verificaram aumento da estabilidade de agregados em ambos os solos quando submetidos ao sistema de semeadura direta. O DMP dos agregados passou de 0,61 mm, no Argissolo, e de 1,76 mm, no Latossolo, em preparo convencional, para 0,91 e 1,90 mm, respectivamente, em plantio direto. Em termos relativos, o aumento ocorrido na estabilidade de agregados do solo em plantio direto foi de 49 e 8%, respectivamente, no Argissolo franco-arenoso e no Latossolo argiloso. Segundo Dufranc et al. (2004), pode-se esperar baixa estabilidade de agregados em solos com altos teores de areia fina, da mesma forma que se pode esperar alta estabilidade de agregados em solos com alto teor de argila. Em contrapartida, Calonego & Rosolem (2008) observaram forte influência do cultivo de plantas de cobertura na maior agregação de um Nitossolo argiloso degradado.

2.3.4. Resistência à penetração

A resistência do solo à penetração é apontada como um dos fatores limitantes ao desenvolvimento e estabelecimento das culturas, pois ela expressa o grau de compactação do solo; varia com o tipo de solo e com a espécie cultivada. Alguns parâmetros são importantes para a quantificação da resistência à penetração, tais como a densidade e o conteúdo de água do solo (SILVA et al., 1994). A densidade apresenta uma relação direta com a resistência (BORGES et al., 1999), enquanto que o conteúdo de água influencia negativamente a resistência (TORMENA et al., 1998; LEÃO et al., 2005).

Em áreas onde o sistema de semeadura direta é adotado, a ausência de revolvimento tem provocado um aumento da densidade do solo que refletirá em maior resistência à penetração (SILVA et al., 2000). Silva et al. (2004) observaram que a distribuição

da compactação do solo neste sistema ocorre de maneira sistemática, sendo maior nas laterais da lavoura, diminuindo para o centro, em função do tráfego de máquinas.

Com relação aos níveis críticos de resistência, na literatura vários valores são adotados, devido principalmente às variações quanto ao teor de água por ocasião do teste além dos equipamentos utilizados não representarem fielmente o comportamento das raízes em condições de solos compactados. Silva et al. (2002a) relatam que um valor de 2,0 MPa de resistência à penetração do solo têm sido associado a condições impeditivas para o crescimento das raízes e da parte aérea das plantas.

De acordo com Dexter & Watts (2000), a compactação do solo é mais prejudicial em solo seco, sendo que em condições de maior umidade pode haver crescimento radicular em valores de resistência à penetração superiores a 4,0 MPa. Assim, como há divergências na literatura quanto ao nível crítico de resistência à penetração, muitos pesquisadores, utilizam o valor de 2,0 MPa como o limite crítico. Beutler & Centurion (2004), objetivando avaliar o efeito da compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja em Latossolo Vermelho de textura média, verificaram que no maior nível de resistência à penetração (camada de 0,0-0,20 m) ocorreram mudanças na distribuição do sistema radicular e que houve aumento da espessura das raízes na camada mais compactada. Também foi verificada maior produção de raízes finas, estimulada pelo aumento da resistência à penetração.

Segundo Marschner (1995), 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 em solo úmido, ocasiona falta de oxigênio para a respiração das raízes.

2.4. IHO na avaliação da qualidade física do solo em SSD

Na literatura encontram-se trabalhos que evidenciam que os sistemas de manejo que proporcionam menor valor de IHO expõem as culturas a uma frequência maior de situações de estresse por excesso ou falta de água, podendo afetar a produtividade das culturas (KAY, 1990; SILVA & KAY, 1996; LAPEN et al., 2004; FREDDI et al., 2008;).

A tentativa de definição de limites críticos a partir dos quais ocorrem danos no desenvolvimento das culturas é uma condição difícil de ser conseguida, pois os fatores diretos que afetam o desenvolvimento das plantas (oxigênio, água, temperatura e impedimento mecânico) não são influenciados apenas pela estrutura do solo (densidade do solo, estado de agregação e porosidade), mas também pelas condições climáticas, que variam de ano para ano (DEXTER, 1988).

Portanto, mantendo-se um solo com uma mesma densidade por longos períodos, quando o ano for seco, o solo poderá ter maior resistência à penetração, menor disponibilidade de água e maior disponibilidade de O₂. No entanto, em condições de maior umidade, a resistência à penetração poderá ser menor e a disponibilidade de água maior, porém, a concentração de O₂ pode ser deficiente. Dessa forma, certa densidade do solo pode ser crítica num ano e não no outro (TORRES & SARAIVA, 1999).

O reconhecimento dessas interações sugere que a avaliação da qualidade física do solo deva ser feita por meio de parâmetros que integrem os atributos físicos do solo relacionados com o crescimento das plantas, tendo a água como uma variável de equilíbrio, amenizando ou agravando os efeitos da aeração e da resistência à penetração (LETEY, 1985).

O crescimento das plantas é afetado quando alguns atributos físicos do solo atingem valores-limite, 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 o ponto de murcha permanente, ou seja, entre os potenciais de -0,01 MPa e -1,5 MPa, respectivamente (CASSEL & NIELSEN, 1986). A interação entre esses atributos em uma única variável foi quantificada por Silva et al. (1994) como “Least Limiting Water Range” que foi traduzido por Tormena et al. (1998) como “Intervalo Hídrico Ótimo” (IHO). De acordo com os 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 (CC) ou o teor de água em que a porosidade de aeração (PA) seja igual a 10%. Como limite inferior, pode-se ter o teor de água do solo na condição de ponto de murcha permanente (PMP) ou o teor de água em que a resistência do solo à penetração seja igual a 2,0 MPa.

O aumento da D_s do solo, por exemplo, afeta mais severamente os teores de água para proporcionar PA e RP satisfatórias do que os teores de água na CC e no PMP, indicando que o IHO é um parâmetro mais sensível às mudanças estruturais no solo que a água disponível (SILVA et al., 1994; ZOU et al., 2000; BLAINSKI et al., 2009). Além do mais, o PMP é uma característica intrínseca do solo, apresentando pouca variação em função da maior compactação do solo (KLEIN et al., 2009).

Portanto, a água no solo necessária para que não ocorram limitações ao crescimento vegetal, seja para atender as condições de água disponível ou a PA mínima e também uma RP não impeditiva, variam com o estado de compactação do solo, que pode ser medido por valores de densidade do solo (SILVA et al., 1994).

Diversos trabalhos apontam um IHO maior em sistemas com revolvimento do solo, já que a macroporosidade e a resistência à penetração tornam-se favoráveis após o revolvimento do solo. No entanto, essa condição é momentânea, e a diminuição do IHO é rápida em função do aumento dos valores de densidade do solo. Em contrapartida, em SSD consolidado, a maior estruturação do solo proporciona menores variações do IHO em função do aumento da compactação, além de apresentar valor de densidade do solo crítica maior (valor de D_s em que o $IHO=0$). Esse comportamento também é comprovado em áreas de mata nativa (ARAUJO et al., 2004; LEÃO et al., 2006).

2.5. Uso de plantas de cobertura em SSD

No sistema convencional de preparo do solo há compactação subsuperficial devido à carga aplicada ao longo dos anos pelos equipamentos de preparo do solo (20-30 cm), ao passo que em SSD, a compactação ocorre nos primeiros centímetros do perfil (5-15 cm), devido ao efeito cumulativo das pressões exercidas pelas máquinas trafegando sobre o solo, além da acomodação natural das partículas, já que não há revolvimento de solo (PEDROTTI et al., 2001). No caso do sistema de ILP, essa camada mais compactada também localiza-se nos primeiros centímetros do perfil do solo, devido ao efeito adicional da compactação pelo pisoteio animal em condições inadequadas de água no solo (GUIMARÃES et al., 2009). Portanto, a camada compactada do solo sob SSD coincide com a região de maior crescimento radicular das espécies cultivadas.

Como para a viabilidade do SSD objetiva-se a constante manutenção de resíduos na superfície do solo, uma alternativa para melhora da qualidade física do solo baseia-se na escolha de 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 (SILVA & ROSOLEM, 2001).

O aporte de matéria seca e conseqüentemente de M.O promovido tanto pela parte aérea quanto radicular das plantas de cobertura, em SSD, atuam como agentes agregantes das partículas individualizadas do solo, promovendo a formação de agregados mais estáveis (CALONEGO & ROSOLEM, 2008), aumentando a porosidade do solo, a infiltração e retenção de água e diminuindo a densidade e o escoamento superficial. Os efeitos diferenciados das plantas de cobertura quando comparados às culturas anuais, nas propriedades químicas do solo, também são consideráveis, com destaque para a absorção de nutrientes em camadas profundas do perfil do solo (GARCIA et al., 2008), velocidade de liberação dos nutrientes dos resíduos vegetais (ROSOLEM et al., 2005), absorção de formas pouco disponíveis e associações com microrganismos do solo (PAUL & CLARK, 1996).

As gramíneas, como braquiárias, milheto, sorgo, cober crop, capim pé de galinha produzem um sistema radicular volumoso, com grande capacidade de explorar o perfil do solo. Em contrapartida, espécies com sistema radicular pivotante, como o guandu, crotalária e o nabo forrageiro, produzem menor quantidade de bioporos, apesar de possuírem maior capacidade de romper camadas compactadas (FOLONI et al., 2006). No trabalho de Calonego (2007), as plantas de cobertura apresentaram capacidade diferenciada quanto à exploração do perfil de um solo argiloso e compactado.

Silva & Rosolem (2002) observaram que o aumento da densidade do solo até $1,60 \text{ Mg m}^{-3}$ não impediu o crescimento radicular de aveia preta, guandu, milheto, mucuna preta, soja, sorgo e tremoço. No entanto, a soja cultivada em seguida, não apresentou crescimento radicular abaixo da camada compactada na densidade mais alta, mas, com relação aos vasos deixados em pousio, o cultivo anterior de adubos verdes aumentou a produção de matéria seca e o acúmulo de nutrientes na parte aérea das plantas de soja. Gonçalves et al. (2006) compararam o crescimento radicular de amaranto, milheto ADR 500, capim pé-de-galinha e kenaf, com camadas intermediárias de solo compactado, e observaram no momento da desmontagem dos vasos que o milheto ADR 500 e o amaranto foram as espécies que se

destacaram na produção de massa seca da parte aérea e conseguiram desenvolver-se nas camadas compactadas e abaixo delas.

2.6. Caracterização e influência da M.O em solo manejado em SSD

A matéria orgânica do solo engloba os resíduos vegetais em estágios variados de decomposição, a biomassa microbiana, as raízes e a fração mais estável, denominada húmus, as quais influenciam nas características químicas, físicas e biológicas do solo (BRAGAGNOLO & MIELNICZUK, 1990). Por ter papel essencial na sustentabilidade do sistema solo, o estoque do C orgânico total (COT) ou da matéria orgânica do solo, têm sido utilizados como indicadores de sua qualidade. Recentemente, a determinação dessas quantidades tem ganhado atenção devido ao solo incorporar C, e, conseqüentemente, diminuir a emissão de gases causadores do efeito estufa (GULDE et al., 2008).

Porém, a dinâmica da matéria orgânica do solo ou o carbono orgânico total têm mostrado baixa sensibilidade às mudanças promovidas pelos sistemas de manejo, o que levou à utilização do estudo dos compartimentos do COT que são mais sensíveis ao manejo do solo, como melhores indicadores dessa dinâmica (XAVIER et al., 2006; DOU et al., 2008).

A biomassa microbiana do solo, a matéria orgânica mineralizável, o carbono orgânico particulado, carbono dissolvido em água e extraído em água quente, têm sido caracterizados como frações lábeis da matéria orgânica do solo e com maior sensibilidade quanto à detecção do efeito de manejo na qualidade do solo (LADD et al., 1994). Essas frações, em geral, apresentam tempo de residência menor no solo quando comparadas às formas mais recalcitrantes, variando de semanas a anos (PAUL et al., 2001). Nesse sentido, Conceição et al. (2005) avaliaram os compartimentos do COT e verificaram que o C orgânico particulado (COP) foi mais sensível às alterações promovidas no solo por diferentes sistemas de manejo.

O carbono contido nas diferentes frações do solo, separadas por tamanho, também é um indicador do grau de proteção da matéria orgânica do solo, que está menos suscetível ao ataque dos microrganismos, elevando os estoques de C no solo (BALABANE & PLANTE, 2004).

A biomassa microbiana do solo é a fração viva da matéria orgânica, sendo assim, responsável por processos bioquímicos e biológicos no solo e, por conseguinte, sensivelmente influenciada pelas condições impostas pelo meio (DOU et al., 2008). Em áreas com maior deposição de resíduos orgânicos no solo e com grande quantidade de raízes, ocorre aumento populacional e da atividade da biomassa microbiana. A biomassa microbiana também representa o compartimento central do ciclo do C no solo e pode funcionar como catalisador na decomposição do C orgânico (CATTELAN & VIDOR, 1990).

Entre as características químicas afetadas pela matéria orgânica, destacam-se a disponibilidade de nutrientes para as culturas, a CTC e a complexação de elementos tóxicos e micronutrientes, fundamentais em solos tropicais, na sua maioria altamente intemperizados e ácidos (FAGERIA & BALIGAR, 2008). Em relação à capacidade de troca catiônica (CTC), a fração húmica da M.O apresenta em torno de 400-800 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$, sendo bem superiores do que os constituintes minerais do solo.

A principal característica física do solo afetada pela matéria orgânica é a agregação. A partir do seu efeito sobre a agregação do solo, indiretamente são afetadas as demais propriedades físicas do solo, como a densidade, a porosidade, a aeração, a capacidade de retenção e a infiltração de água, entre outras, que são fundamentais à capacidade produtiva do solo (BAYER & MIELNICZUC, 2008).

Na formação e estabilização de agregados (microagregados) várias formas de ligação ocorrem concomitantemente. As macromoléculas húmicas apresentam uma grande quantidade de radicais orgânicos que interagem de forma distinta com a superfície do mineral. Adicionalmente às ligações eletrostáticas e pontes de cátions, outras formas de atração ocorrem, como pontes de hidrogênio e forças de van der Waals (BAYER & MIELNICZUC, 2008). Outra categoria de compostos orgânicos importante na estabilização de agregados (microagregados) são os polissacarídeos. Os polissacarídeos do solo são mucilagens provenientes do metabolismo microbiano e da decomposição de raízes, resíduos vegetais e animais e da exsudação radicular (GUERRA et al., 2008). No entanto, os polissacarídeos provenientes do metabolismo microbiano apresentam maior efeito cimentante nos microagregados do solo, devido ao maior peso molecular desses compostos provenientes do metabolismo (GUERRA et al., 2008).

Em relação à estabilidade dos macroagregados, formados a partir da união de microagregados, os componentes orgânicos mais importantes são as hifas de fungos e uma fração da matéria orgânica com pequeno grau de decomposição, denominada de matéria orgânica leve ou matéria orgânica particulada. Portanto, o efeito desses componentes acaba sendo de caráter mecânico. No caso das hifas de fungos, por exemplo, os micélios distribuídos por todo o solo contribuem para enlaçar e unir os microagregados (EASH et al., 1994).

De forma geral, os compostos orgânicos apresentam densidade inferior aos constituintes minerais do solo, contribuindo para a diminuição da densidade do solo através do incremento de carbono orgânico no solo. Além do mais, a porosidade inter e intra- agregados é elevada, afetando positivamente a dinâmica de gases e água no solo (BAYER & MIELNICZUC, 2008).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Localização da área experimental e características climáticas da região

O experimento foi conduzido na Fazenda Experimental Lageado da Faculdade de Ciências Agrônômicas/UNESP, em Botucatu-SP, nas safras agrícolas de 2006/2007, 2007/2008 e 2008/2009. A localização da área está definida pelas seguintes coordenadas geográficas: latitude 22°49'S, longitude 48°25'W e altitude de 786 metros. O clima da região, segundo classificação de Köppen, é do tipo Cwa, que significa clima mesotérmico com inverno seco. A estação seca é bem definida e ocorre entre os meses de maio a setembro. A precipitação média anual é de aproximadamente 1.514 mm, com temperatura média do mês mais quente superior a 22 °C e a do mês mais frio entre 3 e 18 °C. Na figura 1 estão apresentadas as quantidades de chuva e as temperaturas médias mensais nos anos agrícolas de 2006/2007, 2007/2008 e 2008/2009, registradas pela estação agrometeorológica localizada próxima à área experimental.

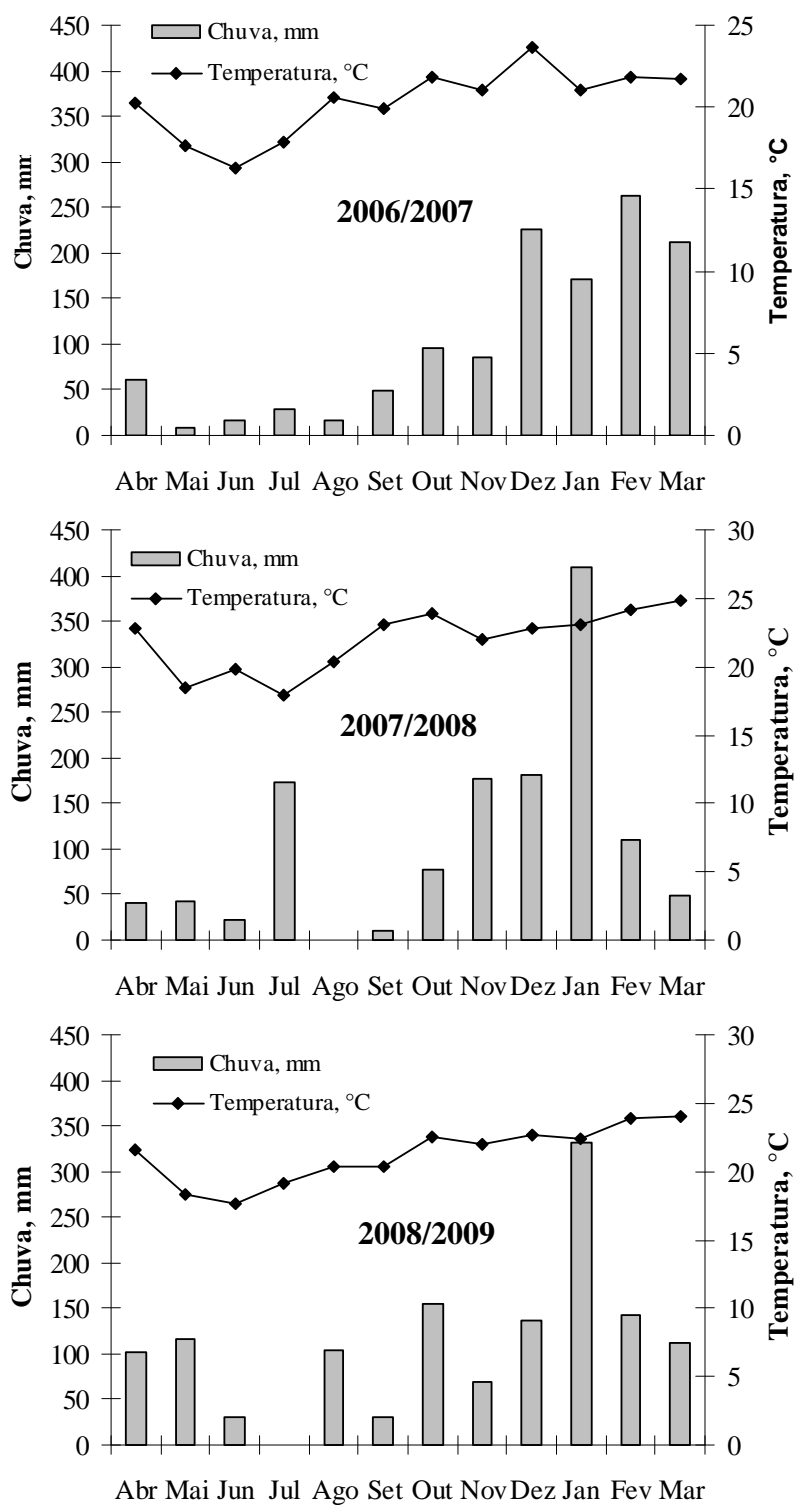


Figura 1. Temperaturas médias mensais e quantidade de chuvas durante a condução do experimento. Botucatu-SP.

3.2. Características do solo, histórico e caracterização da área experimental

O solo da área experimental apresenta relevo suave ondulado e foi classificado como Latossolo Vermelho distroférico de textura argilosa (EMBRAPA, 2006), e pela classificação da FAO (2006), como Rhodic Ferralsol. A área vinha sendo cultivada por sete anos, em Sistema de Seemadura Direta, com a rotação feijão/aveia-preta, sendo o feijão como cultura de verão, e a aveia-preta cultivada no outono-inverno.

Em março de 2006, após a colheita do feijão e antes da demarcação das parcelas experimentais, foram abertas quatro trincheiras em locais representativos, escolhidos de maneira aleatória, para coleta de amostras deformadas nas profundidades 0-5, 5-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm, e volumétricas nas profundidades 0-5, 7,5-12,5, 15-20, 27,5-32,5 e 47,5-52,5 cm. Para as amostras indeformadas, nas camadas de 0-5, 15-20 e 47,5-52,5 cm, foram retirados dois anéis por profundidade, em cada trincheira. Para as camadas de 7,5 a 12,5 e 27,5 a 32,5 cm foram retiradas, além dos dois anéis, mais 8 anéis para determinação do intervalo hídrico ótimo. As profundidades de 7,5-12,5, 15-20, 27,5-32,5 e 47,5-52,5 foram obtidas por anéis volumétricos retirados no centro das camadas de 5-15, 10-25, 20-40 e 40-60 cm, respectivamente.

Nas amostras deformadas determinou-se a granulometria nas camadas de 0-10, 10-20 e 20-40 cm, conforme procedimentos apresentados por Embrapa (1997), e análises químicas de rotina para determinar a fertilidade no perfil do solo (0-5, 5-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm), de acordo Raij et al. (2001). Os dados referentes às análises granulométricas e dos atributos químicos do perfil do solo estão apresentados nas tabelas 1 e 2, respectivamente.

Nas amostras volumétricas avaliou-se a densidade do solo, a macroporosidade, a microporosidade e a porosidade total do solo (EMBRAPA, 1997), conforme dados apresentados na tabela 1.

Torrões de solo foram coletados nas camadas de 0-5 e 5-10 cm para avaliação da estabilidade de agregados via úmida (KIEHL, 1979; EMBRAPA, 1997), sendo determinados os parâmetros índice de estabilidade de agregados (IEA), diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG) e proporção de agregados maiores que 2 mm (Tabela 1).

Tabela 1. Análise granulométrica, estabilidade de agregados e atributos físicos no perfil do solo, por ocasião da caracterização da área experimental. Março/2006.

Granulometria				
Profundidade (cm)	Areia	Argila	Silte	Textura do solo
	----- g kg ⁻¹ -----			
0-10	489	415	96	Argilosa
10-20	435	462	103	Argilosa
20-40	385	509	106	Argilosa
Estabilidade de agregados				
Profundidade (cm)	DMP	DMG	Agregados > 2mm	IEA
	----- mm -----		----- % -----	
0-5	2,75	2,35	65	87,4
5-10	2,57	2,18	54	85,0
Atributos físicos do solo				
Profundidade (cm)	Ds	Pt	Micro	Macro
	----- Mg m ⁻³ -----		----- m ³ m ⁻³ -----	
0-5	1,35	0,43	0,33	0,10
7,5-12,5	1,41	0,41	0,34	0,07
15-20	1,39	0,41	0,32	0,09
27,5-32,5	1,25	0,45	0,32	0,13
47,5-52,5	1,25	0,45	0,33	0,12

DMP: diâmetro médio ponderado; DMG: diâmetro médio geométrico; IEA: índice de estabilidade de agregados; Ds: densidade do solo; Pt: porosidade total; Micro: microporosidade; Macro: macroporosidade.

Tabela 2. Atributos químicos no perfil do solo, por ocasião da caracterização da área experimental. Março/2006.

Profundidade (cm)	pH	M.O.	P _{resina}	H+Al	K	Ca	Mg	SB	CTC	V%
	CaCl ₂	g dm ⁻³	mg dm ⁻³	----- mmol _c dm ⁻³ -----						
0-5	5,6	30	42	26	1,4	33	20	54	80	67
5-10	5,0	25	8	34	0,5	21	15	37	70	52
10-20	5,3	18	12	30	0,6	25	17	43	72	59
20-40	4,2	16	4	98	0,3	8	6	14	113	13
40-60	4,4	18	4	57	0,4	11	9	20	77	26

Para detectar uma possível camada de impedimento físico ao crescimento radicular, foi determinada a resistência mecânica à penetração (RP) ao longo do perfil, com penetrógrafo eletrônico, com célula de carga, desenvolvido por Santos & Lanças (1999). Um valor médio de RP foi obtido como resultado de 20 testes executados em pontos escolhidos aleatoriamente, procurando representar toda a área experimental (Figura 2). O teor

de água no perfil do solo também foi determinado por ocasião do teste de resistência à penetração no campo (Figura 2). Nas amostras não deformadas com estrutura preservada também foi determinada a curva de retenção de água no solo (Figura 3).

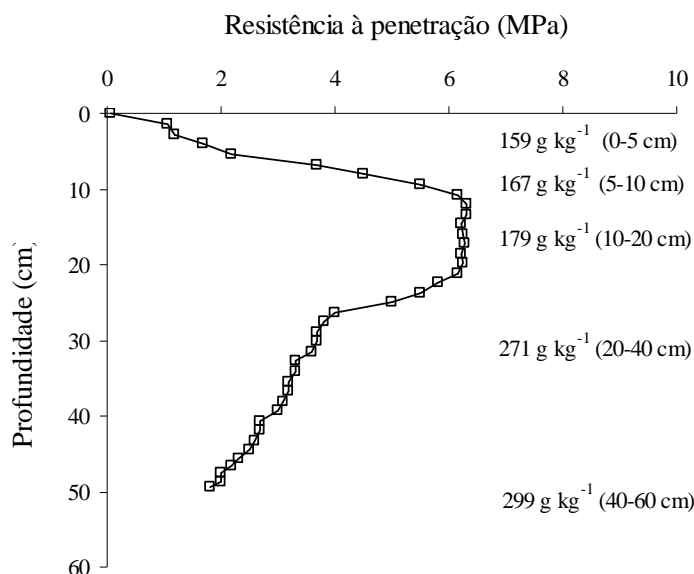


Figura 2. Resistência do solo à penetração (MPa) medida no campo e umidade gravimétrica no momento do teste, nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm, por ocasião da caracterização da área experimental. Março/2006.

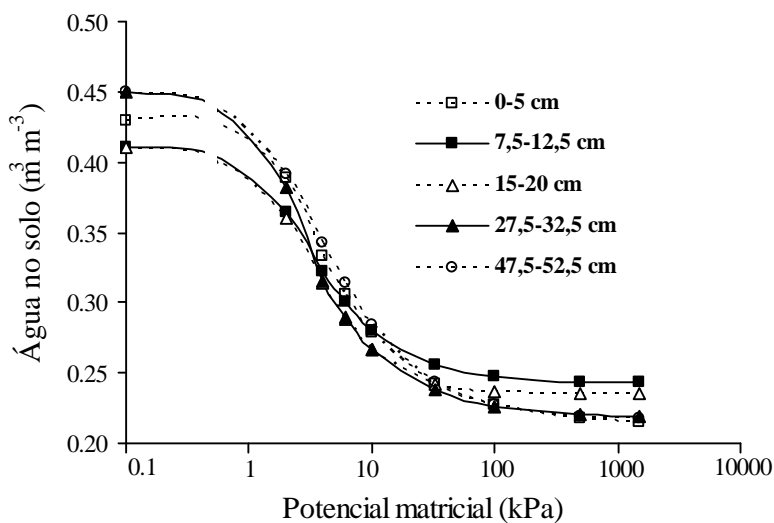


Figura 3. Curvas características da água no solo por ocasião da caracterização da área, nas profundidades de 0-5; 7,5-12,5; 15-20; 27,5-32,5 e 47,5-52,5 cm. Março/2006.

O intervalo hídrico ótimo (IHO) foi delimitado com o método proposto por Silva et al. (1994), em amostras volumétricas provenientes das profundidades de 7,5-12,5 e 27,5-32,5 cm (Figura 4).

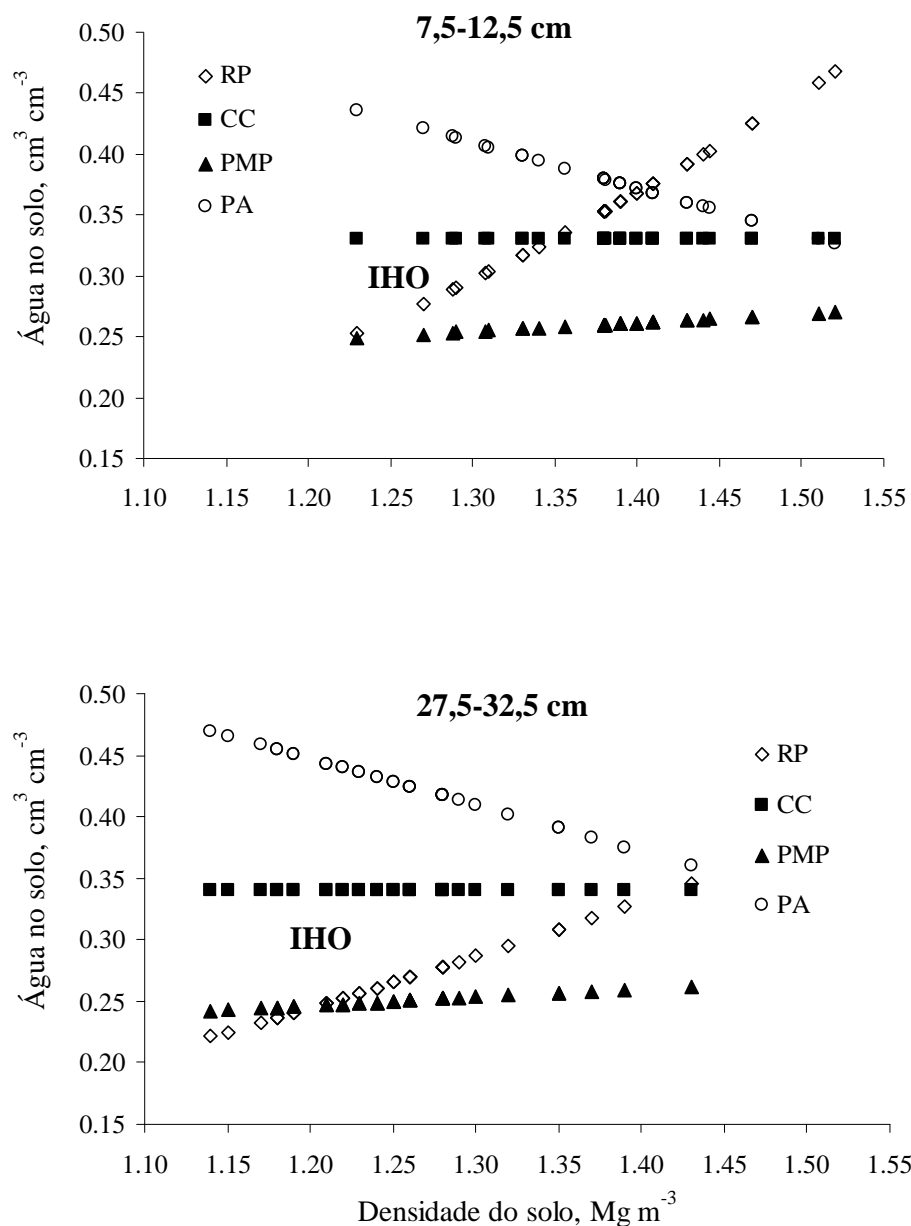


Figura 4. Variação do conteúdo volumétrico de água com a densidade do solo, para limites críticos da porosidade de aeração (PA), capacidade de campo (CC), resistência do solo à penetração (RP) e ponto de murcha permanente (PMP), por ocasião da caracterização da área experimental, nas camadas de 7,5-12,5 cm e 27,5-32,5 cm. IHO: intervalo hídrico ótimo. Março/2006.

3.3. Tratamentos e delineamento do experimento

Os tratamentos foram constituídos pelo sorgo granífero (*Sorghum bicolor*) e braquiária (*Brachiaria ruziziensis*) cultivado no outono-inverno, combinado com espécies de cobertura: milheto (*Pennisetum americanum* (L.) Leek), crotalária juncea (*Crotalaria juncea* L.), cober crop [*Sorghum bicolor* (L.) Moench x *Sorghum sudanense* Piper Stapf] e pousio conduzidos na primavera, antecedendo a cultura de verão soja (*Glycine max* (L.) Merrill). Desse modo, a disposição dos tratamentos está apresentada na tabela 3.

Tabela 3. Espécies utilizadas na composição dos tratamentos conduzidos nos três anos agrícolas do experimento. Botucatu-SP.

Tratamentos	Outono-inverno	Primavera	Verão
1	Braquiaria ruziziensis	Cober crop	Soja
2	Braquiaria ruziziensis	Crotalária juncea	Soja
3	Braquiaria ruziziensis	Milheto	Soja
4	Braquiaria ruziziensis	Pousio	Soja
5	Sorgo granífero	Cober crop	Soja
6	Sorgo granífero	Crotalária juncea	Soja
7	Sorgo granífero	Milheto	Soja
8	Sorgo granífero	Pousio	Soja
9	Sorgo + Braquiaria	Cober crop	Soja
10	Sorgo + Braquiaria	Crotalária juncea	Soja
11	Sorgo + Braquiaria	Milheto	Soja
12	Sorgo + Braquiaria	Pousio	Soja

O delineamento experimental foi o de blocos ao acaso com quatro repetições em esquema de parcelas subdivididas. As parcelas foram cultivadas com braquiária, sorgo e braquiária consorciada com sorgo. Nas subparcelas cultivou-se o milheto, o cober crop, a crotalária juncea e o pousio. A soja foi cultivada como safra de verão em todas as parcelas. A área foi dividida em quatro blocos com 49 m de comprimento por 21 m de largura, sendo cada parcela com 49 m de comprimento por 5 m de largura. As subparcelas continham 10 m de comprimento por 5 metros de largura, sendo a área útil constituída pela área central desprezando-se 1 m de cada extremidade. As subparcelas foram separadas por uma distância

de 3 m no sentido da largura e por 3 m no sentido do comprimento. Houve também um carreador de 4 m entre os blocos para facilitar o acesso com veículos. As dimensões das parcelas e dos carreadores foram estipuladas para possibilitar as operações de pulverização.

3.4. Cultivo de outono-inverno no primeiro ano agrícola (Abril-Setembro/2006)

Em abril de 2006, após colheita do feijão cultivado na área e coleta de amostras deformadas e não deformadas de solo para a caracterização inicial, foram demarcados os blocos e as parcelas experimentais e, no dia 19/04/2006, foram semeadas as culturas de braquiária, sorgo e ambas consorciadas.

