

ATRIBUTOS FÍSICO-HIDRICOS E CARBONO ORGÂNICO DE UM ARGISSOLO APÓS 23 ANOS DE DIFERENTES MANEJOS¹

CLÉRIO HICKMANN^{2*}, LIOVANDO MARCIANO DA COSTA³, CARLOS ERNESTO GONÇALVES REYNOUD SCHAEFER³, RAPHAEL BRAGANÇA ALVES FERNANDES³, CAMILO DE LELLIS TEIXEIRA ANDRADE⁴

RESUMO - A mobilização do solo, decorrente do uso continuado de maquinaria, tem causado alterações consideráveis nos atributos físicos e no teor de carbono orgânico do solo, com risco de redução da produtividade das culturas e efeitos ambientais negativos. Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar as alterações nos atributos físicos e no teor de carbono orgânico em um Argissolo Vermelho-Amarelo, submetido ao sistema plantio direto (PD) e ao sistema convencional de preparo com arado de disco (AD), grade pesada (GP) e grade pesada com arado de disco (GP + AD) durante 23 anos. Um fragmento de floresta natural (FN) foi utilizado como área de referência. O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados, com parcelas de 8 x 12 m, e quatro repetições. Foram coletadas amostras de solo em camadas de 0-5; 5-10; 10-20 e 20-40 cm de profundidade, para avaliar a densidade do solo, teor de carbono orgânico total, porosidade, condutividade hidráulica saturada e estabilidade dos agregados. Os resultados mostraram que o cultivo continuado aumenta a degradação física do solo, comprovada pelas reduções da macroporosidade e porosidade total, estabilidade de agregados, condutividade hidráulica em solo saturado, carbono orgânico total e no aumento da densidade do solo. O manejo plantio direto melhora os atributos físicos e recupera os teores de carbono orgânico do solo na camada superficial de 0-5 cm.

Palavras-chave: Densidade do solo. Estabilidade de agregados. Plantio direto. Plantio convencional. Porosidade do solo.

PHYSICAL-HYDRICAL ATTRIBUTES AND ORGANIC CARBON ON ULTISOL AFTER 23 YEARS UNDER DIFFERENT MANagements

ABSTRACT - Due to continued machinery, soil mobilization has caused considerable changes in both soil bulk density (physical attributes) and organic C content, risking crop yield reduction and negative environmental effects. In this context, this work aimed at assessing changes in both physical attributes and in organic C content of a Argissolo Vermelho-Amarelo surface horizon, subjected to no-tillage (NT) and conventional tillage with disk plow (DP), heavy harrow (HG), and disc plow plus harrow (DP+HG) for 23 years. A natural forest fragment (NF) was used as reference area. A randomized-block design with 8 x 12 m plots and four replications was used. Soil samples were collected at 0-5, 5-10, 10-20, and 20-40 cm depths in order to assess soil density, total organic carbon content, porosity, saturated hydraulic conductivity, and aggregate stability. Results showed that continued cultivation increases soil physical degradation, as evidenced by both macro porosity and total porosity reduction, aggregate stability, saturated hydraulic conductivity, total organic carbon, and soil density increase. The NT was found to best contribute to soil physical properties improvement and total organic carbon recovery in 0-5 cm surface layer.

Keywords: No-tillage. Conventional tillage. Aggregates stability. Porosity. Bulk Density.

*Autor para correspondência.

¹Recebido para publicação em 02/03/2011; aceito em 23/08/2011.

Parte da dissertação de mestrado do primeiro autor.

²Departamento de Ciência do Solo, UFLA Caixa Postal 3037, 37200-000, Lavras - MG; clerioh@gmail.com

³Centro de Ciências Agrárias, Departamento de Solos, UFV, 36570-000, Viçosa - MG; liovandomc@yahoo.com.br; carlos.schaefer@ufv.br; raphael@ufv.br

⁴Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Embrapa Milho e Sorgo, CNPMS, Caixa Postal 151, 35702-098, Sete Lagoas - MG; camilo@cnpms.embrapa.br

INTRODUÇÃO

A relação entre o manejo e a qualidade do solo de sistemas agrícolas pode ser avaliada pelo seu efeito nas propriedades físicas, químicas e biológicas. Dentre as propriedades físicas, as alterações são mais pronunciadas nos sistemas convencionais de preparo, ao compará-los com os sistemas conservacionistas. Essas se manifestam, em geral, na densidade do solo, volume e distribuição de tamanho dos poros e na estabilidade dos agregados, influenciando a infiltração da água, a erosão hídrica e desenvolvimento do sistema radicular das plantas (BERTOL et al., 2004).

