

SISTEMAS DE PREPARO DO SOLO E CULTURAS DE COBERTURA NA PRODUÇÃO ORGÂNICA DE FEIJÃO E MILHO. I - ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO⁽¹⁾

Eurâimi de Queiroz Cunha⁽²⁾, Luís Fernando Stone⁽³⁾, José Aloísio Alves Moreira⁽³⁾, Enderson Petrônio de Brito Ferreira⁽³⁾, Agostinho Dirceu Didonet⁽³⁾ & Wilson Mozena Leandro⁽⁴⁾

RESUMO

Há necessidade de se avaliar a contribuição de plantas de cobertura e do seu manejo na manutenção ou melhoria da qualidade física do solo em áreas sob produção orgânica. Este trabalho objetivou determinar a influência das plantas de cobertura crotalária (*Crotalaria juncea*), guandu (*Cajanus cajan* (L.) Millsp), mucuna-preta (*Mucuna aterrima*), sorgo-vassoura (*Sorgum technicum*) e pousio nos atributos físicos de solo cultivado com feijão e milho orgânicos, sob semeadura direta (SD) e preparo convencional (PC). O trabalho foi conduzido em Santo Antônio de Goiás-GO, em Latossolo Vermelho distrófico, no delineamento de blocos ao acaso, com quatro repetições. Em novembro de 2003 foram instalados quatro experimentos, dois em SD e dois em PC, sendo um com feijão e outro com milho em cada sistema. Amostragens do solo das parcelas e de uma mata próxima aos experimentos foram realizadas em novembro de 2007, nas camadas de 0,00–0,10 e 0,10–0,20 m, para determinação do teor de matéria orgânica (MO) e de atributos físicos do solo. O uso desse solo para a produção agrícola, independentemente do sistema de preparo, resultou em redução no teor de MO e em modificações nos seus atributos físicos, aumentando sua densidade (Ds) e resistência à penetração (RP) e reduzindo a macroporosidade (Mp), porosidade total (Pt) e diâmetro médio ponderado dos agregados (DMP). Entretanto, a Ds e a Mp não atingiram os valores

⁽¹⁾ Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor (projeto financiado pelo CNPq). Recebido para publicação em março de 2010 e aprovado em dezembro de 2010.

⁽²⁾ Engenheiro Agrônomo, Doutorando em Agronomia pela Universidade Federal de Goiás – UFG. Caixa Postal 131, CEP 74001-970 Goiânia (GO). E-mail: euraimi@yahoo.com.br

⁽³⁾ Pesquisador, Embrapa Arroz e Feijão, GO 462, km 12, Caixa Postal 179, CEP 75375-000 Santo Antônio de Goiás (GO). E-mails: stone@cnpaf.embrapa.br; enderson@cnpaf.embrapa.br; didonet@cnpaf.embrapa.br; jaloisio@cnpaf.embrapa.br

⁽⁴⁾ Professor, Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Goiás – UFG. Bolsista do CNPq. E-mail: wilson.mozena@pq.cnpq.br

críticos preconizados na literatura como limitantes ao desenvolvimento das culturas. Os sistemas de preparo do solo divergiram quanto ao DMP e à RP. Os atributos físicos do solo foram alterados favoravelmente pela MO. O índice S correlacionou-se com os atributos físicos do solo e com o teor de MO, mostrando-se adequado como indicador da qualidade física do solo.

Termos de indexação: *Phaseolus vulgaris* L., *Zea mays*, densidade do solo, porosidade do solo, índice S

SUMMARY: *SOIL TILLAGE SYSTEMS AND COVER CROPS IN ORGANIC PRODUCTION OF COMMON BEAN AND CORN. I - SOIL PHYSICAL PROPERTIES*

The influence of cover crops and their management on the maintenance or improvement of soil physical quality in areas under organic production should be investigated. This study aimed to determine the influence of the cover crops sunn hemp (Crotalaria juncea), pigeon pea (Cajanus cajan (L.) Millsp), velvet bean (Mucuna aterrima), sorghum (Sorghum technicum), and fallow on physical properties of soil under organic cultivation of common bean and corn, in no-tillage (NT) and conventional tillage (CT) systems. The study was conducted in Santo Antônio de Goiás-GO, on an Oxisol, in a randomized block design, with four replications. In November 2003 four experiments were installed, two of them under NT and the other two in CT. In each management system, one experiment was carried out with common bean and another with corn. Samples were taken from the layers 0.00–0.10 and 0.10–0.20 m in November 2007, from the plots and from a neighboring native forest, to determine soil organic matter (SOM) and physical properties. The use of this soil for agricultural production, regardless of the tillage system, reduced the SOM content and affected the physical properties, increased bulk density (BD) and soil penetration resistance (PR) and decreased macroporosity (Mp), soil porosity (SP), and the weighted mean diameter of aggregates (WMDA). However, BD and Mp did not reach the critical values indicated in the literature as limiting for crop growth. The soil tillage systems diverged in relation to WMDA and PR. The soil physical properties were favorably affected by SOM. The S index was correlated to the soil physical properties and to SOM and seems to be an adequate indicator of soil physical quality.

Index terms: *Phaseolus vulgaris* L., *Zea mays*, bulk density, soil porosity, S index.

INTRODUÇÃO

O preparo do solo e o uso de plantas de cobertura são importantes práticas no sistema orgânico de cultivo. Com o crescente interesse dos agricultores nesse sistema, visando ao aumento da rentabilidade e melhoria da qualidade de vida no meio rural, além da preservação da capacidade produtiva do solo a longo prazo, é necessário gerar informações sobre a contribuição dessas práticas na manutenção da qualidade física do solo.

Os sistemas de preparo do solo e o uso de plantas de cobertura têm influência significativa na estrutura do solo e nos fluxos de água e ar. O preparo convencional normalmente degrada o solo pela redução de sua cobertura, do estoque de matéria orgânica e da estabilidade de agregados, promovendo a compactação, a erosão e, assim, a queda da produtividade (Costa et al., 2003; Argenton et al., 2005). A semeadura direta, por outro lado, pela redução do tráfego de

máquinas e do revolvimento do solo, associado ao uso de plantas de cobertura, pode preservar e até mesmo recuperar a estrutura do solo, mantendo, dessa forma, o sistema agrícola mais produtivo (Vezzani & Mielniczuk, 2009). Ela é mais eficiente que outros métodos de preparo, pois mantém o C orgânico do solo em níveis adequados, além de proporcionar melhor qualidade, sustentabilidade e capacidade de produção dos solos agrícolas (Silva & Mielniczuk, 1997; Wohlenberg et al., 2004; Vezzani & Mielniczuk, 2009). Contudo, em algumas situações tem sido constatada compactação do solo com o uso da semeadura direta (Alves & Suzuki, 2004; Almeida et al., 2008). Reinert et al. (2008), em um Argissolo Vermelho distrófico típico, observaram que após 15 anos a semeadura direta elevou a densidade do solo para níveis restritivos ao crescimento radicular das plantas.

A influência da matéria orgânica na agregação do solo é um processo dinâmico, sendo necessário o acréscimo contínuo de material orgânico para se

manter a estrutura adequada ao desenvolvimento das plantas. Culturas agregadoras e com sistema radicular agressivo podem minimizar os efeitos negativos da degradação dos solos por meio de melhorias na sua estrutura. Informações sobre quais sistemas de culturas são mais apropriados para a agregação do solo são, entretanto, ainda incompletas (Wohlenberg et al., 2004). É necessário avaliar espécies adequadas para superar restrições químicas e físicas, bem como recuperar a qualidade do solo, ou seja, a capacidade de o solo exercer suas funções na natureza (Doran, 1997), quando submetido a diferentes sistemas de preparo (Argenton et al., 2005).

As gramíneas perenes, por apresentarem maior densidade de raízes e melhor distribuição do sistema radicular no solo, favorecem as ligações dos pontos de contato entre partículas minerais e agregados, contribuindo para sua formação e estabilidade, podendo ser utilizadas como plantas recuperadoras da estrutura do solo em áreas degradadas (Silva & Mielniczuk, 1997). Campos et al. (1999) e Wohlenberg et al. (2004), entretanto, verificaram que a sequência de culturas com a sucessão de gramíneas com leguminosas foi a que favoreceu a maior agregação do solo. Os primeiros autores atribuíram esse comportamento ao sistema radicular da gramínea e à taxa de decomposição da leguminosa, criando ambiente favorável à agregação pela ação das raízes, cobertura do solo, quantidade de resíduos orgânicos da decomposição e conservação da umidade favorável à ação dos microrganismos.

