



ARTIGO ORIGINAL

Carla Eloíze Carducci^{1*}
Geraldo César de Oliveira²
Larissa Maia de Oliveira²
Samara Martins Barbosa²
Érika Andressa Silva²

¹ Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC,
Campus de Curitibanos, Rod. Ulysses Gaboardi
km 3, Caixa Postal 101, 89520-000,
Curitibanos, SC, Brasil

² Universidade Federal de Lavras - UFLA,
Av. Doutor Sylvio Menicucci, 1001,
Kennedy, 37200-000, Lavras, MG, Brasil

*Autor Correspondente:
E-mail: ec.carducci@ufsc.br

PALAVRAS-CHAVE

Distribuição de poros
Índices estruturais
Cultivo cafeeiro
Atributos hídricos

KEYWORDS

Pores distribution
Structure index
Coffee crop
Hydric attributes

Retenção de água do solo sob sistema conservacionista de manejo com diferentes doses de gesso

Soil water retention under conservation management system with different gypsum doses

RESUMO: Sistemas de cultivo conservacionistas atuam no sentido de preservar ou melhorar a qualidade física do solo. O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito do sistema conservacionista de manejo do solo no cultivo de cafeeiros, que utiliza diferentes doses de gesso sobre a retenção de água em um Latossolo muito argiloso, típico da região do Cerrado. O delineamento foi em blocos ao acaso em esquema de parcelas subdivididas, sendo a parcela os tratamentos: G0-, ausência de gesso adicional na linha, G7- 7 Mg ha⁻¹ e G28- 28Mg ha⁻¹ de gesso adicional, ambos aplicados na superfície do solo na linha de plantio, e a subparcela as profundidades de 0,20; 0,80; e 1,50 m. Amostras de solo com estrutura preservada foram coletadas na linha de plantio, em três repetições. Foram realizadas as caracterizações físicas e a distribuição dos poros foi determinada a partir das curvas de retenção de água geradas dos potenciais matriciais (Ψ_m) de -1 a -1500 kPa. Os dados foram ajustados à equação de van Genuchten no *software* R 2.15.1. Foram estimados os parâmetros do modelo: o ponto de inflexão (Ψ_i , θ_i) e o índice *S*. O sistema conservacionista de manejo do solo promoveu a maior retenção de água na profundidade de 0,80 m e melhor distribuição de poros nas primeiras profundidades, especialmente, no G28. O preparo profundo do solo (0,60m) e a manutenção de resíduo vegetal sobre o solo podem ser considerados o fator principal desse sistema de manejo do solo e o gesso aplicado em superfície, como coadjuvante na estruturação do solo.

ABSTRACT: Conservationist cropping systems act to preserve or improve the soil physical quality. This study aimed to evaluate the effect of conservationist management system, as well as the effects of different gypsum doses on the water retention in a clayey Latosol (Oxisol), typical of Cerrado regions. The experimental design was a randomized block in a split plot, being the plot treatments: G0- absence of additional gypsum in the row; G7- 7 Mg ha⁻¹, G28- 28 Mg ha⁻¹ additional gypsum, both applied on the soil surface in the row, and the subplot of 0.20; 0.80 e 1.50 m depth. Soil samples were collected with preserved structure in the coffee row, with three replicates. We performed the physical characterizations and the pores distribution was determined from the water retention curves by the matric potentials (Ψ_m) -1 at -1500 kPa. Data was adjusted to the van Genuchten equation by nonlinear model updating procedures R 2.15.1 software. The model parameters were estimated: the inflection point (Ψ_i , θ_i), and the *S* index. The soil conservation management system increased the water retention in 0.80 m depth and promoted better pores distribution in the first depths especially in G28. The deep plowing (0.60 m) and maintenance of plant residue on the soil surface may be considered as the main factor to that soil management system and, the gypsum applied on the soil surface a coadjutant in soil structuring.

1 Introdução

A agricultura conservacionista se baseia no princípio da preservação e/ou melhoria da qualidade física e química do solo (van Raij, 2008) sem perder o foco da produção. A exemplo dessa visão agrícola, há diferentes sistemas de manejo que são utilizados na produção de grãos (Tirloni et al., 2012). Mais recentemente, um sistema de cultivo cafeeiro que emprega práticas de conservação do solo está em plena ascensão na região do Cerrado (Serafim et al., 2011). Este tem como foco principal a manutenção da qualidade estrutural do solo próximo das condições originais.

Dessa forma a expansão cafeeira nessa região está associada ao uso dos Latossolos, que apresentam elevada estabilidade estrutural, promovida pela mineralogia simples, com a formação de agregados muito pequenos (Ferreira et al., 1999) e altamente porosos. Estes solos, presentes em relevo suavizado, favorecem a mecanização e, quando corrigidos quimicamente, apresentam elevado potencial agrícola.