Os sistemas convencionais reduzem os agregados na camada preparada e aceleram a decomposição da matéria orgânica, refletindo negativamente na resistência dos agregados. Esses sistemas, quando comparados ao plantio direto e solos com vegetação nativa, aumentam o volume de poros, a permeabilidade e o armazenamento de ar, facilitando o crescimento das raízes das plantas dentro da camada preparada. No entanto, abaixo desta camada, contrariamente ao que ocorre no plantio direto, essas propriedades apresentam comportamento inverso ao da camada revolvida (COSTA et al., 2003; BERTOL et al., 2004; WENDLING et al., 2005). Além disso, os aspectos positivos dos manejos convencionais são perdidos quando o solo exposto por decorrência do preparo é submetido à precipitação natural. Esse efeito leva a desagregação e ao salpicamento das partículas de solo, por meio do impacto direto das gotas da chuva. Como consequência, ocorre redução da infiltração e aumento do escoamento superficial da água (BEUTLER et al., 2003; VOLK et al., 2004).

Dessa forma, manejos conservacionistas como o plantio direto modificam as propriedades físicas e químicas do solo em diferentes formas das observadas em manejos que adotam o revolvimento do solo. Nestes manejos, o solo por ser revolvido somente em sulcos, permite maior aporte de resíduos na superfície, favorecendo aumento do teor de carbono orgânico total geralmente nos primeiros 5 cm de profundidade (D'ANDRÉA et al., 2004; LOVATO et al., 2004; ARGENTON et al., 2005), que associado com raízes em decomposição, proporciona recuperação da estrutura do solo e maior distribuição e continuidade dos poros (COLARES et al., 2006).

Um solo é considerado fisicamente ideal quando apresenta em média 34% do volume de poros ocupados por gases e 66% por água (SKOPP et al., 1990), para que ocorram trocas de energia que possibilitam mineralizar os restos culturais e disponibilizar nutrientes para as plantas. O limite crítico adequado dos macroporos, também denominados poros de aeração, é de $0,10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, sendo $0,33 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ considerado valor ideal (TAYLOR; ASHCROFT, 1972), embora estes valores possam ser generalizados. O valor mínimo crítico é limitante ao

desenvolvimento radicular, pela reduzida taxa de difusão de gases no solo e pela dificuldade de drenagem da água (TAYLOR; ASHCROFT, 1972). Por outro lado, valores acima do nível crítico estão associados à compactação do solo, induzindo resistência a penetração do sistema radicular para a maioria das culturas e difusão de nutrientes e água em subsuperfície (TAYLOR; ASHCROFT, 1972).

Neste sentido, o objetivo deste estudo foi verificar, após 23 anos de uso, os efeitos de diferentes sistemas de manejo sobre os atributos físico-hídricos e carbono orgânico total em um Argissolo Vermelho-Amarelo, em comparação a uma área sob vegetação natural.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado no ano agrícola de 2008, em um experimento de campo conduzido em Argissolo Vermelho-Amarelo, fase terraço, de textura argilosa, a partir de 1985, no município de Coimbra, MG ($20^\circ 45' \text{ S}$ e $42^\circ 51' \text{ W}$). A altitude da área experimental é 700 m, com declividade de 5%. A temperatura, precipitação e umidade relativa do ar médias anuais do local são 19° C , 1400 mm e 85%, respectivamente (LEITE et al., 2003). Os atributos químicos e a textura do solo são mostrados na Tabela 1.

O histórico da área experimental revela que o local, originalmente sob Mata Atlântica, foi desmatado no início da década de 1930, e cultivado anualmente durante 54 anos com as culturas de milho e feijão, sob sistema de preparo convencional (aração com arado de discos, seguida de duas gradagens com grade leve niveladora). Em 1985 foi realizada a adequação da área visando à implantação dos sistemas de manejo objetos do presente estudo. A adequação constou da correção da acidez do solo com aplicação de $4,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ de calcário dolomítico e da fertilidade do solo, com aplicações anuais diferenciadas ao longo dos 23 anos de condução de experimentos, na forma de NPK (sulfato de amônio, superfosfato simples e cloreto de potássio) na semeadura, e N na forma de uréia, em cobertura, conforme as exigências nutricionais das culturas estudadas por período.

Durante o período experimental, a área foi submetida, em média, a um preparo de solo por ano para o cultivo das culturas de milho, feijão, soja e trigo. Cultivos anuais foram conduzidos, procedendo-se o plantio e a colheita entre os meses de outubro a março, e mantendo-se a área em pousio nos demais meses do ano, exceto no período de 1996 a 1998, e nos anos 2001, 2003 e 2008, quando também foram realizados cultivos entre os meses de janeiro a março.

O experimento consta de quatro sistemas de manejo do solo, dispostos em delineamento em blocos ao acaso, com quatro repetições distribuídas em parcelas de 8 x 12 m. Foram avaliados os seguintes

tratamentos: PD - plantio direto, com solo revolvido em sulcos na linha de semeadura, utilizando-se semeadora de tração motorizada; AD - preparo com uma única aração com arado de discos fixos de tração motorizada; GP + AD - preparo com uma única gradagem, com grade pesada de 20 discos, para efetuar a trituração dos restos culturais, e posteriormente, uma aração com arado de discos fixos de tração motorizada; e GP - preparo com duas gradagens utilizando-se grade pesada de tração motorizada. Como área referência foi considerada um fragmento de floresta natural (FN) adjacente ao experimento, em tamanho, tipo de solo e repetições equivalentes ao da área experimental. Outros detalhes históricos do experimento podem ser encontrados em Leite et al. (2003).