A diferença entre espécies na agregação do solo pode ser devido à qualidade do material orgânico sintetizado pelas raízes das diversas culturas ou à configuração das raízes, especialmente na proporção das raízes laterais (Wohlenberg et al., 2004), uma vez que a liberação de exsudatos de alto peso molecular – que, devido à sua natureza polissacarídica, podem agir como cimentante das partículas do solo – ocorre na ponta das raízes (Reid & Goss, 1982).

Argenton et al. (2005) verificaram que, em comparação à mata nativa, o preparo convencional e o reduzido (dessecação dos resíduos e abertura de sulcos para semeadura com arado estreito, 0,1 m) modificaram a estrutura do solo, com aumento da densidade e da resistência do solo à penetração e redução da macroporosidade e da porosidade total. Após cinco anos de uso, o preparo reduzido sem o uso de plantas de cobertura não recuperou as propriedades relacionadas com a estrutura; entretanto, com a introdução delas, especialmente da mucuna-cinza (*Stilozobium niveum* Kuntze), intercalares ao milho, notou-se aumento da macroporosidade, da porosidade total e da condutividade hidráulica saturada, bem como redução da densidade do solo, em relação ao sistema milho isolado. Essas melhorias, advindas do uso de plantas de cobertura, não foram observadas no sistema de preparo convencional.

Wutke et al. (2000) observaram alta produção de fitomassa seca por *Crotalaria juncea*, assim como por mucuna-preta (*Mucuna aterrima*) e milho, atribuindo-se à incorporação dessa fitomassa aumento na porosidade do solo, resultando em aumento na velocidade de infiltração básica da água no solo. Esses autores verificaram ainda que a rotação do feijoeiro irrigado com milho e plantas de cobertura favoreceu a redução da resistência do solo à penetração na camada arável. Hernani et al. (2005), comparando diversas culturas antecessoras (solteiras ou em consorciação) ao cultivo do algodoeiro, constataram que *Crotalaria spectabilis* e a consorciação de *Brachiaria decumbens* e *C. spectabilis* proporcionaram os maiores efeitos benéficos, e o milheto (*Pennisetum americanum* L.), o menor efeito sobre a densidade, macroporosidade e porosidade total do solo na camada de 0 a 0,10 m do solo. As duas primeiras culturas, juntamente com a consorciação *C. spectabilis* e sorgo, apresentaram maior produção de biomassa verde.

A interação das culturas de cobertura com os atributos físicos do solo, entretanto, está relacionada às características intrínsecas de cada espécie, ao manejo dos resíduos culturais e às condições edafoclimáticas de cada região (Sousa Neto et al., 2008). Assim, este trabalho objetivou determinar a influência de plantas de cobertura nos atributos físicos de solo cultivado com feijão e milho orgânicos, sob semeadura direta e preparo convencional, na região do Cerrado.

MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização do local

O trabalho foi conduzido na Fazenda Capivara, da Embrapa Arroz e Feijão, localizada no município de Santo Antônio de Goiás-GO, compreendida entre as coordenadas de 16° 31' 18" S, 49° 18' 45" W; 16° 31' 18" S, 49° 16' 07" W; 16° 29' 02" S, 49° 16' 07" W; 16° 29' 02" S e 49° 18' 45" W, com altitude média de 823 m. O clima, conforme classificação de Köppen, é Aw, tropical de savana, megatérmico. O regime pluvial é bem definido, com período chuvoso de outubro a abril e seco de maio a setembro, com precipitação pluvial média anual de 1.460 mm (Silva et al., 2002). O solo do local é um Latossolo Vermelho distrófico (Embrapa, 2006), de textura franco-argilosa, com 410 g kg⁻¹ de areia, 270 g kg⁻¹ de silte e 320 g kg⁻¹ de argila, na camada de 0,00–0,20 m. Antes da implantação dos experimentos, foram aplicados em toda a área e incorporados com grade aradora 1.620 kg ha⁻¹ de fosfato natural Arad (33 % de P₂O₅) e 2.000 kg ha⁻¹ de calcário. A vegetação original da área experimental era do tipo Cerradão (Sousa-Silva & Camargo, 2008), e esta vinha sendo cultivada no sistema convencional

de preparo do solo (gradagens aradora e niveladora) com a rotação milho e soja.

Delineamento experimental e tratamentos

Em novembro de 2003 foram instalados quatro experimentos, que estão sendo conduzidos segundo os preceitos da produção orgânica. Dois experimentos foram conduzidos em semeadura direta, e nos outros dois foi feito o preparo convencional do solo com grades aradora e niveladora operando até 0,10–0,15 m de profundidade. Em cada sistema de preparo do solo, foi conduzido um experimento com a cultura do milho e outro com a do feijão das águas. Em todos os experimentos foram comparadas, no delineamento de blocos ao acaso, com quatro repetições, as culturas de cobertura: crotalária (*Crotalaria juncea*), guandu (*Cajanus cajan* (L.) Millsp), mucuna-preta (*Mucuna aterrima*), sorgo-vassoura (*Sorghum technicum*) e pousio (vegetação espontânea). A vegetação espontânea era constituída basicamente de picão-preto (*Bidens pilosa*), capim-pé-de-galinha (*Eleusine indica*) e leiteiro (*Euphorbia heterophylla*), com menor ocorrência de braquiária (*Brachiaria decumbens*), corda-de-viola (*Ipomoea grandifolia*), caruru (*Amaranthus deflexus*), erva-de-santa-luzia (*Chamaecrista viridis* L.), trapoeraba (*Commelina benghalensis*), mentrasto (*Ageratum conyzoides*), beldroega (*Portulaca oleracea*), guanxuma (*Sida cordifolia*) e Maria-pretinha (*Solanum americanum* Mill).

As culturas de cobertura foram semeadas em abril de cada ano e conduzidas no sistema de semeadura direta. Por ocasião da semeadura do milho e feijão, em novembro, foram manejadas com rolo-faca e deixadas sobre o solo (semeadura direta) ou incorporadas (preparo convencional). Elas foram semeadas sem adubação no espaçamento de 0,45 m entre linhas, utilizando-se 60 sementes por metro de crotalária, guandu e sorgo e 20 sementes por metro de mucuna. O feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) cv. Pérola foi semeado no mesmo espaçamento, com 16 sementes por metro, e o milho (*Zea mays* L.) cv. AG 1051, no espaçamento de 0,90 m, com 5 sementes por metro, também sem adubação. A área das parcelas com feijão era de 27,00 m² (2,70 × 10,00 m), e a de milho, de 54 m² (5,40 × 10,00 m).

Amostragem e determinações

A cada ano, por ocasião do florescimento das plantas de cobertura, a biomassa seca nas parcelas em pousio foi avaliada em 1,00 m², e a das demais coberturas, em duas linhas de 1,00 m. O rendimento de grãos do feijoeiro e do milho foi avaliado ao final de cada ciclo em duas linhas de 8,00 m e corrigido para 13 % de umidade.

Em novembro de 2007, foi realizada amostragem de solo para análise físico-hídrica nas camadas de 0,00–0,10 e 0,10–0,20 m. Foi também amostrado o solo de uma mata próxima ao experimento (Cerradão), representativa da vegetação original. Foram coletadas

em cada parcela cinco amostras por camada estudada, sendo uma deformada, uma no formato de torrão e três indeformadas coletadas com cilindro posicionado na porção média da camada considerada. As amostras com estrutura deformada foram utilizadas para determinar a textura do solo, pelo método da pipeta; a densidade de partículas (Dp), pelo método do balão volumétrico; e o teor de matéria orgânica, pelo método de Walkley & Black (Embrapa, 1997). Duas amostras indeformadas, coletadas em cilindros de 0,05 m de diâmetro e 0,05 m de altura, foram usadas para determinação da densidade do solo (Ds) e microporosidade. A porosidade total (Pt) foi calculada pela equação: $Pt = (1 - Ds/Dp)$, e a macroporosidade foi obtida pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade (Embrapa, 1997). Outra amostra indeformada foi usada para determinação da curva de retenção de água pelo método da centrifuga (Freitas Júnior & Silva, 1984) nas tensões de água de 6, 8, 10, 33, 60, 100 e 1.500 kPa. As curvas características de água no solo foram ajustadas por meio de regressão não linear, utilizando-se o modelo matemático proposto por van Genuchten (1980):

$$\theta = (\theta_{sat} - \theta_{res}) \left[1 + (\alpha h)^n \right]^{-m} + \theta_{res} \quad (1)$$

em que θ , θ_{sat} e θ_{res} são, respectivamente, os conteúdos de água do solo correspondentes à tensão h , à saturação e à umidade residual, em kg kg⁻¹; h é a tensão matricial da água do solo, em kPa; n e m ($m = 1 - 1/n$) são parâmetros empíricos adimensionais de ajuste; e α é um parâmetro expresso em kPa⁻¹.