No entanto, um dos problemas enfrentados pelos agricultores no Cerrado está relacionado às condições climáticas, salientando que, em determinadas épocas do ano, há ocorrência de veranicos que trazem restrições hídricas ao cultivo cafeeiro (Serafim et al., 2013), fazendo-se necessária a complementação de água por meio da irrigação.

É de se destacar que, condições físico-hídricas do solo adequadas são fundamentais para que ocorra o pleno desenvolvimento das lavouras cafeeiras. Segundo Rena & Guimarães (2000), para que ocorra frutificação uniforme, uma grande quantidade de água deve ser absorvida pelas raízes das plantas.

Dessa forma, devem ser adotados sistemas de manejo do solo capazes de mitigar o déficit hídrico, mediante a melhoria da qualidade estrutural do solo, por meio de práticas condicionadoras do desenvolvimento radicular em profundidade (Cremon et al., 2009), o que promoveria o uso eficiente da água armazenada e disponível, a exemplo do que está ocorrendo com o sistema em uso na região do Alto São Francisco, área pertencente ao Cerrado mineiro, descrito em Serafim et al. (2013). De acordo com Carducci et al. (2015), este sistema promove melhorias físicas e químicas no solo com consequências positivas no desenvolvimento das raízes de cafeeiros jovens e alta ramificação radicular no perfil de solo.

Essas alterações físico-hídricas no ambiente de crescimento das plantas podem ser quantificadas pela curva de retenção de água no solo (CRA). O formato da CRA é influenciado pelo diâmetro e distribuição de poros (Dexter & Richard, 2009), com consequências na sua inflexão, decorrente de mudanças na trajetória de escalonamento dos poros, sendo isto resultante da ação conjunta de diferentes atributos do solo (Beutler et al., 2002) associados ao sistema de manejo adotado.

O objetivo foi avaliar os efeitos do sistema conservacionista de manejo do solo que vem sendo utilizado em uma importante região produtora de café do Estado de Minas Gerais – Alto São Francisco, sendo investigados os efeitos de diferentes doses de gesso sobre a retenção de água em um Latossolo muito argiloso, típico da região do Cerrado.

2 Material e Métodos

O estudo foi conduzido em área localizada no município de São Roque de Minas, região fisiográfica do Alto São Francisco, MG, que tem por coordenadas 20°15'45" S e 46°18'17" W com 850 m de altitude. O clima da região foi classificado por Köppen como Cwa, temperado úmido com inverno seco (maio a setembro) e verão quente, com precipitação anual de 1344 mm. A lavoura cafeeira foi implantada na primeira quinzena de novembro/2008 e está sendo conduzida de acordo com um sistema de manejo que emprega diferentes práticas de conservação do solo.

Este sistema conservacionista de manejo do solo para o cultivo cafeeiro preconiza o uso de práticas de conservação tais como: 1- mecânicas: construção de miniterraços na base da planta; 2- vegetativa: cultura de cobertura na entrelinha do cafeeiro (*Brachiaria* sp. Syn *Urochloa*) mantida com cortes periódicos e os resíduos colocados na linha de plantio; 3- edáfica: correção do solo em área total (4 Mg ha⁻¹ calcário dolomítico +1,92 Mg ha⁻¹ de gesso), preparo profundo do solo (0,60 m de profundidade e 0,50 m de largura) promovido por um subsolador + enxada rotativa acoplados a uma caixa adubadora que, simultaneamente, fertiliza o solo (adubação de base 08-44-00 [N-P-K], enriquecida com 1,5% Zn e 0,5% B), associado à aplicação de gesso agrícola na superfície do solo na linha de plantio (7 kg m⁻¹ ou 28 Mg ha⁻¹), plantio antecipado (meados de outubro a início de novembro). Maiores detalhes sobre o sistema estão descritos em Serafim et al. (2011), Carducci et al. (2015) e Silva et al. (2013), que avaliaram as mesmas áreas cafeeiras submetidas ao sistema conservacionista de manejo do solo em questão.

Neste estudo, foram avaliadas três doses de gesso, como sendo os tratamentos: G0- ausência de gesso na linha; G7- 7 Mg ha⁻¹; G28- 28 Mg ha⁻¹ de gesso adicional, aplicados na superfície do solo na linha de plantio. A escolha destas dosagens de gesso baseou-se na hipótese relacionada às possíveis alterações estruturais promovidas por este insumo agrícola que tem em sua composição o elemento cálcio que pode favorecer a agregação do solo. Para isso, avaliou-se a dose máxima recomendada e encontrada na literatura (G7), a dose referência do próprio sistema (G28) e o tratamento sem gesso adicional (G0) como controle.