Em agosto de 2008 foram coletadas amostras de solo indeformadas, em camadas de 0-5; 5-10; 10-20 e 20-40 cm, para análises físicas e químicas, utilizando-se anéis de inox de volume aproximado em 100 cm³. Foram determinadas a densidade de solo (Ds), em g dm⁻³, pelo método do anel volumétrico; a macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e porosidade total (Pt), em cm³cm⁻³, pelo método da mesa de tensão, e a condutividade hidráulica em meio saturado (K₀), utilizando-se permeâmetro de carga constante, em cm h⁻¹; todos conforme Embrapa (1997).

Para a avaliação da estabilidade de agregados, foram coletadas amostras de solo em minitrincheiras na entre linha de cultivo, com auxílio de pá-de-corte. Sendo cada trincheira aberta coletadas quatro amostras distribuídas em camadas de 0-5; 5-10; 10-20 e 20-40 cm. Foram selecionados, manualmente, torrões com devido cuidado para evitar desagregação induzida. Em seguida, as amostras foram secas ao ar e acondicionadas em um jogo de peneiras sobrepos-

tas, tendo as peneiras superior e inferior malhas de 4 e 2 mm, respectivamente. Posteriormente, amostras de 25 g de grânulos foram previamente submetidas a umedecimento por capilaridade durante duas horas. Na sequência, as amostras foram colocadas em um conjunto de peneiras com malhas de 2; 1; 0,50; 0,25 e 0,105 mm de diâmetro, imersas em água e agitadas por um oscilador mecânico tipo Yoder (KEMPER; CHEPIL, 1965), de frequência igual a 38 ciclos min⁻¹ e 3,5 cm de amplitude vertical, durante 15 min, para a obtenção de proporções de classes de agregados de tamanhos 4-2; 2-1; 1-0,5; 0,5-0,25; 0,25-0,105 e < 0,105 mm de diâmetro.

O material retido em cada peneira foi colocado em recipientes para secagem em estufa a 105 °C, durante 48 h. Com os agregados separados em classes de tamanhos, foram determinados os valores de diâmetro médio ponderado (DMP) (CASTRO FILHO et al., 1998), diâmetro médio geométrico (DMG) (WENDLING et al., 2005) e o índice de estabilidade de agregados (IEA) (CASTRO FILHO et al., 1998) pelas equações:

$$DMP = \sum_{i=1}^n (x_i \times w_i) \quad (1)$$

$$DMG = e^x \left(\sum_{i=1}^n wp \times \log x_i \right) / \left(\sum_{i=1}^n w_i \right) \quad (2)$$

$$IEA = \left[\frac{(P_s - wp_{0,105} - \text{areia})}{(P_s - \text{areia})} \times 100 \right] \quad (3)$$

onde,

x_i = diâmetro médio das classes (mm); w_i = proporção de cada classe de agregado em relação ao total

Tabela 1. Valores médios das características físicas e químicas em diferentes profundidades do Argissolo Vermelho-Amarelo submetido em diferentes sistemas de manejo após 23 anos de uso.

Características do solo	0-5 (cm)	5-10 (cm)	10-20 (cm)	20-40 (cm)
pH (H ₂ O) ⁽¹⁾	5,01	4,92	4,82	4,90
P (mg dm ⁻³) ⁽²⁾	19,6	19,9	13,3	1,9
K ²⁺ (mg dm ⁻³) ⁽²⁾	147	106	76	51
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³) ⁽³⁾	1,9	1,6	1,3	1,3
Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³) ⁽³⁾	0,70	0,51	0,31	0,21
Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³) ⁽³⁾	0,15	0,21	0,31	0,21
V (%) ⁽⁴⁾	36	31	27	31
Areia (g kg ⁻¹) ⁽⁵⁾	479	473	459	396
Silte (g kg ⁻¹) ⁽⁶⁾	93	92	88	97
Argila (g kg ⁻¹) ⁽⁶⁾	428	435	453	507

⁽¹⁾ = Relação solo: água 1: 2,5; ⁽²⁾ = Extrator Mehlich-1; ⁽³⁾ = Extrator KCl 1 mol L⁻¹; ⁽⁴⁾ = Índice de saturação por bases; ⁽⁵⁾ = Método por peneiramento (RUIZ, 2005); ⁽⁶⁾ = Método da pipeta com aplicação da lei de Stokes para cálculo do tempo de sedimentação (RUIZ, 2005). Média de quatro repetições.

Tabela 2. Valores médios e coeficiente de variação (%) da microporosidade (Mi), macroporosidade (Ma), porosidade total (Pt) e densidade do solo (Ds) em Argissolo Vermelho-Amarelo sob diferentes sistemas de manejo e profundidades, após 23 anos de uso.