Utilizou-se uma semeadora modelo Personale-DRILL-13 da empresa Semeato, equipada com discos de corte de palha com 16" de diâmetro e com discos sulcadores defasados (13" e 14" de diâmetro) para as sementes. As culturas foram semeadas com espaçamento entrelinhas de 17 cm para a braquiária solteira e 51 cm no caso do sorgo solteiro e consorciado com braquiária. As sementes de sorgo foram tratadas com os fungicidas Carboxin – Thiram (200 mL 100 kg⁻¹ de sementes, do produto comercial Vitavax Thiram SC[®]). Na semeadura da braquiária utilizaram-se 2,5 kg ha⁻¹ de sementes puras viáveis. O sorgo foi semeado utilizando-se 10 kg ha⁻¹ de sementes. Não houve aplicação de adubo na condução das culturas na entressafra. No caso das parcelas com sistema consorciado, as sementes da braquiária foram depositadas na caixa de adubo da semeadora, sendo distribuídas na mesma linha de semeadura do sorgo.

No dia 15/06/2006, fez-se uma pulverização com inseticida Metamidofós (0,5 L ha⁻¹ do produto comercial Metamidofós Fersol 600[®]) para o controle de lagarta no sorgo. A aplicação foi feita com pulverizador de barras, munidas com bicos tipo leque, modelo 110-04, marca Tej-Jet, espaçados em 0,5 m, com pressão de trabalho de 50 lbf cm⁻². Todas as aplicações de defensivos foram realizadas com o mesmo pulverizador.

A colheita de grãos de outono-inverno foi efetuada no dia 11/09/2006. Para a determinação da produtividade de grãos, foram colhidas, no caso do sorgo, em cada parcela experimental, 3 linhas de 8 m de comprimento, com a colhedora de parcelas automotriz da marca Wintersteiger SeedMech, modelo Nursery Master Elite. Para determinação da produtividade de grãos o teor de água foi corrigido para 13%. Para a

braquiária foi determinada somente a massa da matéria seca, assim como nas parcelas com cultivo de sorgo e sorgo consorciado com braquiária, que também tiveram a produção de fitomassa determinada no mesmo dia da colheita de grãos. Com o intuito de determinar a matéria seca da parte aérea das plantas cultivadas no outono-inverno, foram coletadas de cada parcela 3 subamostras com quadros de madeira (0,5 x 0,5 m). As amostras de massa vegetal foram desidratadas em estufa de aeração forçada a 60°C por 72 horas.

3.5. Cultivo das espécies de cobertura no primeiro ano agrícola (Setembro-Novembro/2006)

Logo após a colheita de outono-inverno e amostragens de matéria seca, a área experimental foi manejada quimicamente com o herbicida pós-emergente não seletivo Glyphosate (3,0 L ha⁻¹ do produto comercial Gliz[®]) mais 0,3 L ha⁻¹ de 2-4 D (DMA[®]). Doze dias após esse manejo (26/09/2006), foram semeadas nas subparcelas as espécies de cobertura: cober crop, crotalária e milho. Utilizou-se a mesma semeadora descrita anteriormente, com 13 linhas espaçadas em 17 cm. A semeadora foi regulada para uma distribuição de 12 kg ha⁻¹ de sementes de cober crop e milho e 25 kg ha⁻¹ de crotalária juncea. As plantas foram cultivadas sem o fornecimento de fertilizantes e foram manejadas com aplicação de defensivos para o controle de pragas e doenças. No caso das subparcelas mantidas em pousio, aos 30 dias após a semeadura das espécies de cobertura, a área foi roçada para não haver infestação de plantas daninhas no cultivo em sucessão. Esse manejo nas subparcelas mantidas em pousio foi realizado nos três anos do experimento.

Aos 59 DAE (dias após a emergência) das espécies de cobertura, fez-se a dessecação química das plantas com o herbicida pós-emergente não seletivo Glyphosate (2,5 kg ha⁻¹ do produto comercial Roundup WG[®]). Após a dessecação não foi utilizado manejo mecânico da palhada e os restos vegetais tiveram acamamento natural. Esse procedimento foi adotado para minimizar a taxa de decomposição da cobertura sobre o solo. Com o intuito de determinar a matéria seca da parte aérea produzida pelas plantas de cobertura, cultivadas em sucessão às espécies de outono-inverno, foram coletadas de cada subparcela 3 subamostras com quadros de madeira (0,5 x 0,5 m), um dia antes da dessecação. As

subparcelas mantidas em pousio tiveram a produção de fitomassa considerada como nula nos três anos de experimento.

3.6. Cultivo da soja no primeiro ano agrícola (2006/2007)

No dia 02/12/2006, semeou-se a soja (var. Embrapa 48), com linhas espaçadas de 51 cm. Na semeadura da soja foram aplicados 350 kg ha⁻¹ do formulado 0-20-10. A semeadura foi efetuada com distribuição de 18 sementes por metro (Germinação: 90%). As sementes foram tratadas com os fungicidas 30 Carboxin – Thiram (200 mL para cada 100 kg de sementes, do produto comercial Vitavax Thiram SC[®]), com os micronutrientes cobalto e molibdênio (200 mL para cada 100 kg de sementes do produto comercial Profol – Cobol[®]) e com inoculante (produto comercial Biomax[®]). No dia 18/12/2006, com a soja no estágio vegetativo entre V2 e V3, segundo escala proposta por Fehr et al. (1971), fez-se a aplicação do herbicida seletivo Cloransulam-Metil (47,6 g ha⁻¹ do produto comercial Pacto[®]) para o controle de plantas daninhas de folhas largas. Após três dias dessa aplicação, fez-se uma nova pulverização com herbicida para o controle de plantas daninhas de folhas estreitas, utilizando o graminicida Haloxifop-R, Éster Metílico (400 mL ha⁻¹ do produto comercial Verdict R[®]). Ainda com as plantas no estágio vegetativo, no dia 25/01/2006, foi aplicado o inseticida Deltamethrin (0,75 L ha⁻¹ do produto comercial Decis 25CE[®]) para o controle de insetos desfolhadores.

Em estágio R2, segundo escala proposta por Fehr et al. (1971), foram coletados em cada unidade experimental os terceiros trifólios plenamente desenvolvidos a partir do ápice das plantas, para determinação do estado nutricional. Essas amostras foram desidratadas em estufa de aeração forçada a 60°C por 72 horas, para determinação em laboratório dos macronutrientes no tecido vegetal das plantas, seguindo metodologia descrita por Malavolta et al. (1997). Os resultados obtidos (não apresentados) foram considerados adequados para a cultura da soja (MALAVOLTA et al., 1997).

Na fase de enchimento de grãos da soja, no dia 01/03/2007, fez-se outra pulverização com inseticida, utilizando Metamidofós (1,0 L ha⁻¹ do produto comercial Metamidofós Fersol 600[®]) para controle do percevejo-verde (*Nezara viridula*) e da largarta-da

soja (*Anticarsa gemmattalis*). Aplicou-se, também, o fungicida Triazol ($0,5 \text{ L ha}^{-1}$ do produto comercial Folicur[®]) para controlar as doenças de final de ciclo e a ferrugem asiática.

No dia 08/04/2007, efetuou-se a colheita dos grãos com a colhedora de parcelas descrita anteriormente (item 3.4), coletando-se as três linhas centrais, de 8 m de comprimento, de cada subparcela. Para determinação da produtividade de grãos o teor de água foi corrigido para 13%.

3.7. Cultivo de outono-inverno no segundo ano agrícola (Abril-Setembro/2007)

Dois dias antes da semeadura do segundo ano das culturas de outono-inverno foi realizado manejo químico com o herbicida pós-emergente não seletivo Glifosate ($1,0 \text{ kg ha}^{-1}$ do produto comercial Roundup WG[®]) mais $0,2 \text{ L ha}^{-1}$ de 2-4 D (DMA[®]). A semeadura foi realizada no dia 11/04/2007. As sementes de sorgo foram tratadas com os fungicidas Carboxin – Thiram ($200 \text{ mL } 100 \text{ kg}^{-1}$ de sementes, do produto comercial Vitavax Thiram SC[®]). Os espaçamentos e quantidades de sementes utilizadas foram as mesmas do primeiro ano de condução dessas espécies no outono-inverno. Não houve necessidade de nenhum manejo químico durante a condução das culturas para controle de espécies daninhas, pragas e doenças.

A colheita das culturas de outono-inverno foi efetuada no dia 19/09/2007. Para a determinação da produtividade de grãos, foram colhidas, no caso do sorgo, em cada parcela experimental, 3 linhas de 8 m de comprimento. Para determinação da produtividade de grãos o teor de água foi corrigido para 13%. Para a braquiária foi determinada somente a massa da matéria seca, assim como nas parcelas com cultivo de sorgo e sorgo consorciado com braquiária, que também tiveram a produção de fitomassa determinada no mesmo dia da colheita de grãos. Com o intuito de determinar a matéria seca da parte aérea das plantas cultivadas no outono-inverno, foram coletadas de cada parcela 3 subamostras com quadros de madeira ($0,5 \times 0,5 \text{ m}$). As amostras de massa vegetal foram desidratadas em estufa de aeração forçada a 60°C por 72 horas.

3.8. Cultivo das espécies de cobertura no segundo ano agrícola (Outubro-Dezembro/2007)

Sete dias após a colheita de outono-inverno e as amostragens de massa verde, a área experimental foi manejada quimicamente com o herbicida pós-emergente não seletivo Glyphosate (2,0 L ha⁻¹ do produto comercial Gliz[®]) mais 0,5 L ha⁻¹ de 2-4 D (DMA[®]). Em função do atraso das primeiras chuvas de primavera, a semeadura das espécies de cobertura de solo só foi realizada no dia 20/10/2007, com espaçamento de 17 cm entrelinhas. Assim como no primeiro ano, foram utilizados 12, 12 e 25 kg ha⁻¹ de sementes de cober crop, milho e crotalária, respectivamente. Novamente não foi adicionado fertilizante no cultivo dessas espécies. Aos 46 DAE das espécies de cobertura, fez-se a dessecação química das plantas com o herbicida pós-emergente não seletivo Glyphosate (2,5 kg ha⁻¹ do produto comercial Roundup WG[®]).

Objetivando-se determinar a massa da matéria seca da parte aérea produzida pelas plantas de cobertura, foram coletadas de cada subparcela 3 subamostras com quadros de madeira (0,5 x 0,5 m), um dia antes da dessecação.

3.9. Cultivo da soja no segundo ano agrícola (2007/2008)

No dia 15/12/2007, semeou-se a soja (var. Embrapa 48), com linhas espaçadas de 51 cm. Na semeadura da soja foram aplicados 400 kg ha⁻¹ do formulado 4-14-8. A semeadura foi efetuada com distribuição de 18 sementes por metro (Germinação = 90%). As sementes foram tratadas com os fungicidas 30 Carboxin – Thiram (200 mL para cada 100 kg de sementes, do produto comercial Vitavax Thiram SC[®]), com os micronutrientes cobalto e molibdênio (200 mL para cada 100 kg de sementes do produto comercial Profol – Cobol[®]) e com inoculante (produto comercial Biosoja[®]). No dia 07/01/2008, com a soja no estágio vegetativo V2, fez-se a aplicação do herbicida seletivo com nome comercial Cobra[®] (0,65 L ha⁻¹), com princípio ativo Lactofen, para o controle de plantas daninhas de folhas largas. Já no dia 17/01/2008, fez-se uma pulverização com os produtos comerciais Metafós[®] (0,8 l ha⁻¹), do grupo químico Metamidofós, e Poast[®] (1,25 L ha⁻¹), do grupo químico Oxima ciclohexano, para controle de insetos desfolhadores e plantas invasoras de folha estreita, respectivamente.

Em estágio R2, foram coletados em cada unidade experimental os terceiros trifólios plenamente desenvolvidos a partir do ápice das plantas, para determinação dos teores de macronutrientes. Essas amostras foram desidratadas em estufa de aeração forçada a 60°C por 72 horas, para determinação em laboratório seguindo metodologia descrita por Malavolta et al. (1997), onde foram detectados níveis adequados dos macronutrientes para a cultura da soja (MALAVOLTA et al., 1997).

A partir do florescimento da soja, foram realizadas três pulverizações com intervalos de 20 dias, para prevenção da ferrugem asiática da soja, doenças de final de ciclo e controle do percevejo-verde (*Nezara viridula*) e da lagarta da soja (*Anticarsa gemmatalis*). As seguintes combinações comerciais de inseticidas e fungicidas foram utilizadas: 0,4 L ha⁻¹ de Keschet[®] + 0,6 L ha⁻¹ de Ópera[®] (Epoconazol); 0,8 L ha⁻¹ de Metafós[®] (Metamidofós) + 0,3 L ha⁻¹ de Priori Xtra[®] (Estrobilurina) e 0,4 L ha⁻¹ de Keschet[®] + 0,5 L ha⁻¹ de Rovral[®] (Dicarboxamina).

No dia 05/04/2008, efetuou-se a dessecação da soja com o intuito de antecipar a colheita, com o uso de um desfolhante com nome comercial Finale[®] (Glufosinato de amônio), na dose de 2 l ha⁻¹. A colheita dos grãos foi realizada no dia 12/04/2008, coletando-se mecanicamente as três linhas centrais, de 8 m de comprimento, de cada subparcela. Para determinação da produtividade de grãos o teor de água foi corrigido para 13%.

3.10. Cultivo de outono-inverno no terceiro ano agrícola (Abril-Setembro/2008)

A semeadura das culturas de outono-inverno foi realizada no dia 20/04/2007. As sementes de sorgo foram tratadas com os fungicidas Carboxin – Thiram (200 mL 100 kg⁻¹ de sementes, do produto comercial Vitavax Thiram SC[®]). Na semeadura da braquiária utilizaram-se 2,5 kg ha⁻¹ de sementes puras viáveis. O sorgo foi semeado utilizando-se 10 kg ha⁻¹ de sementes. Os espaçamentos utilizados foram os mesmos dos dois anos anteriores de condução dessas espécies na entressafra. No dia 25/05/2008, fez-se uma pulverização com inseticida Metamidofós (0,5 L ha⁻¹ do produto comercial Metamidofós Fersol 600[®]) para o controle de lagarta no sorgo.

A colheita das culturas de outono-inverno foi efetuada no dia 22/09/2007. Para a determinação da produtividade de grãos, foram colhidas, no caso do sorgo,

em cada parcela experimental, 3 linhas de 8 m de comprimento. Para determinação da produtividade de grãos o teor de água foi corrigido para 13%. Para a braquiária foi determinada somente a massa da matéria seca, assim como nas parcelas com cultivo de sorgo e sorgo consorciado com braquiária, que também tiveram a produção de fitomassa determinada no mesmo dia da colheita de grãos. Foram coletadas de cada subparcela 3 subamostras com quadros de madeira (0,5 x 0,5 m). As amostras de massa vegetal foram desidratadas em estufa de aeração forçada a 60°C por 72 horas e pesadas posteriormente.

3.11. Cultivo das espécies de cobertura no terceiro ano agrícola (Setembro-Dezembro/2008)

Cinco dias após a colheita de inverno e as amostragens de biomassa, a área experimental foi manejada quimicamente com o herbicida pós-emergente não seletivo Glyphosate (2,0 L ha⁻¹ do produto comercial Gliz[®]) mais 0,4 L ha⁻¹ de 2-4 D (DMA[®]). Em função da ocorrência das primeiras chuvas de primavera, a semeadura das espécies de cobertura de solo foi realizada no dia 22/09/2007. Assim como nos anos anteriores, foram utilizados 12, 12 e 25 kg ha⁻¹ de sementes de cober crop, milheto e crotalária, respectivamente. Não foi adicionado fertilizante no cultivo dessas espécies.

Objetivando-se determinar a massa da matéria seca da parte aérea produzida pelas plantas de cobertura, foram coletadas de cada subparcela 3 subamostras com quadros de madeira (0,5 x 0,5 m), um dia antes da dessecação. No dia 5/12/2008 foi feito o manejo químico das plantas, utilizando o herbicida pós-emergente não seletivo Glyphosate (2,5 kg ha⁻¹ do produto comercial Roundup WG[®]). Dois dias após o manejo químico a área foi roçada devido à grande quantidade de fitomassa produzida pelas plantas. Esse procedimento foi adotado para que se fosse possível a semeadura da soja em sucessão.

3.12. Cultivo da soja no terceiro ano agrícola (2008/2009)

No dia 11/12/2008, semeou-se a soja (var. Conquista), com linhas espaçadas de 51 cm. Na semeadura da soja foram aplicados 350 kg ha⁻¹ do formulado 0-20-10. A semeadura foi efetuada com distribuição de 17 sementes por metro (Germinação = 90%).

No terceiro ano de cultivo de soja não foi utilizada a variedade Embrapa 48, devido à presença de cancro da haste na área experimental, no cultivo anterior dessa cultura granífera. As sementes foram tratadas com os fungicidas 30 Carboxin – Thiram (200 mL para cada 100 kg de sementes, do produto comercial Vitavax Thiram SC[®]), com os micronutrientes cobalto e molibdênio (200 mL para cada 100 kg de sementes do produto comercial Profol – Cobol[®]) e com inoculante (produto comercial Biosoja[®]). No dia 04/01/2009, com a soja no estágio vegetativo V2, fez-se a aplicação do herbicida seletivo com nome comercial Cobra[®] (na dose 0,5 L ha⁻¹), com princípio ativo Lactofen, para o controle de plantas daninhas de folhas largas. Já no dia 17/01/2008, fez-se uma pulverização com os produtos comerciais Metafós[®] (0,8 L ha⁻¹), do grupo químico Metamidofós, e Poast[®] (1,5 L ha⁻¹), do grupo químico Oxima ciclohexano, para controle de insetos desfolhadores e plantas invasoras de folha estreita, respectivamente. Em estágio R2, foram coletados em cada unidade experimental os terceiros trifólios plenamente desenvolvidos a partir do ápice das plantas, para determinação dos teores de macronutrientes. Essas amostras foram desidratadas em estufa de aeração forçada a 60°C por 72 horas, para determinação em laboratório seguindo metodologia descrita por Malavolta et al. (1997), onde foram constatados teores adequados de macronutrientes (MALAVOLTA et al., 1997).

A partir do estágio R2 da soja, foram realizadas três aplicações espaçadas de 20 dias, para prevenção da ferrugem asiática da soja, doenças de final de ciclo e controle da largarta da soja (*Anticarsa gemmatalis*) e percevejo marrom (*Euschistus heroes*). As seguintes combinações comerciais de inseticidas e fungicidas foram utilizadas: 0,4 L ha⁻¹ de Keschet[®] + 0,3 L ha⁻¹ de Priori Xtra[®] (Estrobilurina); 0,8 L ha⁻¹ Metafós[®] (Metamidofós) + 0,5 L ha⁻¹ de Ópera[®] (Epoconazol) e 0,4 L ha⁻¹ Keschet[®] + 0,5 L ha⁻¹ de Rovral[®] (Dicarboxamina). A colheita dos grãos foi realizada no dia 19/04/2009, coletando-se mecanicamente as três linhas centrais, de 8 m de comprimento, de cada subparcela. Para determinação da produtividade de grãos o teor de água foi corrigido para 13%.

3.13. Coleta, preparo e avaliação das amostras de raízes

Foram coletadas amostras de raízes, tanto das espécies de cobertura cultivadas na primavera como da soja, nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-20, 20-40 e 40-60

cm, nos três anos de condução do experimento. As raízes das plantas de cobertura foram amostradas no dia anterior à dessecação química, ou seja, junto com as coletas de fitomassa da parte aérea. As raízes foram amostradas na linha de semeadura, com quatro subamostras por unidade experimental.

Quanto às raízes de soja, foram coletadas amostras na linha e na entrelinha de semeadura, quando a cultura apresentava-se no estágio R2 de desenvolvimento. As subamostras da linha e da entrelinha de semeadura foram misturadas para representar todo o espaçamento entre fileiras. Dessa forma, foram retiradas 4 subamostras na entrelinha e quatro na linha de semeadura, totalizando 8 subamostras para compor uma amostra composta.

Durante todas as amostragens do experimento, sempre se tomou o devido cuidado para as amostras não serem retiradas em local onde já tinham sido abertas as trincheiras para coleta de amostras indeformadas. Para amostrar raízes das camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm de profundidade, utilizou-se um trado do tipo caneca (haste de aço maciça com 700 mm de comprimento por 25 mm de diâmetro, acoplada a uma caneca coletora cilíndrica, de aço, com 100 mm de comprimento por 80 mm de diâmetro interno). Para amostragem das camadas de 20-40 e de 40-60 cm foi utilizado um tubo de aço com 900 mm de comprimento por 70 mm de diâmetro, e com espessura de parede de 2 mm. Fez-se um corte oblongo nos primeiros 20 cm do tubo de aço, desse modo seria mais fácil a retirada do solo + raízes coletadas.

Após a coleta das amostras, as porções de solo contendo as raízes foram acondicionadas em sacos plásticos, amarrados e congeladas a -2°C , para em seguida serem lavadas e analisadas. Após o descongelamento dos torrões, as amostras foram despejadas em peneiras com malha de 1 mm e lavadas com jatos de água dirigidos para a retirada de todo o solo das amostras.

Utilizou-se uma pinça para separar as raízes de impurezas, como caules e folhas. 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 pequenas peneiras e uso da pinça. Para todas as amostras de raízes coletadas, o mesmo operador ficou responsável pela lavagem das raízes, minimizando os erros. 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 devidamente processadas e armazenadas foram encaminhadas a um “scanner” de leitura ótica (modelo Scanjet 4C/T, marca HP), na resolução de 250 dpi, e tiveram suas imagens digitalizadas e analisadas com o programa “Win Mac Rhizo” versão 3.8-b (Regente Instrument Inc., Quebec, Canadá), para determinar a densidade de comprimento radicular (cm de raiz por cm³ de solo coletado), baseado no método de Tennant (1975). Em seguida as amostras de raízes foram colocadas em sacos de papel e secas em estufa de aeração forçada a 60°C por 48h, para determinação da massa da matéria seca produzida pelo sistema radicular em cada profundidade do perfil do solo.

3.14. Coleta, preparo e análise de amostras de terra para avaliação da fertilidade do solo

Entre três e cinco dias após o manejo químico das espécies de cobertura de primavera, foram coletadas amostras de solo para determinação da fertilidade do solo, nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-20, 20-40 e 40-60, nos anos de 2006, 2007 e 2008. Por ocasião da caracterização da área (Março/2006), as amostras foram retiradas das quatro paredes das trincheiras já abertas para coleta de amostras não deformadas. Já para as coletas após manejo químico das plantas de cobertura, nos anos de 2006, 2007 e 2008, essa amostragem foi realizada de forma aleatória, com quatro subamostras por subparcela.

Para coletar terra das camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm de profundidade, utilizou-se um trado do tipo caneca (haste de aço maciça com 700 mm de comprimento por 25 mm de diâmetro, acoplada a uma caneca coletora cilíndrica, de aço, com 100 mm de comprimento por 40 mm de diâmetro interno). Para amostragem das camadas de 20-40 e de 40-60 cm foi utilizado um tubo de aço com 900 mm de comprimento por 50 mm de diâmetro. Fez-se um corte oblongo nos primeiros 20 cm do tubo de aço, desse modo seria mais fácil a retirada do solo contido dentro do tubo.

Essas amostras foram colocadas em sacos plásticos identificados, abertos e colocadas para secar ao ar. Após secagem, as amostras foram destorroadas e passadas em peneira com malha de 2 mm, para serem submetidas às análises químicas e

determinados os valores de pH e teores de matéria orgânica, H+Al, P, Ca, Mg e K, seguindo procedimentos propostos por Rajj et al. (2001).

3.15. Determinação de frações lábeis de carbono orgânico

As determinações das frações lábeis de carbono orgânico (carbono solúvel em água, carbono extraído em água quente e carbono da biomassa microbiana) foram efetuadas apenas nas amostras de solo coletadas nas camadas de 0-5 e 5-10 cm, após o manejo das plantas de cobertura em dezembro de 2008, no terceiro ano agrícola. Antes de todas as análises para avaliação de carbono orgânico, testes preliminares foram realizados em algumas amostras para verificar a presença da forma inorgânica, através do pré-tratamento com HCl (0,5M), não sendo detectada a presença de carbono inorgânico. Essa avaliação foi conduzida de acordo com metodologia proposta por Harris et al. (2001). Portanto, a leitura de carbono total foi considerada como carbono orgânico. As análises das frações lábeis de carbono orgânico foram conduzidas no Tropical Research and Education Center, University of Florida.

3.15.1. Carbono da biomassa microbiana

A determinação do carbono da biomassa microbiana (CBM) foi realizada de acordo com Vance et al. (1987). Cada amostra foi trabalhada em triplicata para aumentar a precisão dos resultados obtidos no laboratório. Antes de iniciar as análises, as amostras foram incubadas por sete dias com o teor de água a 80% da capacidade de campo.

As amostras foram divididas em 3 subamostras, sendo uma para fumigação seguida de extração, outra para extração sem fumigação e uma sub-amostra para determinação da umidade do solo (em estufa à 105-110°C por 24h). Os valores da biomassa microbiana do solo foram corrigidos, tendo como base o solo seco à 105-110°C.

Acondicionaram-se 20g de terra em frascos com capacidade para 150 ml, que foram transferidos para dessecador, juntamente com um frasco contendo 20 ml de CHCl_3 isento de etanol, permanecendo sob fumigação em sala de incubação mantida no escuro, com temperatura controlada (28°C), por 24h. As amostras sem fumigação sofreram os mesmos procedimentos, mas sem a presença de CHCl_3 . Logo após, o CHCl_3 foi removido por

aspirações sucessivas. Em seguida, acrescentou-se nas amostras 80 ml de K_2SO_4 ($0,5 \text{ mol L}^{-1}$) com o pH ajustado na faixa de 6,5 a 6,8, procedendo-se a extração em agitador com movimento circular horizontal à 220 rpm por 30min. A solução foi filtrada para determinação dos teores de carbono. O carbono contido nos extratos de sulfato de potássio, com e sem fumigação, foram determinados por um analisador Liqui-TOC (Elementar Analysensysteme, Germany).

O cálculo da CBM é dado pela fórmula:

$$\text{CBM (mg kg}^{-1}\text{)} = \text{FC} \cdot \text{kc}^{-1} \text{ (equação 1),}$$

Sendo: CBM = carbono da biomassa microbiana do solo em mg de C por kg de terra; FC = diferença entre a quantidade de C (mg kg^{-1}) recuperada no extrato da amostra fumigada e a recuperada na amostra não fumigada; kc = fator de correção.

O fator de correção (kc) em situações que exijam maior exatidão deve ser calculado para cada tipo de solo. Como para os solos do Brasil o fator ainda não foi determinado, pode-se utilizar o valor 0,33 preconizado por Sparling & West (1988), a fim de expressar a fração do C microbiano recuperado após o processo de fumigação- extração. As análises do carbono da biomassa microbiana foram conduzidas no Tropical Research and Education Center, University of Florida.

3.15.2. Carbono solúvel em água e extraído em água quente

As determinações dessas frações foram seqüenciais de acordo com o trabalho de Ghani et al. (2003) e esquematizada conforme a figura 5. O carbono contido nos extratos após centrifugação e filtragem foi determinado por um analisador Liqui-TOC (Elementar Analysensysteme, Germany). As análises de carbono solúvel em água e extraído em água quente foram conduzidas no Tropical Research and Education Center, University of Florida.

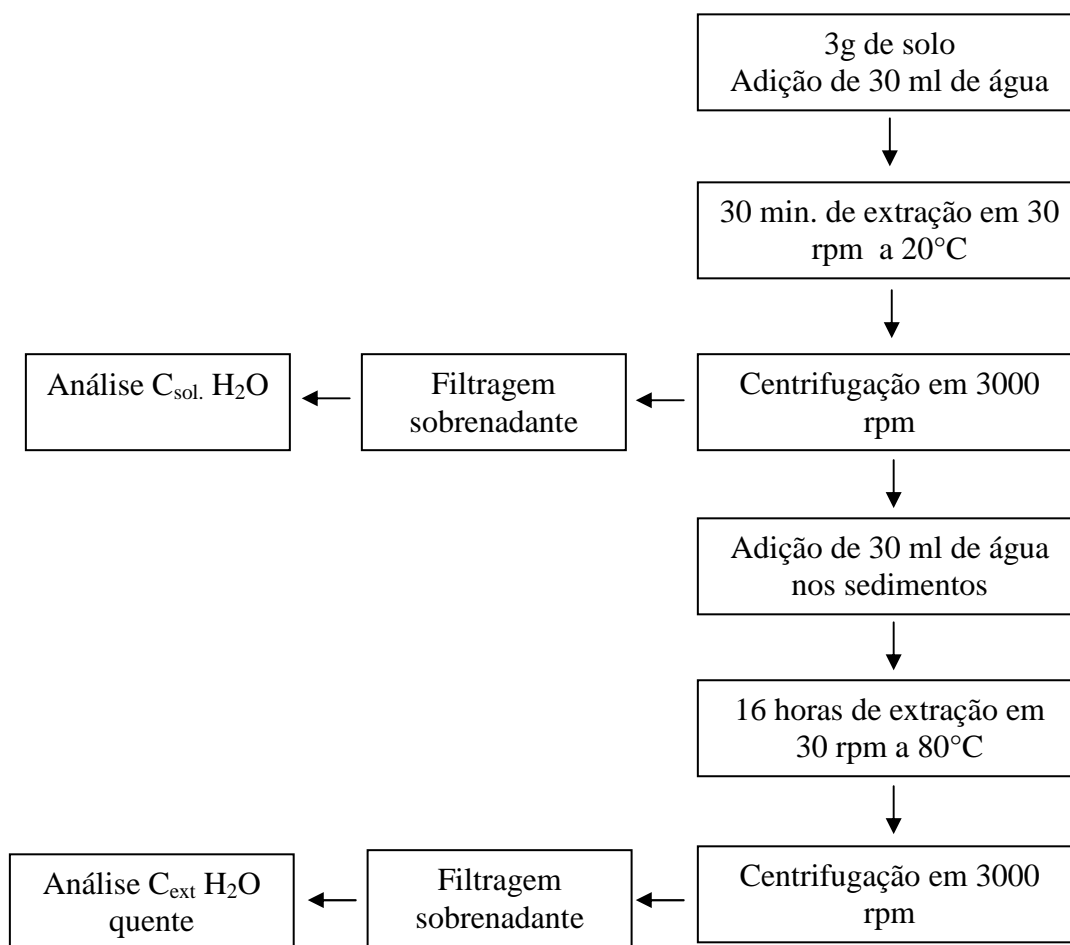


Figura 5. Esquema para determinação dos teores de carbono solúvel em água ($C_{\text{sol. H}_2\text{O}}$) e carbono extraído em água quente ($C_{\text{ext. H}_2\text{O quente}}$).

3.16. Determinação de carbono orgânico particulado e associado aos minerais

As determinações de carbono orgânico particulado, associado aos minerais e total, foram efetuadas apenas nas amostras de solo coletadas nas camadas de 0-5 e 5-10 cm, após o manejo das plantas de cobertura em dezembro de 2008, no terceiro ano agrícola.

O fracionamento físico da matéria orgânica foi realizado segundo Cambardella & Elliot (1992), sendo os procedimentos assim descritos brevemente: foram pesados 20 g de solo, colocados em frascos do tipo “snap-cap” de 180 mL e adicionados 80

mL de solução dispersante de hexametáfosfato de sódio (5 g L^{-1}); as amostras foram então agitadas por 15 h em agitador horizontal; posteriormente, a suspensão foi passada em peneira de 0,053 mm com auxílio de jato de água, sendo o material retido na peneira seco em estufa a 50°C até massa constante; depois de mensurada a massa, o material foi moído em gral de porcelana e, posteriormente, teve o seu teor de C orgânico determinado, sendo este considerado o C orgânico particulado (COP); o C orgânico associado aos minerais (CAM) foi calculado pela diferença entre o carbono orgânico total (COT) e o COP. As amostras tiveram os teores de carbono total determinadas via combustão seca por um analisador C/H/N/S (Elementar Analysensysteme, Germany). As análises de carbono orgânico particulado e associado aos minerais foram conduzidas no Tropical Research and Education Center, University of Florida.

3.17. Coleta, preparo e determinação de carbono orgânico em diferentes frações separadas por classes de tamanho

As determinações de carbono orgânico nas diferentes frações, separadas por tamanho, foram realizadas apenas nas amostras de solo coletadas nas camadas de 0-5 e 5-10 cm, após o manejo das plantas de cobertura em dezembro de 2008, no terceiro ano agrícola.

No perfil exposto pelas trincheiras abertas no terceiro ano, foram retirados, com o auxílio de espátula, torrões de solo com dimensões aproximadas de 5 cm de altura por 10 cm de comprimento e 10 cm de largura, nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos e posteriormente pré-selecionadas em um jogo de peneiras sobrepostas, tendo as peneiras superior e inferior malhas de 8 e 4 mm respectivamente. Para a separação das diferentes frações, utilizou-se a porção que passou pela malha de 8 mm e ficou retida na de 4 mm.

Adiante, também serão detalhados os procedimentos para avaliação da estabilidade de agregados (DMP, DMG, IEA), por ocasião da caracterização da área experimental e após manejo das plantas de cobertura, no primeiro e terceiro anos agrícolas.

A distribuição de tamanho de agregados via úmida foi determinada seguindo os procedimentos propostos por Elliot (1986). As análises foram feitas em duplicata,

onde 40g de solo seco ao ar (passado em peneira de 4 mm) foram colocados na superfície de um conjunto de peneiras (2; 0,25 e 0,05 mm), as quais foram submersas em água deionizada por 5 min para permitir a saturação dos agregados. A seguir, o conjunto de peneiras sofreu 25 oscilações verticais por minuto em água destilada em uma amplitude vertical de 3 cm. O material retido em cada peneira foi vagorosamente lavado e colocado em recipientes de alumínio. A fração menor que 0,05 mm foi coletada após centrifugação por 5 min em 4000 rpm e então transferida para os recipientes de alumínio. Este procedimento resultou nas seguintes frações: >2 mm (macroagregados grandes), 0,25-2 mm (macroagregados pequenos), 0,25-0,05 mm (microagregados) e < 0,05 mm (fração silte + argila). Todas as frações foram secas a 60 °C por 48 horas e pesadas. Cada fração de agregados foi expressa por porcentagem em relação ao peso total do solo.

Os conteúdos de areia nas frações >0,05 mm foram determinados pela dispersão de uma subamostra de cada fração em uma solução de hexametáfosfato de sódio (5 g L⁻¹). Essas subamostras foram agitadas por 18 horas, seguidas por novo peneiramento na mesma malha na qual os agregados foram obtidos (SIX et al., 2002). A areia remanescente foi seca e pesada.

Os teores de carbono orgânico (g kg⁻¹) de agregados livres de areia foram calculados de acordo com a equação:

$$\text{COS livre de areia}_{\text{fração}} = \frac{(\text{COS})_{\text{fração}}}{(1 - (\text{porção areia}))_{\text{fração}}} \quad (\text{equação 2}),$$

Sendo: COS= carbono orgânico do solo

Os conteúdos de carbono orgânico dos agregados, em g kg⁻¹ de solo, foram calculados pela multiplicação dos teores de carbono livres de areia em cada fração pela proporção da massa de solo em de cada fração de agregado. As amostras tiveram os teores de carbono total determinadas via combustão seca por um analisador C/H/N/S (Elementar Analysensysteme, Germany). As análises de carbono orgânico nas diferentes classes separadas por tamanho foram conduzidas no Tropical Research and Education Center, University of Florida.