Determinou-se, com base nos parâmetros obtidos, o índice S , tangente à curva característica de água no solo no ponto de inflexão, segundo a equação (Dexter, 2004):

$$S = -n(\theta_{sat} - \theta_{res}) \left[1 + \frac{1}{m} \right]^{-(1+m)} \quad (2)$$

A amostra indeformada obtida no formato de torrão foi utilizada para determinar a estabilidade de agregados em água pelo método descrito em Embrapa (1997), adaptado para duas peneiras adicionais (agregados com diâmetro entre 4 e 8 mm e maior que 8 mm). Adotou-se como índices de agregação o diâmetro médio ponderado (DMP) e a porcentagem de agregados com diâmetro maior que 2 mm (AGREG>2). O DMP foi calculado pela fórmula:

$$DMP = \sum (C \times P) \quad (3)$$

em que C é o centro das classes de agregados consideradas (mm) e P a proporção da massa seca dos agregados em cada classe, em relação ao total da amostra. A proporção da soma da massa seca dos agregados que foram retidos nas peneiras de malha maior que 2 mm em relação ao total da amostra constituiu a AGREG>2.

Determinou-se a resistência do solo à penetração vertical por meio do penetrômetro de impacto modelo IAA/PLANALSULCAR-Stolf, na camada de 0,00–0,40 m, em quatro pontos nas entrelinhas das culturas, sendo 16 observações por tratamento. Os dados de campo foram obtidos em número de impactos dm^{-1} (N), tendo sido os valores transformados em resistência do solo à penetração (RP) por meio da equação: $\text{RP} (\text{kgf cm}^{-2}) = 5,6 + 6,98 \text{ N}$ (Stolf et al., 1983). Posteriormente, transformou-se a unidade para MPa pela multiplicação por 0,098 e calcularam-se os valores médios para as camadas de 0,00–0,05, 0,05–0,10, 0,10–0,20, 0,20–0,30 e 0,30–0,40 m. A umidade do solo foi determinada gravimetricamente em dois pontos por parcela, ao lado dos pontos de observação da resistência à penetração, nas camadas de 0,00–0,10, 0,10–0,20, 0,20–0,30 e 0,30–0,40 m.

Análise estatística

Foi feita a análise de variância conjunta dos quatro anos em relação ao rendimento de biomassa seca das culturas de cobertura e de grãos do feijão e do milho, para cada experimento, e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5 %.

Os dados referentes aos atributos físicos foram submetidos à análise de variância por camada, utilizando-se o procedimento GLM do programa estatístico SAS (SAS, 1999), sendo as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5 %. As médias dos tratamentos foram comparadas com as obtidas no solo da mata nativa, pelo teste de Dunnett a 5 %. Foram estimadas correlações de Pearson entre as variáveis estudadas, considerando-se, conjuntamente, as duas camadas amostradas e os quatro experimentos. No caso da resistência do solo à penetração, considerou-se a média das camadas de 0,00–0,05 e 0,05–0,10 m como representativa da camada de 0,00–0,10 m.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Rendimentos das culturas de cobertura e grãos

Os rendimentos de biomassa seca das culturas de cobertura foram semelhantes nos dois sistemas de preparo do solo (Quadro 1), com maiores valores para o sorgo. Como elas foram semeadas no final da estação chuvosa, os seus rendimentos foram baixos em comparação com os normalmente obtidos com semeadura no início da estação (Menezes & Leandro, 2004; Menezes et al., 2009), com exceção do sorgo, mais adaptado à pouca disponibilidade hídrica. O rendimento de grãos do feijoeiro e do milho não foi alterado pelas culturas de cobertura nos dois sistemas de preparo do solo. Almeida et al. (2008) também não observaram diferenças no rendimento dessas culturas cultivadas após guandu, crotalária, mucuna e milheto.

Suzuki & Alves (2006), em experimento conduzido desde 1997/1998, em Latossolo Vermelho distrófico típico argiloso, em Selvíria-MS, obtiveram valores de biomassa seca de 9.837, 7.515 e 6.465 kg ha^{-1} , respectivamente para crotalária, mucuna e guandu semeados no início das chuvas (outubro de 2000), e de 8.714 kg ha^{-1} para a vegetação espontânea, na avaliação realizada em janeiro de 2001. Embora esses valores de biomassa tenham sido superiores aos obtidos neste trabalho, expressando mais o potencial produtivo dessas plantas, elas não apresentaram diferenças quanto à atuação na recuperação das propriedades físicas do solo em avaliação realizada em 2002 na mesma área (Alves & Suzuki, 2004), nem sobre a produtividade do milho, tanto na semeadura direta como no preparo convencional (Suzuki & Alves, 2004).

Além da quantidade de biomassa produzida (Wutke et al., 2000; Hernani et al., 2005), o tempo de utilização dos sistemas de manejo também é uma variável importante na avaliação do seu efeito sobre a qualidade do solo (Costa et al., 2003; Reinert et al., 2008).

Teor de matéria orgânica do solo

Apesar do maior rendimento de biomassa seca do sorgo, não foram observadas diferenças significativas entre as plantas de cobertura quanto ao teor de matéria orgânica do solo, tanto na camada de 0,00–0,10 m como na de 0,10–0,20 m, seja sob preparo convencional (Quadros 2 e 4), seja sob semeadura direta (Quadros 3 e 5). Almeida et al. (2008), comparando por três anos pousio, crotalária, guandu, mucuna e milheto, e Sousa Neto et al. (2008), comparando por quatro anos crotalária, milheto e lablabe (*Dolichus lablab*), também não verificaram influência das plantas de cobertura no teor de matéria orgânica do solo. Em todos os experimentos, o teor de matéria orgânica do solo sob mata foi maior do que sob as plantas de cobertura, concordando com os resultados de Corrêa (2002), Silva et al. (2008) e Andrade et al. (2009).

Teores mais elevados de matéria orgânica em solos de mata têm sido atribuídos à maior deposição de resíduos orgânicos, à ausência de revolvimento do solo e à reduzida erosão hídrica (Jakelaitis et al., 2008). Os valores observados para o teor de matéria orgânica na camada superficial do solo sob mata são comparáveis com os obtidos por Corrêa (2002), 29,8 g dm^{-3} , em Querência-MT, e Andrade et al. (2009), 27,4 g dm^{-3} , em Santo Antônio de Goiás-GO, e menores que os obtidos por Silva et al. (1998), 46,0 g dm^{-3} , em Goiânia-GO, e Silva et al. (2008), 53 g dm^{-3} , em Jaboticabal-SP.

Um dos efeitos esperados pelo uso de plantas de cobertura é o aumento do teor de matéria orgânica, favorecendo a maior agregação do solo. Contudo, além da quantidade de resíduos fornecidos por elas, o aumento da matéria orgânica depende também da qualidade desses resíduos, sobretudo no que se refere à relação C/N e de constituintes recalitrantes à

Quadro 1. Rendimento de biomassa seca da parte aérea das culturas de cobertura e de grãos de feijão e milho, de acordo com o sistema de preparo do solo, no período de 2004 a 2007

Tratamento	Rendimento					
	Preparo convencional			Semeadura direta		
	Cobertura	Feijão	Milho	Cobertura	Feijão	Milho
	kg ha ⁻¹					
Pousio	1.460b	808a	5.503a	1.525b	585a	4.476a
Crotalária	3.532b	772a	6.553a	3.722b	910a	5.795a
Guandu	4.023b	767a	6.591a	3.761b	929a	5.270a
Mucuna	3.933b	869a	6.793a	4.046b	838a	6.564a
Sorgo	11.120a	741a	4.315a	9.943a	722a	4.070a
CV (%)	29,9	35,8	33,8	30,7	29,2	25,1

Médias nas colunas seguidas da mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5 %.