Sistema ¹	Mi (cm ³ cm ⁻³)	Ma (cm ³ cm ⁻³)	Pt (cm ³ cm ⁻³)	Ds (g cm ⁻³)
————— 0-5 (cm) —————				
FN	0,278 b	0,373 a	0,651 a	0,85 c
PD	0,390 a	0,067 b	0,457 c	1,32 a
AD	0,348 ab	0,182 b	0,530 bc	1,21 a
GP + AD	0,332 ab	0,210 b	0,542 b	1,08 b
GP	0,352 ab	0,205 b	0,557 b	1,07 b
C.V. (%)	11,9	31,6	6,4	4,8
————— 5-10 (cm) —————				
FN	0,293 c	0,317 a	0,610 a	0,99 b
PD	0,377 b	0,080 b	0,457 b	1,34 a
AD	0,400 ab	0,041 bc	0,441 bc	1,36 a
GP + AD	0,398 ab	0,007 c	0,405 c	1,47 a
GP	0,423 a	0,007 c	0,430 bc	1,47 a
C.V. (%)	4,0	26,2	4,2	4,4
————— 10-20 (cm) —————				
FN	0,300 b	0,312 a	0,612 a	1,02 b
PD	0,365 ab	0,110 b	0,475 b	1,28 a
AD	0,407 a	0,070 bc	0,477 b	1,30 a
GP + AD	0,392 a	0,030 c	0,422 b	1,34 a
GP	0,387 a	0,065 bc	0,452 b	1,41 a
C.V. (%)	8,4	29,4	8,0	4,6
————— 20-40 (cm) —————				
FN	0,342 b	0,223 a	0,565 a	1,15 b
PD	0,412 a	0,118 b	0,530 ab	1,21 b
AD	0,435 a	0,042 c	0,477 c	1,36 a
GP + AD	0,420 a	0,025 c	0,445 c	1,39 a
GP	0,432 a	0,060 c	0,492 bc	1,32 a
C.V. (%)	4,4	24,2	5,2	3,5

¹ = FN: Floresta natural, PD: plantio direto, AD: arado de disco, GP + AD: grade pesada com arado de disco e GP: grade pesada. Médias seguidas de letras iguais na coluna de variáveis, em cada camada, não diferem entre si pelo teste Tukey (p < 0,05).

de classes; Ps = massa da amostra seca (g); wp_{0,105} = massa dos agregados da classe < 0,105 mm (g); wp = massa dos agregados de cada classe (g); areia = proporção de areia (g kg⁻¹).

Não foi descontada a areia nos cálculos do DMP e DMG, uma vez que essas partículas participam do processo de agregação do solo (CASTRO

FILHO et al., 1998).

Para determinação do carbono orgânico total (COT), foram utilizadas amostras deformadas coletadas no ato das amostragens para estudo dos agregados, sendo determinado conforme Yeomans e Bremner (1988).

Os resultados foram submetidos à análise de

variância e as médias comparadas pelo teste Tukey ao nível de 5% de probabilidade de erro, com auxílio do sistema computacional WinStat (MACHADO; CONCEIÇÃO, 2002). Foram realizadas análises de correlação de Pearson entre os tributos físicos do solo avaliados, ao nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste t-Student.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Quando analisada a D_s na camada superficial (Tabela 2), verificou-se que esta foi maior no PD, não diferindo ($p < 0,05$) apenas do sistema de manejo com AD, concordando com estudos realizados por Bertol et al. (2004) e Argenton et al. (2005), embora sendo em Cambissolo e Latossolo, respectivamente. No entanto, com exceção do PD, verificou-se incremento nas outras três camadas nos manejos que adotaram o revolvimento do solo. O sistema PD teve acréscimo em profundidade apenas na camada 5-10 cm.

Os altos valores de D_s verificados na camada 5-10 cm nos solos cultivados pode ser indicio de compactação, em virtude do confinamento das pressões resultantes do tráfego de máquinas, tanto no PD, quanto nas formas de manejo convencional. A pressão exercida pelos implementos agrícolas durante o preparo do solo nos sistemas convencionais também pode ter favorecido um processo de compactação, concordando com Argenton et al. (2005), que verificaram incrementos na faixa entre 5 e 15 cm de profundidade em Latossolo submetido a preparo reduzido e convencional. Para Reichert et al. (2003), o maior estado de compactação de solos no sistema PD indicado pela D_s , ocorre entre 8 e 15 cm de profundidade. Além do efeito da compactação, as argilas dispersas pela calagem e o impacto das gotas de chuvas nos solos expostos podem provocar o entupimento de poros, influenciando o aumento da D_s .