3.18. Coleta, preparo e análise da estabilidade de agregados do solo

No perfil exposto pelas trincheiras abertas na caracterização da área e após o manejo químico das espécies de primavera no primeiro (2006) e terceiro (2008) anos, foram retirados, com o auxílio de espátula, torrões de solo com dimensões aproximadas de 5 cm de altura por 15 cm de comprimento e 10 cm de largura, nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos e posteriormente pré-selecionadas em um jogo de peneiras sobrepostas, tendo as peneiras superior e inferior malhas 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 pré-selecionados foram avaliados quanto à estabilidade de agregados via úmida, conforme Kemper & Chepil (1965), utilizando o aparelho de oscilação vertical (YODER, 1936). O aparelho movimenta verticalmente 4 conjuntos de peneiras imersos em água apresenta um motor elétrico acoplado a um redutor de velocidade, tendo uma polia com eixo excêntrico, com 30 ciclos por minuto (MULLER, 2002). Ligado ao eixo excêntrico há uma haste vertical com a função de sustentar quatro jogos de peneira e de mergulhar cada jogo em um tanque contendo água. Os jogos de peneiras são ajustados de tal forma que, quando ocorrer a oscilação vertical (3,5 cm), a amostra de solo depositada inicialmente no tamis superior mergulhe totalmente e depois suba até aflorar no nível da água.

Cada conjunto foi composto por 5 peneiras com as seguintes malhas: 2,0, 1,0, 0,5, 0,25 e 0,105 mm. Duas subamostras de 25 gramas foram retiradas de cada amostra, uma para o tamisamento e uma para determinar o teor de água do solo no momento da avaliação. As amostras para tamisamento, após serem pesadas, foram umedecidas levemente por meio de um borrifador de água. Esperou-se 10 minutos para que a umidade dentro dos agregados fosse uniformizada, e em seguida depositou-se as amostras na peneira superior do conjunto (malha de 2 mm). O tamisamento mecânico em água foi realizado por 15 minutos. Após esse tempo de peneiramento, supõe-se que os falsos agregados se desfaçam inteiramente e que os agregados verdadeiros vão passando para as peneiras inferiores onde serão retidos pelas malhas menores que suas dimensões. Finalmente, o material contido em cada peneira foi passado para potes de alumínio, com ajuda de jatos de água, levado para secar

em estufa a 105-110°C por 48h, e pesado em balança com precisão de centésimo de grama. Uma sexta classe de agregados foi considerada como agregados menores que 0,105 mm, pela diferença entre massa de solo inicial e o somatório de solo retido em cada peneira.

Obtido o peso de solo seco de cada classe de agregados, bem como o peso seco total das amostras, por meio da determinação do teor de água do solo, os valores de DMP (diâmetro médio ponderado) e DMG (diâmetro médio geométrico) foram determinados. Calculou-se, também, o índice de estabilidade dos agregados (IEA) (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 0,105 mm, menor será o IEA. Essas propriedades foram calculadas por meio das seguintes equações:

$$\text{DMP} = \sum_{i=1}^n (x_i \cdot w_i) \quad (\text{equação 3}),$$

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

$$\text{DMG} = \frac{\exp \sum_{i=1}^n w_p \cdot \log x_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (\text{equação 4}),$$

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

$$\text{IEA} = ((\text{peso da amostra seca} - w_{p25}) / \text{peso da amostra seca}) \cdot 100 \quad (\text{equação 5}),$$

Sendo: w_{p25} = peso dos agregados menores que 0,25 mm.

3.19. Coleta e preparo das amostras com estrutura preservada

Para determinar a densidade do solo, a macro 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 de inox com 5,0 cm de altura por 4,8 cm de diâmetro interno, nas camadas de 0-5; 7,5-12,5 (cento da camada de 5-15 cm); 15-20

(cento da camada de 10-25 cm); 27,5-32,5 (cento da camada de 20-40 cm) e 47,5-52,5 cm (cento da camada de 40-60 cm), sendo duas amostras por profundidade. Utilizou-se um suporte de aço para os anéis (“castelinho”) e marreta de 1 kg. As amostras foram retiradas antes de iniciar o experimento (Março/2006), para caracterização da área, e após o manejo das espécies de cobertura nos anos de 2006 e 2008. Foram abertas trincheiras com dimensões aproximadas de 40 cm de largura por 60 cm de comprimento e 60 cm de profundidade. Ao fechar as trincheiras, uma estaca foi fixada no centro da trincheira para evitar a realização de novas amostragens no mesmo local. 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 refrigerador a 2°C, até serem processados.

Para determinar o intervalo hídrico ótimo (IHO), foram utilizadas 8 amostras por camada de amostragem, nas profundidades de 7,5-12,5 e de 27,5-32,5 cm. No entanto, o IHO só foi determinado na caracterização da área experimental e nas amostras coletadas após manejo das plantas de cobertura no terceiro ano agrícola. Portanto, na caracterização do experimento e no terceiro ano agrícola foram retiradas 24 amostras por trincheira, e no segundo ano do experimento, em que não houve determinação do IHO, foram retiradas 10 amostras por trincheira, sendo duas para cada profundidade, para determinação da curva de retenção de água.

3.19.1. Determinação da curva de retenção da água no solo, densidade e porosidade do solo

Para determinar a curva característica da água no solo (CRA), a densidade (D_s), a macroporosidade (M_p), a microporosidade (m_p) e a porosidade total do solo (P_t), foram utilizados os métodos descritos em Embrapa (1997). As amostras coletadas com estrutura preservada foram saturadas em bandejas plásticas com água ao redor de 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 elástico de borracha.

Após 72 horas de imersão das amostras, e com todos os poros do solo 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, também representados por 2; 4; 6; 10; 33; 100; 500 e 1500 kPa, respectivamente. Para obtenção dos potenciais matriciais (Ψ_m) de -0,002, -0,004 e -0,006 MPa utilizou-se mesa de tensão adaptada de Kiehl (1979). Os potenciais mátricos de -0,01, -0,033, -0,1, -0,5 e de -1,5 MPa, ou seja, com as maiores tensões aplicadas, foram obtidas pelo posicionamento das amostras sobre placas porosas em câmaras de Richards (KLUTE, 1986). A extração de água das amostras nas câmaras de Richards foi realizada por meio de compressor com capacidade para 20 bars.

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 105-110 °C, por 48 horas, em estufa com aeração forçada para, em seguida, serem determinados os pesos secos das amostras com volume de solo conhecido.

Com a umidade volumétrica obtida em cada potencial matricial, a curva de retenção foi determinada por meio de ajuste dos dados originais, utilizando a função (equação 6) proposta por Genuchten (1980), e o software SWRC, desenvolvido por Dourado Neto et al. (1990). A equação considera o potencial mátrico (Ψ), como variável independente e a umidade volumétrica (v), como variável dependente.

$$v = r + ((s - r) / (1 + (\Psi)^n)^m) \quad (\text{equação 6}),$$

Sendo: v = umidade volumétrica do solo em cada potencial matricial ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); r = umidade volumétrica do solo no potencial matricial de 1,5 MPa ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); s = umidade volumétrica do solo saturado ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); Ψ = potencial matricial (MPa); n, m = coeficientes da equação.

Pela diferença obtida da massa das amostras saturadas com água e secas a 105-110 °C, e com o volume conhecido dos anéis volumétricos, a porosidade total foi determinada (EMBRAPA, 1997) e expressa em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$.

Com o objetivo de determinar a densidade do solo, a massa das amostras secas a 105-110°C foi dividida pelo volume do anel volumétrico (BLAKE & HARTGE, 1986), e os resultados apresentados em Mg m^{-3} .

A microporosidade (mp) e a macroporosidade (Mp), expressas em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, foram determinadas utilizando o teor de água retida nas amostras submetidas à tensão de 0,006 MPa, considerando que essa tensão é suficiente para retirar toda a água retida nos macroporos. A água restante retida a maiores tensões representa o volume de microporos (EMBRAPA, 1997). Portanto, conhecendo a porosidade total e a microporosidade foi possível calcular a macroporosidade (porosidade total = macro + microporos).

3.19.2. Determinação do intervalo hídrico ótimo (IHO)

A determinação do IHO foi conforme descrito em Silva et al. (1994), sendo calculado um valor de IHO para cada amostra coletada, em função da densidade do solo. Considerando valores que não sejam restritivos ao crescimento das plantas, valores críticos de umidade do solo foram associados quanto ao potencial mátrico, resistência do solo à penetração e porosidade de aeração, representados, respectivamente, pelo teor de água na capacidade de campo, ou teor de água do solo no potencial matricial de $-0,01 \text{ MPa}$ (θ_{cc}) (HAISE et al., 1955); pelo teor de água no ponto de murcha permanente, ou teor de água do solo no potencial de $-1,5 \text{ MPa}$ (θ_{PMP}) (RICHARDS, 1965); 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}) seja de 10% (GRABLE & SIEMER, 1968).

No laboratório, as amostras foram devidamente preparadas e saturadas com água em uma bandeja, contendo uma lâmina de água cobrindo $2/3$ da altura das amostras. Cada um dos 8 grupos de amostras (1 grupo: 12 tratamentos x 4 repetições x 2 profundidades) foi submetido a uma das seguintes tensões: 0,002; 0,004; 0,006 MPa em mesa de tensão adaptada; e 0,01; 0,033; 0,1; 0,5 e 1,5 MPa em câmaras de pressão. O tempo para equilíbrio variou desde 48 horas para a menor tensão (0,002 MPa), até trinta dias para a maior tensão aplicada às amostras (1,5 MPa ou 1500 kPa).

Após atingir o equilíbrio as amostras foram submetidas ao teste de resistência à penetração e, em seguida, secas em estufa a $105-110^\circ\text{C}$, por 48 horas, para determinar a umidade gravimétrica (EMBRAPA, 1997). A umidade volumétrica (θ_v) foi obtida multiplicando-se a umidade gravimétrica pela densidade do solo (REICHARDT &

TIMM, 2004). As amostras coletadas nas profundidades de 7,5-12,5 e 27,5-32,5 cm no terceiro ano agrícola, utilizadas para determinação da CRA, após a determinação do teor de água no potencial matricial de -1,5 MPa, foram utilizadas para o teste de resistência à penetração.

Com o gradiente de tensão ao qual as amostras foram submetidas, foi obtido um gradiente de umidade e , conseqüentemente, um gradiente de RP, sendo este o princípio das curvas de retenção de água e de resistência à penetração do solo para determinar o IHO.

Para obter os valores de θ_{CC} e θ_{PMP} foi utilizado o modelo matemático referente à equação 7, proposta por Silva et al. (1994), para ajuste dos dados originais, a qual inclui a variável D_s na função empregada por Ross et al. (1991).

$$\theta = \exp(a + b D_s) \Psi^c \quad (\text{equação 7}),$$

Sendo: θ = umidade volumétrica do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); D_s = densidade do solo (Mg m^{-3}); Ψ = potencial matricial; a , b , c = coeficientes da equação.

Diferentemente da metodologia utilizada para determinar a CRA, anteriormente, em que a mesma amostra foi submetida às diferentes tensões, para obter os limites do IHO, foi necessário ter uma amostra para cada tensão utilizada, para estabelecer um gradiente de umidade entre as amostras, justificando a necessidade da coleta de 8 amostras por camada de amostragem para cálculo do IHO já que ao serem avaliadas quanto à RP no penetrógrafo eletrônico as amostras são desestruturadas, não podendo ser mais utilizadas.

Para o teste de resistência à penetração utilizou-se um penetrômetro de bancada da marca Marconi, e modelo MA 933. Esse penetrógrafo é composto por uma célula de carga com capacidade de 20 kg acoplada na extremidade de uma haste mecânica, movimentado verticalmente por uma rosca-sem-fim. Uma ponteira metálica com diâmetro de 6 mm e com ponta cônica com semi-ângulo de 30° e área da base de 0,1256 cm^2 foi utilizada para penetrar as amostras.

A velocidade de deslocamento vertical da haste foi de 1,0 cm min^{-1} até a profundidade de 5,0 cm. As medidas obtidas a partir da superfície da amostra até 1,0 cm

de profundidade e o último centímetro do anel em profundidade, foram descartadas. Foi obtido um valor de RP a cada segundo de penetração da ponteira, obtendo um total de 180 valores (1-4 cm), dos quais foi retirado um valor médio de RP por amostra. As leituras foram obtidas por meio de um sistema automatizado de aquisição de dados.

O valor crítico de umidade do solo () para que a RP não ultrapasse 2,0 MPa (RP) para cada amostra com densidade conhecida foi obtido pela relação funcional entre a RP, teor volumétrico de água (v) e densidade do solo (D_s), ajustando os dados originais por meio da equação 8, proposta por Busscher (1990).

$$RP = d \cdot v^e \cdot D_s^f \quad (\text{equação 8}),$$

Sendo: RP = resistência à penetração (MPa); v = teor volumétrico de água da amostra ($m^3 m^{-3}$); D_s = densidade do solo ($g cm^{-3}$); d, e, f = coeficientes da equação.

Assim, para obter o valor de RP , substitui-se RP, na equação 8, pelo valor de 2,0 MPa, considerado como limitante para efeito de cálculo do IHO.

Por fim, o valor de PA é obtido por meio da equação 9.

$$PA = SAT - 0,1 \quad (\text{equação 9}),$$

Sendo: PA = teor de água do solo em que a porosidade de aeração é igual a 10% ($0,1 m^3 m^{-3}$); $SAT = (1 - D_s/2,65)$, sendo D_s o valor da densidade do solo ($Mg m^{-3}$) e 2,65 o valor da densidade média das partículas em solos argilosos ($g cm^{-3}$) (IMHOFF et al., 2002).

3.20. Análise estatística

Para os atributos químicos do solo, matéria orgânica, estabilidade de agregados, produtividade de matéria seca e grãos, crescimento radicular, porosidade, densidade do solo e teores de carbono orgânico, os dados originais foram submetidos à análise de variância, e as médias foram comparadas estatisticamente pelo teste t, no nível de 5 % de probabilidade.

O IHO foi calculado utilizando a planilha eletrônica do Excel, proposta por Leão & Silva (2004), representado 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 de v entre v_{CC} e v_{PA} , e o limite inferior o maior valor entre v_{PMP} e v_{RP} . Para o ajuste das equações 7 e 8 e obtenção dos coeficientes a, b, c, d, e, f, foi utilizado o software estatístico SigmaPlot 8.0.

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 determinado utilizando planilha eletrônica do Excel desenvolvida por Leão & Silva (2004).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Produção de matéria seca e grãos no outono-inverno

A produção de matéria seca dos cultivos de outono-inverno foi baixa nas três safras agrícolas (Tabelas 4 e 5), devido às condições climáticas da região, caracterizada por baixa disponibilidade de chuvas (Figura 1). Em todas as situações a produção de massa vegetal no sistema consorciado foi superior, mesmo após o segundo ano do experimento, em que o cultivo estava sob influência das diferentes espécies conduzidas na primavera (Tabela 5). Houve interação significativa apenas para a produção de matéria seca no ano de 2008, no entanto, foi efetuado o desdobramento para a variável matéria seca (Tabela 5) e grãos de sorgo (Tabela 7) nos anos de 2007 e 2008.

A produtividade de grãos do sorgo granífero foi baixa nos três anos de experimento (Tabelas 6 e 7). A produtividade média de grãos de sorgo cultivado na safrinha na região Sudeste é de aproximadamente 2300 kg ha⁻¹ (EMBRAPA, 2010), sendo bem superior aos dados obtidos. Em contrapartida, deve-se ressaltar que não foi aplicado fertilizante nos cultivos de outono-inverno. A produtividade de grãos não foi afetada pelo cultivo simultâneo da braquiária, nos três anos do experimento (Tabelas 6 e 7). As diferentes plantas de cobertura utilizadas nas rotações também não afetaram os valores obtidos para os grãos de sorgo. Esses resultados reforçam a idéia da possibilidade do consórcio de forrageiras com o sorgo, em sistemas integrados entre lavoura e pecuária, sem que ocorram prejuízos na

produtividade da cultura granífera. De acordo com Borghi & Crusciol (2007), a integração agricultura-pecuária tem sido proposta como forma de promover inovações tecnológicas à pecuária e de proporcionar a recuperação de solos degradados. Nesta modalidade de produção, destacam-se o cultivo de milho ou sorgo em consórcio com espécies forrageiras como as braquiárias, uma vez que as plantas forrageiras apresentam sistema radicular profundo e considerável tolerância à deficiência hídrica. Este sistema é realizado com o objetivo de fornecimento de forragem para alimentação animal durante o período da seca e palha para viabilizar a semeadura direta na safra seguinte. Em pesquisas realizadas nos Estados de Goiás, Bahia e Mato Grosso, Kluthcouski et al. (2000) verificaram que o milho, em consórcio com a *Brachiaria brizantha*, sofreu reduções de produtividade inferiores a 3%.

Tabela 4. Produção de matéria seca de braquiária, sorgo e consórcio de sorgo + braquiária, no primeiro ano do experimento. Setembro/2006.

Braquiária (B)	Sorgo (S)	S+B
----- kg ha ⁻¹ -----		
2012c ⁽¹⁾	2975b	5081a

⁽¹⁾ Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste t a 5%.

Tabela 5. Matéria seca de braquiária, sorgo e consórcio de sorgo + braquiária, em função da rotação de culturas, nos anos de 2007 e 2008.

Cultivo de primavera	Cultivo de outono-inverno (2007)		
	Braquiária (B)	Sorgo (S)	S+B
	----- kg ha ⁻¹ -----		
Cober crop	1822Ca ⁽¹⁾	2804Ba	4958Aa
Crotalária	1863Ca	2771Ba	4985Aa
Milheto	1925Ca	2529Ba	5069Aa
Pousio	1850Ca	2723Ba	4964Aa
Cultivo de primavera	Cultivo de outono-inverno (2008)		
	Braquiária	Sorgo	S+B
	----- kg ha ⁻¹ -----		
Cober crop	1790Ca	3135Ba	5480Aa
Crotalária	2158Ba	2501Ba	4928Aa
Milheto	2414Ba	2898Ba	4970Aa
Pousio	2181Ba	2539Ba	5363Aa

⁽¹⁾ Médias seguidas de letras iguais, maiúsculas na linha e minúsculas na coluna, não diferem entre si pelo teste t a 5%.

Tabela 6. Produtividade de grãos de sorgo em sistema solteiro e consorciado com braquiária, no primeiro ano do experimento. Setembro/2006.

Sorgo	Sorgo+Braquiária
----- kg ha ⁻¹ -----	
1361a ⁽¹⁾	1354a

⁽¹⁾ Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste t a 5%.

Tabela 7. Produtividade de grãos de sorgo em sistema solteiro e consorciado com braquiária, em função da rotação de culturas, nos anos de 2007 e 2008.

Cultivo de primavera	Cultivo de outono-inverno (2007)	
	Sorgo	Sorgo+Braquiária
	----- kg ha ⁻¹ -----	
Cober crop	1684Aa ⁽¹⁾	1820Aa
Crotalária	1737Aa	1854Aa
Milheto	1818Aa	1639Aa
Pousio	1945Aa	1785Aa

Cultivo de primavera	Cultivo de outono-inverno (2008)	
	Sorgo	Sorgo+Braquiária
	----- kg ha ⁻¹ -----	
Cober crop	1640Aa	1505Aa
Crotalária	1468Aa	1573Aa
Milheto	1572Aa	1657Aa
Pousio	1589Aa	1552Aa

⁽¹⁾ Médias seguidas de letras iguais, maiúsculas na linha e minúsculas na coluna, não diferem entre si pelo teste t a 5%.

4.2. Matéria seca das plantas de cobertura antecedentes à soja

As produções de matéria seca do cober crop e milheto foram superiores à crotalária, nos três anos agrícolas (Tabela 8). No entanto, no terceiro ano do experimento, o desempenho do milheto foi superior ao cober crop quando cultivado após o sistema consorciado, atingindo valores expressivos, da ordem de 14230 kg ha⁻¹. Como as subparcelas mantidas em pousio foram conduzidas sem a infestação de plantas daninhas, tiveram a produção de fitomassa bem inferiores, consideradas como nula.

Tabela 8. Produção de matéria seca das plantas de cobertura cultivadas em sucessão aos cultivos de outono-inverno, nos três anos agrícolas. Botucatu-SP.

Cultivo de outono-inverno	Cultivo de primavera (2006)			
	Cober crop	Crotalária	Milheto	Pousio
	----- kg ha ⁻¹ -----			
Braquiária (B)	4813Aa	1747Ab	5047Aa	0Ac
Sorgo (S)	5254Aa	1600Ab	4840Aa	0Ac
S+B	5280Aa	1807Ab	4527Aa	0Ac
Cultivo de outono-inverno	Cultivo de primavera (2007)			
	Cober crop	Crotalária	Milheto	Pousio
	----- kg ha ⁻¹ -----			
Braquiária (B)	3458Aa	1600Ab	3385Aa	0Ac
Sorgo (S)	3408Aa	1559Ab	3415Aa	0Ac
S+B	3351Aa	1695Ab	3142Aa	0Ac
Cultivo de outono-inverno	Cultivo de primavera (2008)			
	Cober crop	Crotalária	Milheto	Pousio
	----- kg ha ⁻¹ -----			
Braquiária (B)	11419Aa	4922Ab	11804Aa	0Ac
Sorgo (S)	9108Aa	4397Ab	12250Aa	0Ac
S+B	10525Ab	4569Ac	14230Aa	0Ad

⁽¹⁾ Médias seguidas de letras iguais, maiúsculas na coluna e minúsculas na linha, não diferem entre si pelo teste t a 5%.

A maior produção de matéria seca das espécies C₄ (milheto e cober crop) justifica-se pela maior eficiência fisiológica no aproveitamento da energia luminosa em relação às plantas C₃ (crotalária), e comprometem menos nitrogênio (N) para a formação dos complexos enzimáticos de fixação do CO₂, sobrando mais N para a formação de novos tecidos (MARSCHNER, 1995; TAIZ & ZEIGER, 2002; ROSOLEM et al., 2005). Sendo assim, as gramíneas C₄ apresentam maior capacidade para aproveitar o nitrogênio do solo, pois são mais aptas fisiologicamente para crescer.

As chuvas antecipadas de primavera, bem como a melhor distribuição ao longo do cultivo de primavera no terceiro ano (Figura 1), proporcionaram melhores condições para o desenvolvimento das plantas de cobertura, as quais apresentaram produções satisfatórias de matéria seca para a viabilidade do SSD. Esses resultados assemelham-se aos obtidos por Torres et al. (2008), onde a produção de fitomassa do milheto e sorgo forrageiro foram superiores à crotalária, em um experimento conduzido por 110 dias sob condições de

cerrado. No SSD é indispensável que o esquema de rotação de culturas, além de propiciar grande quantidade de matéria fresca, promova, na superfície do solo, a manutenção permanente de uma quantidade considerável de matéria seca. No entanto, Fiorin (1999) relata que o aporte de matéria seca a ser adicionado na superfície do solo deve estar em torno de 10 e 12 t ha⁻¹.

4.3. Raiz

4.3.1. Raízes das plantas de cobertura cultivadas na primavera

As plantas de cobertura apresentaram diferentes potenciais na exploração do perfil do solo, nos três anos de experimento (Figura 6). Para as duas variáveis analisadas do sistema radicular (densidade de comprimento radicular e matéria seca de raízes), as diferenças entre as espécies foram constatadas até a camada de 40-60 cm de profundidade. Como era esperada, a produção de raízes nas condições de pousio foi menor.

As diferenças são mais evidentes nas camadas superficiais do solo, em que as rotações envolvendo o cultivo de cober crop ou milho apresentaram maior crescimento radicular (Figura 6). Esse comportamento foi consistente nos três anos de experimentação. Isso é desejável em um solo conduzido em SSD onde as camadas compactadas são mais superficiais, devido à ausência de mobilização do solo (PEDROTTI et al., 2001).

As raízes, ao encontrarem 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, de nutrientes e enfraquecendo a sustentação da planta (JORGE, 1985). Em contrapartida, pode haver a proliferação de raízes laterais, as quais são mais finas e capacitadas para o crescimento em pontos de menor fraqueza. Por sua vez, Materechera et al. (1992) mostraram que existe uma influência significativa do aumento da densidade do solo sobre o diâmetro médio radicular, e diferentes capacidades de crescimento entre as espécies, nessas condições adversas.

Rosolem et al. (2002) observaram maior e menor crescimento radicular abaixo da camada compactada para o milho e crotalária, respectivamente. Os

autores relatam que as gramíneas foram mais sensíveis ao aumento da densidade do solo que leguminosas, no entanto, em termos quantitativos, as gramíneas superaram as demais espécies em quantidade de raízes na camada compactada, o que de fato corrobora os resultados obtidos no experimento em questão, em que o crescimento radicular das gramíneas foi maior que o da crotalária (Figura 6). Portanto, a quantidade de raízes produzidas nas camadas compactadas acaba sendo mais importante que a sensibilidade da espécie quanto à resistência do solo, pois a quantidade de bioporos formados no solo com a decomposição das raízes será maior.

Ao longo dos anos, observa-se que o crescimento radicular foi maior no segundo ano do experimento (Figura 6B), mesmo com as plantas sendo cultivadas por um período menor, decorrente do atraso das chuvas de primavera (Figura 1). O maior crescimento radicular pode ser explicado pela menor umidade do solo e a tentativa das plantas em explorarem um maior volume de solo, devido aos menores índices pluviométricos. Nessas condições climáticas adversas, as diferenças no crescimento radicular entre as espécies foram aumentadas (Figura 6B).

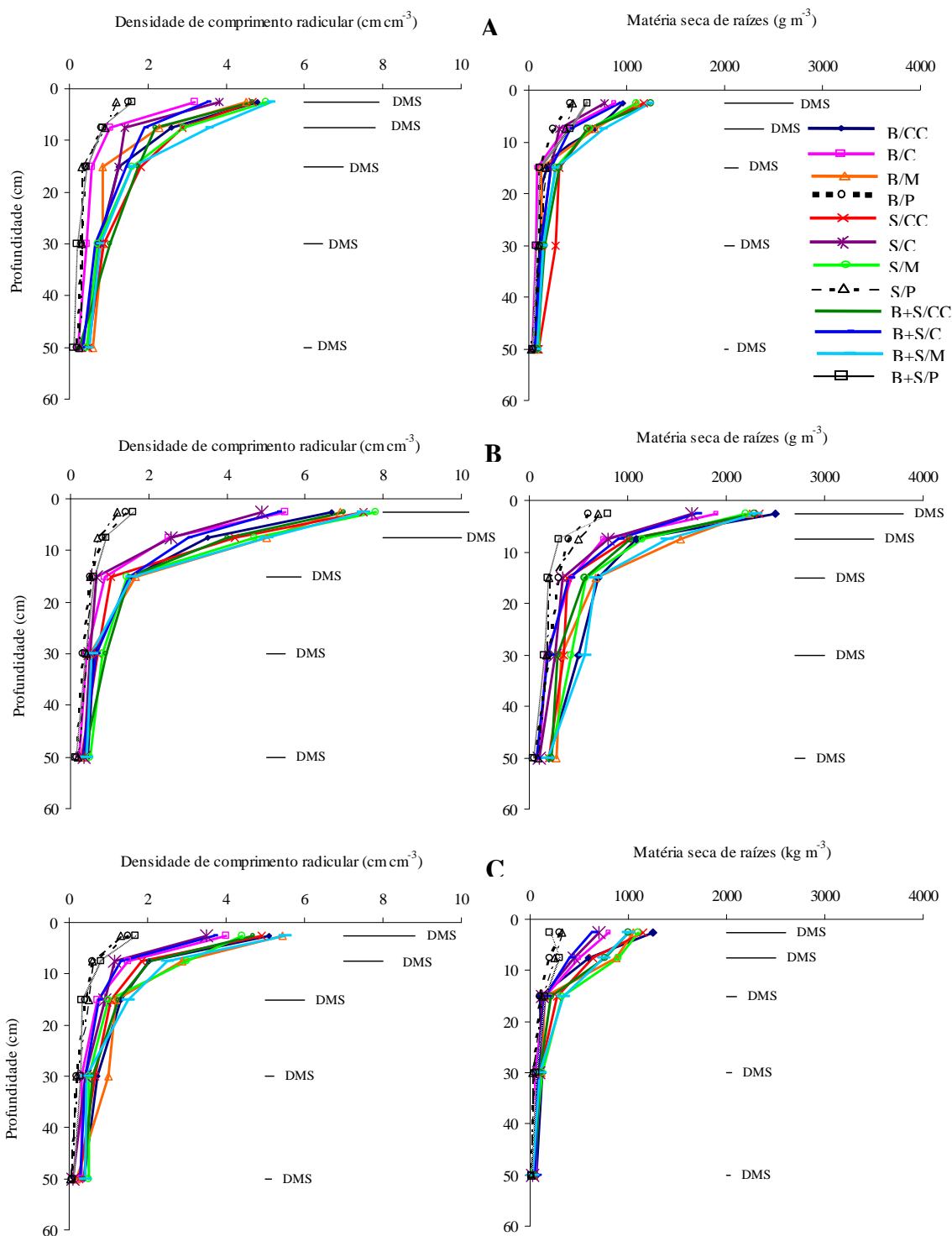


Figura 6. Densidade de comprimento radicular e matéria seca de raízes coletadas por ocasião do manejo das espécies de cobertura conduzidas na primavera, nas diferentes rotações de culturas, nos anos de 2006 (A), 2007 (B) e 2008 (C). B: braquiária; S:sorgo; B+S: braquiária + sorgo; CC: cober crop; C: crotalária; M: milho; P: pousio. DMS: diferença mínima significativa.

4.3.2. Raízes da soja em estágio de florescimento pleno

Conforme apresentado na figura 7, o crescimento radicular da soja foi influenciado pela rotação de culturas, nos três anos agrícolas. No primeiro ano de experimento, a densidade de comprimento radicular foi afetada até a camada de 20-40 cm (Figura 7A), sendo que para o segundo e terceiro ano, os efeitos dos cultivos anteriores no desenvolvimento de raízes de soja limitaram-se até a camada de 10-20 e 5-10 cm de profundidade, respectivamente. Por ocasião da caracterização da área experimental, constatou-se a presença de camadas compactadas e possivelmente restritivas ao crescimento radicular das culturas graníferas (Tabela 1; Figura 2). Segundo Rosolem et al. (1994), há um decréscimo no crescimento radicular da soja a partir da densidade do solo de $1,25 \text{ Mg m}^{-3}$, porém, o crescimento só é completamente inibido quando a densidade do solo chegar em $1,72 \text{ Mg m}^{-3}$. Borges et al. (1988) constataram redução no crescimento radicular de cinco variedades de soja à medida que o nível de compactação foi elevado, e, a partir da densidade de $1,35 \text{ Mg m}^{-3}$, não observaram crescimento das raízes abaixo da camada compactada. Portanto, a influência da rotação de culturas no crescimento radicular da soja é de vital importância para a maior exploração do perfil do solo com restrições à penetração radicular.

De fato, o cultivo anterior das plantas de cobertura de primavera influenciou positivamente o crescimento radicular da lavoura de soja (Tabela 9). A partir do segundo ano agrícola, foram observadas correlações significativas entre o crescimento radicular das plantas de cobertura e o desenvolvimento de raízes de soja conduzida em sucessão. Esses efeitos benéficos foram constatados para a densidade de crescimento radicular e para a matéria seca de raízes, até a camada de 10 cm de profundidade (Tabela 9). Entre os tratamentos, o cultivo de cober crop e milheto apresentaram maiores benefícios no crescimento da soja em sucessão.

Apesar das raízes de soja serem influenciadas pelas plantas de cobertura apenas nas camadas mais superficiais do solo, nos dez centímetros iniciais do perfil do solo localiza-se a área de maior atuação do sistema radicular das plantas cultivadas, além de ser a camada que mais frequentemente limita o desenvolvimento de raízes em solos manejados no SSD. O sistema radicular das plantas de cobertura, ao morrerem e iniciarem o processo de decomposição, deixam canais no solo, favorecendo o crescimento em

profundidade das raízes da cultura seguinte, promovendo a exploração mais uniforme do perfil do solo (TORRES & SARAIVA, 1999).

Os canais verticais contínuos no solo servem como orientação, ligando a superfície do solo às camadas mais profundas, proporcionando maior colonização das raízes em profundidade e facilitando o fluxo de água e gases (EHLERS et al., 1983). São vários os estudos na tentativa do desenvolvimento de penetrômetros que caracterizem adequadamente a impedância física do solo (BEUTLER et al., 2007), no entanto, esses equipamentos utilizados na medição da resistência do solo à penetração não são aptos a avaliarem os efeitos benéficos proporcionados pelos bioporos, pois rompem as camadas compactadas de forma contínua e sem explorarem os pontos de menor resistência do solo, assim como ocorre para o crescimento das raízes de plantas (BIANCHINI et al., 2002).

Os bioporos resultantes do crescimento radicular de culturas antecessoras apresentam um microclima mais favorável ao crescimento das raízes. Na medida em que há incremento de matéria orgânica no solo proveniente do sistema radicular das plantas cultivadas, através de exsudados radiculares, atividade microbiana ou mesmo pelo processo de decomposição das raízes mortas, essa matéria orgânica funciona como fonte de nutrientes, e também pode atuar na complexação de metais como o Al e Mn, reduzindo o efeito tóxico para as plantas e favorecendo o crescimento das raízes sucessoras (BAYER & MIELNICZUK, 2008).

Adicionalmente à complexação de metais pesados por substâncias húmicas, a diminuição da toxidez de elementos tóxicos é influenciada pela presença de ácidos orgânicos de baixo peso molecular na solução do solo. A concentração desses ácidos na solução do solo varia de 0,01 a 5 mmol L⁻¹, valor bastante elevado quando comparado à concentração de metais traços. A meia vida desses ácidos no solo é muito curta, talvez horas, entretanto eles são continuamente produzidos e liberados pelos microrganismos e raízes, principalmente no sistema plantio direto, onde o aporte de resíduos vegetais é maior. Algumas substâncias húmicas, principalmente os ácidos húmicos, através de ligações de esfera interna, indisponibilizam o Al tóxico por longos períodos, sendo esse um fator limitante ao crescimento radicular das plantas cultivadas (BAYER & MIELNICZUK, 2008). Portanto, o crescimento radicular das plantas de cobertura pode favorecer o desenvolvimento das raízes da soja em sucessão através do seu efeito sobre os atributos físicos, químicos e biológicos do solo.

Silva & Rosolem (2002) observaram que o aumento da compactação do solo não impediu o crescimento radicular de aveia preta, guandu, milheto, mucuna preta, soja, sorgo e tremoço. No entanto, a soja cultivada em seguida, não apresentou crescimento radicular abaixo da camada compactada na densidade mais alta, mas, com relação aos vasos deixados em pousio, o cultivo anterior de adubos verdes aumentou a produção de matéria seca e o acúmulo de nutrientes na parte aérea das plantas de soja. Esses resultados assemelham-se em parte aos resultados obtidos no experimento em questão, em que o desenvolvimento radicular da soja foi influenciado pelas raízes das plantas de cobertura (Figura 7; Tabela 9); em contrapartida, os teores e acúmulos de nutrientes na parte aérea das plantas de soja não foram alterados, nos três anos de experimento (dados não apresentados).

Em função da maior exploração do perfil do solo pelas raízes de soja, afetadas pelo crescimento radicular das plantas de cobertura, esperava-se maior absorção de nutrientes pelas plantas, o que não ocorreu (dados não mostrados). Para Johnson et al. (1990) e Foloni et al. (2006), para entender melhor o efeito da compactação sobre o crescimento radicular e a produtividade da soja, deve-se considerar que, mesmo ocorrendo uma camada compactada que impeça o desenvolvimento radicular ao longo do perfil do solo, a produtividade poderá ser razoável, desde que não haja limitações de água e de nutrientes na zona de distribuição das raízes; e, o efeito de um mesmo valor de densidade do solo sobre o desenvolvimento da soja, varia entre os anos, devido ao caráter aleatório do clima, principalmente das chuvas.