Quadro 2. Teor de matéria orgânica, densidade, porosidade, diâmetro médio ponderado dos agregados (DMP), agregados com diâmetro maior que 2 mm (AGREG>2) e índice S do solo, de acordo com as culturas de cobertura e camadas estudadas, no experimento sob preparo convencional com a cultura do feijão

Tratamento	Profundidade (m)							
	0,00 -0,10		0,10 -0,20		0,00 -0,10		0,10 -0,20	
	Matéria orgânica		Densidade do solo		Microporosidade		Macroporosidade	
	g dm ⁻³		Mg m ⁻³		m ³ m ⁻³			
Pousio	21,2a*	20,0a*	1,35a*	1,40a*	0,372a*	0,358a*	0,118a*	0,115a*
Crotalária	21,5a*	20,2a*	1,31a*	1,37a*	0,357a*	0,369a*	0,150a*	0,112a*
Guandu	21,5a*	20,5a*	1,37a*	1,37a*	0,374a*	0,372a*	0,110a*	0,113a*
Mucuna	21,2a*	20,0a*	1,36a*	1,38a*	0,365a*	0,366a*	0,123a*	0,111a*
Sorgo	21,8a*	20,2a*	1,33a*	1,42a*	0,351a*	0,366a*	0,147a*	0,098a*
CV (%)	2,6	2,8	6,1	4,4	5,4	4,5	32,8	32,3
Mata	26,0	25,0	0,89	1,01	0,305	0,338	0,361	0,281
	Porosidade total		DMP		AGREG>2		S	
	m ³ m ⁻³		mm		%			
Pousio	0,490a*	0,473a*	4,0b*	7,8a*	47,3b*	67,3a*	0,027a*	0,023a*
Crotalária	0,506a*	0,482a*	5,4ab*	6,9a*	53,5ab*	63,2a*	0,032a*	0,024a*
Guandu	0,484a*	0,484a*	5,3ab*	5,5a*	53,9ab*	54,8a*	0,024a*	0,023a*
Mucuna	0,488a*	0,478a*	4,6ab*	5,4a*	50,3ab*	51,0a*	0,026a*	0,022a*
Sorgo	0,498a*	0,464a*	6,5a*	6,9a*	64,2a*	63,8a*	0,031a*	0,019a*
CV (%)	6,2	4,9	25,9	32,1	18,0	22,9	29,1	25,2
Mata	0,666	0,619	12,0	11,5	94,1	94,9	0,091	0,071

Médias nas colunas seguidas da mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5 %, e as médias seguidas de * diferem significativamente da mata pelo teste de Dunnett a 5 %.

decomposição microbiana, como ligninas, ceras e compostos fenólicos de alto peso molecular. Possivelmente devido a esses fatores é que o sorgo, apesar da maior produção de biomassa (Quadro 1), não diferiu das demais plantas de cobertura em relação ao seu efeito na matéria orgânica do solo.

Densidade e porosidade do solo

O solo sob mata, por não sofrer o trânsito de máquinas e equipamentos ou animais, apresentou menores valores de densidade e microporosidade e maiores valores de macroporosidade e porosidade total,

em todas as camadas avaliadas, em relação ao solo sob as culturas de cobertura, em todos os experimentos (Quadros 2 a 5), concordando com os resultados de Argenton et al. (2005), Silva et al. (2008) e Andrade et al. (2009). Considerando que, de maneira geral, condições físicas do solo favoráveis ao crescimento das plantas têm sido associadas com uma porosidade de aeração mínima de 0,10 m³ m⁻³ (Dexter, 1988; Xu et al., 1992), abaixo da qual a difusão de oxigênio torna-se limitante ao funcionamento das raízes, todas as plantas de cobertura propiciaram na camada superficial valores de macroporosidade superiores a

esse limite. Na camada de 0,10–0,20 m, os valores da macroporosidade foram, em geral, menores, mas só em algumas poucas situações inferiores ao limite de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Ademais, considerando que a densidade crítica para solos franco-argilosos situa-se entre 1,40 e $1,50 \text{ Mg m}^{-3}$ (Reichert et al., 2003), valores maiores que $1,40 \text{ Mg m}^{-3}$ ocorreram apenas em poucos tratamentos nessa camada.

Nas duas camadas, as diferentes plantas de cobertura não diferiram em relação aos seus efeitos sobre a densidade e porosidade do solo nos experimentos sob preparo convencional (Quadros 2 e 4). No experimento com feijão sob semeadura direta, na camada superficial, o sorgo propiciou maior macroporosidade que o pousio, enquanto na camada de 0,10–0,20 m isso ocorreu com a crotalária em relação ao guandu. Nessa camada, o guandu propiciou maior microporosidade que a crotalária e o sorgo (Quadro 3). Foloni et al. (2006) observaram que a crotalária apresentou maior potencial de formação de “bioporos” em camadas compactadas que o guandu e, assim, de melhorar as condições físicas do solo. No experimento com milho (Quadro 5), na camada de 0,10–0,20 m, a densidade do solo sob crotalária foi maior e a porosidade total, menor que as do solo sob pousio. Os poros biológicos, normalmente, representam menos de 3 % do volume do solo, e sua formação reduz pouco a densidade do solo, porém com efeito importante nos fluxos de ar e água no perfil,

muitas vezes não detectados por métodos tradicionais (Reinert et al., 2008).

A densidade do solo apresentou correlação positiva com a microporosidade e negativa com a macroporosidade e porosidade total (Quadro 6). Argenton et al. (2005) também encontraram correlação negativa da densidade do solo com a macroporosidade e a porosidade total e não observaram correlação com a microporosidade. Essas correlações eram esperadas, uma vez que a porosidade total foi determinada com base na razão entre a densidade do solo e a de partículas, e a compressão do solo reduz o tamanho dos poros e aumenta a densidade do solo.

Considerando os quatro experimentos e as duas camadas de solo amostradas, verifica-se que as variações na densidade, macroporosidade, microporosidade e porosidade total do solo podem ser explicadas, em parte, pelo teor de matéria orgânica (Quadro 6). A densidade e a microporosidade apresentaram correlação negativa, e a porosidade total e a macroporosidade, correlação positiva com o teor de matéria orgânica no solo, concordando com os resultados obtidos por Silveira Neto et al. (2006), Juhász et al. (2007) e Andrade et al. (2009).

Resistência do solo à penetração e umidade do solo

Não foram observadas diferenças significativas entre as plantas de cobertura quanto ao seu efeito na

Quadro 3. Teor de matéria orgânica, densidade, porosidade, diâmetro médio ponderado dos agregados (DMP), agregados com diâmetro maior que 2 mm (AGREG>2) e índice S do solo, de acordo com as culturas de cobertura e camadas estudadas, no experimento sob semeadura direta com a cultura do feijão

Tratamento	Profundidade (m)							
	0,00 -0,10		0,10 -0,20		0,00 -0,10		0,10 -0,20	
	Matéria orgânica		Densidade do solo		Microporosidade		Macroporosidade	
	g dm ⁻³		Mg m ⁻³		m ³ m ⁻³			
Pousio	21,5a*	20,2a*	1,37a*	1,37a*	0,365a*	0,366ab*	0,117b*	0,117ab*
Crotalária	21,5a*	20,0a*	1,32a*	1,35a*	0,350a	0,356b*	0,152ab*	0,133a*
Guandu	21,2a*	20,0a*	1,31a*	1,39a*	0,362a*	0,384a*	0,146ab*	0,090b*
Mucuna	21,8a*	20,5a*	1,33a*	1,39a*	0,346a*	0,366ab*	0,151ab*	0,109ab*
Sorgo	22,0a*	20,8a*	1,28a*	1,41a*	0,335a*	0,364b*	0,181a*	0,102ab*
CV (%)	2,2	2,2	5,0	3,8	6,4	3,5	27,2	26,0
Mata	26,0	25,0	0,89	1,01	0,305	0,338	0,361	0,281
	Porosidade total		DMP		AGREG>2		S	
	m ³ m ⁻³		mm		%			
Pousio	0,482a*	0,483a*	6,0a*	3,9a*	67,2a*	45,9a*	0,025b*	0,025a*
Crotalária	0,502a*	0,489a*	6,5a*	4,7a*	69,4a*	53,9a*	0,030ab*	0,027a*
Guandu	0,508a*	0,474a*	6,1a*	4,7a*	64,6a*	54,6a*	0,031ab*	0,022a*
Mucuna	0,497a*	0,476a*	6,9a*	4,7a*	71,6a*	47,7a*	0,031ab*	0,021a*
Sorgo	0,516a*	0,466a*	6,2a*	4,9a*	66,6a*	52,1a*	0,034a*	0,021a*
CV (%)	5,0	4,1	18,0	40,3	9,6	25,1	20,8	21,4
Mata	0,666	0,619	12,0	11,5	94,1	94,9	0,091	0,071

Médias nas colunas seguidas da mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5 %, e as médias seguidas de * diferem significativamente da mata pelo teste de Dunnett a 5 %.