Entretanto, no solo sob PD, a D_s tende a diminuir em profundidade. Ocorre redução de cerca de 9% na camada 20-40 cm em relação à camada 0-5 cm, sendo semelhante ($p < 0,05$) ao solo da FN. Esse valor ($1,21 \text{ g cm}^{-3}$) ficou abaixo de $1,30 \text{ g cm}^{-3}$, estabelecido por Taylor e Aschroft (1972) como nível crítico para o desenvolvimento adequado do sistema radicular das culturas, embora esse valor não possa ser generalizado. Considerando-se valores acima deste como indicio de compactação do solo.

Em solos com manejos distintos que apresentam horizonte diagnóstico Bt originado de processos pedogenéticos envolvidos na iluviação de argila de horizontes superficiais (A, E ou horizontes de transição), como o Argissolo do presente estudo, ocorre participação efetiva do adensamento natural em camadas subsuperficiais. Portanto, é preciso considerar que a D_s nos solos revolvidos pode ter influência, além da pressão exercida pelos implementos de preparo durante o manejo, também pelo adensamento

natural causado pelo acúmulo de argila de horizontes superficiais.

A Ma e a Pt foram maiores na FN em todas as camadas (Tabela 2). Essa constatação pode ser atribuída ao fato da vegetação nativa ser considerada um sistema inalterado, preservando propriedades físicas do solo relacionadas à sua estrutura. Ainda na Pt, o sistema PD mostrou menor porosidade na camada 0-5 cm. No entanto, esta aumentou proporcionalmente com a Ma em profundidade, de modo a não diferir estatisticamente da FN na camada 20-40 cm. Este comportamento também foi observado por estudos realizados por Bertol et al. (2004) e Argenton et al. (2005), os quais apontam a redução da D_s em subsuperfície como principal atributo que resulta no aumento da Ma. Observou-se que a Ma foi maior que $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ na FN e no PD, nas camadas 10-20 e 20-40 cm, considerado valor mínimo para permitir trocas líquidas e gasosas necessárias ao desenvolvimento adequado do sistema radicular da maioria das culturas (TAYLOR ; ASCHCROFT, 1972).

Pode-se destacar também que os manejos por GP + AD e GP apresentam a menor Pt nas camadas mais profundas, atingindo um volume de apenas $0,007 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de macroporos na camada 5-10 cm (Tabela 2). Este volume representa apenas 7% do valor citado por Taylor e Aschcroft (1972) como limite crítico para desenvolvimento ideal das culturas. Indícios de possível formação de “pé-de-grade” nestes solos pode causar restrições da infiltração de água e circulação de oxigênio (CASTRO et al., 2010), causando limitações consideráveis no sistema radicular de futuras culturas alvo de estudo da área experimental.

Ressalta-se que fatores associados ao sistema de preparo com reduzido tráfego de máquinas e o revolvimento mínimo do solo, permitem um ambiente mais favorável para a presença de organismos edáficos, possibilitando a formação de bioporos. Da mesma forma, o desenvolvimento de galerias a partir da morte do sistema radicular das culturas antecessoras possibilita o rearranjo estrutural dos agregados. Justificando o incremento da Ma no sistema PD.

O sistema PD e a FN não diferem ($p < 0,05$) nos três índices de agregação avaliados (DMP, DMG e IEA), quando comparados aos manejos convencionais da camada superficial de 0-5 cm (Tabela 3). Entretanto, os aumentos, em valores absolutos, proporcionados pelo sistema PD em relação ao manejo por GP + AD, considerado o mais degradado fisicamente, foram da ordem de 64,4; 47,7 e 6,4%, para o DMP, DMG e IEA, respectivamente. Esse comportamento foi observado até a camada 10-20 cm, com exceção da camada 5-10 cm, na qual o DMG e DMP foram superados pelo manejo com grade pesada, embora não diferindo estatisticamente.

A agregação do solo tem influências naturais e do tipo de manejo utilizado. A influência da ação de máquinas durante o preparo do solo por revolvimento (AD, GP + AD e GP) e aberturas de sulcos

Tabela 3. Valores médios e coeficiente de variação (%) do carbono orgânico total (COT), diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG) e índice de estabilidade de agregados (IEA) em Argissolo Vermelho-Amarelo sob diferentes sistemas de manejo e profundidades, após 23 anos de uso.