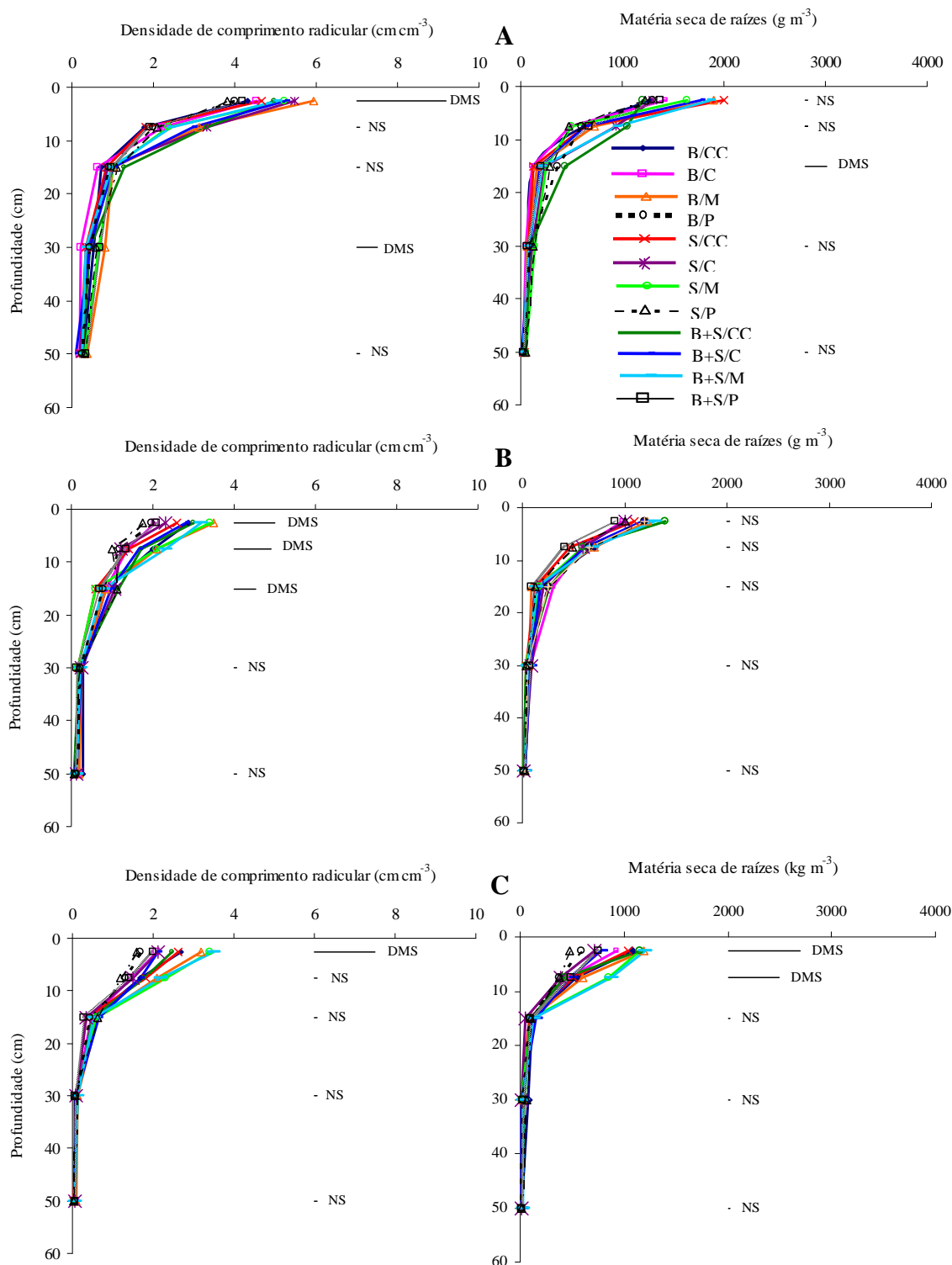


Figura 7. Densidade de comprimento radicular e matéria seca de raízes de soja em estágio R2 de desenvolvimento, nas diferentes rotações de culturas, nos anos de 2007 (A), 2008 (B) e 2009 (C). B: braquiária; S:sorgo; B+S: braquiária + sorgo; CC: cober crop; C: crotalária; M: milho; P: pousio. DMS: diferença mínima significativa. NS: não significativo.

Tabela 9. Correlação entre densidade de comprimento radicular (DCR) e matéria seca de raízes (MSR) coletadas por ocasião do manejo das espécies de cobertura com a densidade de comprimento radicular e matéria seca de raízes de soja amostradas em sucessão, respectivamente.

Profundidade (cm)	2006-2007		2007-2008		2008-2009	
	DCR	MSR	DCR	MSR	DCR	MSR
0-5	ns	ns	0,68**	ns	0,89**	0,51**
5-10	ns	ns	0,79**	0,58*	0,65*	ns
10-20	ns	ns	ns	ns	ns	ns
20-40	ns	ns	ns	ns	ns	ns
40-60	ns	ns	ns	ns	ns	ns

* e **: significativo a 5 e 1 % de probabilidade pelo teste t, respectivamente. ns: não significativo.

4.4. Estabilidade de agregados

Mesmo no primeiro ano de avaliação da estabilidade de agregados, o cultivo das plantas de cobertura antecedente à coleta das amostras melhorou alguns parâmetros avaliados, como o diâmetro médio ponderado (DMP) e a proporção de agregados maiores que 2 mm. Em contrapartida, a melhor estruturação do solo avaliada através da agregação do solo restringiu-se à profundidade 0-5 cm (Tabela 10). Para o DMP, as três espécies utilizadas como plantas de cobertura foram superiores ao pousio. Quando analisada a proporção de agregados maiores que 2 mm, o cultivo de milho proporcionou efeitos similares ao cober crop; no entanto, proporcionou agregados significativamente maiores em comparação à leguminosa. Segundo Hakanson et al. (1988), as plantas de cobertura com elevada capacidade de fixação de carbono e que também possuam sistema radicular volumoso e agressivo, podem trazer benefícios na estruturação do solo mesmo em curtos intervalos de cultivo.

Por ocasião da análise da estabilidade de agregados após o terceiro ano de rotações de culturas, observaram-se efeitos nos 10 centímetros iniciais do perfil do solo (Tabela 11). As espécies conduzidas no outono-inverno diferiram consideravelmente. Para a camada de 0-5 cm, o sistema consorciado entre braquiária e sorgo proporcionou maior DMP, e na avaliação do DMG, o sistema integrado foi superior à cultura granífera e similar à forrageira solteira. Na segunda camada de solo avaliada (5-10 cm), os agregados maiores que

2 mm sofreram influência parecida em função da presença da forrageira, independente da modalidade de cultivo.

As gramíneas de cobertura de primavera (cober crop e milho) proporcionaram maior efeito agregante nos 10 centímetros de solo avaliados, com o cultivo por três anos consecutivos dessas espécies (Tabela 11). Somente na avaliação dos agregados maiores que 2 mm na camada de 0-5 cm, o cultivo da crotalaria foi superior à ausência de plantas de cobertura. Esses resultados demonstram que, além da ausência de revolvimento do solo preconizada pelo SSD, a manutenção de um considerável aporte de resíduos vegetais na superfície do solo, somada ao contínuo crescimento radicular pelo cultivo de plantas, é fundamental na melhoria e manutenção de uma boa agregação do solo.

Segundo Oliveira et al. (2004) há correlação altamente significativa entre o aumento no teor de matéria orgânica e o aumento da estabilidade de agregados até 0,10 m de profundidade. Para Huang et al. (2010), a aplicação de resíduos orgânicos via adubos verdes, na presença ou ausência de fertilizantes inorgânicos, influenciou na maior agregação do solo, com a formação de grande quantidade de macroagregados.

A quantidade de restos vegetais mantidos na superfície do solo tem grande influência na maior agregação do solo, pois mesmo não havendo revolvimento da camada arável no SSD, a mobilização dos centímetros iniciais no processo de semeadura, é um fator que atua na incorporação de quantidade considerável de resíduos vegetais, influenciando na maior agregação dos constituintes sólidos do solo nas camadas superficiais. Portanto, a maior produção de fitomassa das gramíneas de cobertura nos três anos de experimento, principalmente no último ano agrícola (tabela 8), influenciaram fortemente a estrutura do solo, avaliada pela estabilidade de agregados.

A agregação do solo também pode ter seu efeito acelerado pela exploração radicular no perfil do solo, que, no processo de crescimento, promove a aproximação das partículas à medida que as raízes exercem pressão sobre as partículas minerais no seu avanço pelo espaço poroso. A absorção de água pelas raízes também causa secamento na região adjacente às raízes, promovendo aumento na força de coesão entre as partículas (ZONTA et al., 2006). Essas informações estão de acordo com os resultados obtidos nas avaliações do crescimento radicular das plantas de cobertura, onde as subparcelas com maior crescimento radicular na camada de 0-10 cm, em comprimento e massa (Figura 6),

apresentaram efeitos positivos na estabilidade de agregados (Tabela 11). No trabalho de Calonego & Rosolem (2008), os autores atribuem a maior agregação do solo pelas características do sistema radicular do triticale cultivado na entressafra, quando comparado ao girassol.

Segundo Mielniczuk (1999), a maior densidade de raízes das monocotiledôneas em relação às dicotiledôneas e a distribuição mais uniforme do sistema radicular favorecem a distribuição dos exsudados no solo, os quais apresentam efeito aglutinador dos constituintes sólidos do solo. Além do mais, a maior quantidade de raízes no solo serve como maior disponibilidade de substrato para a atividade de microrganismos, os quais têm papel fundamental na liberação de polissacarídeos de origem microbiana, com maior efeito agregante no solo (BAYER & MIELNICZUK, 2008). De acordo com as características do crescimento das raízes da braquiária e das coberturas de primavera cober crop e milheto, essas espécies, de forma geral, proporcionaram melhorias em alguns parâmetros de agregação do solo, como DMP, DMG e agregados maiores que 2 mm, até a profundidade de 10 cm, sendo que os cultivos de primavera geraram benefícios mais rápidos, ou seja, no primeiro ano agrícola (Tabelas 10 e 11). Com a maior agregação, além da maior proteção do solo contra agentes desagregantes (SEVERIANO et al., 2008), outros parâmetros do solo relacionados diretamente ao crescimento das plantas podem ser afetados positivamente, como a resistência do solo à penetração e o movimento de água e gases no perfil do solo.

Tabela 10. Análise de variância e valores médios de diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG), agregados maiores que 2 mm e índice de estabilidade de agregados (IEA), em função dos cultivos de outono-inverno e primavera, nas amostras coletadas após manejo das plantas de cobertura de primavera, no primeiro ano do experimento. Dezembro/2006.

Tratamentos	DMP	DMG	Agregados > 2mm	IEA
	----- mm -----	----- mm -----	----- % -----	
0-5 cm				
Outono-Inverno				
Braquiária (B)	2,90	2,36	72,56	89,72
Sorgo (S)	2,83	2,41	70,56	89,15
S+B	2,88	2,53	71,25	89,85
Primavera				
Cober crop	2,96a ⁽¹⁾	2,46	72,08ab	90,54
Crotalária	2,89a	2,35	71,00b	90,10
Milheto	2,97a	2,49	75,83a	91,50
Pousio	2,68b	2,31	66,17c	86,17
Probab. F ⁽¹⁾				
Outono-Inverno (I)	0,6430	0,6841	0,7533	0,8466
Primavera (P)	0,0004	0,1680	0,0015	0,0861
IxP	0,1258	0,0982	0,5938	0,1080
CV				
Outono-Inverno	7,85	11,47	4,40	11,11
Primavera	9,12	10,96	7,55	5,85
5-10 cm				
Outono-Inverno				
Braquiária (B)	2,68	2,19	65,00	90,32
Sorgo (S)	2,57	2,09	63,18	85,75
S+B	2,64	2,21	68,29	89,12
Primavera				
Cober crop	2,79	2,24	66,67	88,88
Crotalária	2,69	2,23	67,50	91,18
Milheto	2,77	2,35	62,75	91,19
Pousio	2,63	2,09	63,92	84,00
Probab. F				
Outono-Inverno (I)	0,1815	0,3167	0,7824	0,2234
Primavera (P)	0,0921	0,1862	0,2475	0,1080
IxP	0,3652	0,7739	0,8402	0,1635
CV				
Outono-Inverno	5,89	18,41	13,00	9,25
Primavera	6,45	11,64	7,66	8,15

⁽¹⁾ Médias seguidas de letras diferentes na coluna diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade.

Tabela 11. Análise de variância e valores médios de diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG), agregados maiores que 2 mm e índice de estabilidade de agregados (IEA), em função dos cultivos de outono-inverno e primavera, nas amostras coletadas após manejo das plantas de cobertura de primavera, no terceiro ano do experimento. Dezembro/2008.

Tratamentos	DMP	DMG	Agregados > 2mm	IEA
	----- mm -----	----- mm -----	----- % -----	-----
0-5 cm				
Outono-Inverno				
Braquiária (B)	3,10b ⁽¹⁾	2,70ab	72,70	90,70
Sorgo (S)	3,18b	2,58b	71,63	89,99
S+B	3,43a	2,79a	72,06	90,15
Primavera				
Cober crop	3,32a	2,73	77,18a	91,45
Crotalária	3,15b	2,68	74,75a	90,18
Milheto	3,39a	2,69	74,67a	90,98
Pousio	3,04b	2,59	65,91b	88,50
Probab. F⁽¹⁾				
Outono-Inverno (I)	0,0031	0,0419	0,7607	0,6291
Primavera (P)	0,0002	0,0621	0,0003	0,0730
IxP	0,1119	0,6006	0,8477	0,9386
CV				
Outono-Inverno	7,20	5,73	9,88	8,12
Primavera	8,39	7,82	5,63	9,96
5-10 cm				
Outono-Inverno				
Braquiária (B)	2,94	2,63	73,56a	90,26
Sorgo (S)	2,89	2,55	67,25b	88,29
S+B	3,01	2,61	74,88a	91,85
Primavera				
Cober crop	3,08a	2,62	78,33a	89,50
Crotalária	2,84b	2,60	68,00b	90,29
Milheto	2,98a	2,61	77,67a	90,42
Pousio	2,80b	2,49	63,17b	89,50
Probab. F				
Outono-Inverno (I)	0,5386	0,5261	0,0423	0,3760
Primavera (P)	0,0082	0,9315	0,0318	0,3808
IxP	0,7981	0,9824	0,0925	0,6603
CV				
Outono-Inverno	7,79	8,65	8,79	8,88
Primavera	5,99	9,23	6,25	8,93

⁽¹⁾ Médias seguidas de letras diferentes na coluna diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade.

4.5. Matéria orgânica do solo

Apesar das diferenças encontradas entre os tratamentos nas produções de fitomassa seca da parte aérea e do crescimento radicular das plantas, a matéria orgânica do solo não foi afetada pelas plantas cultivadas no outono-inverno e/ou na primavera. Esses resultados confirmaram-se em todos os anos agrícolas, até a profundidade de 60 cm do perfil do solo (Tabela 12). Em contrapartida, no terceiro ano, houve tendência de acréscimo da matéria orgânica pelas plantas de cobertura de primavera nas camadas de 0-5 e 5-10 cm, com probabilidade do teste F ao redor de 6 e 8%, respectivamente (Tabela 12).

A avaliação isolada da matéria orgânica do solo muitas vezes não é um bom indicador do efeito do manejo nas propriedades do solo pois, em muitos casos, alterações nos estoques de matéria orgânica do solo levam muitos anos para serem detectados, como no caso de Blanco-Canqui et al. (2010), em que as rotações de culturas e os sistemas de preparo do solo, após 33 anos de experimento, tiveram grandes efeitos nos atributos físico-hídricos do solo, com atuação menos considerável nos valores da matéria orgânica do solo.

Por ocasião da caracterização da área experimental, os teores de matéria orgânica nas camadas de 0-5 e 5-10 cm de profundidade foram de 30 e 25 g dm⁻³ (Tabela 2), respectivamente, e, apesar de não serem feitas comparações dos tratamentos ao longo dos anos com a análise inicial do solo, observou-se que a matéria orgânica do solo foi incrementada até o final do experimento, pois os teores ultrapassaram 32 g dm⁻³ na camada mais superficial do solo para todos os tratamentos (Tabela 12).

No terceiro ano de experimento, o cultivo de cober crop, milho e crotalária na primavera, acrescentou ao solo na camada de 0-5 cm, cerca de 0,59; 0,40 e 0,41 Mg ha⁻¹ de carbono orgânico, respectivamente, em comparação ao solo mantido em pousio (Tabela 12). Essas quantidades são consideráveis, podendo influenciar nos atributos físicos do solo, o que de fato ocorreu, conforme análise da estabilidade de agregados no terceiro ano agrícola (Tabela 11). A probabilidade do teste F para o cultivo de primavera foi menor que 9% nas camadas de 0-5 e 5-10 cm (Tabela 12).

Os sistemas de manejo e rotações de culturas que proporcionam maior produção de fitomassa e aumento nos estoques de M.O no solo, apresentam maior capacidade de suporte de carga, sem alterar o IHO, por exemplo, além de promoverem expressivas

melhorias na qualidade do solo. Segundo Silva et al. (2002b), a desagregação do solo diminui substancialmente a capacidade do solo de receber carga, sendo essa capacidade aumentada em até 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 e maior cobertura do solo pelos resíduos vegetais.

O incremento dos estoques de carbono no solo ao longo dos anos resulta em considerável retirada de CO₂ da atmosfera, contribuindo para a mitigação do efeito estufa (ABDALLA et al, 2010). O SSD é uma prática agrícola conservacionista 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 M.O., devido à maior proteção do carbono já incorporado nas camadas superficiais do solo, diminuindo as perdas de C via oxidação da matéria orgânica (BAYER & MIELNICZUK, 2008).

Tabela 12. Teores de matéria orgânica (g dm^{-3}) no perfil do solo em função dos cultivos de outono-inverno e primavera, após o manejo das plantas de cobertura de primavera, nos anos de 2006, 2007 e 2008. Botucatu, SP.

Tratamento	0-5 cm	5-10 cm	10-20 cm	20-40 cm	40-60 cm
	2006				
Outono-Inverno					
Braquiária (B)	29,46	26,23	24,83	23,70	22,25
Sorgo (S)	30,39	26,80	24,85	23,73	22,48
S+B	29,43	26,55	25,30	23,78	23,02
Primavera					
Cober crop	30,42	26,67	25,33	23,57	23,00
Crotalária	28,76	26,65	25,33	23,67	22,34
Milheto	30,70	27,67	24,67	24,00	22,99
Pousio	28,65	26,40	24,63	23,71	21,97
Probab. F					
Outono-Inverno (I)	0,8412	0,9124	0,2934	0,7415	0,9458
Primavera (P)	0,3841	0,7915	0,4125	0,2745	0,9417
IxP	0,9155	0,4815	0,8814	0,4897	0,7825
CV					
Outono-Inverno	14,12	11,28	25,88	14,21	22,45
Primavera	12,84	13,15	21,09	11,87	19,09
2007					
Outono-Inverno					
Braquiária (B)	30,00	26,10	23,63	22,95	21,85
Sorgo (S)	30,30	26,25	23,95	22,50	21,50
S+B	30,50	26,23	23,88	22,00	21,25
Primavera					
Cober crop	32,00	26,67	24,33	22,93	21,00
Crotalária	29,67	26,00	23,41	22,33	22,00
Milheto	31,00	26,67	24,00	23,00	22,00
Pousio	28,40	25,43	23,62	22,70	21,14
Probab. F					
Outono-Inverno (I)	0,4568	0,3945	0,8412	0,9425	0,4896
Primavera (P)	0,1254	0,2574	0,4567	0,9714	0,7548
IxP	0,7458	0,6987	0,1939	0,7694	0,6987
CV					
Outono-Inverno	18,25	17,25	23,21	19,24	11,07
Primavera	11,05	14,25	24,29	15,07	16,16

continua...

continuação da tabela 12...

Tratamento	0-5 cm	5-10 cm	10-20 cm	20-40 cm	40-60 cm
	2008				
Outono-Inverno					
Braquiária (B)	33,25	28,88	24,90	22,75	20,25
Sorgo (S)	33,65	28,41	25,11	22,96	20,98
S+B	33,66	28,12	24,50	21,95	19,41
Primavera					
Cober crop	35,66	29,25	25,33	22,08	20,13
Crotalaria	34,62	28,93	24,33	22,58	19,75
Milheto	34,33	29,33	24,75	22,91	20,42
Pousio	32,27	27,40	24,90	22,67	20,50
Probab. F					
Outono-Inverno (I)	0,9451	0,7419	0,9147	0,2874	0,8709
Primavera (P)	0,0614	0,0871	0,8746	0,3547	0,8317
IxP	0,4743	0,6841	0,6123	0,1997	0,2848
CV					
Outono-Inverno	12,25	20,09	9,84	11,13	9,99
Primavera	18,06	17,14	14,62	14,29	11,28

4.6. Frações lábeis da matéria orgânica do solo

Os resultados referentes às frações lábeis da matéria orgânica do solo, por ocasião das amostras coletadas no terceiro ano agrícola, estão apresentados na tabela 13. As diferentes espécies vegetais utilizadas nas rotações de culturas ocasionaram efeitos nos diferentes compartimentos da matéria orgânica até a camada de 10 cm.

Na camada mais superficial do solo, o carbono solúvel em água e o carbono da biomassa microbiana foram superiores no sistema de cultivo simultâneo no outono-inverno, sendo que na camada de solo seguinte (5-10 cm), a presença da braquiária, independente da modalidade de cultivo, proporcionou maiores teores de carbono microbiano em relação ao cultivo do sorgo granífero solteiro.

Com relação às plantas de cobertura antecedentes à soja, independente da espécie cultivada, os teores de carbono solúvel em água e o carbono microbiano foram incrementados em relação ao pousio na camada de 0-5 cm. No entanto, entre as espécies cultivadas, na camada de 5-10, o cober crop apresentou maior quantidade de carbono proveniente da biomassa microbiana do que a leguminosa (Tabela 13). Apesar de proporcionar

restos vegetais mais propensos à decomposição microbiana e maior liberação de compostos solúveis, a produção de fitomassa da crotalária foi inferior ao longo dos anos (Tabela 8), sendo possivelmente o fator quantidade de resíduos vegetais o responsável pela menor quantidade de C na fração microbiana. A quantidade de palha sobre o solo é regulada por dois fatores principais: relação C/N do material vegetal da palhada e pelo manejo que lhe é dado. Com respeito ao primeiro fator, a relação C/N é inerente à espécie e reflete a velocidade com que a decomposição do material pode se processar. Quanto a essa característica, as plantas podem ser agrupadas em duas classes, uma de decomposição rápida (exemplo: leguminosas) e a outra de decomposição lenta (exemplo: gramíneas), sendo bem aceito um valor de relação C/N próximo a 25 como de referência na separação entre elas (ALVARENGA et al., 2001).

A maior fração de todo o carbono orgânico que entra no solo é aquela oriunda do resíduo de plantas, já que essas contêm 15-16% de celulose, 10-30% de hemicelulose, 5-30% de lignina e 2-15% de proteína. Substâncias como açúcares, ácidos orgânicos, aminoaçúcares e aminoácidos podem constituir 10% do peso seco. Eles são prontamente lixiviados dos resíduos das plantas e rapidamente utilizados pelos microorganismos (PAUL & CLARK, 1996). No processo de decomposição realizado pelos microorganismos, parte do carbono é liberada para a atmosfera na forma de CO₂ e o restante torna-se constituinte da matéria orgânica do solo, podendo também sofrer perdas por erosão e/ou lixiviação (SANTOS, 1984). Essa porção de matéria morta representa aproximadamente 96% do total de C orgânico do solo, sendo que o restante é constituído pela biomassa microbiana.

A biomassa microbiana é a fração viva da matéria orgânica do solo composta por bactérias, fungos, actinomicetos, protozoários e algas. Ela é um importante componente na avaliação da qualidade do solo porque atua nos processos de decomposição natural interagindo na dinâmica dos nutrientes e regeneração da estabilidade dos agregados (FRANZLUEBBERS et al., 1999). A biomassa microbiana é influenciada pelas variações sazonais de umidade e temperatura, pelo manejo do solo, pelo cultivo e, também, pelos resíduos vegetais. Representa pequena parte da fração ativa da matéria orgânica (DE LUCA, 1998), constituindo apenas 2% a 5% do C orgânico do solo. Apesar disso, é mais sensível que os teores de C orgânico para aferir alterações na matéria orgânica causadas pelas práticas de

cultivo (GAMA-RODRIGUES, 1999). Segundo Barreto et al. (2008), quanto maior a relação carbono microbiano/carbono total do solo, melhor sua qualidade estrutural.

Mesmo com a ausência de interação significativa entre as fontes de variação (cultivo de outono-inverno e primavera), na figura 8 estão apresentados os teores das frações lábeis de carbono no solo, nas diferentes rotações de culturas, onde é evidenciado, principalmente na camada de 0-5 cm, o efeito das espécies no carbono solúvel em água e microbiano.

Tabela 13. Teores (mg kg^{-1}) de carbono orgânico solúvel em água ($\text{C}_{\text{solúvelH}_2\text{O}}$), carbono orgânico extraído com água quente ($\text{C}_{\text{extH}_2\text{O quente}}$) e carbono da biomassa microbiana (CBM) nas camadas de 0-5 e 5-10 cm, após o manejo das plantas de cobertura conduzidas na primavera no terceiro ano do experimento.

Tratamentos	$\text{C}_{\text{solúvelH}_2\text{O}}$	$\text{C}_{\text{extH}_2\text{O quente}}$	CBM
	----- mg kg^{-1} -----		
0-5 cm			
Outono-Inverno			
Braquiária (B)	39,56b ⁽¹⁾	121,25	321,31b
Sorgo (S)	36,18b	119,62	300,19b
S+B	60,50a	115,13	410,81a
Primavera			
Cober crop	45,75a	115,08	347,42a
Crotalária	50,05a	119,33	364,17a
Milheto	52,43a	121,08	354,15a
Pousio	33,41b	116,25	293,32b
Prabab. F			
Outono-Inverno (I)	0,0174	0,6265	0,0214
Primavera (P)	0,0477	0,9399	0,0081
IxP	0,3819	0,9895	0,6414
CV			
Outono-Inverno	11,15	7,65	7,96
Primavera	11,86	15,52	6,98
5-10 cm			
Outono-Inverno			
Braquiária (B)	26,25	84,63	261,00a
Sorgo (S)	25,38	86,25	231,87b
S+B	29,93	79,34	263,30a
Primavera			
Cober crop	24,30	84,08	268,00a
Crotalária	26,17	80,21	246,75b
Milheto	24,50	83,69	264,42ab
Pousio	25,75	81,82	219,05c
Prabab. F			
Outono-Inverno (I)	0,4670	0,5713	0,0382
Primavera (P)	0,7859	0,9604	0,0184
IxP	0,9959	0,5556	0,1478
CV			
Outono-Inverno	19,55	27,65	10,05
Primavera	20,98	15,46	7,87

⁽¹⁾ Médias seguidas de letras diferentes na coluna diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade.

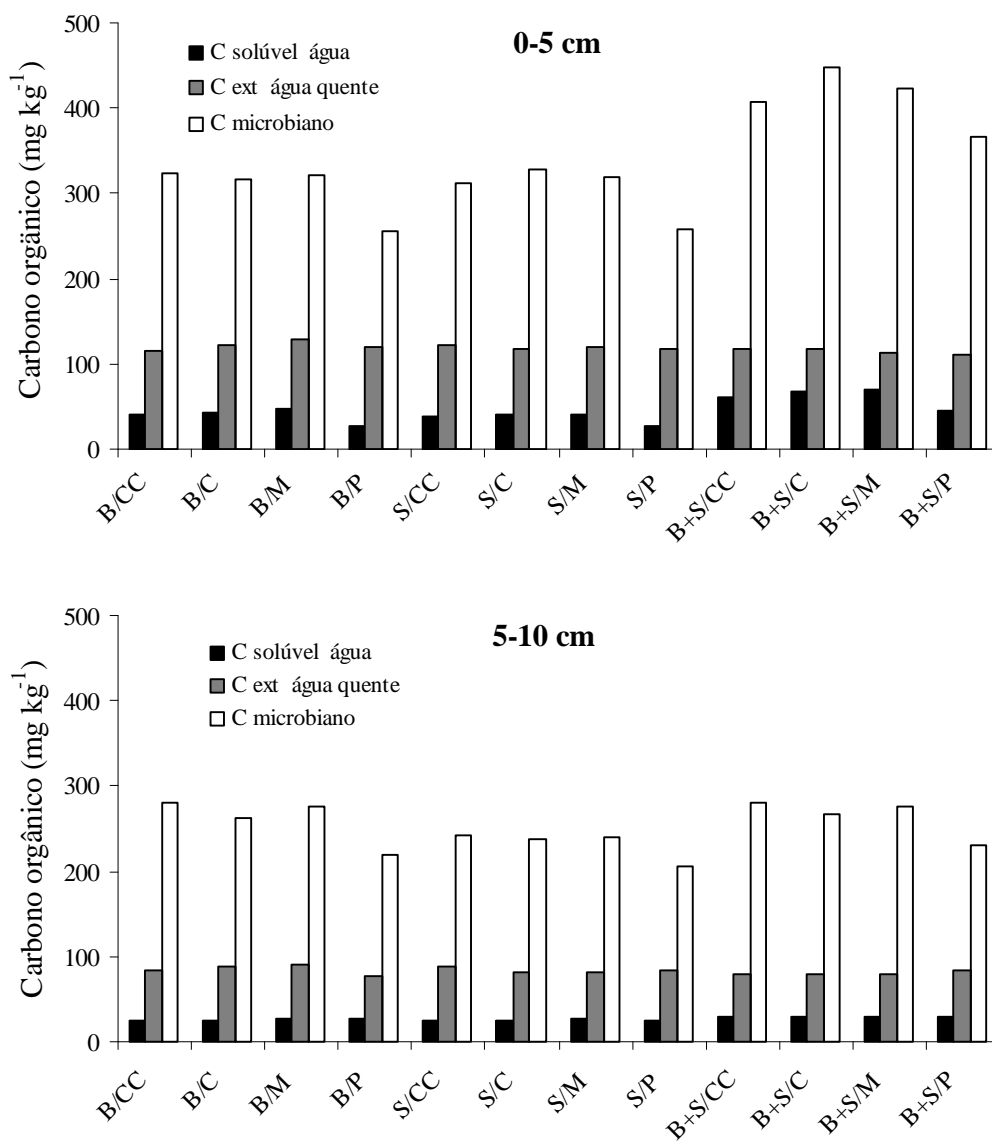


Figura 8. Teores de carbono orgânico solúvel em água, carbono orgânico extraído com água quente e carbono da biomassa microbiana nas camadas de 0-5 e 5-10 cm, nas diferentes rotações de culturas, após o manejo das plantas de cobertura conduzidas na primavera, no terceiro ano do experimento. B: brachiaria ruziziensis; CC: cober crop; C: crotalária juncea; M: milho; P: pousio; S: sorgo.

4.7. Carbono orgânico particulado

O fracionamento físico da matéria orgânica do solo, três anos após o início do experimento, está apresentado na tabela 14. Por meio desse modelo de caracterização da matéria orgânica, foram obtidas as frações carbono orgânico particulado e associado aos minerais, bem como o carbono orgânico total.

Na determinação da matéria orgânica do solo no terceiro ano do experimento (Tabela 12), com a metodologia proposta por Raij et al. (2001), apesar de notadas tendências de aumento nos teores na camada de 0-10 cm, em função do cultivo das plantas de cobertura, não ocorreram diferenças significativas. Em contrapartida, na avaliação do COT obtido pelo fracionamento da MO, observou-se aumento nos estoques de carbono nas camadas de 0-5 e 5-10 cm pelo cultivo das coberturas de primavera (Tabela 12). Esse fato pode ser atribuído pelas diferentes metodologias adotadas na avaliação de carbono, pois para a determinação do COT foi utilizado o procedimento de combustão via seca, considerado padrão, o que poderia diferenciar os resultados obtidos (RHEINHEIMER et al., 2008).

Com relação ao COP e ao CAM, após três anos, essas frações foram afetadas apenas pelo cultivo de primavera. Para a camada de 0-5 cm, a crotalaria, o milho e o cober crop geraram maiores concentrações de carbono em relação às subparcelas mantidas em pousio. Em contrapartida, na camada de solo subsequente, as gramíneas de cobertura foram superiores à leguminosa. A utilização de sistemas de manejo que promovam diferentes aportes de biomassa vegetal pode ser identificada por meio da fração particulada da M.O., sendo possível esta ser utilizada como ferramenta para avaliar a qualidade do solo, principalmente em um curto período de tempo (CONCEIÇÃO et al., 2005).

O fracionamento granulométrico da M.O (CAMBARDELLA & ELLIOTT, 1992) consiste na separação de duas frações orgânicas: o carbono orgânico particulado (COP) e o carbono orgânico associado aos minerais (CAM). O COP é a fração da M.O. separada por dispersão e peneiramento do solo associada à fração areia, sendo caracterizado como partículas derivadas de resíduos de plantas e hifas com estrutura celulares reconhecíveis, cuja permanência no solo está condicionada à proteção física desempenhada pelos agregados (Golchin et al., 1994). O CAM é a fração da M.O. associada às frações silte e argila do solo, sendo definida como a fração da M.O. que interage com a superfície de

partículas minerais, formando os complexos organominerais, estando protegida pelo mecanismo de proteção coloidal (CHRISTENSEN, 2000). No trabalho conduzido por oito anos por Loss et al. (2009), os autores observaram teores de COP na camada de 0-5 cm 26% maiores na rotação berinjela/milho em sistema plantio direto quando comparada à sucessão feijão/milho sob sistema convencional. Bayer et al. (2009) observaram maior taxa de sequestro de carbono e aumento nas relações de carbono lábil (COP/CAM) nos sistemas envolvendo o cultivo de mucuna-preta, em relação aos sistemas com plantas de cobertura de inverno. Segundo os autores, esses resultados estariam relacionados a maior produção de fitomassa e crescimento radicular da mucuna preta ao longo dos oito anos de experimento.

Salton et al. (2002) afirmaram que, em um sistema de integração lavoura-pecuária em SSD, ocorre aporte diferenciado de resíduos vegetais em relação aos sistemas puros de produção de grãos, tanto na superfície quanto no perfil do solo pelas raízes. De acordo com a intensidade de pastejo, ocorre maior crescimento radicular tanto da pastagem quanto da cultura de grãos integrante do sistema e, com isso, o aporte de matéria orgânica em profundidade é influenciado (SOUZA et al., 2008). No trabalho de Souza et al. (2009), a fração representada pelo COP, aponta que na área com maior intensidade de pastejo está havendo a degradação da matéria orgânica a partir do terceiro ano, em função de sua tendência de queda. No entanto, intensidades de pastejo moderadas em sistemas de integração pastagem de gramíneas-soja em plantio direto promovem aumento nos estoques de COT e COP. De certa forma, esses resultados são condizentes com o experimento em questão, em que o maior crescimento radicular (Figura 6) e de fitomassa pelas plantas de cobertura (Tabela 8) influenciaram nos valores de COP (Tabela 14).