Quadro 4. Teor de matéria orgânica, densidade, porosidade, diâmetro médio ponderado dos agregados (DMP), agregados com diâmetro maior que 2 mm (AGREG>2) e índice S do solo, de acordo com as culturas de cobertura e camadas estudadas, no experimento sob preparo convencional com a cultura do milho

Tratamento	Profundidade (m)							
	0,00 -0,10		0,10 -0,20		0,00 -0,10		0,10 -0,20	
	Matéria orgânica		Densidade do solo		Microporosidade		Macroporosidade	
	g dm ⁻³		Mg m ⁻³		m ³ m ⁻³			
Pousio	22,8a*	21,0a*	1,27a*	1,35a*	0,355a*	0,372a*	0,166a*	0,117a*
Crotalária	22,2a*	20,8a*	1,25a*	1,41a*	0,348a*	0,383a*	0,180a*	0,084a*
Guandu	22,5a*	20,5a*	1,26a*	1,38a*	0,353a*	0,377a*	0,172a*	0,101a*
Mucuna	22,5a*	21,0a*	1,26a*	1,42a*	0,355a*	0,385a*	0,170a*	0,081a*
Sorgo	22,5a*	21,2a*	1,21a*	1,40a*	0,346a*	0,372a*	0,198a*	0,098a*
CV (%)	2,7	3,4	5,7	4,9	4,8	4,4	23,4	41,9
Mata	26,0	25,0	0,89	1,01	0,305	0,338	0,361	0,281
	Porosidade total		DMP		AGREG>2		S	
	m ³ m ⁻³		mm		%			
Pousio	0,522a*	0,490a*	4,9ab*	7,3a*	56,4ab*	67,7a*	0,035a*	0,023a*
Crotalária	0,528a*	0,467a*	4,5b*	8,2a*	53,0b*	71,9a*	0,036a*	0,017a*
Guandu	0,524a*	0,478a*	5,0ab*	7,4a*	54,0ab*	67,3a*	0,034a*	0,019a*
Mucuna	0,525a*	0,466a*	6,0ab*	7,0a*	61,5ab*	60,1a*	0,035a*	0,018a*
Sorgo	0,544a*	0,470a*	7,0a*	6,8a*	67,5a*	63,1a*	0,040a*	0,019a*
CV (%)	5,1	5,5	30,1	21,3	17,0	13,8	24,3	30,3
Mata	0,666	0,619	12,0	11,5	94,1	94,9	0,091	0,071

Médias nas colunas seguidas da mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5 %, e as médias seguidas de * diferem significativamente da mata pelo teste de Dunnett a 5 %.

Quadro 5. Teor de matéria orgânica, densidade, porosidade, diâmetro médio ponderado dos agregados (DMP), agregados com diâmetro maior que 2 mm (AGREG>2) e índice S do solo, de acordo com as culturas de cobertura e camadas estudadas, no experimento sob semeadura direta com a cultura do milho

Tratamento	Profundidade (m)							
	0,00 -0,10		0,10 -0,20		0,00 -0,10		0,10 -0,20	
	Matéria orgânica		Densidade do solo		Microporosidade		Macroporosidade	
	g dm ⁻³		Mg m ⁻³		m ³ m ⁻³			
Pousio	22,0a*	20,5a*	1,24a*	1,34b*	0,341a*	0,366a*	0,192a*	0,127a*
Crotalária	22,5a*	20,8a*	1,30a*	1,42a*	0,355a*	0,372a*	0,152a*	0,091a*
Guandu	22,8a*	21,0a*	1,25a*	1,35ab*	0,346a*	0,364a*	0,184a*	0,126a*
Mucuna	22,0a*	20,5a*	1,30a*	1,39ab*	0,342a*	0,363a*	0,167a*	0,113a*
Sorgo	22,5a*	20,5a*	1,32a*	1,37ab*	0,341a*	0,357a*	0,163a*	0,126a*
CV (%)	1,9	2,8	6,2	3,9	8,0	3,1	28,2	22,2
Mata	26,0	25,0	0,89	1,01	0,305	0,338	0,361	0,281
	Porosidade total		DMP		AGREG>2		S	
	m ³ m ⁻³		mm		%			
Pousio	0,532a*	0,494a*	6,4a*	5,5a*	67,7a*	59,0a*	0,037a*	0,025a*
Crotalária	0,508a*	0,464b*	6,6a*	5,7a*	71,8a*	60,6a*	0,029a*	0,020a*
Guandu	0,530a*	0,490ab*	6,9a*	5,8a*	72,8a*	59,4a*	0,035a*	0,022a*
Mucuna	0,509a*	0,475ab*	7,2a*	5,4a*	75,0a*	51,0a*	0,031a*	0,022a*
Sorgo	0,504a*	0,483ab*	7,4a*	5,4a*	75,6a*	53,6a*	0,029a*	0,023a*
CV (%)	5,7	4,2	19,2	42,9	11,1	25,3	27,2	18,5
Mata	0,666	0,619	12,0	11,5	94,1	94,9	0,091	0,071

Médias nas colunas seguidas da mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5 %, e as médias seguidas de * diferem significativamente da mata pelo teste de Dunnett a 5 %.

Quadro 6. Coeficientes de correlação de Pearson (r) e probabilidade (p) entre os atributos do solo, considerando todas as culturas de cobertura, camadas de solo e experimentos

		Ds	RP	S	Pt	Mp	mp
MO	r	-0,81	-0,82	0,79	0,81	0,80	-0,65
	p	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Ds	r		0,72	-0,96	-0,99	-0,97	0,76
	p		0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
RP	r			-0,67	-0,73	-0,65	0,39
	p			0,01	0,01	0,01	0,05
S	r				0,96	0,96	-0,81
	p				0,01	0,01	0,01

Ds: densidade do solo; RP: resistência do solo à penetração; S: índice S; PT: porosidade total; Mp: macroporosidade; mp: microporosidade; MO: matéria orgânica.

resistência do solo à penetração (RP) e na umidade do solo, em nenhuma das camadas consideradas, seja sob preparo convencional ou semeadura direta (Quadro 7). Almeida et al. (2008), em Latossolo Vermelho, também não verificaram diferenças entre guandu, crotalária, mucuna, milheto e pousio quanto à umidade do solo, em semeadura direta ou preparo convencional. Esses autores observaram ainda que o pousio propiciou maior RP que o guandu e o milheto.

Em relação ao solo sob mata, a maior densidade do solo sob as plantas de cobertura refletiu-se na maior resistência do solo à penetração. O solo sob mata apresentou valores de RP menores que 2 MPa nos primeiros 0,30 m de profundidade. No experimento com feijoeiro sob preparo convencional, o solo sob as plantas de cobertura apresentou maior valor de RP que o sob mata em todo o perfil amostrado. No experimento com o milho, isso ocorreu a partir de 0,10 m; na camada de 0,10–0,20 m apenas a crotalária e o guandu diferiram da mata, e na camada de 0,30–0,40 m foram o guandu, mucuna e sorgo (Quadro 7). Nesse preparo, o aumento de RP com a profundidade foi crescente sob as plantas de cobertura, devido provavelmente ao efeito da soleira da grade, atingindo valores entre 3,29 e 3,82 MPa no experimento com milho e entre 3,84 e 5,06 MPa no com o feijoeiro. Corrêa (2002) constatou a presença de camada compactada a partir de 0,15 m de profundidade em solo preparado com grades aradora e niveladora. Argenton et al. (2005) e Carneiro et al. (2009) também observaram menor RP em solo sob mata em relação ao solo cultivado; os primeiros autores constataram ainda aumento gradativo da RP da superfície até 0,40 m em solo sob preparo convencional e sob mata, refletindo o aumento da densidade do solo.

No experimento com o feijoeiro sob semeadura direta, o solo sob mata apresentou menor valor de RP em relação às plantas de cobertura nos primeiros 0,30 m de profundidade, com exceção do sorgo nas camadas de 0,00–0,05 e 0,20–0,30 m. O sorgo, como

discutido anteriormente, apresentou maior produção de biomassa seca, o que pode ter contribuído para esse resultado. Carneiro et al. (2009) constataram menor RP em área com sorgo em semeadura direta e pastagem e ao milheto sob preparo convencional. No experimento com o milho sob semeadura direta, menores valores de RP do solo sob mata em relação às plantas de cobertura só foram verificados nas camadas de 0,05–0,10 e 0,10–0,20 m (Quadro 7).