Sistema ¹	COT (g kg ⁻¹)	DMP (mm)	DMG (mm)	IEA (%)
————— 0-5 (cm) —————				
FN	34,1 a	2,73 a	2,35 a	96,1 a
PD	21,7 b	2,61 a	2,14 a	96,0 a
AD	14,4 d	1,94 b	1,27 b	92,3 b
GP + AD	15,9 cd	1,68 b	1,02 b	90,2 b
GP	16,8 c	2,02 b	1,37 b	92,5 b
C.V. (%)	4,8	7,1	11,1	1,5
————— 5-10 (cm) —————				
FN	26,0 a	2,70 a	2,32 a	96,4 a
PD	15,0 b	2,34 ab	1,76 b	94,7 ab
AD	14,0 b	2,18 b	1,56 b	93,8 ab
GP + AD	14,9 b	2,00 b	1,38 b	92,8 b
GP	15,8 b	2,36 ab	1,81 ab	94,1 ab
C.V. (%)	5,7	7,8	13,5	1,6
————— 10-20 (cm) —————				
FN	20,2 a	2,53 a	2,10 a	96,5 a
PD	13,2 b	2,29 ab	1,76 ab	95,9 ab
AD	12,3 b	2,07 b	1,41 b	93,1 d
GP + AD	13,4 b	2,16 ab	1,53 b	93,6 cd
GP	11,8 b	2,23 ab	1,66 ab	94,8 bc
C.V. (%)	9,7	8,1	13,0	0,7
————— 20-40 (cm) —————				
FN	15,3 a	2,48 a	2,00 a	96,1 a
PD	10,2 b	2,34 a	1,79 a	95,8 ab
AD	8,7 b	2,22 a	1,65 a	94,9 ab
GP + AD	9,5 b	2,23 a	1,65 a	94,9 ab
GP	8,9 b	2,22 a	1,63 a	94,4 b
C.V. (%)	8,6	6,3	10,0	0,7

¹ = FN: Floresta natural; PD: plantio direto; AD: arado de disco; GP + AD: grade pesada com arado de disco e GP: grade pesada. Médias seguidas de letras iguais na coluna de variáveis, em cada camada, não diferem entre si pelo teste Tukey (p < 0,05).

para semeadura (PD), na agregação, deve-se principalmente na execução de pressões resultantes no solo durante o tráfego, sendo os efeitos mais pronunciados com o aumento do tempo de uso do mesmo tipo de manejo (SILVA et al., 2008). Por outro lado, a ação de ciclos de umedecimento e secagem por forças naturais na agregação tem sido abordado fre-

quentemente em estudos (BASTOS et al., 2005) mostrando participação efetiva no rearranjo dos agregados.

Na camada 20-40 cm não ocorreu (p < 0,05) efeitos de manejo na agregação. Possivelmente fatores pedogenéticos do solo atenuaram os efeitos das distintas formas de preparo. Em solos com horizonte

Bt, resultante da migração de argila de horizontes superficiais (exemplo dos Argissolos), as argilas em maior proporção a dos horizontes superficiais podem exercer a função de principal agente cimentante na formação de agregados. Uma vez que, o efeito da argila quando em menor quantidade pode ser substituída pelo maior teor de matéria orgânica nos horizontes superficiais, de maior influência do manejo.

A maior agregação ($p < 0,05$) na superfície do manejo PD correspondeu ao maior acúmulo de COT verificado nesse sistema, concordando com Castro Filho et al. (1998), Wendling et al. (2005) e Silva et al. (2008), quando observaram existir correlações positivas do COT com índices de agregação (DMP, DMG e IEA). A ação do sistema radicular - mais conservado e em maior quantidade - neste sistema tem contribuição efetiva na agregação (RAMOS et al., 2010). Uma vez que atuam na aproximação das partículas minerais devido à pressão exercida durante seu avanço nos espaços porosos do solo e na liberação de exsudados orgânicos. Ainda, quando associado à compressão das partículas unitárias, favorece a coesão entre as partículas do solo (WENDLING et al., 2005; SILVA et al., 2008), influenciando na maior estabilidade de agregados.

Os resultados obtidos para DMP e DMG nos preparos convencionais, além da camada superficial, não diferem ($p < 0,05$) do sistema PD, porém diferem da FN. Possivelmente, como já citado, ocorreu compressão das partículas do solo causada pela pressão exercida dos implementos agrícolas durante o preparo, sem, entretanto, ocorrerem outros mecanismos que contribuem com a sua estabilização. Assim como na proporção em classes de tamanho de agregados, possíveis ciclos sucessivos de umedecimento e secagem durante o período experimental também

podem ter influenciado na determinação dos índices de agregação. Resultados semelhantes foram obtidos por Cruz et al. (2003), ao estudarem os mecanismos de agregação de um Argissolo sob sistema convencional e conservacionista.

Ao analisar o conteúdo de COT na massa do solo, houve um aumento expressivo deste na primeira camada do solo sob sistema PD. Em experimentos de longa duração realizados em diferentes regiões do Brasil, têm sido comprovados os efeitos do acúmulo de resíduos vegetais na superfície do solo sob plantio direto, formando camadas com teores diferenciáveis de carbono orgânico (CORAZZA et al., 1999; BERTOL et al., 2004; ARGENTON et al., 2005; COSTA et al., 2008). Nessas condições, a dinâmica da matéria orgânica no solo em sistema PD é alterada, favorecendo a estruturação do solo. Segundo Castro Filho et al. (1998), a manutenção da arquitetura dos poros pela permanência dos restos de raízes das culturas, a ação da meso e macrofauna na fragmentação dos resíduos e na formação das galerias, contribui na aeração e movimentação descendente de água, induzindo trocas mais intensas entre ambos, contribuindo para melhorar a estruturação do solo em sistemas que adotam o revolvimento mínimo do solo.