Tabela 14. Teores (g kg^{-1}) de carbono orgânico total (COT), carbono orgânico particulado (COP) e carbono orgânico associado aos minerais (CAM) nas camadas de 0-5 e 5-10 cm, após o manejo das plantas de cobertura conduzidas na primavera no terceiro ano do experimento. Dezembro/2008.

Tratamentos	COT	COP		CAM
		g kg^{-1}		
0-5 cm				
Outono-Inverno				
Braquiária (B)	19,29	6,84	12,45	
Sorgo (S)	19,02	4,98	14,04	
S+B	19,67	6,98	12,69	
Primavera				
Cober crop	20,42a ⁽¹⁾	5,89a	14,53a	
Crotalária	20,15a	6,49a	13,66a	
Milheto	19,95a	6,55a	13,40a	
Pousio	15,37b	3,87b	11,50b	
Prabab. F				
Outono-Inverno (I)	0,9125	0,1001	0,0930	
Primavera (P)	0,0211	0,0028	0,0246	
IxP	0,5841	0,4871	0,5831	
CV				
Outono-Inverno	4,98	15,68	6,35	
Primavera	5,04	5,18	15,77	
5-10 cm				
Outono-Inverno				
Braquiária (B)	16,09	2,88	13,21	
Sorgo (S)	15,22	2,45	12,77	
S+B	16,88	2,34	14,54	
Primavera				
Cober crop	16,90a	2,25a	14,65a	
Crotalária	14,30b	1,34b	12,96b	
Milheto	18,10a	2,35a	15,75a	
Pousio	13,99b	1,08b	12,91b	
Prabab. F				
Outono-Inverno (I)	0,3895	0,2931	0,1547	
Primavera (P)	0,0349	0,0001	0,0274	
IxP	0,8415	0,4126	0,9128	
CV				
Outono-Inverno	4,89	6,54	6,97	
Primavera	4,65	5,81	6,76	

⁽¹⁾ Médias seguidas de letras diferentes na coluna diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade.

4.8. Carbono orgânico nas diferentes classes de tamanho de agregados

A distribuição de agregados nas frações maiores que 2 mm, entre 2-0,25 mm, 0,25-0,05 mm e menores que 0,05 mm, três anos após as diferentes rotações de culturas, está apresentada na tabela 15.

Como descrito anteriormente, na determinação da estabilidade de agregados também foi avaliada a porcentagem de agregados maiores que 2 mm (item 3.18), no entanto, essa variável foi determinada novamente no terceiro ano de experimento, pois nesse caso, o objetivo foi avaliar o teor de carbono nas diferentes frações. Apesar da metodologia e equipamentos diferentes, observou-se resultados similares para a porcentagem de agregados maiores que 2 mm, por ocasião das análises efetuadas no terceiro ano agrícola (Tabelas 11 e 15).

Na camada de 0-5 cm, o cultivo das plantas de cobertura apresentou maior quantidade de macroagregados. Conseqüentemente, a porcentagem da fração menor que 0,05 mm foi maior nas subparcelas mantidas em pousio na primavera. Para a camada de 5-10 cm, dentre as plantas de cobertura, as gramíneas foram superiores à crotalária, e com relação ao cultivo de outono-inverno, a presença da braquiária elevou a porcentagem de agregados maiores que 2 mm (Tabelas 11 e 15).

O cultivo das coberturas de primavera, bem como a presença da braquiária, em sistema solteiro ou consorciado incrementou os teores de carbono orgânico na fração representada pelos macroagregados grandes, na camada de 0-5 cm de profundidade (Tabela 16). Para a camada subsequente do perfil do solo, esse efeito foi observado somente pelas espécies de primavera. No trabalho desenvolvido por Diekow et al. (2005), os autores constataram maiores teores de carbono na fração areia para a rotação envolvendo leguminosas, comparada à área em pousio ou rotação apenas com gramíneas. Os autores atribuíram esse fato à maior produção de massa vegetal pelas leguminosas ao longo dos anos. Os teores de carbono nessa fração alcançaram 30% do COT na camada de 0-2,5 cm. No trabalho supracitado, também é destacada a importância do armazenamento de carbono na fração areia do solo, pois as frações mais finas apresentam capacidade limitada no armazenamento de carbono, tornando-se saturadas. Do mesmo modo, a diminuição nas concentrações de carbono nas

menores frações do solo indica a degradação do solo, pela maior exposição do carbono à oxidação pelo ataque microbiano.

Chan et al. (2002) relataram que a estabilidade dos microagregados, particularmente os menores que 0,05 mm, está relacionada aos teores de carbono na fração <0,053mm, enquanto que a estabilidade dos macroagregados é determinada por algumas formas temporárias da matéria orgânica do solo, como raízes e hifas de fungos, as quais são mais sensíveis às práticas agrícolas. Assim como o carbono orgânico particulado, os teores de carbono nas frações granulométricas representadas pelos macroagregados, são variáveis mais sensíveis na avaliação da qualidade do solo, e recentemente, têm sido utilizadas como parâmetros na determinação dos estoques de carbono do solo. Huang et al. (2010) destacam que em solos com predominância de óxidos de ferro e alumínio e caulinita na fração argila, os incrementos de carbono orgânico na fração argila levam muitos anos, pois a matéria orgânica não atua como agente principal na agregação de microagregados.

A quantidade de carbono orgânico em cada fração granulométrica, levado em consideração a porcentagem de cada fração bem como o seu teor, está apresentado na tabela 17. Na camada de 0-5 cm, o cultivo de braquiária na entressafra elevou as quantidades de carbono armazenadas nos macroagregados grandes (> 2 mm). Tal efeito também foi observado através da condução das plantas de cobertura na primavera, no entanto, até 10 cm de profundidade (Tabela 17).

O cultivo de sorgo solteiro no outono-inverno apresentou maiores quantidades de carbono na fração menor que 0,05, na camada de 5-10 cm. De fato, isso indicaria maiores quantidades de carbono armazenadas nessa fração do solo, com maior estabilidade devido às ligações organominerais com os minerais de argila. No entanto, essa diferença constatada estaria mais relacionada com as maiores proporções de agregados nessa fração, pois, apesar de não diferir significativamente, o cultivo de sorgo solteiro apresentou cerca de 22 e 28% mais agregados nessa fração, quando comparado à braquiária solteira e consorciada, respectivamente (Tabela 15), afetando as quantidades de C nesse compartimento (Tabela 17).

De forma geral, os efeitos proporcionados pelas diferentes rotações de culturas restringiram-se basicamente no carbono dos macroagregados grandes, sem nenhum efeito nas classes intermediárias (Tabelas 16 e 17). Chakraborty et al. (2010) afirmam que a

fração acima de 250 μm , composta pelos macroagregados, contém a fração mais ativa do carbono e sensível ao uso do solo e práticas agrícolas. Esta fração contém as adições recentes de carbono no solo (CARTER, 2002). A classe dos microagregados na fração 53–250 μm é uma estrutura mais estável de armazenamento de C, sendo considerada uma classe de decomposição mais lenta que as frações maiores (SIX et al, 2000). Em outras palavras, a classe de microagregados, em termos de estabilidade do carbono orgânico, estaria entre os macroagregados e a fração silte-argila. A interação entre os minerais de argila e as substâncias húmicas promove a estabilidade do C dentro da classe silte-argila. As argilas criam pequenos poros ($<1 \mu\text{m}$), onde a matéria orgânica pode ser armazenada e permanecer menos suscetível à decomposição microbiana (BRADY & WEIL, 2008).

Portanto, em um solo manejado em SSD, a produção de fitomassa e o crescimento radicular volumoso das espécies utilizadas em rotação podem ter efeito relativamente rápido na formação dos macroagregados do solo, principalmente em solos com estrutura degradada. Por conseguinte, outros atributos físicos do solo podem ser influenciados, como a porosidade e a capacidade em reter água (BAYER & MIELNICZUC, 2008).

Tabela 15. Porcentagem (%) de agregados distribuídos nas frações maiores que 2 mm, entre 2-0,25 mm, 0,25-0,05 mm e menores que 0,05 mm, em função dos cultivos de outono-inverno e primavera, no terceiro ano do experimento. Dezembro/2008.

Tratamentos	> 2 mm	2-0,25 mm	0,25-0,05 mm	< 0,05 mm
	----- % do solo -----			
0-5 cm				
Outono-Inverno				
Braquiária (B)	58,67	13,31	15,13	12,89
Sorgo (S)	58,10	12,78	15,50	12,71
S+B	58,45	13,90	15,75	11,99
Primavera				
Cober crop	61,75a ⁽¹⁾	13,17	14,70	10,42b
Crotalária	59,80a	14,08	15,58	10,53b
Milheto	59,35a	13,55	14,67	11,88b
Pousio	52,73b	14,67	16,92	15,68a
Probab. F				
Outono-Inverno (I)	0,8735	0,8417	0,7794	0,7029
Primavera (P)	0,0001	0,1731	0,1140	0,0007
IxP	0,8888	0,9872	0,8300	0,9830
CV				
Outono-Inverno	8,97	20,07	6,19	22,04
Primavera	5,36	18,18	16,24	25,55
5-10 cm				
Outono-Inverno				
Braquiária (B)	50,15a	14,94	25,62	10,81
Sorgo (S)	46,45b	14,57	24,49	13,83
S+B	51,75a	14,62	24,09	10,05
Primavera				
Cober crop	52,76a	15,80	24,85	7,23
Crotalária	47,45b	15,75	25,75	9,25
Milheto	52,30a	15,17	24,70	7,86
Pousio	43,66b	15,08	25,20	10,11
Probab. F				
Outono-Inverno (I)	0,0022	0,1553	0,9929	0,0625
Primavera (P)	0,0412	0,8560	0,2321	0,0911
IxP	0,2128	0,4910	0,8360	0,4522
CV				
Outono-Inverno	8,90	20,72	6,73	19,19
Primavera	7,69	9,02	6,95	10,14

⁽¹⁾ Médias seguidas de letras diferentes na coluna diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade.

Tabela 16. Carbono orgânico do solo (COS) de agregados livres de areia, nas frações maiores que 2 mm, entre 2-0,25 mm, 0,25-0,05 mm e menores que 0,05 mm, em função dos cultivos de outono-inverno e primavera, no terceiro ano do experimento. Dezembro/2008.

Tratamentos	> 2 mm	2-0,25 mm	0,25-0,05 mm	< 0,05 mm
	----- COS (g kg ⁻¹ de agregados livres de areia) -----			
0-5 cm				
Outono-Inverno				
Braquiária (B)	23,13a ⁽¹⁾	5,56	7,13	28,43
Sorgo (S)	19,38b	5,88	7,52	29,60
S+B	24,43a	5,65	8,25	29,40
Primavera				
Cober crop	24,15a	5,65	8,25	28,29
Crotalária	23,83a	5,58	7,84	29,40
Milheto	23,50a	5,75	7,40	28,99
Pousio	18,00b	5,80	7,80	29,88
Probab. F				
Outono-Inverno (I)	0,0012	0,8336	0,4890	0,1697
Primavera (P)	0,0091	0,9785	0,8288	0,1212
IxP	0,5321	0,9390	0,9938	0,6953
CV				
Outono-Inverno	5,25	8,81	13,03	11,34
Primavera	8,63	19,75	16,14	7,57
5-10 cm				
Outono-Inverno				
Braquiária (B)	18,70	6,68	8,94	26,00
Sorgo (S)	17,91	7,05	8,39	27,04
S+B	20,27	6,83	8,87	27,41
Primavera				
Cober crop	20,40a	6,80	9,08	25,87
Crotalária	19,81a	6,70	8,62	27,88
Milheto	19,74a	6,93	7,45	26,50
Pousio	14,49b	7,04	8,93	27,49
Probab. F				
Outono-Inverno (I)	0,1911	0,8336	0,4890	0,1697
Primavera (P)	0,0020	0,9785	0,8098	0,1212
IxP	0,2533	0,9390	0,9938	0,6953
CV				
Outono-Inverno	6,92	12,12	12,99	11,34
Primavera	8,07	25,05	16,42	8,55

⁽¹⁾ Médias seguidas de letras diferentes na coluna diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade.

Tabela 17. Carbono orgânico do solo (COS) nas frações maiores que 2 mm, entre 2-0,25 mm, 0,25-0,05 mm e menores que 0,05 mm, considerando os teores (g kg^{-1} de agregados livres de areia) e a porcentagem (%) de cada fração, em função dos cultivos de outono-inverno e primavera, no terceiro ano do experimento. Dezembro/2008.

Tratamentos	> 2 mm	2-0,25 mm	0,25-0,05 mm	< 0,05 mm
	----- COS (g kg^{-1} de solo) -----			
0-5 cm				
Outono-Inverno				
Braquiária (B)	13,39a ⁽¹⁾	0,74	1,23	3,68
Sorgo (S)	11,94b	0,77	1,18	3,79
S+B	14,15a	0,79	1,27	3,58
Primavera				
Cober crop	14,92a	0,77	1,20	3,04
Crotalária	14,18a	0,65	1,23	3,09
Milheto	13,97a	0,85	1,16	3,92
Pousio	9,50b	0,84	1,32	4,68
Probab. F				
Outono-Inverno (I)	0,0339	0,7508	0,7349	0,7884
Primavera (P)	0,0120	0,3130	0,5728	0,0584
IxP	0,5071	0,8192	0,9899	0,9881
CV				
Outono-Inverno	10,14	25,29	7,82	20,12
Primavera	8,28	22,28	21,06	23,09
5-10 cm				
Inverno				
Braquiária (B)	9,48	0,99	2,20	2,72b
Sorgo (S)	8,12	1,10	2,07	3,30a
S+B	10,50	1,00	2,18	2,46b
Primavera				
Cober crop	10,76a	1,02	2,25	2,89
Crotalária	10,03a	0,90	2,05	2,70
Milheto	10,35a	1,07	2,12	2,97
Pousio	6,38b	1,06	2,17	3,49
Probab. F				
Outono-Inverno (I)	0,0825	0,5084	0,5014	0,0319
Primavera (P)	0,0104	0,9307	0,5414	0,0922
IxP	0,0998	0,7894	0,9728	0,8553
CV				
Outono-Inverno	13,19	22,01	13,19	20,03
Primavera	9,14	29,41	14,93	24,81

⁽¹⁾ Médias seguidas de letras diferentes na coluna diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade.

4.9. Densidade e porosidade do solo

Os dados referentes à densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade, no primeiro ano agrícola, estão apresentados na tabela 18. Somente os macroporos foram alterados pelo cultivo das plantas de cobertura, com efeitos positivos até a camada de 7,5-12,5 cm. No entanto, nas camadas mais profundas do perfil do solo, a densidade e a porosidade do solo não foram influenciadas pelas rotações de culturas. Apesar do efeito limitar-se na macroporosidade do solo no primeiro ano agrícola, o uso de plantas de cobertura com crescimento vigoroso é fundamental em um esquema de rotação de culturas em SSD, pois a quantidade de macroporos é de suma importância para o movimento de água e gases no perfil do solo, favorecendo um ambiente mais propício ao desenvolvimento radicular.

A porosidade do solo é uma propriedade física do solo que sofre grandes alterações com a compactação. Pesquisas realizadas em várias regiões apontam alterações significativas com a compactação no decréscimo da porosidade, da continuidade do número e tamanho dos poros, com reduções significativas principalmente no volume dos macroporos (NOVAK et al., 1992). O uso de escarificadores também é uma prática que visa a descompactação do solo, atuando principalmente na diminuição da resistência à penetração e aumento dos macroporos (SECCO et al., 2005). No trabalho de Genro Junior et al. (2009), apesar da rotação de culturas não alterar a densidade e a macroporosidade do solo, a inclusão da crotalária como planta de cobertura elevou a produtividade da cultura principal, e, segundo os autores, isso estaria relacionado a melhor distribuição dos poros grandes no perfil do solo, resultantes do crescimento radicular da cultura anterior.

Após o manejo das plantas de cobertura no terceiro ano agrícola, em dezembro/2008, os atributos físicos do solo apresentaram maiores variações em função da aplicação dos tratamentos, sendo as variáveis afetadas pelas espécies conduzidas no outono-inverno bem como pelas plantas de cobertura de primavera (Tabela 19). Porém, as parcelas (cultivo de outono-inverno) tiveram menor influência, sendo apenas a densidade do solo diminuída no sistema sorgo+braquiária na camada de 0-5 cm.

Em contrapartida, o uso das plantas de cobertura em rotação alterou a densidade do solo na camada de 7,5-12,5cm e teve forte influência nos macroporos do solo até

a camada de 15-20 cm, sendo que na camada 7,5-12,5, a porosidade total e os microporos também foram incrementados. Esses resultados evidenciam a melhora da qualidade física do solo, quando comparada à caracterização física do solo da área experimental, principalmente na camada de 7,5-12,5 cm, com valores iniciais de $1,41 \text{ Mg m}^{-3}$ e $0,07 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, para a densidade do solo e volume de macroporos, respectivamente (Tabela 1). Existe uma estreita relação entre porosidade do solo e crescimento radicular, sendo considerada uma macroporosidade mínima de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para o crescimento e o desenvolvimento satisfatórios das plantas (VOMOCIL & FLOCKER, 1966). Normalmente os solos arenosos apresentam alta macroporosidade e, dependendo da preservação dos teores de matéria orgânica e da atividade biológica, tendem a proporcionar condições satisfatórias ao crescimento radicular. Nos solos argilosos, a situação é bem mais complexa. Em condições naturais esses solos possuem boa quantidade de poros grandes, em torno de 15 a 25%, porém em condições de cultivo, a macroporosidade diminui drasticamente, o que de fato ocorre com o experimento em questão, onde a porcentagem de macroporos não ultrapassa os 13% no perfil do solo (Tabelas 1, 18 e 19). Para preservar a qualidade do solo e eliminar a necessidade de mobilizações nesse sistema, é recomendado o uso da rotação de culturas, a qual diminui a densidade e aumenta a porosidade, a condutividade hidráulica saturada e a estabilidade de agregados do solo, conforme constatado por Albuquerque et al. (1995) e Campos et al. (1995), em Latossolo Vermelho distrófico argiloso, e por Wohlenberg et al. (2004), em Argissolo Vermelho- Amarelo.

O cultivo das gramíneas de cobertura cober crop e milho proporcionou maior volume de microporos na camada de 7,5-12,5 cm. No entanto, esse aumento não é proveniente da diminuição da porosidade total e/ou do volume de macroporos, pois essas variáveis também foram elevadas (Tabela 19). A microporosidade é responsável pela capacidade de retenção de água e solutos no solo, enquanto que a macroporosidade influencia diretamente a capacidade de infiltração, a drenabilidade do solo e sua capacidade de aeração (ABID & LAL, 2008). Portanto, uma quantidade total de poros, assim como um equilíbrio entre as classes de tamanhos são fundamentais para que as plantas não sofram restrições ao desenvolvimento das raízes.

Os solos agrícolas funcionam como um sistema complexo que retém e transmite água, ar, nutrientes e calor às sementes e plantas, de maneira que é fundamental um ambiente físico favorável ao crescimento radicular, para maximizar a produção das culturas

(LETEY, 1985). Nas regiões tropicais, sistemas de preparo com mínima perturbação do solo e que propiciem a manutenção de resíduos na superfície são necessários para o controle da erosão e melhora da agregação do solo (LAL, 2000).

Na tabela 20 estão apresentadas as correlações entre os teores de carbono orgânico, em diversas frações, e alguns parâmetros para avaliação da qualidade física do solo. De forma geral, o carbono orgânico total, particulado, microbiano e teores na fração maior que 2 mm apresentaram correlação significativa com algum dos parâmetros físicos do solo, nas camadas de 0-5 e/ou 5-10 cm.

No sistema de semeadura direta, a manutenção dos resíduos na superfície do solo e a capacidade em aumentar a matéria orgânica no solo, principalmente nas camadas superficiais, são características favoráveis do sistema que afetam a melhor agregação do solo. Por sua vez, essa propriedade do solo pode atuar na melhoria de outras características do solo, como a densidade, porosidade, aeração e o movimento de água no perfil do solo, que são fundamentais para o desenvolvimento das plantas cultivadas (BAYER & MIELNICZUC, 2008).

Três anos após o início do experimento, o cultivo de sorgo consorciado com braquiária ou mesmo a forrageira solteira, nas estações de outono-inverno, em rotação com as plantas de cobertura de primavera, com maior destaque para o cober crop e milho, através da maior produção de fitomassa ao longo dos anos (Tabela 8) e maior crescimento radicular nas camadas superficiais do solo (Figura 6), tiveram maior influência nos atributos físicos do solo (Tabelas 11, 13, 14, 15, 16, 17 e 19), em função do aumento dos teores de carbono até a camada de 10 cm (Tabela 20).

Tabela 18. Análise de variância e valores médios de densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), microporosidade (micro) e macroporosidade (macro), em função dos cultivos de outono-inverno e primavera, nas amostras coletadas após manejo das plantas de cobertura de primavera, no primeiro ano do experimento. Dezembro/2006.

Tratamentos	Ds	Pt	Micro	Macro
	---- Mg m ⁻³ ----	----- m ³ m ⁻³ -----	m ³ m ⁻³	
0-5 cm				
Outono-Inverno				
Braquiária (B)	1,35	0,42	0,33	0,10
Sorgo (S)	1,35	0,43	0,32	0,11
S+B	1,33	0,43	0,33	0,10
Primavera				
Cober crop	1,35	0,43	0,33	0,10a ⁽¹⁾
Crotalária	1,35	0,42	0,32	0,10a
Milheto	1,33	0,43	0,33	0,10a
Pousio	1,36	0,41	0,32	0,09b
Probab. F				
Outono-Inverno (I)	0,5005	0,7537	0,3500	0,2925
Primavera (P)	0,1589	0,2006	0,2878	0,0116
IxP	0,9409	0,9350	0,6565	0,9087
CV				
Outono-Inverno	8,68	15,16	19,00	4,62
Primavera	6,04	7,49	10,54	16,37
7,5-12,5 cm				
Outono-Inverno				
Braquiária (B)	1,40	0,41	0,33	0,08
Sorgo (S)	1,40	0,42	0,34	0,08
S+B	1,39	0,41	0,33	0,08
Primavera				
Cober crop	1,39a	0,42	0,33	0,08a
Crotalária	1,42b	0,41	0,33	0,08a
Milheto	1,39a	0,42	0,33	0,08a
Pousio	1,42b	0,41	0,35	0,07b
Probab. F				
Outono-Inverno (I)	0,3153	0,8741	0,4716	0,1215
Primavera (P)	0,0207	0,5806	0,1469	0,0425
IxP	0,9687	0,4518	0,5962	0,6987
CV				
Outono-Inverno	8,56	5,84	7,39	8,75
Primavera	9,09	5,32	6,65	18,44

continua...

continuação da tabela 18...

Tratamentos	Ds	Pt	Micro	Macro
	---- Mg m ⁻³ ----	----- m ³ m ⁻³ -----	m ³ m ⁻³	
15-20 cm				
Outono-Inverno				
Braquiária (B)	1,39	0,42	0,32	0,09
Sorgo (S)	1,42	0,41	0,31	0,10
S+B	1,40	0,42	0,33	0,09
Primavera				
Cober crop	1,40	0,42	0,32	0,09
Crotalária	1,40	0,42	0,32	0,09
Milheto	1,40	0,43	0,33	0,09
Pousio	1,40	0,41	0,32	0,09
Probab. F				
Outono-Inverno (I)	0,8089	0,5501	0,3795	0,6786
Primavera (P)	0,9517	0,2943	0,2824	0,5722
IxP	0,7817	0,9811	0,9280	0,9197
CV				
Outono-Inverno	4,99	6,44	6,72	16,39
Primavera	9,02	7,10	11,20	21,27
27,5-32,5 cm				
Outono-Inverno				
Braquiária (B)	1,26	0,44	0,32	0,12
Sorgo (S)	1,26	0,44	0,31	0,13
S+B	1,25	0,44	0,31	0,12
Primavera				
Cober crop	1,26	0,44	0,32	0,13
Crotalária	1,24	0,44	0,31	0,13
Milheto	1,26	0,44	0,31	0,13
Pousio	1,26	0,44	0,31	0,12
Probab. F				
Outono-Inverno (I)	0,5810	0,8242	0,8385	0,1705
Primavera (P)	0,8348	0,8969	0,9469	0,5792
IxP	0,9766	0,8561	0,4842	0,4898
CV				
Outono-Inverno	6,29	14,15	23,06	33,28
Primavera	5,34	6,19	7,89	12,65

continua...

continuação da tabela 18...

Tratamentos	Ds	Pt	Micro	Macro
	---- Mg m ⁻³ ----	-----	m ³ m ⁻³ -----	-----
47,5-52,5 cm				
Outono-Inverno				
Braquiária (B)	1,25	0,46	0,34	0,12
Sorgo (S)	1,26	0,46	0,33	0,13
S+B	1,25	0,46	0,33	0,13
Primavera				
Cober crop	1,25	0,46	0,34	0,13
Crotalaria	1,26	0,46	0,33	0,13
Milheto	1,26	0,46	0,34	0,12
Pousio	1,26	0,45	0,33	0,12
Probab. F				
Outono-Inverno (I)	0,5660	0,9242	0,9524	0,9699
Primavera (P)	0,4069	0,9169	0,9629	0,7281
IxP	0,1258	0,8561	0,5009	0,3967
CV				
Outono-Inverno	8,64	13,53	14,44	15,09
Primavera	7,99	9,12	10,90	17,41

⁽¹⁾ Médias seguidas de letras diferentes na coluna diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade.

Tabela 19. Análise de variância e valores médios de densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), microporosidade (micro) e macroporosidade (macro), em função dos cultivos de outono-inverno e primavera, nas amostras coletadas após manejo das plantas de cobertura de primavera, no terceiro ano do experimento. Dezembro/2008.

Tratamentos	Ds	Pt	Micro	Macro
	---- Mg m ⁻³ ----	----- m ³ m ⁻³ -----	m ³ m ⁻³	m ³ m ⁻³
0-5 cm				
Outono-Inverno				
Braquiária (B)	1,31a ⁽¹⁾	0,45	0,34	0,12
Sorgo (S)	1,32a	0,44	0,33	0,12
S+B	1,26b	0,47	0,35	0,12
Primavera				
Cober crop	1,29	0,49a	0,37	0,12a
Crotalária	1,30	0,45b	0,34	0,11a
Milheto	1,29	0,49a	0,37	0,12a
Pousio	1,33	0,44b	0,34	0,10b
Probab. F				
Outono-Inverno (I)	0,0055	0,0913	0,4464	0,4843
Primavera (P)	0,0702	0,0404	0,0834	0,0012
IxP	0,9510	0,9159	0,8295	0,0651
CV				
Outono-Inverno	8,88	5,46	16,06	25,92
Primavera	9,25	7,90	10,60	11,81
7,5-12,5 cm				
Outono-Inverno				
Braquiária (B)	1,38	0,44	0,34	0,10
Sorgo (S)	1,38	0,44	0,34	0,10
S+B	1,38	0,45	0,34	0,11
Primavera				
Cober crop	1,36a	0,48a	0,37a	0,11a
Crotalária	1,36a	0,44ab	0,33b	0,11a
Milheto	1,36a	0,48a	0,37a	0,11a
Pousio	1,39b	0,43b	0,34b	0,09b
Probab. F				
Outono-Inverno (I)	0,3485	0,8097	0,1800	0,0777
Primavera (P)	0,0130	0,0005	0,0061	0,0072
IxP	0,9229	0,9128	0,8954	0,9320
CV				
Outono-Inverno	6,97	5,88	8,15	7,45
Primavera	8,01	7,19	10,29	16,20

continua...

continuação da tabela 19...

Tratamentos	Ds	Pt	Micro	Macro
	---- Mg m ⁻³ ----	----- m ³ m ⁻³ -----	----- m ³ m ⁻³ -----	----- m ³ m ⁻³ -----
15-20 cm				
Outono-Inverno				
Braquiária (B)	1,35	0,44	0,34	0,10
Sorgo (S)	1,37	0,44	0,34	0,10
S+B	1,38	0,45	0,34	0,11
Primavera				
Cober crop	1,36	0,45	0,34	0,11a
Crotalária	1,37	0,45	0,34	0,10b
Milheto	1,38	0,45	0,34	0,11a
Pousio	1,37	0,45	0,35	0,10b
Probab. F				
Outono-Inverno (I)	0,4366	0,1685	0,8297	0,5526
Primavera (P)	0,2075	0,2862	0,7187	0,0003
IxP	0,8205	0,9711	0,9212	0,8811
CV				
Outono-Inverno	4,89	6,73	19,30	8,55
Primavera	6,05	7,33	9,83	14,19
27,5-32,5 cm				
Outono-Inverno				
Braquiária (B)	1,27	0,43	0,32	0,11
Sorgo (S)	1,26	0,42	0,32	0,10
S+B	1,26	0,43	0,32	0,11
Primavera				
Cober crop	1,27	0,42	0,32	0,10
Crotalária	1,26	0,43	0,32	0,11
Milheto	1,27	0,42	0,32	0,11
Pousio	1,25	0,43	0,33	0,10
Probab. F				
Outono-Inverno (I)	0,7803	0,3146	0,6799	0,7617
Primavera (P)	0,7154	0,4823	0,8498	0,7739
IxP	0,8195	0,8593	0,8870	0,8916
CV				
Outono-Inverno	8,51	7,59	13,36	7,43
Primavera	12,19	6,67	8,35	14,37

continua...

continuação da tabela 19...

Tratamentos	Ds	Pt	Micro	Macro
	---- Mg m ⁻³ ----	----- m ³ m ⁻³ -----	m ³ m ⁻³	
47,5-52,5 cm				
Outono-Inverno				
Braquiária (B)	1,26	0,46	0,35	0,12
Sorgo (S)	1,26	0,44	0,33	0,12
S+B	1,27	0,45	0,33	0,12
Primavera				
Cober crop	1,27	0,44	0,32	0,12
Crotalária	1,26	0,45	0,34	0,11
Milheto	1,26	0,46	0,34	0,12
Pousio	1,25	0,46	0,34	0,12
Probab. F				
Outono-Inverno (I)	0,9136	0,8184	0,2802	0,7797
Primavera (P)	0,9169	0,3821	0,4256	0,7231
IxP	0,8960	0,3083	0,8324	0,9897
CV				
Outono-Inverno	5,02	5,32	5,12	5,70
Primavera	4,61	5,13	8,68	14,64

⁽¹⁾ Médias seguidas de letras diferentes na coluna diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade.

Tabela 20. Correlação entre os teores de carbono orgânico em diferentes frações e propriedades físicas do solo, nas camadas de 0-5 e 5-10 cm de profundidade, em amostras de solo coletadas 3 anos após início de diferentes rotações de culturas. Botucatu-SP.

0-5 cm						
Variáveis	Ds	Macro	Micro	Pt	Agregados >2mm	Dsc
COT	ns	ns	ns	r = 0,66*	ns	-
CAM	ns	ns	ns	ns	ns	-
COP	r = -0,72**	r = 0,59**	ns	ns	r = 0,88*	-
C _{solúvel} H ₂ O	ns	ns	ns	ns	ns	-
C _{ext.} H ₂ O quente	ns	ns	ns	ns	ns	-
C _{mic}	ns	ns	ns	ns	ns	-
C _{fração} > 2 mm	ns	r = 0,84*	ns	ns	ns	-
C _{fração} 2-0,25	ns	ns	ns	ns	ns	-
C _{fração} 0,25-0,05	ns	ns	ns	ns	ns	-
C _{fração} < 0,05 mm	ns	ns	ns	ns	ns	-
5-10 cm						
Variáveis	Ds	Macro	Micro	Pt	Agregados >2mm	Dsc
COT	r = -0,61**	ns	ns	r = 0,69*	ns	ns
CAM	ns	ns	ns	ns	ns	ns
COP	ns	r = 0,77**	r = 0,49*	ns	r = 0,92*	r = 0,48*
C _{solúvel} H ₂ O	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C _{ext.} H ₂ O quente	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C _{mic}	ns	ns	ns	r = 0,62*	r = 0,88**	ns
C _{fração} > 2 mm	ns	r = 0,85*	r = 0,53*	ns	ns	r = 0,57*
C _{fração} 2-0,25	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C _{fração} 0,25-0,05	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C _{fração} < 0,05 mm	ns	ns	ns	ns	ns	ns

COT: carbono orgânico total; CAM: carbono associado aos minerais; COP: carbono orgânico particulado; C_{solúvel}H₂O: carbono solúvel em água; C_{ext.}H₂O quente: carbono extraído em água quente; C_{mic}: carbono da biomassa microbiana; C_{fração} > 2 mm: carbono na fração maior que 2 mm; C_{fração} 2-0,25: carbono na fração entre 2 e 0,25 mm; C_{fração} 0,25-0,05: carbono na fração entre 0,25-0,05 mm; C_{fração} < 0,05 mm: carbono na fração menor que 0,05 mm; Ds: densidade do solo; Macro: macroporosidade; Micro: microporosidade; Pt: porosidade total; Agregados > 2 mm: porcentagem de agregados maiores que 2 mm; Dsc: densidade do solo crítica. * e **: significativo a 5 e 1% de probabilidade pelo teste t, respectivamente. ns: não significativo.

4.10. Curva de retenção de água no solo

As curvas características de retenção de água no solo, nas camadas de 0-5; 7,5-12,5; 15-20; 27,5-32,5 e 47,5-52,5 cm, nos anos de 2006 e 2008, estão apresentadas nas figuras 9 e 10, respectivamente.

No primeiro ano agrícola, o comportamento das curvas de retenção de água no perfil do solo foi pouco alterado pelos tratamentos. Esses resultados são coerentes com as análises de porosidade do solo na primeira avaliação. Com exceção da macroporosidade até a camada de 7,5-12,5 cm, não ocorreram alterações no volume total de poros bem como nos microporos nas camadas de solo avaliadas (Tabela 18).

Pequena diferença entre as rotações de culturas pode ser notada somente nas camadas de 0-5 e 7,5-12,5 cm de profundidade (Figura 9). Na camada de 0-5 cm, nas condições de solo saturado ($\Psi=0$), os tratamentos sem o cultivo de plantas de cobertura apresentaram menor retenção de água (Figura 9). O volume total de água retido no solo nas condições de saturação ($\Psi=0$) é influenciado pela porosidade total do solo. No entanto, no primeiro ano agrícola, a porosidade total não foi aumentada na camada de 0-5 cm pelo cultivo das coberturas de solo, apesar de constatada a tendência (Tabela 18).

Na camada de 7,5-12,5 cm de profundidade, com o aumento das tensões aplicadas até 100 kPa, ou seja, potenciais matriciais mais negativos, os tratamentos com pousio durante a primavera apresentaram maior quantidade de água retida no solo. A análise da porosidade do solo no primeiro ano de experimento, na camada de 7,5-12,5 cm (Tabela 18), indica menor quantidade de macroporos na ausência das plantas de cobertura, o que pode ter influenciado na maior retenção de água em função dos potenciais matriciais mais negativos, pois os macroporos são drenados de forma mais rápida com o aumento da tensão aplicada nas amostras indeformadas. Esse comportamento da retenção de água em solos compactados foi bem caracterizado nas camadas mais superficiais do solo por ocasião da caracterização da área experimental (Figura 3).