A umidade do solo sob mata foi menor que sob as plantas de cobertura em todas as camadas (Quadro 7), provavelmente devido à maior macroporosidade e menor densidade do solo, favorecendo a percolação da água no perfil do solo. Argenton et al. (2005) também verificaram menor umidade no solo sob mata e a atribuíram à maior percolação no perfil do solo, à maior interceptação da precipitação pluvial na vegetação e à maior transpiração, pela maior massa verde da parte aérea da mata. Constataram ainda, como observado neste trabalho, que a menor umidade do solo sob mata não se refletiu em maior RP em relação ao solo cultivado.

A resistência à penetração mostrou correlação positiva com a densidade do solo e negativa com a macroporosidade e porosidade total (Quadro 6), concordando com os resultados de Argenton et al. (2005). Almeida et al. (2008) observaram maiores valores de RP na camada de solo de 0,00–0,30 m sob semeadura direta em relação ao preparo convencional. Entretanto, segundo Silva et al. (2000), valores elevados de RP, ao redor de 2,5 MPa, não chegam a comprometer o sistema radicular, devido à maior continuidade de poros, homogeneidade do solo e atividade microbiana sob semeadura direta.

Considerando que as determinações de RP foram feitas com a umidade do solo próxima da capacidade de campo (0,34, 0,36 e 0,37 m³ m⁻³ na área experimental e 0,30, 0,33 e 0,34 m³ m⁻³ na área de mata, respectivamente para as camadas de 0,00–0,10, 0,10–0,20 e 0,20–0,40 m) e que valores de RP maiores que 2 MPa têm sido comumente associados como impeditivos para o crescimento das raízes (Taylor et al., 1966), tanto nos experimentos com o feijoeiro como com o milho o solo apresenta camadas com algum grau de compactação ao longo do perfil, sendo esse problema menos acentuado no caso do milho, provavelmente por essa gramínea ter sistema radicular mais abundante e maior produção de biomassa seca que o feijoeiro, o que favorece os atributos físicos do solo. Almeida et al. (2008) constataram menor valor de RP na sucessão milho/feijão que em soja/feijão. Spera et al. (2009), comparando diversos sistemas de produção, observaram que a significativa biomassa seca da cultura do milho deixada na superfície do solo foi uma das causas da sua menor densidade nos sistemas com essa gramínea. A resistência do solo à penetração apresentou correlação negativa com o teor de matéria orgânica (Quadro 6), concordando com Silva et al. (2000).

Quadro 7. Valores médios da resistência do solo à penetração e da umidade de acordo com as culturas de cobertura e camadas estudadas, nos experimentos sob preparo convencional e semeadura direta, com as culturas do feijoeiro e do milho

Tratamento	Profundidade (m)									
	Resistência do solo à penetração					Umidade do solo				
	MPa					m ³ m ⁻³				
	Preparo convencional - Feijoeiro									
Pousio	1,83a*	2,24a*	2,64a*	3,58a*	4,56a*	0,34a*	0,33a*	0,36a*	0,35a*	
Crotalária	1,54a*	1,90a*	2,38a*	3,44a*	5,06a*	0,32a*	0,34a*	0,34a*	0,36a*	
Guandu	1,92a*	2,29a*	2,62a*	3,55a*	4,60a*	0,32a*	0,34a*	0,35a*	0,36a*	
Mucuna	1,57a*	2,00a*	2,57a*	3,82a*	4,69a*	0,33a*	0,34a*	0,35a*	0,36a*	
Sorgo	1,68a*	2,28a*	2,71a*	2,89a*	3,84a*	0,32a*	0,34a*	0,34a*	0,36a*	
CV (%)	17,6	18,1	14,6	15,2	12,7	6,4	4,6	6,5	4,5	
	Semeadura direta - Feijoeiro									
Pousio	2,30a*	2,98a*	3,20a*	3,06a*	2,96a	0,33a*	0,33a*	0,35a*	0,35a*	
Crotalária	1,74a*	2,42a*	3,21a*	3,15a*	3,28a	0,32a*	0,32a*	0,34a*	0,34a*	
Guandu	1,74a*	2,17a*	2,65a*	2,75a*	2,60a	0,33a*	0,34a*	0,35a*	0,36a*	
Mucuna	2,22a*	2,84a*	2,85a*	2,96a*	2,58a	0,31a*	0,34a*	0,33a*	0,36a*	
Sorgo	1,59a	2,06a*	3,00a*	2,44a	2,26a	0,30a*	0,33a*	0,32a*	0,35a*	
CV (%)	30,9	17,2	17,0	15,4	36,3	5,9	3,8	6,2	3,4	
	Preparo convencional - Milho									
Pousio	0,55a	0,83a	1,86a	2,58a*	3,29a	0,32a*	0,34a*	0,34a*	0,36a*	
Crotalária	0,83a	1,06a	2,05a*	2,73a*	3,47a	0,32a*	0,36a*	0,34a*	0,37a*	
Guandu	0,82a	1,40a	2,34a*	3,02a*	3,78a*	0,32a*	0,35a*	0,34a*	0,37a*	
Mucuna	0,69a	0,90a	1,78a	2,87a*	3,80a*	0,32a*	0,36a*	0,34a*	0,38a*	
Sorgo	1,06a	1,42a	1,99a	2,91a*	3,82a*	0,31a*	0,35a*	0,33a*	0,36a*	
CV (%)	35,2	24,6	13,2	11,9	14,7	5,1	4,8	4,9	4,6	
	Semeadura direta - Milho									
Pousio	1,42a	2,12a*	2,75a*	2,72a	2,71a	0,31a*	0,34a*	0,33a*	0,36a*	
Crotalária	1,36a	1,95a*	2,93a*	2,86a	2,94a	0,32a*	0,34a*	0,34a*	0,36a*	
Guandu	1,56a	2,10a*	2,69a*	2,36a	2,08a	0,32a*	0,34a*	0,34a*	0,35a*	
Mucuna	1,43a	2,02a*	2,42a*	2,34a	1,89a	0,31a*	0,33a*	0,33a*	0,35a*	
Sorgo	1,38a	1,90a*	2,54a*	2,54a	2,19a	0,31a*	0,33a*	0,33a*	0,35a*	
CV (%)	36,4	18,6	18,3	26,4	34,7	8,6	3,2	8,2	3,1	
Mata	0,64	0,84	1,40	1,85	2,48	0,27	0,29	0,29	0,32	

Médias nas colunas seguidas da mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5 %, e as médias seguidas de * diferem significativamente da mata pelo teste de Dunnett a 5 %.

Aggregação do solo

Nas duas camadas amostradas, o solo sob mata apresentou maior DMP e percentagem de agregados com diâmetro maior que 2 mm que aquele sob as diferentes plantas de cobertura, em todos os experimentos (Quadros 2 a 5), o que concorda com os resultados obtidos por Carpenedo & Mielniczuk (1990), Silva et al. (1998), Corrêa (2002) e Silva et al. (2008), os quais constataram maior agregação nos sistemas em equilíbrio, com maiores teores de matéria orgânica e boa diversidade e atividade microbiana na massa do solo. Corrêa (2002) observou que 88 % dos agregados da camada superficial de um solo sob condições de mata natural apresentavam diâmetro maior que 2 mm – valor próximo dos 94,1 %, verificado neste trabalho. Os valores de DMP no presente trabalho, devido à inclusão de mais duas classes na sua

determinação (4 e 8 mm), são maiores que os observados por esse autor. A percentagem de agregados nessas duas classes também foi maior no solo sob mata (92,2 e 81,4 %, médias das duas camadas amostradas) em relação às plantas de cobertura (43 e 30 % nos experimentos com feijoeiro e 49 e 35 % com milho), mostrando que o cultivo conduz ao fracionamento dos agregados maiores em unidades menores, com conseqüente redução de macroporos e aumento de microporos e da densidade.

Em todos os experimentos, as culturas de cobertura alteraram, de maneira similar, a percentagem de agregados com diâmetro maior que 2, 4 e 8 mm e o DMP nas duas camadas amostradas, sendo discutidos neste trabalho apenas o DMP e a percentagem de agregados com diâmetro maior que 2 mm, que correspondeu, em média, a mais de 60 % do total

(Quadros 2 a 5). Silva et al. (2000) constataram que essa classe pode ser utilizada para expressar a agregação do solo. As plantas de cobertura só diferiram significativamente quanto a esses atributos nos experimentos sob preparo convencional, em que o sorgo, provavelmente pela sua maior produção de biomassa seca, propiciou maiores valores na camada superficial do solo em relação ao pousio, no experimento com o feijoeiro (Quadro 2), e em relação à crotalária, no experimento com o milho (Quadro 4). Silva et al. (1998) verificaram que *Brachiaria ruziziensis* propiciou maior agregação do solo que a crotalária e o guandu. A influência benéfica das gramíneas na estruturação e na estabilidade dos agregados do solo tem sido demonstrada por vários pesquisadores (Tisdall & Oades, 1979; Silva & Mielniczuk, 1997) e atribuída à alta densidade de raízes, que promove a aproximação das partículas pela constante absorção de água do perfil do solo, às periódicas renovações do sistema radicular e à uniforme distribuição dos exsudatos no solo, que estimulam a atividade microbiana, cujos subprodutos atuam na formação e estabilização dos agregados (Silva & Mielniczuk, 1997). Tisdall & Oades (1979) sugeriram que o aumento da estabilidade de agregados devido à ação de gramíneas deve-se à liberação de polissacarídeos por hifas de micorrizas associadas. Sousa Neto et al. (2008), entretanto, constataram que milheto, crotalária e lablabe apresentaram efeito semelhante na estabilidade dos agregados do solo.