A condutividade hidráulica (K_0) mostrou-se superior na FN em todas as camadas, não diferindo ($p < 0,05$) dos sistemas agrícolas apenas na camada 10-20 cm (Tabela 4). A K_0 é uma propriedade físico-hídrica do solo que apresenta elevada variabilidade em decorrência da variabilidade espacial (horizontal e vertical) inerente ao solo, típica das propriedades de movimentação tridimensional da água, bem como dos efeitos da coleta sobre a amostra obtida, que normalmente sofre alguma perturbação (SOUZA; ALVES, 2003).

Tabela 4. Valores médios e coeficiente de variação (%) da condutividade hidráulica em solo saturado (K_0) em Argissolo Vermelho-Amarelo sob diferentes sistemas de manejo e profundidades, após 23 anos de uso.

Camada (cm)	FN (cm h ⁻¹)	PD (cm h ⁻¹)	AD (cm h ⁻¹)	GP + AD (cm h ⁻¹)	GP (cm h ⁻¹)	C.V. (%)
0-5	190,79 a	13,72 c	10,94 c	33,92 bc	59,56 b	30,5
5-10	39,20 a	3,84 b	3,56 b	2,22 b	3,04 b	92,4
10-20	21,14 a	6,43 a	14,16 a	17,78 a	2,26 a	127,6
20-40	20,53 a	15,55 ab	7,47 ab	4,42 ab	1,56 b	75,3

FN: Floresta natural, PD: plantio direto, AD: arado de disco, GP + AD: grade pesada com arado de disco e GP: grade pesada; Médias seguidas de letras iguais na linha de variáveis não diferem entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

A redução nos valores da K_0 com o aumento da profundidade tornam-se preocupante, tanto do ponto de vista da infiltração, quanto no transporte de água das camadas superficiais para as subsuperficiais. Este problema pode ser minimizado como uso da subsolagem, uma vez que este procedimento aumenta significativamente a capacidade de infiltração de água no solo (VIEIRA; KLEIN, 2007; CASTRO et al., 2010).

A correlação negativa ($p < 0,05$) observada na Ds com a M_a , Pt e K_0 evidencia a diminuição da

capacidade de aeração do solo em profundidade, afetando a infiltração da água (Tabela 5). Ao contrário, a correlação positiva da K_0 com a M_a , Pt, DMP, DMG e AG, confirma a importância da estruturação do solo na condução da água dentro do perfil do solo. Entretanto, a correlação negativa observada entre Ds e os parâmetros DMG e DMP e a MA confirma o efeito da Ds na estabilidade estrutural do solo.

Os coeficientes de correlação do COT com os valores dos índices de agregação foram positivos e significativos. Castro Filho et al. (1998) e Wendling

Tabela 5. Valores das correlações lineares estabelecidas entre os atributos físicos e o carbono orgânico total em Argissolo Vermelho-Amarelo sob diferentes sistemas de manejo após 23 anos de uso.

Variáveis ¹	Mi	Ma	Pt	DMG	DMP	IEA	K ₀	COT
Ds	0,75*	- 0,92*	- 0,92*	- 0,35*	- 0,31*	- 0,13 ^{ns}	- 0,71*	- 0,69*
Mi	-	- 0,88*	- 0,68*	- 0,29*	- 0,23*	- 0,17 ^{ns}	- 0,58*	- 0,71*
Ma		-	0,94*	0,37*	0,31*	0,21*	0,66*	0,69*
Pt			-	0,37*	0,33*	0,21*	0,63*	0,59*
DMG				-	0,99*	0,86*	0,32*	0,55*
DMP					-	0,85*	0,28*	0,51*
IEA						-	0,12 ^{ns}	0,27*
K ₀							-	0,75*

¹ = Ds: densidade do solo; Mi: microporosidade; Ma: macroporosidade; Pt: porosidade total; DMG: diâmetro médio geométrico; DMP: diâmetro médio ponderado; IEA: índice de estabilidade de agregados; K₀: condutividade hidráulica em meio saturado e COT: carbono orgânico total. * e ^{ns} = Significativo e não significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste t-Student, respectivamente.

et al. (2005), ao examinarem Latossolos submetidos a diferentes manejos, também obtiveram boas correlações positivas entre esses atributos. A correlação significativa, tanto positiva, quanto negativa, do COT com todos os atributos correlacionados, evidencia a importância da matéria orgânica como componente estrutural do solo, sendo considerado um eficiente indicador de qualidade do solo, pelo fato de ser sensível às alterações do manejo e interferir na atividade microbiana do solo (RAMOS et al., 2010).

CONCLUSÕES

Os efeitos do manejo nos atributos físicos e carbono orgânico do solo são mais significativos na camada superficial, local onde as operações de manejo e preparo para a semeadura são mais intensas;

O cultivo do solo aumenta a degradação física, comprovada pela redução da porosidade, estabilidade de agregados, condutividade hidráulica em solo saturado, aumento da densidade do solo e perda de carbono orgânico total, comparado à floresta natural;

O sistema plantio direto melhora os atributos físicos e recupera os teores de carbono orgânico total do solo na camada superficial de 0-5 cm;

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro concedido.