As curvas de retenção de água no solo, nas amostras indeformadas coletadas no terceiro ano agrícola, evidenciam maior influência das rotações de culturas, até a camada de 15-20 cm (Figura 10). Para a profundidade de 7,5-12,5 cm, a retenção de água nas condições de potencial matricial nulo foi menor nas rotações com pousio na primavera, em

função do menor volume de poros nesses tratamentos, conforme apresentado na tabela 19. No caso da profundidade de 15-20 cm, as amostras coletadas na rotação com sistema consorciado no outono-inverno e milho como planta de cobertura, apresentaram maior retenção de água com o solo saturado, apesar de a porosidade total ser igual para todas as rotações (Tabela 19).

De acordo com Reichardt & Timm (2004), as curvas de retenção de água referente aos tratamentos com pousio, na camada de 7,5-12,5 cm, são características de solos menos estruturados, pois há uma menor retenção de água com o solo saturado. Esse comportamento é observado até a tensão de 100 kPa, representada pelos teores de água na capacidade de campo (Figura 10). No entanto, a partir da tensão de 333 kPa (potenciais matriciais mais negativos), a umidade do solo nos tratamentos com pousio é maior, em função da maior proporção dos microporos em relação aos macroporos (Tabela 19). A maior concentração de raízes das plantas de cobertura nas camadas superficiais (Figura 6) pode ter atuado na maior estruturação do solo e retenção de água nos potenciais matriciais mais elevados, até a capacidade de campo (Figura 10). Segundo Reeve & Carter (1991), solos compactados caracterizam-se por apresentar menor retenção de água nas baixas tensões, devido à redução promovida na porosidade total, 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 microporosidade, aumentando o volume de água capilar e laminar.

Os teores de água no potencial matricial mais negativo (-1500 kPa), representado pelo ponto de murcha permanente, foram próximos, mesmo nas camadas mais superficiais, onde o efeito das plantas de cobertura foi maior nos atributos físicos do solo (Tabela 19). Em solos mais compactados, devido à maior proporção de microporos, responsáveis em reter a água do solo com maior energia, era esperado maior retenção de água na tensão de 15 MPa. No entanto, o cultivo das plantas de cobertura teve influência nos teores de carbono orgânico do solo na camada de 0-10 cm, o que também pode influenciar na maior retenção de água nas maiores tensões. Além do mais, na camada de 7,5-12,5 cm, os valores de porosidade total e microporos foram maiores em função da presença do cober crop e milho (Tabela 19). Contudo, mesmo apresentando condições físicas mais desfavoráveis três anos após o início da rotação de culturas, as subparcelas mantidas em pousio na primavera não

reteram mais água na tensão representada pelo ponto de murcha permanente. Em contrapartida, Cavalieri et al. (2006) argumentam que o aumento na densidade do solo promove aumento da água retida no PMP, pois após o solo ser submetido à tensão de 1,5 MPa, a água restante apresenta-se retida por adsorção, ao redor dos colóides do solo.

Melo et al. (2004) verificaram que a aplicação de biossólidos e o aumento nos teores de matéria orgânica altera a retenção de água no solo somente em algumas tensões, nos dois Latossolos avaliados. A retenção de água do solo é característica específica de cada solo, sendo resultado da ação conjunta e complexa de vários fatores, como o teor e mineralogia da fração argila (FERREIRA et al., 1999), teor de matéria orgânica, estrutura (REICHARDT, 1988) e densidade do solo (BEUTLER et al., 2002).

Dexter (2004) estudou o coeficiente angular no ponto de inflexão da curva de retenção (índice S), e concluiu que o valor do índice S apresenta relação direta e indireta com a matéria orgânica e com a compactação do solo, respectivamente. Assim, maiores valores de S indicam a existência de solos com melhor qualidade estrutural. Apesar do índice S não ser determinado no experimento em questão, o comportamento das curvas nas rotações envolvendo ausência de planta de cobertura, nas camadas de 0-5 e 7,5-12,5 cm, assemelha-se ao estudo de Dexter (2004), com menor inflexão das curvas, caracterizadas por menor volume de água com o solo saturado e maior retenção com a aplicação de tensões mais elevadas (Figura 10).

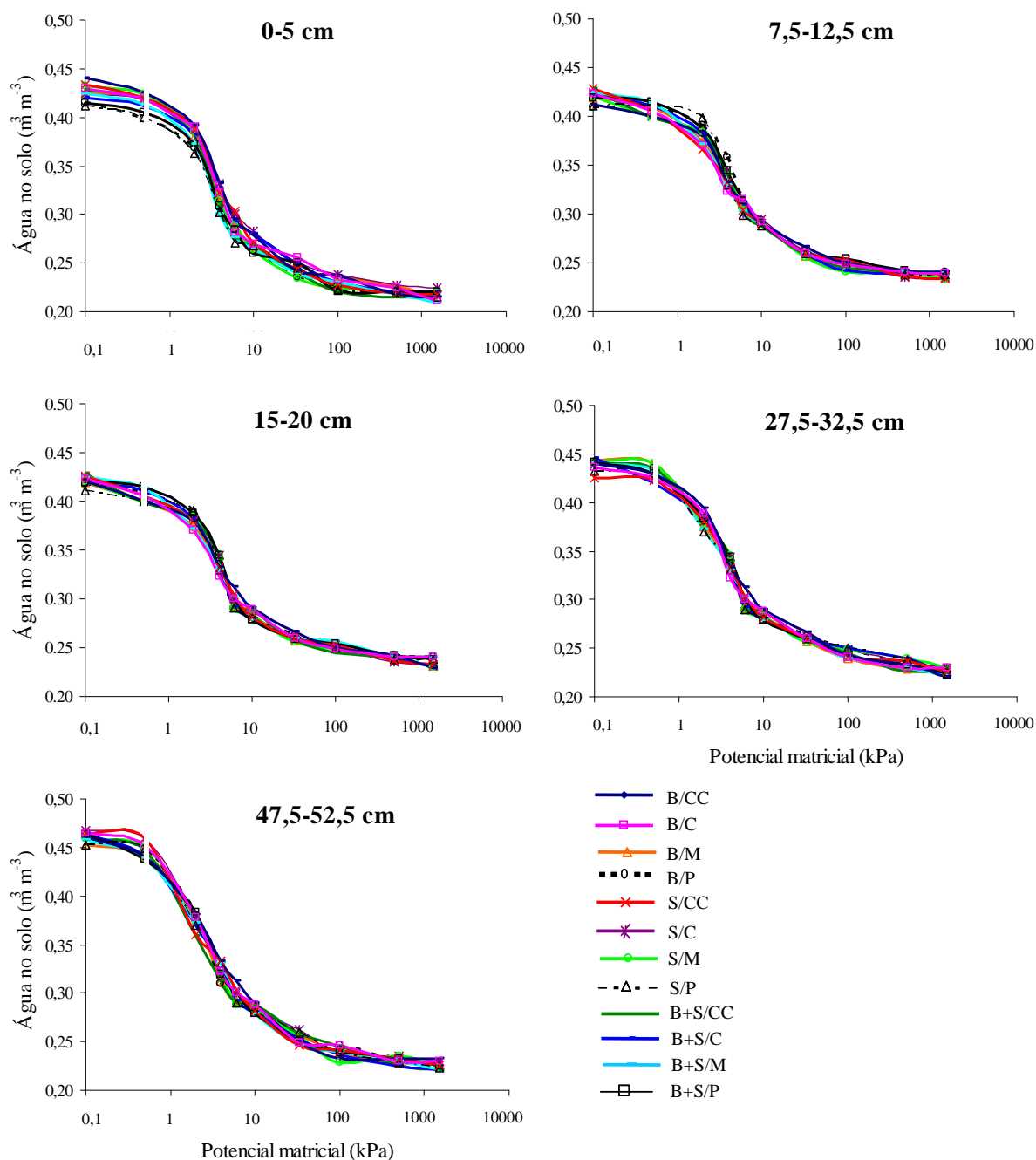


Figura 9. Curvas características da água no perfil do solo no primeiro ano do experimento, em função de diferentes rotações de culturas. Dezembro/2006. B: braquiária; S: sorgo; B+S: braquiária + sorgo; CC: cober crop; C: crotalária; M: milho; P: pousio.

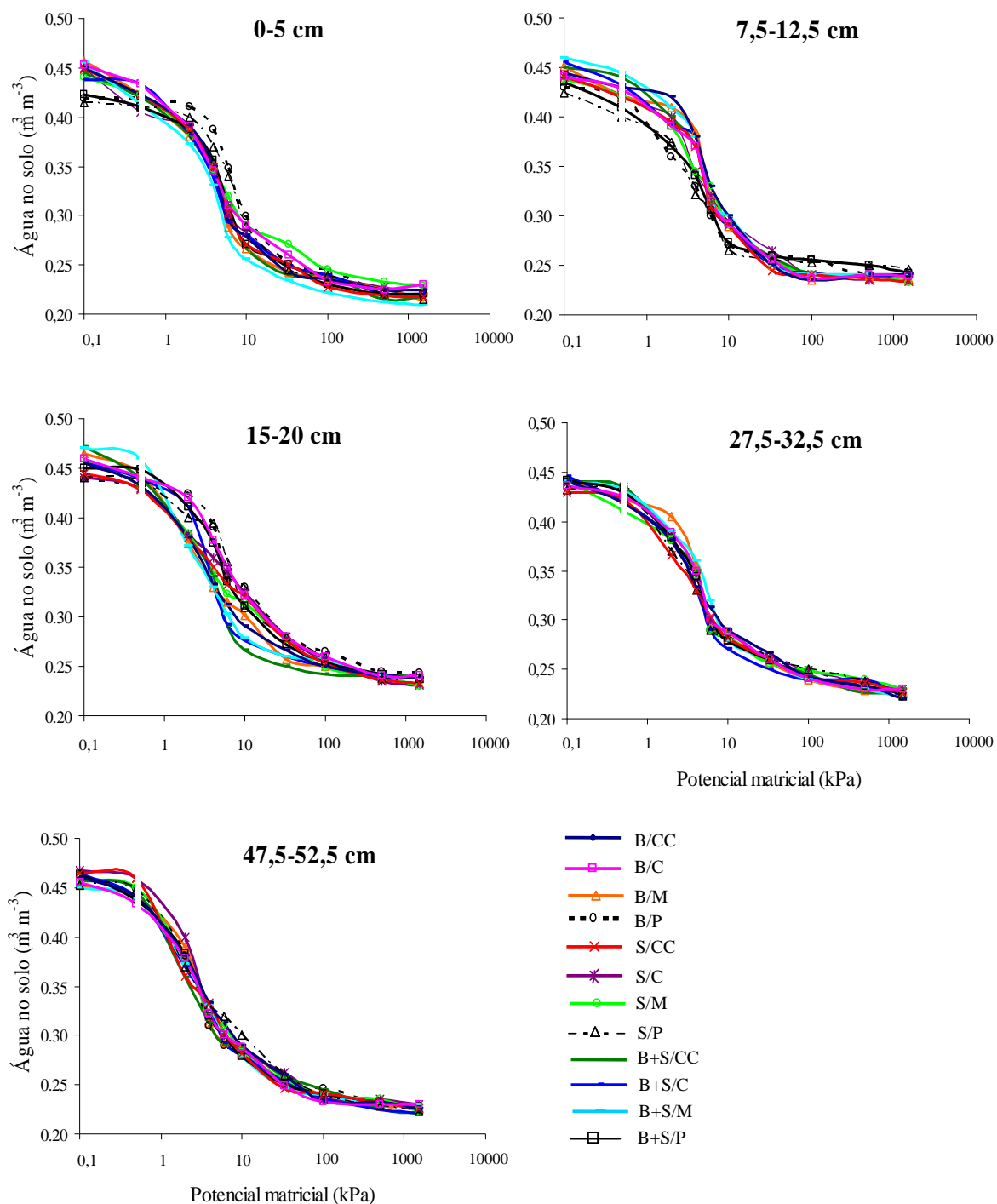


Figura 10. Curvas características da água no perfil do solo no terceiro ano do experimento, em função de diferentes rotações de culturas. Dezembro/2008. B: braquiária; S:sorgo; B+S: braquiária + sorgo; CC: cober crop; C: crotalária; M: milho; P: pousio.

4.11. Intervalo hídrico ótimo

A determinação do intervalo hídrico ótimo, efetuada após o manejo das plantas de cobertura no terceiro ano agrícola, na camada de 7,5-12,5 cm, está apresentada nas figuras 11 e 12. Para a camada de 27,7-32,5 cm, as representações do IHO para os doze tratamentos do experimento estão mostradas nas figuras 13 e 14.

As estimativas dos parâmetros de regressão para o conteúdo volumétrico de água no solo em função da densidade e do potencial mátrico, assim como as estimativas dos parâmetros de regressão para a resistência do solo à penetração (RP) em função do conteúdo volumétrico da água e densidade do solo, estão apresentadas nos apêndices 3 e 4, respectivamente.

De forma geral, em todos os tratamentos e nas duas profundidades do solo avaliadas, o IHO foi inferior à água disponível (CC-PMP) em função do aumento dos valores de densidade do solo (Figuras 11, 12, 13 e 14). Isso demonstra que em solos cultivados, muitas vezes, mesmo com os teores de água no solo entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente, o crescimento das plantas cultivadas pode ser afetado por outros atributos físicos do solo, como uma resistência limitante ao crescimento radicular ou uma porosidade de aeração insatisfatória. Segundo Araújo et al. (2004), em solos degradados, além da redução da quantidade de água disponível, a taxa de difusão de oxigênio e a resistência do solo à penetração podem limitar o crescimento das plantas na faixa de potenciais que determina a disponibilidade de água no solo. Desta forma, a caracterização dos efeitos dos sistemas de uso e manejo sobre a degradação e qualidade física do solo é mais bem quantificada por medidas integradoras destas modificações (SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 1998).

Alguns estudos comparando sistemas de cultivo com áreas sob mata nativa evidenciam adequadamente esses efeitos (ARAÚJO et al., 2004; LEÃO et al., 2006). Nas áreas naturais, em praticamente todas as variações de densidade do solo (Ds), o IHO apresenta como limite superior e inferior os valores de umidade correspondentes a CC e ao PMP, respectivamente, corroborando as indicações de que solos sob mata nativa apresentam excelentes condições físicas (REYNOLDS et al., 2002).

Devido à maior compactação e desagregação das camadas mais superficiais no SSD, a profundidade de 7,5-12,5 cm, mesmo após três anos de rotações de

culturas, continuou apresentando menores valores de IHO, ou seja, maiores chances de condições inadequadas para o desenvolvimento radicular das plantas nessa camada do solo (Figuras 11, 12, 13 e 14). Na camada de 7,5-12,5 cm, os teores de água no solo para atender as necessidades das plantas quanto à resistência à penetração e a porosidade de aeração foram fortemente influenciados pelo aumento da D_s , ou seja, com a compactação do solo (Figuras 11 e 12). De maneira geral, é necessário aumentar os valores de umidade do solo para aumentar a lamina de água entre as partículas do solo e reduzir o atrito entre as partículas, e com isso ser possível manter a RP limitante de 2 MPa, mesmo aumentando os valores de densidade do solo. Quanto à aeração, em solos com elevado grau de compactação e com redução da porosidade total e de macroporos, o volume de ar do solo pode restringir o crescimento das plantas em valores de umidade inferiores àquele correspondente a CC. Nessa situação, o secamento do solo é necessário para que um maior volume de poros seja preenchido por ar e atinja um nível de aeração adequado. No entanto, na camada de 27,5-32,5 cm, a porosidade de aeração não foi o limite superior do IHO para toda a variação de D_s obtida (Figuras 13 e 14). De acordo com Topp et al. (1994) e Imhoff et al. (2001), a RP é o fator que mais reduz o IHO em solos sob diferentes condições de textura e manejo.

Quanto à diferenciação dos tratamentos na camada de 7,5-12,5 cm de profundidade, observam-se maiores amplitudes do IHO em função do cultivo das plantas de cobertura de primavera (Figuras 11 e 12). A presença das gramíneas de cobertura na primavera (cober crop e milheto), cultivadas por três safras, proporcionou uma maior amplitude de água no solo sem que ocorram restrições que possam afetar diretamente o desenvolvimento das plantas. Com relação à crotalária, essa planta de cobertura proporcionou valores intermediários de IHO, sendo inferiores aos obtidos no solo conduzido com gramíneas, no entanto, superiores ao solo mantido em pousio durante a primavera (Figuras 11 e 12). Devido à influência do cultivo no outono-inverno em alguns atributos do solo, no terceiro ano agrícola (Tabelas 11 e 19), era de se esperar que o sistema consorciado com sorgo granífero e braquiária ruziziensis ou mesmo a forrageira solteira, apresentassem maior amplitude nos teores de água sem que ocorressem restrições às plantas, de acordo com os parâmetros do IHO. No entanto, na camada de 7,5-12,5 cm de profundidade, somente as plantas de cobertura de primavera que apresentaram influência nas condições propostas pelo IHO (Figuras 11 e 12). Deve-se ressaltar também, que, apesar do cultivo de outono-inverno ter influenciado em algumas frações da

M.O e propriedades físicas do solo, os efeitos das plantas de cobertura de primavera, em geral, foram mais consistentes (Tabelas 11, 13, 14, 15, 16, 17 e 19).

As maiores amplitudes do IHO nos tratamentos com cober crop e milho na primavera devem-se, principalmente, pelos incrementos nos teores de água relativos à capacidade de campo e os menores teores de água para que a resistência à penetração se tornasse limitante, portanto, aumentando o IHO.

Quanto à RP, nos tratamentos sem plantas antecedentes à safra granífera de verão, além da RP ser o limite inferior do IHO em toda a variabilidade da Ds, a maior compactação do solo, avaliado através do aumento da Ds, exigiram que os teores de água para manter a RP em 2MPa fossem aumentados mais drasticamente quando comparado aos demais tratamentos (Figuras 11 e 12). Normalmente, a RP é o limite inferior do IHO nos solos cultivados, sendo afetada pelo aumento da Ds. Essa situação é agravada nos solos argilosos, mais propensos à compactação. No trabalho desenvolvido por Kaiser et al. (2009), em um Latossolo Vermelho argiloso, mesmo considerando a RP de 3MPa como limitante, essa substituiu o PMP como limite inferior do IHO para uma Ds de $1,28\text{Mg m}^{-3}$.

Para romper a compactação, destaca-se, entre outros métodos, a escarificação mecânica com subsolador, que torna o solo mais solto, sem inverter as camadas, diminuindo as restrições à penetração das raízes no perfil do solo. No entanto, essa não é uma prática desejável no SSD. Em contrapartida, no SSD com o cultivo de plantas de cobertura com sistema radicular vigoroso, devido aos bioporos deixados no perfil com a morte das raízes, os quais orientam o crescimento radicular em profundidade da cultura sucessora, a RP limitante para o crescimento das plantas pode ser superior à RP restritiva em sistemas com revolvimento do solo, em que a mobilização do solo causa a interrupção da continuidade dos macroporos e dos canais (CALONEGO, 2007). Assim, se fosse considerada uma RP limitante superior a 2 MPa para os manejos envolvendo o cultivo de plantas de cobertura, certamente aumentaria o IHO nesses tratamentos.

Cunha et al. (2004) verificaram que a resistência mecânica do solo à penetração é afetada pela presença de braquiária em sistema de rotação de culturas, apresentando menores valores de resistência à penetração, 2,3 a 2,7 MPa, na profundidade de 15 a 35 cm, contra 2,9 a 3,3 MPa para mesma profundidade no tratamento sem braquiária. Portanto, as espécies vegetais utilizadas em rotação têm a capacidade de influenciar na RP, o

que de fato, pode ter ocorrido na camada de 7,5-12,5 cm, devido ao maior crescimento de raízes nas camadas superficiais do solo (Figura 6). Deste modo, seriam necessários menores teores de água para serem atendidas as exigências da RP como limite inferior do IHO (Figuras 11 e 12).

Solos que possuem como limite superior do IHO o teor de água retida na CC podem ter o IHO aumentado com o incremento da matéria orgânica, devido à propriedade da M.O de reter grande quantidade de água em sua elevada microporosidade (“efeito esponja”), o que é de suma importância em solos com elevada macroporosidade e baixa quantidade de microporos. Já em solos com maior volume de microporos e baixa macroporosidade, com elevada retenção de água na CC, que pode limitar a PA de 10 %, o aumento da M.O auxilia na formação de macroagregados, equilibrando a relação entre macro e microporos, aumentando o IHO em situações em que a PA é o limite superior de água no solo para o máximo crescimento das plantas. No experimento em questão, apesar da porosidade de aeração sofrer grande influência pelo aumento da D_s , sendo necessários menores teores de água para atingir uma aeração de 10% (característica dos solos argilosos), os teores de água retidos na CC foram responsáveis pelo limite superior do IHO na grande maioria dos valores de D_s obtidos (Figuras 11, 12, 13 e 14). Portanto, o aumento dos teores de carbono orgânico e da agregação do solo promovidos pela presença do milho e do sorgo forrageiro, na camada de 0-10 cm, influenciaram na maior retenção de água correspondente à CC. Silva & Kay (1997) relataram a influência do carbono orgânico no aumento do IHO. Esses resultados condizem com a microporosidade e a porosidade total do solo na camada de 7,5-12,5 cm no terceiro ano agrícola (tabela 19), as quais foram aumentadas pela presença das gramíneas forrageiras como plantas de cobertura. Blainski et al. (2009), trabalhando em um solo com 73% de argila, também verificaram reduções nos teores de água para satisfazer uma PA de 10%. Em contrapartida, somente com uma D_s de $1,38 \text{ Mg m}^{-3}$ a PA substituiu a CC .

A densidade do solo crítica (D_{sc}), ou seja, em que o intervalo hídrico ótimo é zero, está apresentada na figura 15, para as camadas de 7,5-12,5 cm e 27,5-32,5 cm de profundidade. A D_{sc} foi definida, segundo Silva & Kay (1997), como aquela em que o IHO é igual a zero, ou seja, aquela na qual o limite inferior cruza com o limite superior do intervalo, a partir da qual ocorreriam limitações severas ao desenvolvimento das plantas, independente da umidade do solo.

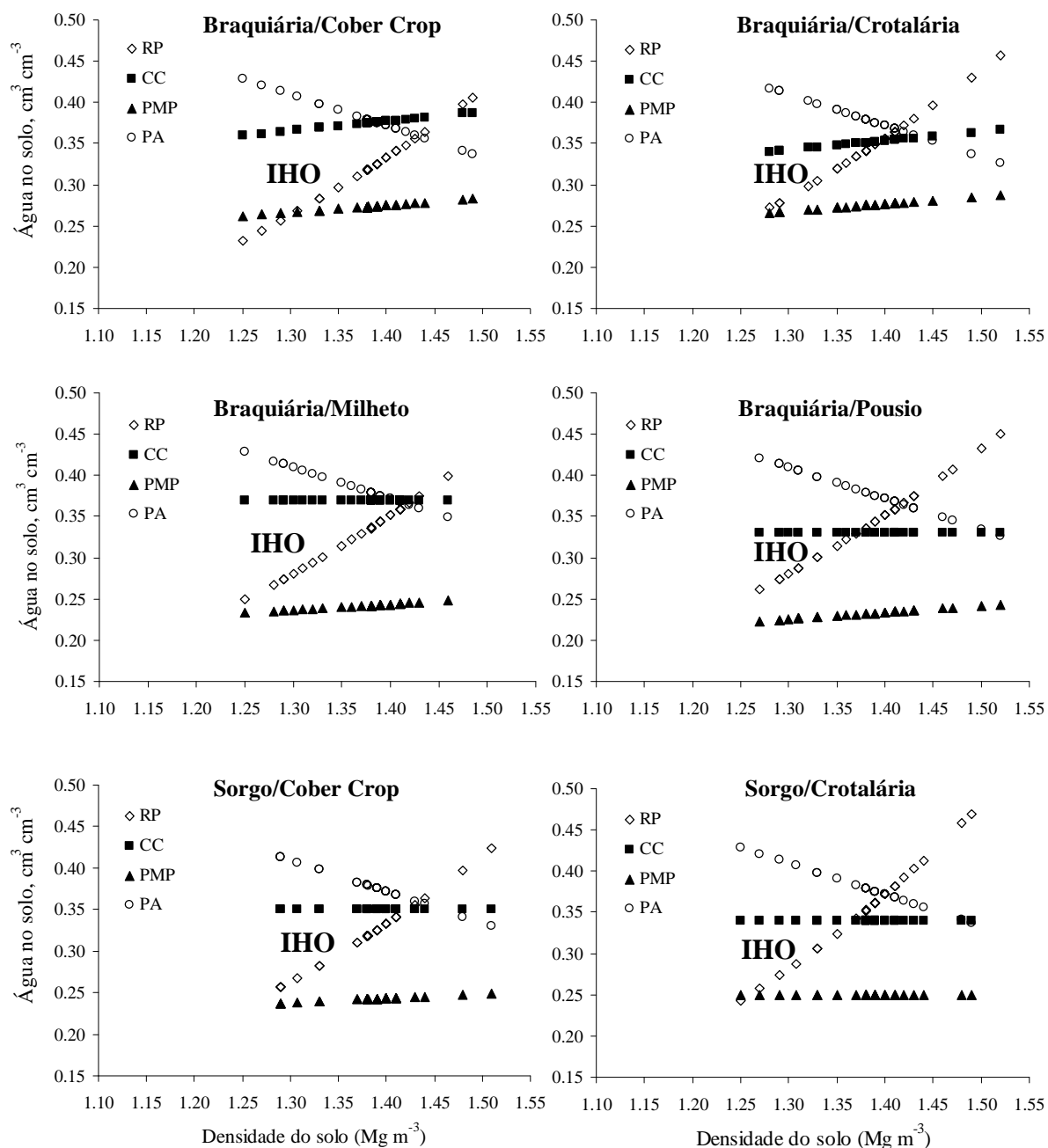


Figura 11. Variação do conteúdo de água volumétrica com a densidade do solo, para limites críticos da porosidade de aeração (PA), capacidade de campo (CC), resistência do solo à penetração de 2 MPa (RP) e ponto de murcha permanente (PMP), na camada de 7,5-12,5 cm, três anos após diferentes rotações de culturas. IHO: intervalo hídrico ótimo. Dezembro/2008.

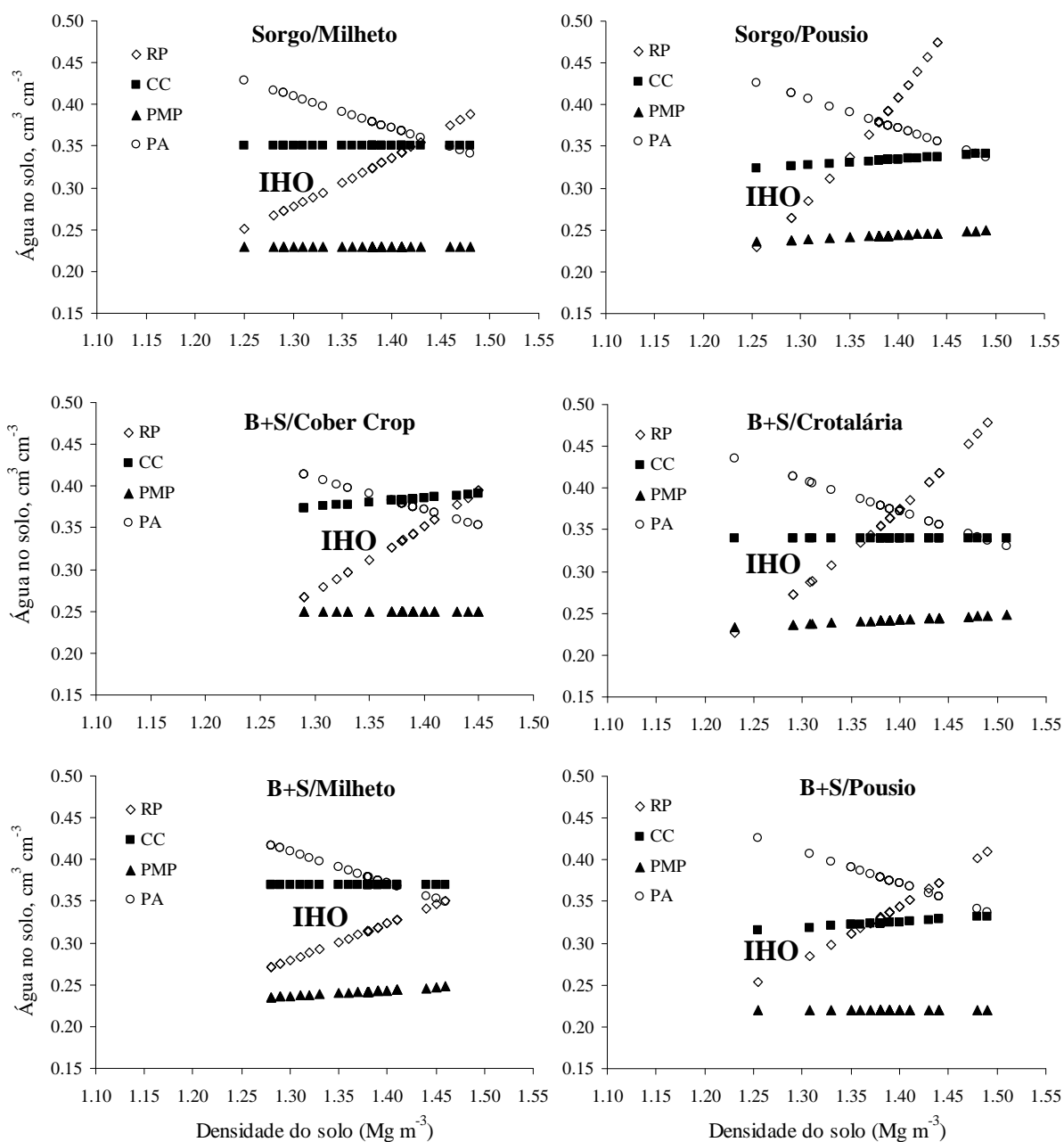


Figura 12. Variação do conteúdo de água volumétrico com a densidade do solo, para limites críticos da porosidade de aeração (PA), capacidade de campo (CC), resistência do solo à penetração de 2 MPa (RP) e ponto de murcha permanente (PMP), na camada de 7,5-12,5 cm, três anos após diferentes rotações de culturas. B+S: Braquiária + Sorgo. IHO: intervalo hídrico ótimo. Dezembro/2008.

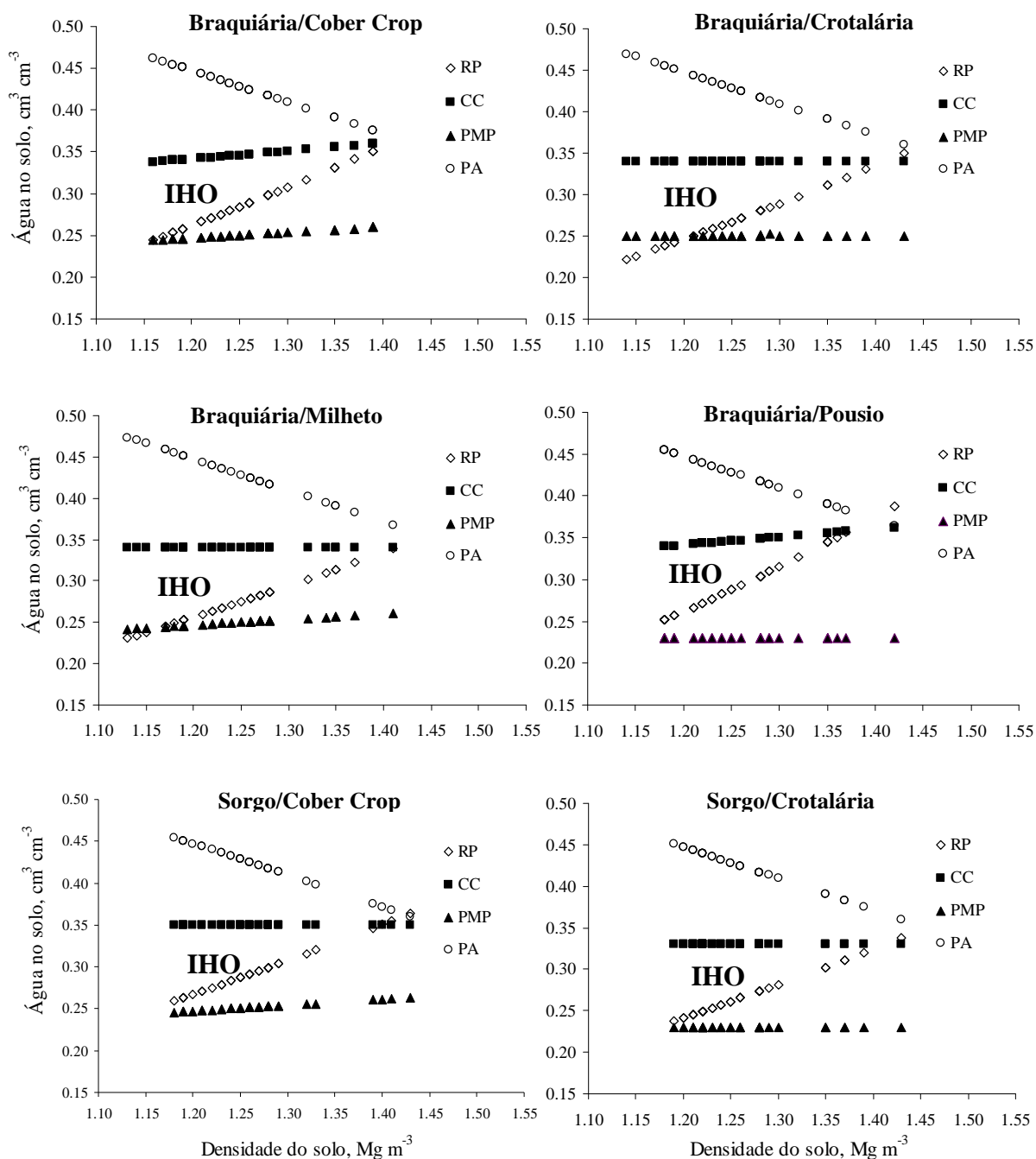


Figura 13. Variação do conteúdo de água volumétrico com a densidade do solo, para limites críticos da porosidade de aeração (PA), capacidade de campo (CC), resistência do solo à penetração de 2 MPa (RP) e ponto de murcha permanente (PMP), na camada de 27,5-32,5 cm, três anos após diferentes rotações de culturas. IHO: intervalo hídrico ótimo. Dezembro/2008.