Nos experimentos com utilização da semeadura direta, o DMP e a percentagem de agregados com diâmetro maior que 2 mm (AGREG>2) apresentaram correlação significativa com o teor de matéria orgânica, respectivamente $r = 0,89$ ($p < 0,01$) e $r = 0,90$ ($p < 0,01$). Carpenedo & Mielniczuk (1990) e Corrêa (2002) encontraram correlação entre DMP e matéria orgânica, tendo esse último autor também encontrado correlação entre AGREG>2 e matéria orgânica. Nos experimentos sob plantio convencional a relação não foi significativa: $r = 0,37$ e $r = 0,17$, respectivamente para DMP e AGREG>2. Nesse preparo do solo, ao contrário da semeadura direta, esses atributos apresentaram maiores valores na camada de 0,10–0,20 m, em que os teores de matéria orgânica são menores. Possivelmente a maior agregação nessa camada se deva mais às forças de compressão (camada compactada) e não à ação biológica de raízes e microrganismos. Nesse preparo do solo a resistência à penetração aumentou gradualmente com a profundidade. Silva et al. (2000) também observaram maior agregação na camada subsuperficial do solo sob preparo convencional em relação ao sob semeadura direta e a atribuíram à compressão das partículas do solo pela ação do arado e da grade, formando torrões na massa de solo, sem que, entretanto, ocorressem mecanismos que contribuíssem para a estabilização desses torrões, não apresentando as qualidades positivas de um agregado. Segundo Bertol et al. (1998), pelo fato de o DMP não avaliar a qualidade estrutural do solo no tocante à distribuição de tamanho dos poros,

é possível que um solo adensado, com estrutura degradada, apresente alta estabilidade de agregados em água e, por conseguinte, alto valor de DMP e, ao mesmo tempo, uma relação entre microporos e porosidade total completamente alterada em relação à ideal. Realmente, a maior DMP observada na camada de 0,10–0,20 m sob preparo convencional não melhorou a relação entre microporos e porosidade total, que foi, em média, de 0,77 e 0,80, respectivamente nos experimentos com feijoeiro e milho, contra 0,74 e 0,66 da camada superficial. Sob semeadura direta, essa relação foi de 0,77 e 0,72 na camada de 0,10–0,20 m e de 0,70 e 0,67 na camada superficial.

Índice S

O índice S apresentou maiores valores na camada de 0,00–0,10 m, sugerindo que a ação das plantas de cobertura na melhoria da qualidade física do solo foi mais efetiva na camada superficial (Quadros 2 a 5). As plantas de cobertura diferiram significativamente quanto a esse índice apenas na camada superficial do experimento de semeadura direta com a cultura do feijoeiro, em que o solo sob cobertura de sorgo apresentou maior valor de S que o pousio (Quadro 3). Nessa camada, o sorgo propiciou maior macroporosidade do solo que o pousio. Nas duas camadas amostradas, o solo sob mata apresentou maior índice S que as diferentes plantas de cobertura, em todos os experimentos (Quadros 2 a 5), indicando melhor qualidade física, o que concorda com os resultados de Silva et al. (2008), Andrade et al. (2009) e Aratani et al. (2009).

Considerando o limite de $S < 0,025$ para solos degradados fisicamente e $S \geq 0,045$ para solo com boa qualidade física, como determinado por Andrade & Stone (2009) para solos de Cerrado, na camada superficial do solo de todos os experimentos esse índice situou-se entre esses dois limites e, na camada de 0,10–0,20 m, na maioria das situações, ficou abaixo de 0,025 (Quadros 2 a 5). Esses resultados sinalizam que o uso do solo sob vegetação de Cerrado para produção agrícola, independentemente do sistema de cultivo, degrada sua qualidade física.

O índice S mostrou-se adequado como indicador da qualidade física do solo, pois correlacionou-se de maneira significativa e negativa com a densidade do solo e microporosidade e positivamente com a macroporosidade, porosidade total e teor de matéria orgânica do solo (Quadro 6), concordando com os resultados obtidos por Stone et al. (2005), Juhász et al. (2007), Andrade et al. (2009) e Aratani et al. (2009). Esse índice também correlacionou-se negativamente com a resistência do solo à penetração (Quadro 6) e, nos experimentos sob semeadura direta, correlacionou-se com o DMP ($r = 0,66$, $p < 0,01$), concordando com os resultados de Stone et al. (2005). Nos experimentos sob plantio convencional essa relação não foi significativa ($r = 0,41$). Nesse preparo do solo, como discutido anteriormente, a agregação foi devida às

forças de compressão, formando torrões. Keller et al. (2007) constataram que a formação de torrões quando do preparo do solo, mesmo nas condições adequadas de umidade, deve-se à inadequada qualidade do solo, ou seja, baixos valores do índice S, o que justifica a ausência de relação entre esse índice e o DMP.

CONCLUSÕES

1. O uso do solo sob vegetação de Cerrado para a produção agrícola, independentemente do sistema de cultivo, resultou em redução no seu teor de matéria orgânica e em modificações nos seus atributos físicos, aumentando a densidade e a resistência à penetração e reduzindo a macroporosidade, a porosidade total e o diâmetro médio ponderado dos agregados.

2. A densidade do solo e a macroporosidade, tanto no sistema convencional quanto na semeadura direta, não atingiram os valores críticos preconizados na literatura como limitantes ao desenvolvimento das culturas.

3. Os sistemas de preparo do solo divergiram quanto ao seu efeito nos índices de agregação e na resistência do solo à penetração.

4. Os atributos físicos do solo foram alterados favoravelmente pelo seu teor de matéria orgânica.

5. O índice S correlacionou-se significativamente com os atributos físicos do solo e com o seu teor de matéria orgânica, mostrando-se adequado como indicador da qualidade física do solo.

LITERATURA CITADA

- ALMEIDA, V.P.; ALVES, M.C.; SILVA, E.C. & OLIVEIRA, S.A. Rotação de culturas e propriedades físicas e químicas em Latossolo Vermelho de cerrado sob preparo convencional e semeadura direta em adoção. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:1227-1237, 2008.
- ALVES, M.C. & SUZUKI, L.E.A.S. Influência de diferentes sistemas de manejo do solo na recuperação de suas propriedades físicas. *Acta Sci. Agron.*, 26:27-34, 2004.
- ANDRADE, R.S. & STONE, L.F. Índice S como indicador da qualidade física de solos do cerrado brasileiro. *R. Bras. Eng. Agric. Amb.*, 13:382-388, 2009.
- ANDRADE, R.S.; STONE, L.F. & SILVEIRA, P.M. Culturas de cobertura e qualidade física de um Latossolo em plantio direto. *R. Bras. Eng. Agric. Amb.*, 13:411-418, 2009.
- ARATANI, R.G.; FREDDI, O.S.; CENTURION, J.F. & ANDRIOLI, I. Qualidade física de um Latossolo Vermelho Acriférrico sob diferentes sistemas de uso e manejo. *R. Bras. Ci. Solo*, 33:677-687, 2009.
- ARGENTON, J.; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C. & WILDNER, L.P. Comportamento de atributos relacionados com a forma da estrutura de Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo e plantas de cobertura. *R. Bras. Ci. Solo*, 29:425-435, 2005.
- BERTOL, I.; GOMES, K.E.; DENARDIN, R.B.N.; MACHADO, L.A.Z. & MARASCHIN, G.E. Propriedades físicas do solo relacionadas a diferentes níveis de oferta de forragem numa pastagem natural. *Pesq. Agropec. Bras.*, 33:779-786, 1998.
- CAMPOS, B.C.; REINERT, D.J.; NICOLODI, R. & CASSOL, L.C. Dinâmica da agregação induzida pelo uso de plantas de inverno para cobertura do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:386-391, 1999.
- CARNEIRO, M.A.C.; SOUZA, E.D.; REIS, E.F.; PEREIRA, H.S. & AZEVEDO, W.R. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de Cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. *R. Bras. Ci. Solo*, 33:147-157, 2009.
- CARPENEDO, V. & MIELNICZUK, J. Estado de agregação e qualidade de agregados de Latossolos Roxos, submetidos a diferentes sistemas de manejo. *R. Bras. Ci. Solo*, 14:99-105, 1990.
- CORRÊA, J.C. Efeito de sistemas de cultivo na estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho-Amarelo em Querência, MT. *Pesq. Agropec. Bras.*, 37:203-209, 2002.
- COSTA, F.S.; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C.; FONTOURA, S.M.V. & WOBETO, C. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas plantio direto e preparo convencional. *R. Bras. Ci. Solo*, 27:527-535, 2003.
- DEXTER, A.R. Advances in characterization of soil structure. *Soil Tillage Res.*, 11:199-238, 1988.
- DEXTER, A.R. Soil physical quality. Part 1. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, 120:201-214, 2004.
- DORAN, J.W. Soil quality and sustainability. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26., Rio de Janeiro, 1997. Anais... Rio de Janeiro, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997. CD ROM.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa do Solo. Manual de métodos de análise de solo. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p. (Documentos, 1).
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa do Solo. Sistema brasileiro de classificação de solo. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.
- 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. *R. Bras. Ci. Solo*, 30:49-57, 2006.
- FREITAS JÚNIOR, E. & SILVA, E.M. Uso da centrífuga para a determinação da curva de retenção de água no solo, em uma única operação. *Pesq. Agropec. Bras.*, 19:1423-1428, 1984.