REFERÊNCIAS

ARGENTON, J. et al. Comportamento de atributos

relacionados com a forma da estrutura de um Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo e plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 29, n. 3, p. 425-435, 2005.

BASTOS, R. S. et al. Formação e estabilização de agregados do solo influenciados por ciclos de umedecimento e secagem após adição de compostos orgânicos com diferentes características hidrofóbicas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 29, n. 1, p. 21-31, 2005.

BERTOL, I. et al. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas às do campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, n. 1, p. 155-163, 2004.

BEUTLER, J. F. et al. Perdas de solo e água num Latossolo Vermelho aluminoférrico submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo sob chuva natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 27, n. 3, p. 509-517, 2003.

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 das amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 22, n. 3, p. 527-538, 1998.

CASTRO, O. M.; VIEIRA, S. R.; SIQUEIRA, G. M. Atributos físico-hídricos de um Latossolo Vermelho eutroférrico sob diferentes sistemas de manejo. **Bragantia**, Campinas, v. 69, n. 2, p. 433-443, 2010.

COLLARES, G. L. et al. Qualidade física do solo na

- produtividade da cultura do feijão num Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 11, p. 1663-1674, 2006.
- CORAZZA, E. J. et al. Comportamento de diferentes sistemas de manejo como fonte ou depósito de carbono em relação à vegetação de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 23, n. 2, p. 425-432, 1999.
- COSTA, F. S. et al. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas de plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 27, n. 3, p. 527-535, 2003.
- COSTA, F. S. et al. Estoque de carbono orgânico no solo e emissões de dióxido de carbono influenciadas por sistemas de manejo no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 1, p. 323-332, 2008.
- CRUZ, A. C. R. et al. Atributos físicos e carbono orgânico de um Argissolo Vermelho sob sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 27, n. 6, p. 1105-1112, 2003.
- D'ANDRÉA, A. F. et al. Estoque de carbono e nitrogênio e formas de nitrogênio mineral em um solo submetido a diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 2, p. 179-186, 2004.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise do solo**. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212 p.
- KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C. A.; EVANS, D. D.; WHITE, J. L. **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy. 1965. v. 2, cap. 39, p. 499-510.
- LEITE, L. F. C. et al. Total C and N storage and organic C pools of a Red-Yellow Podzolic under conventional and no tillage at the Atlantic Forest Zone, south-eastern Brazil. **Australian Journal of Soil Research**, v. 41, n. 4, p. 717-730, 2003.
- LOVATO, T. et al. Adição de carbono e nitrogênio e sua relação com os estoques no solo e com o rendimento do milho em sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, n. 1, p. 175-187, 2004.
- MACHADO, A.; CONCEIÇÃO, A. R. **Programa estatístico WinStat**: sistema de análise estatística para windows. Versão 2.0. Pelotas: Universidade Federal de Pelotas, 2002.
- RAMOS, F. T. et al. Indicadores de qualidade em um Latossolo Vermelho-Amarelo sob pastagem extensiva no pantanal matogrossense. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 23, n. 1, p. 112-120, 2010.
- REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência & Ambiente**, Santa Maria, v. 27, n. 1, p. 29-48, 2003.
- RUIZ, A. R. Incremento da exatidão da análise granulométrica do solo por meio da coleta da suspensão (silte + argila). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 29, n. 2, p. 297-300, 2005.
- SILVA, R. F. et al. Atributos físicos e teor de matéria orgânica na camada superficial de um Argissolo Vermelho cultivado com mandioca sob diferentes manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 6, p. 435-2441, 2008.
- SKOPP, J.; JAWSON, M.D.; DORAN, J. W. Steady-state aerobic microbial activity as a function of soil water content. **Soil Science Society of American Journal**, v. 54, n. 6, p. 1619-1625, 1990.
- SOUZA, Z. M.; ALVES, M. C. Movimento de água e resistência à penetração em um Latossolo Vermelho distrófico de Cerrado, sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 1, p. 18-23, 2003.
- TAYLOR, S. A.; ASHCROFT, G. L. **Physical edaphology: the physics of irrigated and nonirrigated soils**. San Francisco, W.H. Freeman, 1972. 532 p.
- VIEIRA, M. L.; KLEIN, V. A. Propriedades físico-hídricas de um latossolo vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, n. 6, p. 1271-1280, 2007.
- VOLK, L. B.; COGO, N. P.; STRECK, E. V. Erosão hídrica influenciadas por condições físicas de superfície e subsuperfície do solo resultantes do seu manejo, na ausência de cobertura vegetal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, n. 4, p. 763-774, 2004.
- WENDLING, B. et al. Carbono orgânico e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho sob diferentes manejos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n. 5, p. 487-494, 2005.
- YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 19, n. 13, p. 1467-1476, 1988.