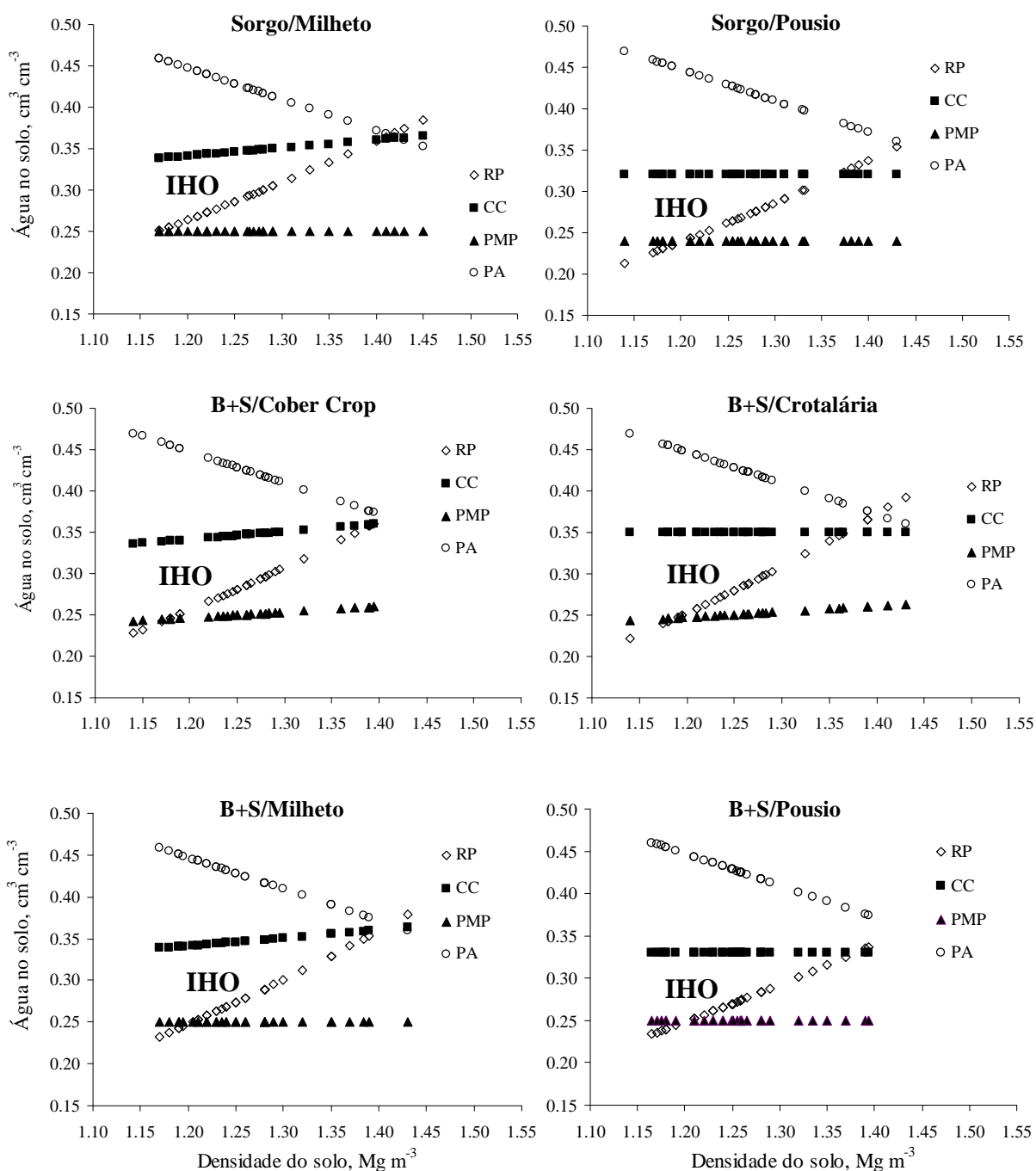


Figura 14. Variação do conteúdo de água volumétrico com a densidade do solo, para limites críticos da porosidade de aeração (PA), capacidade de campo (CC), resistência do solo à penetração de 2 MPa (RP) e ponto de murcha permanente (PMP), na camada de 27,5-32,5 cm, três anos após diferentes rotações de culturas. B+S: Braquiária + Sorgo. IHO: intervalo hídrico ótimo. Dezembro/2008.

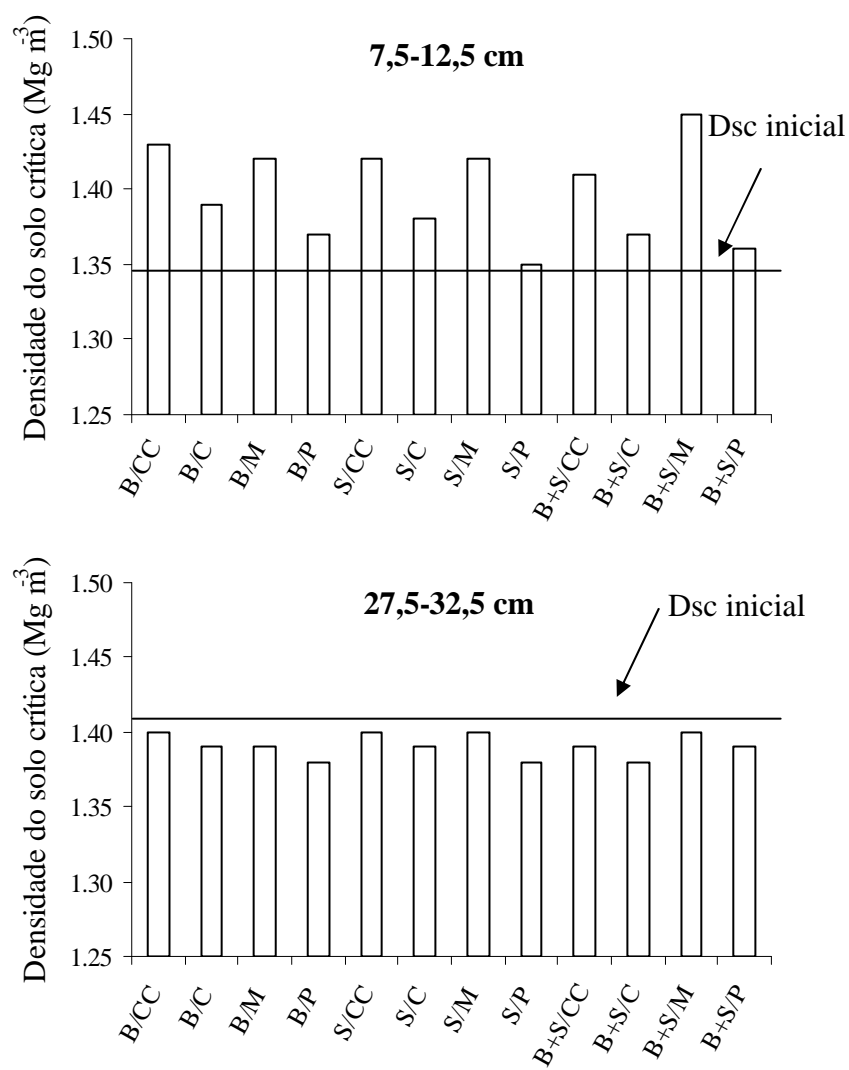


Figura 15. Densidade do solo crítica (IHO=0) nas camadas de 7,5-12,5 e 27,5-32,5 cm de profundidade, no terceiro ano do experimento. B: brachiaria ruziziensis; CC: cober crop; C: crotalária juncea; M: milho; P: pousio; S: sorgo. Dezembro/2008.

Na camada amostrada mais superficialmente, os resultados evidenciam maiores Dsc para as rotações envolvendo as gramíneas de cobertura (cober crop e milho), e, em um plano secundário, o cultivo da crotalária na primavera. O solo mantido em pousio na primavera, além de apresentar valores inferiores ao uso das plantas de cobertura,

manteve uma Dsc com valores próximos à caracterização da área experimental, ao redor de $1,35 \text{ Mg m}^{-3}$, indicando a eficiência das plantas de cobertura na recuperação de solos compactados, proporcionando melhores condições para o desenvolvimento das culturas sucessoras.

Assim como para a amplitude do IHO, a Dsc na camada de 27,5-32,5 cm sofreu poucas alterações em função das diferentes rotações de culturas, pois os efeitos dos cultivos limitaram-se nas camadas mais superficiais do perfil do solo.

A Dsc pode ser considerada um “semáforo” da qualidade estrutural do solo. As condições de umidade ideais, para o desenvolvimento e crescimento das plantas, ocorrem entre os limites superior e inferior do IHO. As condições são limitantes quando ficam acima ou abaixo dos limites do IHO, e críticas ao crescimento das plantas quando a densidade do solo estiver acima da densidade onde o IHO é nulo (SILVA & KAY, 1996, 1997; COLLARES et al., 2006). A densidade crítica obtida por meio do IHO auxilia na tomada de decisões diante das condições de manejo adotadas ou a serem adotadas em determinado solo (FREDDI et al., 2009; KAISER et al., 2009). No trabalho de Leonel et al. (2007), o IHO diminuiu com o aumento da compactação, pela RP, até atingir Dsc de $1,40 \text{ Mg m}^{-3}$, valor próximo a Ds de $1,32 \text{ Mg m}^{-3}$, a partir da qual a produtividade em casca do amendoim decresceu no campo. Assim, o IHO foi útil no monitoramento da qualidade física do solo para a cultura do amendoim (LEONEL et al., 2007).

Os tratamentos com cultivo das plantas de cobertura, com Dsc mais elevadas, indicam uma melhor estruturação do solo, em que mesmo com o aumento da compactação, as chances em que não ocorram restrições ao crescimento das plantas, seja por resistência à penetração, aeração ou umidade inadequada, são maiores. Em contrapartida, solos menos estruturados e desagregados, representados pelos tratamentos mantidos no pousio na primavera, valores de Dsc crítica baixos indicam que com pequeno aumento da densidade do solo as plantas estarão sempre em condições inadequadas para o desenvolvimento, independente dos teores de água no solo (Figuras 11 e 12).

A maior Dsc na camada de 7,5-12,5 cm foi obtida repetindo por três anos o cultivo de sorgo consorciado com braquiária como safra de outono-inverno e com a utilização do milho como espécie de cobertura antecedendo a soja. Esse tratamento permitiu um valor de Dsc igual a $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$, em virtude da baixa necessidade de aumento no teor de

volumétrico de água para manter a RP em 2 MPa e incremento dos teores de água na capacidade de campo. Um elevado valor de Dsc permite que grande parte das amostras coletadas para determinação do IHO esteja com Ds abaixo da Dsc, o que, de acordo com Silva & Kay (1997), reduz a probabilidade de ocorrência de condições altamente restritivas ao crescimento radicular.

Os valores de Dsc na camada de 7,5-12,5 cm apresentaram correlação positiva com os teores de carbono orgânico da camada de 5-10 cm, das amostras coletadas no terceiro ano agrícola (Tabela 20). Os teores de carbono orgânico particulado e os teores de carbono orgânico na fração >2mm foram as frações que apresentaram efeito benéfico na Dsc. Portanto, o fracionamento físico da matéria orgânica, atualmente amplamente estudado devido à maior sensibilidade aos efeitos de práticas agrícolas nos estoques de carbono no solo (DOU et al., 2008; GULDE et al., 2008), também mostrou-se como bom indicador de melhorias da qualidade física do solo e estreita relação com o IHO, através do aumento da Dsc (Tabela 20). O aumento da M.O e da estruturação do solo, aumenta a Ds crítica, ou seja, aumenta a Ds em que o IHO se iguala a zero, pelo fato de aumentar o IHO e por aumentar a capacidade do solo em receber cargas sem sofrer deformações plásticas. Além disso, o aumento da M.O e da agregação do solo diminui a Ds e a RP reduzindo o teor de água no solo que propicie a RP crítica de 2 MPa, que comumente é o limite inferior do IHO em solos argilosos compactados. Para Peche Filho (1999), o material orgânico presente no solo, mas que ainda não entrou em processo acelerado de decomposição tem o papel de prevenção contra a compactação, pois aumenta a compressibilidade, propiciando aeração e diminuindo o efeito do rearranjo das partículas do solo causado pelo tráfego de máquinas agrícolas.

Considerando os valores de Dsc como ferramenta para avaliar o efeito dos tratamentos na qualidade estrutural do solo, pode-se dizer que as rotações envolvendo o cultivo de plantas de cobertura por três anos consecutivos, com maior destaque para as gramíneas, propiciaram na camada de 7,5 a 12,5 cm, os melhores resultados, sendo que com o cultivo de primavera antecedendo a soja obtiveram-se os maiores incrementos nos valores de Dsc (Figura 15). Esses resultados corroboram as afirmações de Calonego (2007), em que o cultivo de primavera, antecedente à soja, proporcionou maiores ganhos nos valores de Dsc em relação ao cultivo de outono-inverno.

4.12. Produtividade da soja

A produtividade de grãos de soja, nas safras agrícolas de 2006/2007, 2007/2008 e 2008/2009, não diferiu em função dos cultivos de outono-inverno e primavera. A interação das causas de variação também não foi significativa (Tabela 21). Mesmo comportamento foi obtido para a média da produtividade da soja nos três anos agrícolas (Tabela 21). Por outro lado, o efeito do cultivo de primavera na produtividade da soja ao longo dos anos, avaliado pela probabilidade de F, mostra uma tendência de possíveis ganhos em produtividade, no caso da continuidade do experimento, com valores de 37, 28 e 13%, para as safras 2006/2007, 2007/2008 e 2008/2009, respectivamente. A soma da produtividade da soja nos três anos agrícolas, afetada pelas plantas de cobertura de primavera, apresentou uma probabilidade de F de 10%. Esses resultados demonstram que em períodos mais longos de avaliação, o cultivo de plantas de cobertura antecedentes à soja pode proporcionar ganhos mais consideráveis na produtividade de grãos.

A produtividade de grãos foi aumentada pelas rotações de culturas ao longo do experimento, no entanto, esse comportamento foi constatado em todos os tratamentos. No terceiro ano agrícola foi utilizado um cultivar de soja diferente das duas safras anteriores. Esse material pode ter sido responsável pelos maiores ganhos de produtividade no último ano agrícola (Tabela 21). Portanto, as maiores produtividades no último ano do experimento, obtidas em todas as situações, podem não estar relacionadas com os atributos físicos do solo e com a matéria orgânica nas camadas mais superficiais, que de forma geral, depois de três anos de rotação de culturas, foram melhorados em todos os tratamentos, principalmente naqueles com cultivo de sorgo consorciado ou braquiária solteira no outono-inverno, combinados com as plantas de cobertura em sucessão, com maior ênfase para o cober crop e milho (Tabelas 11, 13, 14, 15, 16, 17 e 19). O maior crescimento de raízes de soja nas camadas de 0-5 e 5-10 cm, influenciado pelas plantas de cobertura, proporcionou maior volume de solo explorado, o que também não significou incrementos na produtividade de grãos.

De acordo com os limites propostos pelo IHO, em que não há restrições ao desenvolvimento das plantas, quanto à aeração, resistência à penetração do sistema radicular e água disponível, as plantas de soja cultivadas nas rotações envolvendo as plantas de cobertura, apresentaram menores chances de sofrerem alguma restrição ao

desenvolvimento, devido à maior amplitude nos teores de água do IHO na camada de 7,5-12,5 cm (Figuras 11 e 12). Em contrapartida, mesmo com condições mais favoráveis ao desenvolvimento da soja, os tratamentos supracitados não apresentaram ganhos em produtividade (Tabela 21). O crescimento aéreo do milho foi diminuído de acordo com o aumento da frequência que os teores de água estivessem fora dos limites do IHO (SILVA & KAY, 1996). Segundo os autores, o desenvolvimento vegetal apresenta relação inversa ao número de medições dos teores de água no solo fora do IHO.

No experimento em questão, não foram monitorados diariamente os teores de água no solo. Dessa forma, não é possível concluir se durante o desenvolvimento da soja, mesmo em condições de menor IHO, a água do solo esteve fora do limite inferior ou superior, prejudicando o desenvolvimento da soja. Além do mais, os estágios de desenvolvimento das plantas, em que ocorrem as limitações propostas pelo IHO, também são importantes para relacionar o IHO com a produtividade das culturas. A cultura da soja apresenta considerável tolerância a algumas adversidades climáticas no estágio de desenvolvimento vegetativo. Por outro lado, as mesmas restrições podem gerar perdas consideráveis no rendimento de grãos se ocorrerem nos estágios de pegamento de vagens e/ou enchimento de grãos (EMBRAPA, 2008). Durante a condução do experimento, nos três anos agrícolas, a distribuição de chuvas foi considerada adequada, não ocorrendo períodos longos por estresse hídrico (Figura 1).

No experimento desenvolvido por Klein & Camara (2007), as limitações propostas pelo IHO não afetaram o desenvolvimento e o rendimento de grãos da cultura da soja, em razão das condições climáticas favoráveis durante todo o ciclo da cultura, conduzida em um Latossolo Vermelho sob plantio direto.

No SSD, solos com densidade abaixo da crítica e com macroporosidade próximas de 10 %, apresentam menor efeito sobre o crescimento radicular, mesmo que a resistência do solo à penetração esteja acima de 2 MPa (COLLARES et al., 2006), pois os poros resultantes dos cultivos anteriores representam os caminhos preferenciais ao crescimento das raízes (STIRZAKER et al., 1996; RASSE & SMUCKER, 1998), permitindo que as camadas mais profundas do solo sejam ocupadas na busca de água e nutrientes. A bioporosidade pode ser aumentada com o uso de plantas de cobertura com sistema radicular capaz de romper camadas compactadas e formar poros novos, contínuos e

estáveis (ABREU et al., 2004; KAISER et al., 2009). Dessa forma, nem sempre se observa resposta nas produtividades de grãos quando o solo mantém resistência de 2 MPa por determinado período.

Mesmo na ausência de plantas de cobertura na primavera, devido à ausência de revolvimento do solo, as subparcelas mantidas em pousio também podem ter apresentado bioporos resultantes dos cultivos anteriores, no entanto, em menores quantidades. Apesar de menor desenvolvimento radicular da soja em sucessão ao pousio (Figura 7), o perfil do solo explorado pode ter proporcionado condições suficientes para o crescimento da lavoura de soja.

Tabela 21. Análise de variância e produtividade média dos grãos de soja (kg ha^{-1}) em função dos cultivos de outono-inverno e primavera, nos anos agrícolas de 2006/2007, 2007/2008 e 2008/2009. Botucatu-SP.

Tratamentos	Produtividade (kg ha^{-1})			Total
	2006/2007	2007/2008	2008/2009	
Outono-Inverno				
Braquiária (B)	2865	3014	3448	9327
Sorgo (S)	2867	3005	3338	9210
S+B	2840	3067	3430	9337
Primavera				
Cober crop	2856	3115	3437	9408
Crotalária	2865	3102	3497	9464
Milheto	2903	3098	3499	9500
Pousio	2806	2946	3354	9106
Probab. F				
Outono-Inverno (I)	0,8133	0,8326	0,9820	0,7821
Primavera (P)	0,3680	0,2785	0,1280	0,1007
IxP	0,9271	0,9552	0,9618	0,8841
CV				
Outono-Inverno	4,70	15,01	12,58	7,84
Primavera	4,62	6,78	8,99	8,25

5. CONCLUSÕES

As melhorias proporcionadas pelas rotações de culturas nas propriedades físicas do solo se estendem para camadas mais profundas com a sucessão dos cultivos. As espécies de cobertura conduzidas na primavera apresentam efeitos mais rápidos e consistentes do que o cultivo de outono-inverno.

A produção de fitomassa e o crescimento vigoroso das raízes das espécies utilizadas em rotação têm influência positiva na formação de macroagregados num solo com estrutura degradada, com reflexos em outras características físicas do solo, como a porosidade e a retenção de água.

A rotação das culturas soja e crotalária, apesar da maior oferta de nitrogênio, não acumula mais matéria orgânica no solo comparada ao uso só de gramíneas.

O cultivo da braquiária e das plantas de cobertura cober crop ou milho tem efeito positivo nas frações de carbono do solo.

O IHO e a densidade do solo crítica na camada de 7,5-12,5 cm foram influenciados somente pelo cultivo de primavera, de forma geral, na seguinte ordem: cober crop = milho > crotalária > pousio.

A melhoria das condições físicas do Latossolo ocorreu com aportes de matéria seca, em média, menores do que os preconizados na literatura para viabilizar o SSD.

O fracionamento da matéria orgânica demonstra grande sensibilidade em avaliar o efeito positivo do cultivo da braquiária e das plantas de cobertura nas frações de carbono do solo, as quais atuam nas propriedades físicas do solo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDALLA, M.; JONES, M.; WILLIAMS, M. Simulation of N₂O fluxes Irish arable soils: effect of climate change and management. **Biology and Fertility of Soils**, v.46, p.247-260, 2010.

ABID, M.; LAL, R. Tillage and drainage impact on soil quality. I: Aggregate stability, carbon and nitrogen pools. **Soil & Tillage Research**, v.100, p.89-98, 2008.

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

ALBUQUERQUE, J.A.; REINERT, D.J.; FIORIN, J.E.; RUEDELL, J.; PETRERE, C.; FONTINELLI, F. Rotação de culturas e sistemas de manejo do solo: efeito sobre a forma da estrutura do solo ao final de sete anos. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v.19, p.115-119, 1995.

ALVARENGA, R.C.; LARA-CABEZAS, W.A.; CRUZ, J.C.; SANTANA, D.P. Plantas de cobertura de solo para sistema plantio direto. **Informativo Agropecuário**, v.22, n.208, p.25-36, 2001.

AMARAL, A.S.; ANGHINONI, I.; DESCHAMPS, F.C. Resíduos de plantas de cobertura e do calcário aplicado na superfície do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.115-123, 2004.

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

BALABANE, M.; PLANTE, F. Aggregation and carbon storage in silty soil using physical fractionation techniques. **European Journal of Soil Science**, v.55, p.415-427, 2004.

BALBINOT JUNIOR, A.A.; MORAES, A.; VEIGA, M.; PELISSARI, A.; DIECKOW, J. Integração lavoura-pecuária: intensificação de uso de áreas agrícolas. **Ciência Rural**, v.39, p.1925-1933, 2009.

BARRETO, P.A.B.; GAMA-RODRIGUES, E.F.; GAMA-RODRIGUES, A.C.; BARROS, N.F.; FONSECA, S. Atividade microbiana, carbono e nitrogênio da biomassa microbiana em plantações de eucalipto, em seqüência de idades. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.611-619, 2008.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G.A.; SILVA, L.S.; CANELLAS, L.P.; CAMARGO, F.A.O. (Eds.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2ed. Porto Alegre: Metropole, 2008. p.7-18.

BAYER, C.; DIECKOW, J.; AMADO, T.J.C.; ELTZ, F.L.P.; VIEIRA, F.C.P. Cover Crop Effects Increasing Carbon Storage in a Subtropical No-Till Sandy Acrisol. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.40, p.1499-1511, 2009.

BEARE, M.H.; BRUCE, R.R. A comparison of methods for measuring water-stable aggregates: implications for determining environmental effects on soil structure. **Geoderma**, v.56, p.87-104, 1993.

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

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F. Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, p.581-588, 2004.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SILVA, A.P. Comparação de penetrômetros na avaliação da compactação de latossolos. **Engenharia Agrícola**, v.27, p.146-151, 2007.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SOUZA, Z.M.; ANDRIOLI, I.; ROQUE, C.G. Retenção de água em dois tipos de Latossolos sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.829-834, 2002.

BIANCHINI, A.J.C.S.; MAIA, P.S.G.; MAGALHÃES, P.S.G.; CAPELLI, N.; UMEZU, C.K. Penetrógrafo eletrônico automático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.6, p.332-336, 2002.

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

BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. 2ed. Madison: ASA, 1986. p.363-375.

BLANCO-CANQUI, H.; STONE, L.R.; STAHLMAN, P.W. Soil Response to Long Term Cropping Systems on an Argiustoll in the Central Great Plains. **Soil Science Society of America Journal**, v.11, p.602-611, 2010.

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**, v.34, p. 1663-1667, 1999.

BORGES, E.N.; NOVAIS, R.F. de.; REGAZZI, A.J.; FERNANDES, B.; BARROS, N.F. Respostas de variedades de soja à compactação de camadas de solo. **Revista Ceres**, v.35, p.553-568, 1988.

BORGHI, E.; CRUSCIOL, C.A.C. Produtividade de milho, espaçamento e modalidade de consorciação com *Brachiaria brizantha* em sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.42, 163–171, 2007.

BORTOLOZZO, A.R.; SANS, L.M.A. Selamento superficial e seus efeitos na taxa de infiltração: uma revisão. **Revista FactuCiência**, v.1, p.32-42, 2001.

BRADY, N.; WEIL, R. **The Nature and Properties of Soils**. 14ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2008. 975p.

BRAGAGNOLO, N.; MIELNICZUK, J. Cobertura do solo por resíduos de oito seqüências de culturas e seu relacionamento com a temperatura e umidade do solo, germinação e crescimento inicial do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.14, p.91-98, 1990.

BUSSCHER, W.J. Adjustment of that-tipped penetrometer resistance data to a common water content. **Transactions of the ASAE**, v.33, p.519-524, 1990.

CAIRES, E.F.; BLUM, J.; BARTH, G.; GARBUIO, F.J.; KUSMAN, M.T. Alterações químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na implantação do sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.275-286, 2003.

CALONEGO, J.C. **Uso de plantas de cobertura na recuperação de solo compactado**. Botucatu, 2007. 125f. Tese (Doutorado em Agronomia/Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

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

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

CAMBARDELLA, C.A.; ELLIOT, E.T. Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of America Journal**, v.56, p.777-783, 1992.

CAMPOS, B.C.; REINERT, D.J.; NICOLODI, R.; RUEDELL, J.; PETRERE, C. Estabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico após sete anos de rotação de culturas e sistemas de manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.19, p.121-126, 1995.

CARTER, M.R. Soil quality for sustainable land management: organic matter and aggregation interactions that maintain soil functions. **Agronomy Journal**, v.94, p.38-47, 2002.

CASSEL, D.K.; NIELSEN, D.R. Field capacity and available water capacity. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis: Part1 - Physical and mineralogical methods**. Madison: ASA/SSSA, 1986. p.901-926.

CASTRO FILHO, C.; CORSINI, P.C.; SOARES, D.; POLITANO, W. Acceptance of soil and water conservation strategies and technologies in Southern Brazil. In: BAUM, E.; WOLFF, P.; ZOBISCH, M.A. (Eds.). **Acceptance of soil and water conservation: Strategies and Technologies**, Topics in applied resource management in the tropics. Witzhausen: German Institute for Tropical and Subtropical Agriculture, 1993. v.3, p.341-363.

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**, v.22, p.527-538, 1998.

CATTELAN, A.J.; VIDOR, C. Sistemas de cultura e a população microbiana no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.14, p.125-132, 1990.

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

CHAKRABORTY, D.; GARG, R.N.; TOMAR, R.K.; DWIVEDI, B.S.; AGGARWAL, P.; SINGH, R.; BEHERA, U. K.; THANGASAMY, A.; SINGH, D. Soil Physical Quality as Influenced by Long-Term Application of Fertilizers and Manure Under Maize-Wheat System. **Soil Science**, v.175, p.128-136, 2010.

CHAN, K.Y., HEENAN, D.P., OATES, A. Soil carbon fractions and relationship to soil quality under different tillage and stubble management. **Soil & Tillage Research**, v.63, p.133-139, 2002.

CHRISTENSEN, B.T. **Organic matter in soil: Structure, function and turnover**. Tijele: DIAS, 2000. 95p. (Plant Production Report, 30).

COLLARES, G.L.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; KAISER, D.R. Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, p.1663-1674, 2006.

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

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 braquiária em sistemas de rotação de culturas. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DE SOLO E ÁGUA, 15., 2004, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria, 2004. CD-ROM.

DE LUCA, T.H. Relationship of 0,5 M K₂SO₄ extractable anthronereactive carbon to indices of microbial activity in forest soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v.30, p.1293-1299, 1998.

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

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

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

DIAS JUNIOR, M.S.; FERREIRA, M.M.; FONSECA, S.; SILVA, A.R.; FERREIRA, D.F. Avaliação quantitativa da sustentabilidade estrutural dos solos em sistemas florestais na região de Aracruz-ES. **Revista Árvore**, v.23, p.371-380, 1999.

DIEKOW, J.; MIELNICZUK, J.; KNICKER, H.; BAYER, C.; DICK, D.P.; KÖGEL-KNABNER, I. Carbon and nitrogen stocks in physical fractions of a subtropical Acrisol as influenced by long-term no-till cropping systems and N fertilisation. **Plant and Soil**, v.268, p.319-328, 2005.

DOU, F.; WRIGHT, A.L.; HONS, F.M. Sensitivity of labile soil organic carbon to tillage in wheat-based cropping systems. **Soil Science Society of America Journal**, v.72, p.1445-1453, 2008.

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**, v.1, p.92-102, 1990.

DUFRANC, G.; DECHEN, S.C.F.; FREITAS, S.S.; CAMARGO, O.A. Atributos físicos, químicos e biológicos relacionados com a estabilidade de agregados de dois latossolos em plantio direto no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.505-517, 2004.

EASH, N.S.; KARLEN, D.L.; PARKIN, T.B. Fungal contributions to soil aggregation and soil quality. In: DORAN, J.W. (Ed). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: ASA/SSSA, 1994. p.221-228.

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

ELLIOTT, E.T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.50, p.627-633, 1986.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo. **Cultivo do sorgo**. Disponível em: <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Sorgo/CultivodoSorgo_5ed/index.htm>. Acesso em 19 abr. 2010.

EMBRAPA. Centro Nacional e Pesquisa em Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa-SPI; Rio de Janeiro: Embrapa-Solos, 2006. 306 p.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Centro Nacional de Pesquisa da Soja. **Recomendações técnicas para a cultura da soja na região central do Brasil**. Londrina: Embrapa/Embrapa Soja, 1997. 171p.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Tecnologias de produção de soja-região central do Brasil 2009 e 2010**. Londrina: Embrapa Soja/Embrapa Cerrados/Embrapa Agropecuária Oeste, 2008. 262p.

FAGERIA, N.K.; BALIGAR, V.C. Ameliorating soil acidity of tropical oxisols by liming for sustainable crop production. **Advances in Agronomy**, v.99, p.345-399, 2008.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **World reference base for soil resources: World Soil Resources Reports**. Rome: FAO, 2006. n.103.

FEHR, W.R.; CAVINESS, C.E.; BURMOOD, D.T.; PENNINGTON, J.S. Stage of development descriptions for soybeans, *Glycine max* (L.) Merrill. **Crop Science**, v.11, p.29-31, 1971.

FERREIRA, M.M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de latossolos da Região Sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.515-524, 1999.

FIORIN, J.E. Plantas recuperadoras da fertilidade do solo. In: CURSO SOBRE ASPECTOS BÁSICOS DE FERTILIDADE DO SOLO SOB PLANTIO DIRETO, 1999, Cruz Alta. **Resumos de palestras**. Passo Fundo: Editora Aldeia Norte. 92p.

FLOWERS, M.D.; LAL, R. Axle load and tillage effects on soil physical properties and soybean grain yield on a mollic ochraqualf in northwest Ohio. **Soil and Tillage Research**, v.48, p.21-35, 1998.

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

FRANZLUEBBERS, A.J.; HANEY, R.L.; HONS, F.M. Relationships of chloroform fumigation-incubation to soil organic matter pools. **Soil Biology and Biochemistry**, v.31, p.395-405, 1999.

FREDDI, O.S.; CENTURION, J.F.; ARATANI, R.G.; BEUTLER, A.N. Compactação e intervalo hídrico ótimo no crescimento da parte aérea e produtividade da cultura do milho. **Irriga**, v.13, p.272-287, 2008.

GAMA-RODRIGUES, E.F. Biomassa microbiana e ciclagem de nutrientes. In: SANTOS, G.A.; CAMARGO, F.A.O. (Eds.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Gênese, 1999. p.227-243.

GARCIA, R.A.; CRUSCIOL, C.A.C.; CALONEGO, J.C.; ROSOLEM, C.A. Potassium cycling in a corn-brachiaria cropping system. **European Journal of Agronomy**, v.28, p.579-585, 2008.

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

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

GHANI, A.; DEXTER, M.; PERROTT, K.W. Hot-water extractable carbon in soils: a sensitive measurement for determining impacts of fertilisation, grazing and cultivation. **Soil Biology & Biochemistry**, v.35, p.1231-1243, 2003.

GOLCHIN, A.; OADES, J.M.; SKJEMSTAD, J.O.; CLARKE, P. Soil structure and carbon cycling. **Australian Journal of Soil Research**, v.32, p.1043-1068, 1994.

GONÇALVES, W.G.; JIMENEZ, R.L.; ARAÚJO FILHO, J.V.; ASSIS, R.L.; SILVA, G.P.; PIRES, F.R. Sistema radicular de plantas de cobertura sob compactação do solo. **Engenharia Agrícola**, v.26, p.67-75, 2006.

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**, v.32, p.180-186, 1968.

GUERRA, J.G.M.; SANTOS, G.A.; SILVA, L.S.; CAMARGO, F.A.O. Macromoléculas e substâncias húmicas. In: SANTOS, G.A.; SILVA, L.S.; CANELLAS, L.P.; CAMARGO, F.A.O. (Eds.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2ed. Porto Alegre: Metropole, 2008. p.19-26.

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

GULDE, S.; CHUNG, H.; AMELUNG, W.; CHANG, C.; SIX, J. Soil Carbon Saturation Controls Labile and Stable Carbon Pool Dynamics. **Soil Science Society of America Journal**, v.72, p. 605-612, 2008.

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 Science Society of America Proceedings**, v.34, p.20-25, 1955.

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

HARRIS, D.; HORWATH, W.R.; KESSEL, C. van. Acid fumigation of soils to remove carbonates prior to total organic carbon or carbon-13 isotopic analysis. **Soil Science Society of America Journal**, v.65, p.1853–1856, 2001.

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

HUANG, S.; PENG, X.; HUANG, Q.; ZHANG, W. Soil aggregation and organic carbon fractions affected by long-term fertilization in a red soil of subtropical China. **Geoderma**, v.154, p.364–369, 2010.

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

IMHOFF, S.C. **Indicadores de qualidade estrutural e trafegabilidade de Latossolos e Argissolos Vermelhos**. Piracicaba, 2002. 104p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

JOHNSON, J.F.; VOORHEES, W.B.; NELSON, W.W.; RANDALL, G.W. Soybean growth and yield as affected by surface and subsoil compaction. **Agronomy Journal**, v.82, p.973-979, 1990.

JORGE, J.A. **Física e manejo dos solos tropicais**. Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1985. 328p.

KAISER, D.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; COLLARES, G.L.; KUNZ, M. Intervalo hídrico ótimo no perfil explorado pelas raízes de feijoeiro em um latossolo sob diferentes níveis de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.845-855, 2009.

KAY, B.D. Rates of changes of soil structure under different cropping systems. **Advances in Soil Science**, v.12, p. 1-51, 1990.

KEMPER, W.D.; W.S. CHEPIL. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C.A.; EVANS, D.D.; WHITE, J.L.; ENSMINGE, L.E.; CLARK, F.E. (Eds.). **Methods of soil analysis**. Madison: ASA, 1965. p.499-510.

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

KLEIN, V.A.; BASEGGIO, M.; MADALOSSO, T. Indicadores da qualidade física de um Latossolo Vermelho distrófico típico sob plantio direto escarificado. **Ciência Rural**, v.39, p.2475-2481, 2009.

KLEIN, V.A.; CAMARA, R.K. Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em latossolo vermelho sob plantio direto escarificado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.221-227, 2007.

KLEIN, V.A.; LIBARDI, P.L.; SILVA, A.P. Resistência mecânica do solo à penetração sob diferentes condições de densidade e teor de água. **Engenharia Agrícola**, v.18, p.45-54, 1998.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: Klute, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. 2ed. Madison: ASA, 1986. p.635-662.

KLUTHCOUSKI, J.; COBUCCI, T.; AIDAR, H.; YOKOYAMA, L.P.; OLIVEIRA, I.P.; COSTA, J.L.S.; SILVA, J.G.; VILELA, L.; BACELLOS, A.O.; MAGNABOSCO, C.U. **Sistema Santa Fé**: Tecnologia Embrapa de integração lavoura-pecuária pelo consórcio de culturas anuais com forrageiras, em áreas de lavoura, nos sistemas direto e convencional. Santo Antonio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2000. 28p. (Circular técnica, 38)

LADD, J.N.; AMATO, M.; ZHOU, L.K.; SCHULTZ, J.E. Differential effects of rotation, plant residue and nitrogen fertilizer on microbial biomass and organic matter in an Australian Alfisol. **Soil Biology and Biochemistry**, v.26, p.821-831, 1994.