- HERNANI, L.C.; FABRICIO, A.C.; LAMAS, F.M. & ALVES JUNIOR, M. Culturas de cobertura, produtividade do algodoeiro e atributos físicos do solo em plantio direto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ALGODÃO, 5., Salvador, 2005. Anais. Campina Grande, Embrapa-CNPA, 2005. 1CD-ROM.
- JAKELAITIS, A.; SILVA, A.A.; SANTOS, J.B. & VIVIAN, R. Qualidade da camada superficial de solo sob mata, pastagens e áreas cultivadas. *Pesq. Agropec. Trop.*, 38:118-127, 2008.
- JUHÁSZ, C.E.P.; COOPER, M.; CURSI, P.R.; KETZER, A.O. & TOMA, R.S. Savanna woodland soil micromorphology related to water retention. *Sci. Agric.*, 64:344-354, 2007.
- KELLER, T.; ARVIDSSON, J. & DEXTER, A.R. Soil structures produced by tillage as affected by soil water content and the physical quality of soil. *Soil Tillage Res.*, 92:45-52, 2007.
- MENEZES, L.A.S. & LEANDRO, W.M. Avaliação de espécies de coberturas do solo com potencial de uso em sistema de plantio direto. *Pesq. Agropec. Trop.*, 34:173-180, 2004.
- MENEZES, L.A.S.; LEANDRO, W.M.; OLIVEIRA JUNIOR, J.P.; FERREIRA, A.C.B.; SANTANA, J.G. & BARROS, R.G. Produção de fitomassa de diferentes espécies, isoladas e consorciadas, com potencial de utilização para cobertura do solo. *Biosci. J.*, 25:7-12, 2009.
- REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. & BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. *Ci. Amb.*, 27:29-48, 2003.
- REID, J.B. & GOSS, M.J. Interactions between soil drying due to plant water use and decreases in aggregate stability caused by maize roots. *J. Soil Sci.*, 33:47-53, 1982.
- REINERT, D.J.; ALBUQUERQUE, J.A.; REICHERT, J.M.; AITA, C. & ANDRADA, M.M.C. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:1805-1816, 2008.
- SAS Institute Inc. SAS/STAT procedure guide for personal computers: Version 5. Cary, 1999.
- SILVA, F.F.; FREDDI, O.S.; CENTURION, J.F.; ARATANI, R.G.; ANDRIOLI, F.F. & ANDRIOLI, I. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho cultivado no sistema plantio direto. *Irriga*, 13:191-204, 2008.
- SILVA, I.F. & MIELNICZUK, J. Ação do sistema radicular de plantas na formação e estabilização de agregados do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 21:113-117, 1997.
- SILVA, M.L.M.; CURI, N. & BLANCANEUX, P. Sistemas de manejo e qualidade estrutural de Latossolo Roxo. *Pesq. Agropec. Bras.*, 35:2485-2492, 2000.
- SILVA, M.L.N.; BLANCANEUX, P.; CURI, N.; LIMA, J.M.; MARQUES, J.J.G.S.M. & CARVALHO, A.M. Estabilidade e resistência de agregados de Latossolo Vermelho-Escuro cultivado com a sucessão milho-adubo verde. *Pesq. Agropec. Bras.*, 33:97-103, 1998.
- SILVA, S.C.; XAVIER, L.S.; SANTANA, N.M.P.; CARDOSO, G.M. & PELEGRINI, J.C. Informações meteorológicas para pesquisa e planejamento agrícola referentes ao município de Santo Antônio de Goiás, GO, 2001. Santo Antônio de Goiás, Embrapa Arroz e Feijão, 2002. 21p. (Embrapa Arroz e Feijão. Documentos, 136)
- SILVEIRA NETO, A.N.; SILVEIRA, P.M.; STONE, L.F. & OLIVEIRA, L.F.C. Efeitos de manejo e rotação de culturas em atributos físicos do solo. *Pesq. Agropec. Trop.*, 36:29-35, 2006.
- SOUSA NETO, E.L.; ANDRIOLI, I.; BEUTLER, A.N. & CENTURION, J.F. Atributos físicos do solo e produtividade de milho em resposta a culturas de pré-safra. *Pesq. Agropec. Bras.*, 43:255-260, 2008.
- SOUSA-SILVA, J.C. & CAMARGO, A.J.A. A flora e a fauna do Cerrado. In: ALBUQUERQUE, A.C.S. & SILVA, A.G., eds. Agricultura Tropical: Quatro décadas de inovações tecnológicas, institucionais e políticas. Brasília, Embrapa Informação Tecnológica, 2008. v.2. p.149-201.
- SPERA, S.T.; SANTOS, H.P.; FONTANELI, R.S. & TOMM, G.O. Integração lavoura e pecuária e os atributos físicos de solo manejado sob sistema plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 33:129-136, 2009.
- STOLF, R.; FERNANDES, J. & FURLANI NETO, V.L. Penetrômetro de impacto, IAA/Planalsucar-Stolf: Recomendações para o seu uso. *STAB*, 1:18-23, 1983.
- STONE, L.F.; BALBINO, L.C. & CUNHA, E.Q. Índice S como indicador da qualidade física do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 34., Canoas, 2005. Resumos. Canoas, Universidade Luterana do Brasil, 2005. CD ROM.
- SUZUKI, L.E.A.S. & ALVES, M.C. Fitomassa de plantas de cobertura em diferentes sucessões de culturas e sistemas de cultivo. *Bragantia*, 65:121-127, 2006.
- SUZUKI, L.E.A.S. & ALVES, M.C. Produtividade do milho (*Zea mays* L.) influenciada pelo preparo do solo e por plantas de cobertura em um Latossolo Vermelho. *Acta Sci. Agron.*, 26:61-65, 2004.
- TAYLOR, H.M.; ROBERSON, G.M. & PARKER JR., J.J. Soil strength-root penetration relations to medium to coarse-textured soil materials. *Soil Sci.*, 102:18-22, 1966.
- TISDALL, J.M. & OADES, J.M. Stabilization of soil aggregates by the root systems of ryegrass. *Austr. J. Soil Res.*, 17:429-441, 1979.
- van GENUCHTEN, M.T. A closed form equation for predicting the hydraulic properties of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:892-898, 1980.
- VEZZANI, F.M. & MIELNICZUK, J. Uma visão sobre a qualidade do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 33:743-755, 2009.
- 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. *R. Bras. Ci. Solo*, 28:891-900, 2004.

- WUTKE, E.B.; ARRUDA, F.B.; FANCELLI, A.L.; PEREIRA, J.C.V.N.A.; SAKAI, E.; FUSIWARA, M. & AMBROSANO, G.M.B. Propriedades do solo e sistema radicular do feijoeiro irrigado em rotação de culturas. R. Bras. Ci. Solo, 24:621-633, 2000.
- XU, X.; NIEBER, J.L. & GUPTA, S.C. Compaction effect on the gas diffusion coefficient in soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 56:1743-1750, 1992.