LAL, R. Soil management in the developing countries. **Soil Science**, v.165, p.57-72, 2000.

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

LEÃO, T.P.; SILVA, A.P. A simplified Excel_ algorithm for estimating the least limiting water range of soils. **Scientia Agricola**, v.61, n.6, p.649-654. 2004.

LEÃO, T.P.; SILVA, A.P.; MACEDO, M.C.M.; IMHOFF, S.; EUCLIDES, V.P.B. Least limiting water range: a potential indicator of changes in near-surface soil physical quality after the conversion of brazilian savanna into pasture. **Soil & Tillage Research**, v.88, p.279-285, 2006.

LEÃO, T.P.; SILVA, A.P.; PERFECT, E.; TORMENA, C.A. An algorithm for calculating the least limiting water range of soils. **Agronomy Journal**, v.97, p.1210-1215, 2005.

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

LEONEL, C.L.; CENTURION, M.A.P.C.; CENTURION, J.F.; BEUTLER, A.N.; FREDDI, O.J. Relação da compactação do solo com a cultura do amendoim. **Bioscience Journal**, v.23, p.70-81, 2007.

LIMA, C.L.R. **Compressibilidade de solos versus intensidade de tráfego em um pomar de laranja e pisoteio animal em pastagem irrigada**. Piracicaba, 2004. 70p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

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

LOPES, A.S.; WIETHOLTER, S.; GUILHERME, L.R.G.; SILVA, C.A. **Sistema Plantio Direto**: bases para o manejo da fertilidade do solo. São Paulo: ANDA, 2004. 110p.

LOSS, A.; PEREIRA, M.G.; SCHULTZ, N.; ANJOS, L.H.C.; SILVA, E.M.R. Carbono e frações granulométricas da matéria orgânica do solo sob sistemas de produção orgânica. **Ciência Rural**, v.39, p.1077-1082, 2009.

MALAVOLTA, E.A.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: Potafós, 1997. 201p.

MARSCHNER, H. **Mineral Nutrition of Higher Plants**. London: Academic Press, 1995. 889p.

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**, v.144, p.297-303, 1992.

MELO, V.P.; BEUTLER, A.N.; SOUZA, Z.M.; CENTURION, J.F.; MELO, W.J. Atributos físicos de Latossolos adubados durante cinco anos com biossólido. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, p.67-72, 2004.

MIELNICZUK, J. Matéria orgânica e sustentabilidade de sistemas agrícolas. In: SANTOS, G.; CAMARGO, F.A.O. (Orgs.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo**: ecossistemas tropicais e subtropicais. 1ed. Porto Alegre: Genesis, 1999, p.1-8.

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**, v.54, n.2, p.393-403, 1995.

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, 120f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

NEVES, C.M.N.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.; MACEDO, R.L.G.; TOKURA, A.M. Estoque de carbono em sistemas agrossilvopastoril, pastagem e eucalipto sob cultivo convencional na região noroeste do Estado de Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.28, p.1038-1046, 2004.

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

OLIVEIRA, F.H.T.; NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.V.H.; CANTARUTTI, R.B.; BARROS, N.F. Fertilidade do solo no sistema Plantio Direto. In: ALVAREZ, V.V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R.; BARROS, N.F.; MELLO, J.W.V.; COSTA, L.M. (Eds.) **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. v.2, p.393-486.

OLIVEIRA, G.C.; DIAS JÚNIOR, M.S.; RESCK, D.V.S.; CURI, N. Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p. 327-336, 2004.

PAUL, E.A.; CLARK, F.E. **Soil microbiology and biochemistry**. San Diego: Academic Press, 1996. 340p.

PAUL, E.A.; MORRIS, S.J.; BOHM, S. The determination of soil C pool sizes and turnover rates: biophysical fractionation and tracers. In: LAL, R.; KIMBLE, J.M.; FOLLETT, R.F.; STEWART, B.A. (Eds.). **Assessment methods for soil carbon**. Boca Raton: Lewis Publ., 2001. p.193-206.

PECHE FILHO, A. **Crêterios para avaliar a qualidade do plantio direto**. O Agrônomo, v.51, n.1, 1999.

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

RAIJ, B.; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avalia o da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico, 2001. 285p.

RASSE, D.P.; SMUCKER, A.J.M. Root recolonization of previous root channels in corn and alfalfa rotations. **Plant and Soil**, v.204, p.203-213, 1998.

REDDY, S.S.; NYAKATAWA, E.Z.; REDDY, K.C.; RAPER, R.L.; REEVES, D.W.; LEMUNYON, J.L. Long-term effects of poultry litter and conservation tillage on crop yields and soil phosphorus in cotton-cotton-corn rotation. **Field Crop Research**, v.114, p.311-319, 2009.

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.

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

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

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S.B.; CORRÊA, G.F. **Pedologia: base para distin o de ambientes**. Viçosa: NEPUT, 1995. 304p.

REYNOLDS, W.D.; BOWMAN, B.T.; DRURY, C.F.; TAN, C.S.; LU, X. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. **Geoderma**, v.110, p.131-146, 2002.

RHEINHEIMER, D.S.; CAMPOS, B.C.; GIACOMINI, S.J.; CONCEIÇÃO, P.C.; BORTOLUZZI, E.C. Comparação de métodos de determinação de carbono orgânico total no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.435-440, 2008.

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

RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; BRITO, O.R.; LANILLO, R.F.; FERREIRA, R. Compactação de solo: causas e efeitos. **Semina Ciência Agrária**, v.26, p.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**, v.53, p.259-266, 1994.

ROSOLEM, C.A.; CALONEGO, J.C.; FOLONI, J.S.S. Leaching of nitrate and ammonium from cover crop straws as affected by rainfall. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.36, p.819-831, 2005.

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**, v.65, p.109-115, 2002.

ROSS, P.J.; WILLIAMS, J.; BRISTOW, K.L. Equations for extending water-retention curves to drynees. **Soil Science Society of America Journal**, v.55, p.923-927, 1991.

SALTON, J.C.; FABRÍCIO, A.C.; MACHADO, L.A.Z.; OLIVEIRA, H. Pastoreio de aveia e compactação do solo. **Revista Plantio Direto**, v.69, p.32-34, 2002.

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

SANTOS, G.A. **Métodos de extração e dosagem das frações húmicas dos solos**. Seropédica, 1984, 148f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

SAXON, K.E.; McCOOL, D.K.; KENNY, J.F. Tillage and residues impacts on infiltration. In: FOK, Y. (Ed.). **Infiltration principles and practices**. Water Resources Research Center: Honolulu, 1988. p.509-513.

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

SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G.C.; DIAS JÚNIOR, M.S.; OLIVEIRA, L.F.C.; CASTRO, M.B. Pressão de preconsolidação e intervalo hídrico ótimo como indicadores de alterações estruturais de um latossolo e de um cambissolo sob cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.1419-1427, 2008.

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

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

SILVA, A.P.; KAY, B.D. Estimating of soil from properties and management the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, v.61, p.877-883, 1997.

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

SILVA, I.F.; MIELNICZUK, J. Ação do sistema radicular de plantas na formação e estabilização de agregados do solo. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v.21, p.113-117, 1997.

SILVA, M.L.N.; CURI, N.; BLANCANEAUX, P. Sistemas de manejo e qualidade estrutural de Latossolo Roxo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, p.2485-2492, 2000.

SILVA, R.H.; ROSOLEM, C.A. Crescimento radicular de espécies utilizadas como cobertura decorrente da compactação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p. 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**, v.37, p.855-860, 2002.

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

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**, v.26, p.1-8, 2002.

SILVEIRA, P.M.; STONE, L.F. Sistemas de preparo do solo e rotação de culturas na produtividade de milho, soja e trigo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, p.240-244, 2003.

SIMMONS, B.L.; COLEMAN, D.C. Microbial community response to transition from conventional to conservation tillage in cotton fields. **Applied Soil Ecology**, v.40, p.518-528, 2008.

SIQUEIRA, G.M.; VIEIRA, S.R.; DECHEN, S.C.F. Variabilidade espacial da densidade e da porosidade de um latossolo vermelho eutroférico sob semeadura direta por vinte anos. **Bragantia**, v.68, p.751-759, 2009.

SIX, J.; CALLEWAERT, P.; LENDERS, S.; De GRYZE, S.; MORRIS, S.J.; GREGORICH, E.G.; PAUL, E.A.; PAUSTIAN, K. Measuring and understanding carbon storage in afforested soils by physical fractionation. **Soil Science Society of America Journal**, v.66, p.1981–1987, 2002.

SIX, J.; PAUSTIAN, K.; ELLIOTT, E.T.; COMBRINK, C. Soil structure and soil organic matter: I-Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon. **Soil Science Society of America Journal**, v.64, p.681–689, 2000.

SOUZA, E.D.; COSTA, S.E.V.G.A.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P.C.F.; ANDRIGUETI, M.; CAO, E. Estoques de carbono orgânico e de nitrogênio no solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto, submetido a intensidades de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.1829-1836, 2009.

SOUZA, E.D.; COSTA, S.E.V.G.A.; LIMA, C.V.S.; ANGHINONI, I.; MEURER, E.J.; CARVALHO, P.C.F. Carbono orgânico e fósforo microbiano em sistemas de integração agricultura-pecuária submetidos a diferentes intensidades de pastejo em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.1273- 1282, 2008.

SPARLING, G.P.; WEST, A.W. A direct extraction method to estimate soil microbial C: Calibration *in situ* using microbial respiration and ^{14}C labelled cells. **Soil Biology and Biochemistry**, v.20, p.337-343, 1988.

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

STIRZAKER, R.J.; PASSIOURA, J.B.; WILMS, Y. Soil structure and plant growth: Impact of bulk density and biopores. **Plant and Soil**, v.185, p.151-162, 1996.

SWAN, J.B.; MONCRIEF, J.F.; VOOHEES, W.B. **Soil compaction causes, effects, and control**. St. Paul: University of Minnesota, 1987. 11p. (Agriculture Bulletin, 3115).

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant physiology**. 3ed. Sunderland: Sinauer Associates, 2002. 90p.

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

TENNANT, D.A. A test of a modified line intersect method of estimating root length. **Journal of Ecology**, v.63, p.995-1001, 1975.

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, Agriculture and Agri-Food Canada: Ottawa, 1994. 36p. (Technical report, 2)

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

TORRES, E.; SARAIVA, O.F.; PICCININ, J.L.; FARIAS, J.R.B.; GALERANI, P.R.; GAZZIERO, D.L.P. **Avaliação de sistemas de preparo do solo, rotação de culturas e semadura da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 1998. p.171-177 (Série Documentos)

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

TORRES, J.L.R.; PEREIRA, M.G.; FABIAN, A.J. Produção de fitomassa por plantas de cobertura e mineralização de seus resíduos em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.43, p.421-428, 2008.

VANCE, E.D.; BROOKES, P.C.; JENKINSON, D.S. Microbial biomass measurements in forest soils: determination of K_c values and test of hypotheses to explain the failure of the chloroform fumigation-incubation method in acid soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v.19, p.689-696, 1987.

VOMOCIL, J.A.; FLOCKER, W.J. Effect os soil compaction on storage and movement of soil, air and water. **American Society Agricultural Engineering**, v.4, p.242-246, 1966.

WANG, Q.R.; LI, Y.C.; KLASSEN, W. Changes of soil microbial biomass carbon and nitrogen with cover crops and irrigation in tomato field. **Journal of Plant Nutrition**, v.30, p.623-639, 2007.

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

XAVIER, F.A.S.; MAIA, S.M.F.; OLIVEIRA, T.S.; MENDONÇA, E.S. Biomassa microbiana e matéria orgânica leve em solos sob sistemas agrícolas orgânico e convencional na Chapada da Ibiapaba, CE. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.247-258, 2006.

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

ZONTA, E.; BRASIL, F.; GOI, S.R.; ROSA, M.M.T. 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.

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

APÊNDICES

Apêndice 1. Coeficientes de determinação e parâmetros calculados da curva característica da água no solo, no primeiro ano do experimento, nas profundidades de 0-5; 7,5-12,5; 15-20; 27,5-32,5 e 47,5-52,5 cm. Dezembro/2006.

Rotações ⁽¹⁾	Parâmetros da curva: $v = r + ((s - r) / (1 + (\Psi)^n))^m$					R ²
	α	n	m	Θ_r	Θ_s	
0-5 cm						
B/CC	0,0108	1,114	0,608	0,215	0,440	0,99**
B/C	0,0325	1,521	0,241	0,210	0,430	0,99*
B/M	0,0280	1,489	0,259	0,214	0,425	0,99**
B/P	0,0026	0,320	3,332	0,219	0,416	0,98**
S/CC	0,0031	0,338	2,225	0,217	0,433	0,97**
S/C	0,0189	1,429	0,428	0,224	0,420	0,99**
S/M	0,0285	1,511	0,229	0,220	0,432	0,99**
S/P	0,0037	0,389	3,698	0,215	0,411	0,99**
B+S/CC	0,0029	0,345	3,325	0,214	0,430	0,99**
B+S/C	0,0121	1,400	0,412	0,220	0,420	0,98*
B+S/M	0,0091	0,599	0,712	0,211	0,424	0,99**
B+S/P	0,0029	0,325	3,421	0,223	0,415	0,99**
7,5-12,5 cm						
B/CC	0,0026	0,881	0,295	0,240	0,412	0,96**
B/C	0,0139	0,992	0,309	0,239	0,423	0,99**
B/M	0,0289	1,459	0,089	0,236	0,418	0,99**
B/P	0,0002	0,428	3,998	0,241	0,410	0,99**
S/CC	0,0081	0,889	0,300	0,234	0,429	0,98**
S/C	0,0094	0,893	0,329	0,235	0,420	0,99**
S/M	0,0009	0,525	1,269	0,232	0,419	0,99**
S/P	0,0008	0,499	2,897	0,238	0,411	0,99*
B+S/CC	0,0113	0,759	0,287	0,240	0,428	0,99**
B+S/C	0,0088	0,612	0,421	0,241	0,420	0,99**
B+S/M	0,0091	0,399	0,629	0,240	0,424	0,99*
B+S/P	0,0021	0,881	1,298	0,238	0,418	0,99**
15-20 cm						
B/CC	0,0026	0,465	1,891	0,229	0,420	0,98**
B/C	0,0198	0,889	0,298	0,240	0,423	0,99**
B/M	0,0127	0,712	0,589	0,231	0,418	0,99**
B/P	0,0031	0,559	1,356	0,241	0,418	0,99**
S/CC	0,0254	0,998	0,256	0,232	0,426	0,99**
S/C	0,0058	0,512	1,425	0,231	0,421	0,99**
S/M	0,0047	0,666	1,099	0,230	0,420	0,98**
S/P	0,0165	1,455	0,225	0,238	0,411	0,98**
B+S/CC	0,0133	1,554	0,199	0,240	0,428	0,99**
B+S/C	0,0059	0,645	1,125	0,230	0,421	0,99**
B+S/M	0,0024	0,329	2,498	0,240	0,423	0,97**
B+S/P	0,0099	0,784	0,499	0,238	0,418	0,99**

continua...

continuação do apêndice 1...

Rotações ⁽¹⁾	Parâmetros da curva: $v = r + ((s - r) / (1 + (\Psi)^n))^m$					R ²
	α	n	m	Θ_r	Θ_s	
27,5-32,5 cm						
B/CC	0,0825	0,389	0,998	0,221	0,440	0,99**
B/C	0,0694	0,325	1,845	0,232	0,436	0,99**
B/M	0,1025	0,985	0,689	0,229	0,444	0,99**
B/P	0,0045	0,256	3,589	0,222	0,440	0,96*
S/CC	0,0059	0,299	3,845	0,227	0,426	0,98**
S/C	0,0091	0,689	1,352	0,231	0,441	0,99**
S/M	0,3250	3,225	0,045	0,233	0,442	0,99**
S/P	0,0458	2,224	0,125	0,223	0,433	0,99**
B+S/CC	0,0099	0,785	1,125	0,231	0,442	0,99*
B+S/C	0,1009	1,325	0,488	0,222	0,445	0,98**
B+S/M	0,0081	0,577	0,697	0,228	0,446	0,99**
B+S/P	0,0069	0,425	1,116	0,225	0,442	0,99**
47,5-52,5 cm						
B/CC	0,0825	0,722	0,589	0,234	0,462	0,99**
B/C	0,1225	1,065	0,269	0,231	0,465	0,99**
B/M	0,0478	0,652	0,994	0,228	0,452	0,98**
B/P	0,0235	0,588	0,998	0,230	0,461	0,98**
S/CC	0,0051	0,412	1,204	0,226	0,465	0,97**
S/C	0,0089	0,444	1,025	0,231	0,471	0,99*
S/M	0,0761	0,659	0,895	0,224	0,459	0,99**
S/P	0,0981	0,842	0,458	0,223	0,452	0,99**
B+S/CC	0,1026	0,9856	0,394	0,223	0,458	0,98**
B+S/C	0,0843	0,759	0,564	0,222	0,469	0,99**
B+S/M	0,0128	0,497	1,087	0,220	0,458	0,99**
B+S/P	0,0035	0,298	1,256	0,225	0,461	0,98**

⁽¹⁾ B: braquiária; S: sorgo; B+S: braquiária + sorgo; CC: cober crop; C: crotalária; M: milheto; P: pousio.

Apêndice 2. Coeficientes de determinação e parâmetros calculados da curva característica da água no solo, no terceiro ano do experimento, nas profundidades de 0-5; 7,5-12,5; 15-20; 27,5-32,5 e 47,5-52,5 cm. Dezembro/2008.

Rotações ⁽¹⁾	Parâmetros da curva: $v = r + ((s - r) / (1 + (\Psi)^n))^m$					R ²
	α	n	m	Θ_r	Θ_s	
0-5 cm						
B/CC	0,0032	0,652	0,702	0,225	0,450	0,99**
B/C	0,0021	0,525	0,822	0,230	0,453	0,99**
B/M	0,0127	0,786	0,321	0,214	0,456	0,99**
B/P	0,0002	0,452	3,751	0,219	0,418	0,99**
S/CC	0,0042	0,432	0,784	0,217	0,449	0,99**
S/C	0,0028	0,601	0,589	0,224	0,450	0,99*
S/M	0,0091	0,543	0,732	0,228	0,440	0,98**
S/P	0,0002	0,289	4,238	0,215	0,415	0,98**
B+S/CC	0,0089	0,540	0,689	0,218	0,444	0,99**
B+S/C	0,0690	2,498	0,289	0,220	0,438	0,99**
B+S/M	0,0811	3,873	0,243	0,210	0,455	0,99**
B+S/P	0,0004	0,324	2,872	0,220	0,422	0,99**
7,5-12,5 cm						
B/CC	0,0713	1,239	0,091	0,241	0,445	0,98**
B/C	0,0008	0,229	2,872	0,240	0,442	0,99**
B/M	0,0568	1,158	0,107	0,236	0,453	0,99**
B/P	0,0003	0,211	4,181	0,240	0,429	0,99**
S/CC	0,0023	0,603	0,329	0,234	0,439	0,99**
S/C	0,0012	0,458	0,512	0,235	0,441	0,99**
S/M	0,0048	0,821	0,412	0,232	0,438	0,97**
S/P	0,0001	0,199	3,151	0,238	0,425	0,99**
B+S/CC	0,0029	0,611	0,832	0,243	0,452	0,99**
B+S/C	0,0039	0,756	0,289	0,241	0,455	0,99**
B+S/M	0,0590	2,011	0,093	0,244	0,462	0,99*
B+S/P	0,0005	0,281	3,981	0,238	0,437	0,99**
15-20 cm						
B/CC	0,0019	0,709	0,716	0,239	0,454	0,99**
B/C	0,0008	0,301	2,813	0,238	0,461	0,99**
B/M	0,0028	0,698	0,486	0,239	0,465	0,99**
B/P	0,0004	0,298	3,918	0,243	0,433	0,99**
S/CC	0,0051	0,567	0,812	0,233	0,444	0,99**
S/C	0,0049	0,813	0,499	0,231	0,440	0,98**
S/M	0,0025	0,711	0,672	0,232	0,461	0,99**
S/P	0,0001	0,183	4,813	0,237	0,443	0,99**
B+S/CC	0,0492	1,321	0,225	0,241	0,473	0,99**
B+S/C	0,0891	2,846	0,386	0,239	0,455	0,99**
B+S/M	0,0092	1,099	1,179	0,239	0,471	0,99**
B+S/P	0,0002	0,245	4,129	0,238	0,454	0,99**

continua...

continuação do apêndice 2...

Rotações ⁽¹⁾	Parâmetros da curva: $v = r + ((s - r) / (1 + (\Psi)^n))^m$					R ²
	α	n	m	Θ_r	Θ_s	
27,5-32,5 cm						
B/CC	0,0452	0,815	0,299	0,222	0,441	0,99**
B/C	0,0235	0,616	0,591	0,230	0,436	0,99**
B/M	0,0089	0,409	0,401	0,228	0,443	0,96**
B/P	0,0011	0,328	0,953	0,222	0,440	0,99**
S/CC	0,0333	0,911	0,212	0,226	0,433	0,99*
S/C	0,0421	0,581	0,449	0,230	0,445	0,98**
S/M	0,0512	0,722	0,742	0,232	0,442	0,99**
S/P	0,0041	0,422	0,801	0,224	0,432	0,99**
B+S/CC	0,0643	0,921	0,281	0,235	0,441	0,99**
B+S/C	0,0091	0,609	0,308	0,222	0,445	0,99**
B+S/M	0,0231	0,492	0,422	0,221	0,446	0,99**
B+S/P	0,0031	0,434	0,510	0,225	0,442	0,99**
47,5-52,5 cm						
B/CC	0,0634	0,887	0,289	0,225	0,462	0,99**
B/C	0,0911	0,906	0,514	0,230	0,455	0,99**
B/M	0,0376	0,818	0,301	0,228	0,451	0,99*
B/P	0,0441	0,719	0,553	0,228	0,460	0,99**
S/CC	0,0421	0,821	0,361	0,225	0,465	0,97**
S/C	0,0297	0,798	0,447	0,233	0,471	0,99**
S/M	0,0369	0,813	0,442	0,224	0,461	0,99**
S/P	0,0357	0,873	0,501	0,223	0,452	0,99**
B+S/CC	0,0864	0,843	0,285	0,226	0,458	0,99**
B+S/C	0,0761	0,679	0,348	0,222	0,464	0,99**
B+S/M	0,0651	0,697	0,462	0,230	0,459	0,98**
B+S/P	0,0421	0,802	0,333	0,224	0,463	0,99**

⁽¹⁾ B: braquiária; S: sorgo; B+S: braquiária + sorgo; CC: cober crop; C: crotalária; M: milheto; P: pousio.

Apêndice 3. Estimativa dos parâmetros de regressão para a resistência do solo à penetração em função do conteúdo volumétrico da água e densidade do solo, no terceiro ano do experimento ($RP = d_v^e Ds^f$). Dezembro/2008.

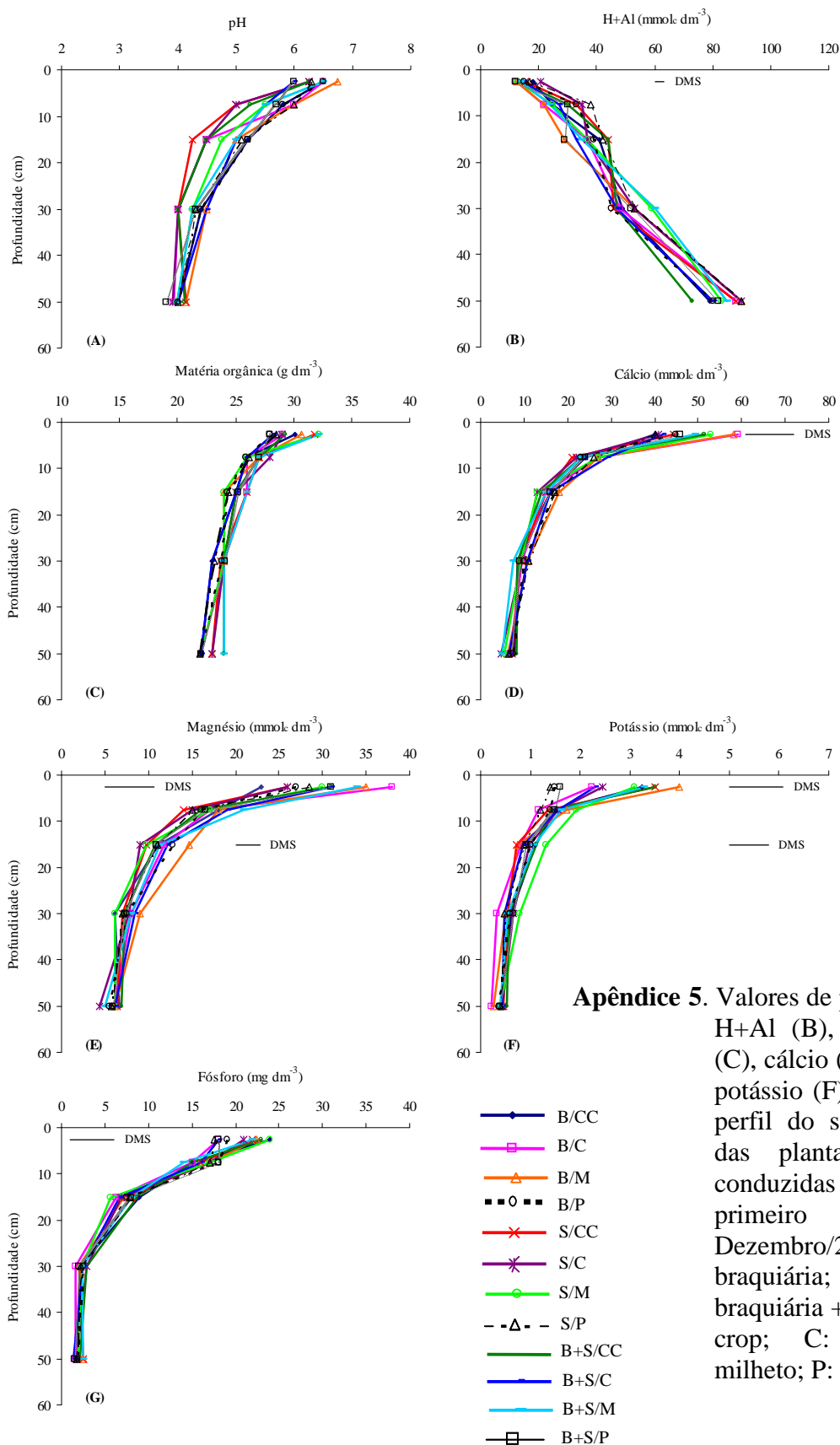
Tratamentos	Parâmetros			
	a	b	c	r ²
7,5 a 12,5 cm				
Braquiária/Cober crop	0,0209	-2,139	6,663	0,82**
Braquiária/Crotalaria	0,0222	-2,226	6,821	0,77**
Braquiária/Milheto	0,0168	-2,314	7,011	0,62**
Braquiária/Pousio	0,0160	-2,229	7,290	0,77**
Sorgo/Cober crop	0,0211	-2,103	6,661	0,93**
Sorgo/Crotalaria	0,0098	-2,400	9,001	0,88**
Sorgo/Milheto	0,0107	-2,751	7,002	0,94*
Sorgo/Pousio	0,0220	-1,702	9,120	0,92*
B+S/Cober crop	0,0112	-2,109	7,003	0,65**
B+S/Crotalaria	0,0103	-2,313	9,012	0,63**
B+S/Milheto	0,0251	-2,450	4,811	0,71**
B+S/Pousio	0,0232	-2,313	6,412	0,82**
27,5 a 32,5 cm				
Braquiária/Cober crop	0,0131	-3,071	6,003	0,89**
Braquiária/Crotalaria	0,0123	-3,041	6,124	0,71**
Braquiária/Milheto	0,0120	-3,002	6,223	0,67**
Braquiária/Pousio	0,0092	-3,125	7,002	0,83**
Sorgo/Cober crop	0,0145	-3,202	5,302	0,94**
Sorgo/Crotalaria	0,0121	-3,421	6,012	0,92**
Sorgo/Milheto	0,0123	-3,008	6,112	0,90**
Sorgo/Pousio	0,0218	-2,881	6,450	0,94**
B+S/Cober crop	0,0184	-2,643	6,009	0,68**
B+S/Crotalaria	0,0126	-2,771	7,241	0,76**
B+S/Milheto	0,0289	-2,983	7,451	0,97**
B+S/Pousio	0,0192	-3,281	6,004	0,84**

* e **: significativo a 5 e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

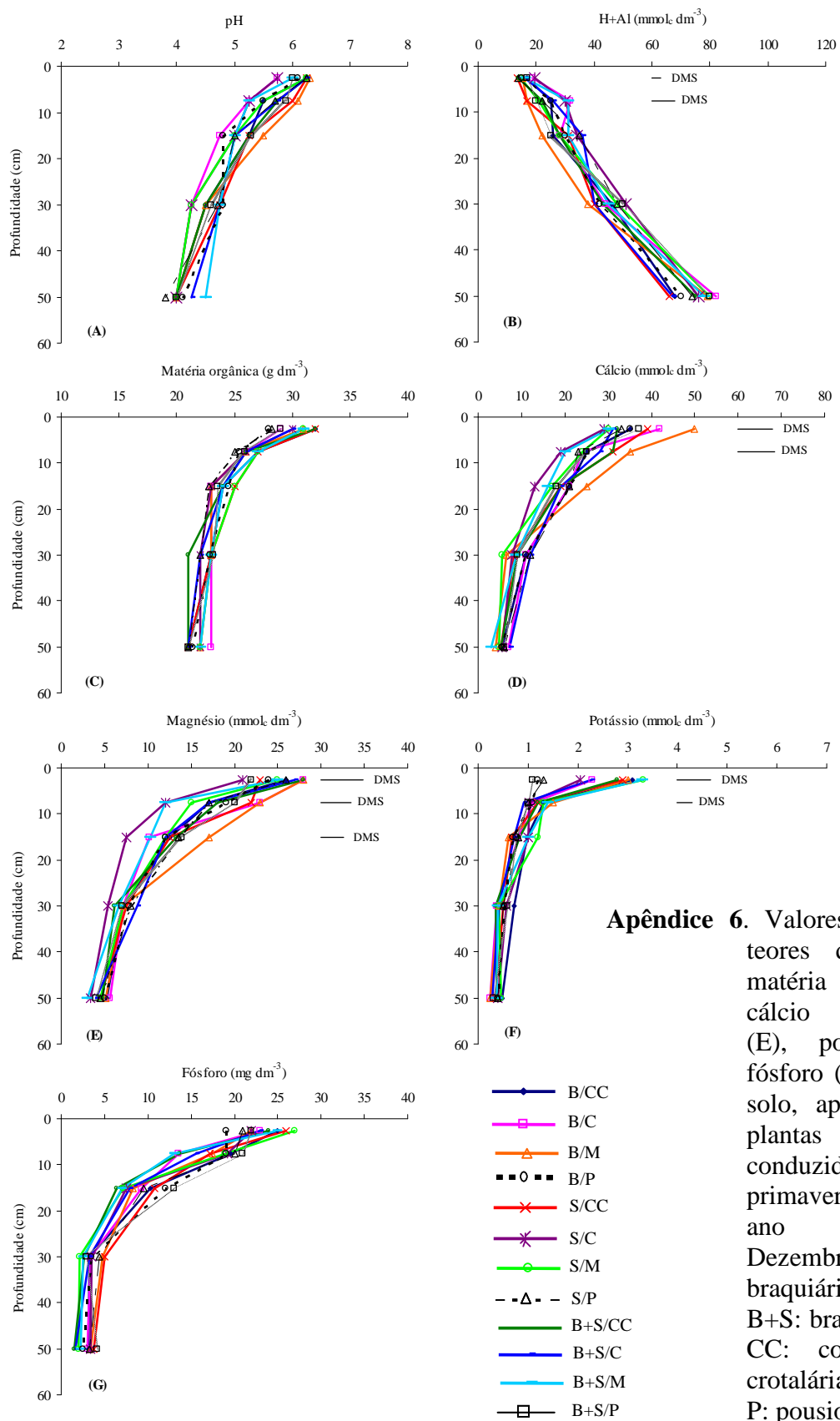
Apêndice 4. Estimativa dos parâmetros de regressão para o conteúdo volumétrico de água no solo em função da densidade e do potencial mátrico, no terceiro ano do experimento ($v = \exp(a + b Ds) \Psi^c$. Dezembro/2008.

Tratamentos	Parâmetros			
	d	e	f	r ²
7,5 a 12,5 cm				
Braquiária/Cober crop	-1,698	0,313	-0,065	0,92**
Braquiária/Crotalaria	-1,528	0,300	-0,049	0,87**
Braquiária/Milheto	-1,814	0,291	-0,011	0,83**
Braquiária/Pousio	-1,945	0,351	-0,018	0,92**
Sorgo/Cober crop	-1,592	0,225	-0,061	0,81**
Sorgo/Crotalaria	-1,791	-0,310	-0,068	0,76**
Sorgo/Milheto	-1,814	-0,293	-0,009	0,89**
Sorgo/Pousio	-1,621	0,225	-0,066	0,90**
B+S/Cober crop	-0,998	0,271	-0,083	0,75**
B+S/Crotalaria	-1,710	0,222	-0,081	0,84**
B+S/Milheto	-1,811	0,292	-0,021	0,79**
B+S/Pousio	-1,723	0,381	-0,062	0,95**
27,5 a 32,5 cm				
Braquiária/Cober crop	-1,719	0,264	-0,066	0,92**
Braquiária/Crotalaria	-1,700	-0,472	-0,072	0,77**
Braquiária/Milheto	-1,598	0,261	-0,077	0,78**
Braquiária/Pousio	-1,592	0,223	-0,081	0,93**
Sorgo/Cober crop	-1,661	0,313	-0,044	0,87**
Sorgo/Crotalaria	-2,025	0,381	-0,081	0,88**
Sorgo/Milheto	-1,629	-0,261	-0,066	0,80**
Sorgo/Pousio	-0,889	-0,311	-0,088	0,67**
B+S/Cober crop	-1,528	0,374	-0,038	0,95**
B+S/Crotalaria	-1,721	0,271	-0,058	0,90**
B+S/Milheto	-1,439	0,422	-0,091	0,64**
B+S/Pousio	-1,631	-0,281	-0,071	0,94**

* e **: significativo a 5 e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.



Apêndice 5. Valores de pH (A) e teores de H+Al (B), matéria orgânica (C), cálcio (D), magnésio (E), potássio (F) e fósforo (G) no perfil do solo, após manejo das plantas de cobertura conduzidas na primavera, no primeiro ano agrícola. Dezembro/2006. B: braquiária; S:sorgo; B+S: braquiária + sorgo; CC: cober crop; C: crotalária; M: milho; P: pousio.



Apêndice 6. Valores de pH (A) e teores de H+Al (B), matéria orgânica (C), cálcio (D), magnésio (E), potássio (F) e fósforo (G) no perfil do solo, após manejo das plantas de cobertura conduzidas na primavera, no segundo ano agrícola. Dezembro/2007. B: braquiária; S:sorgo; B+S: braquiária + sorgo; CC: cober crop; C: crotalária; M: milheto; P: poisio.