A área de estudo foi implantada no delineamento em blocos ao acaso, com três repetições por tratamento (dose de gesso) sendo que, cada parcela continha 10 linhas de plantio com 36 plantas, totalizando 360 plantas por parcela, ocupando uma área de 585 m². A bordadura correspondeu a três plantas no início da parcela e duas linhas nas laterais, totalizando área de 360 m².

O solo em estudo foi classificado como Latossolo Vermelho Distrófico muito argiloso e mineralogia gibbsítica, de acordo com Carducci et al. (2014). Na época da amostragem (setembro/2011), a lavoura tinha aproximadamente três anos de implantação. Para a caracterização do solo, foram abertas três trincheiras longitudinais à linha de cultivo, em cada tratamento, com dimensões de 0,70 × 1,00 × 1,50 m.

Amostras de solo com estrutura preservada obtidas em cilindros de alumínio de 0,064 m de diâmetro × 2,5 m de altura foram coletadas com auxílio do amostrador tipo Uhland, nas

profundidades de 0,20-0,25; 0,80-0,85; 1,50-1,55 m (neste trabalho, será tratado como 0,20; 0,80; 1,50 m) na linha de cultivo, em cada trincheira, totalizando 27 amostras, com posterior acondicionamento em filmes plásticos e parafinação para a preservação do solo até a execução laboratorial.

As amostras com estrutura preservada foram preparadas – o solo excedente, proveniente da parte superior e inferior do cilindro, foi seco ao ar – e passadas por peneiras de dois milímetros, obtendo-se assim as amostras deformadas utilizadas para determinação granulométrica do solo.

A análise granulométrica foi realizada pelo emprego de agitação lenta da suspensão do solo usando NaOH 1mol L⁻¹ por 16 horas no agitador tipo Wagner com 50 rpm (Mauri et al., 2011). Os valores médios obtidos para argila, silte e areia, foram: 819, 157 e 24 g kg⁻¹, na profundidade de 0,20-0,25 m; 848, 127 e 25 g kg⁻¹ na profundidade de 0,80-0,85 m; e 886, 89 e 25 g kg⁻¹ na profundidade de 1,50-1,55 m, respectivamente.

Para determinação das curvas de retenção de água (CRA), as amostras com estrutura preservada foram inicialmente saturadas gradualmente em água destilada por capilaridade e submetidas aos potenciais matriciais (Ψ_m) de -1, -2, -4, -6, -10 kPa utilizando os funis de Büchner dotados de placa porosa e -33, -100, -500, -1.500 kPa, obtidas no extrator de placas porosas. Em seguida, as amostras foram secas em estufa, a 105-110 °C, por 48 h, para a determinação do conteúdo de água correspondente aos Ψ_m e cálculo da densidade do solo (Ds) (Embrapa, 2011).

Posteriormente, foi ajustado o modelo de van Genuchten (1980) com restrição de $m=1-1/n$, aos dados experimentais. Obtiveram-se as estimativas dos parâmetros do modelo: θ_s - conteúdo de água na saturação, θ_r - conteúdo de água residual, α e n - coeficientes de ajuste do modelo (escala e forma da curva, respectivamente).

O conteúdo de água (θ_i) e potencial matricial no ponto de inflexão (Ψ_i) das CRA foram calculadas de acordo com a proposta de Dexter & Bird (2001), assim como a inclinação no ponto de inflexão, referido como índice S de acordo com Dexter & Richard (2009).

Para a quantificação da distribuição dos poros, foi utilizada a equação proposta por Bouma (1991), descrita em Oliveira et al. (2004): $D = 4 \sigma \cos\theta / \Psi_m$. Onde: D é o diâmetro do poro (μm); σ a tensão superficial da água (0,727 bar μm a 20 °C); θ é o ângulo de contato entre o menisco e a parede do tubo capilar (considerado como zero); e Ψ_m o potencial matricial (kPa).

Neste trabalho, as classes de poros geradas foram denominadas como: macroporos grandes (>147 μm); macroporos finos (147-73 μm); mesoporos grandes (73-49 e 49-29 μm); mesoporos médios (29-9 e 9-2,9 μm); mesoporos finos (2,9-0,2 μm); e microporos (<0,6 μm), adaptado dos critérios micromorfológicos propostos por Bullock et al. (1985). A porosidade total calculada foi determinada pela relação entre o volume de vazios e o volume total de solo (Embrapa, 2011).

Os dados foram submetidos à análise exploratória e a normalidade dos erros foi verificada pelo teste de Shapiro-Wilk. O delineamento foi em blocos ao acaso em arranjo de parcelas subdivididas, sendo as parcelas os tratamentos (G0, G7 e G28) e as subparcelas as profundidades: 0,20-0,25; 0,80-0,85; 1,50-1,55 m (neste trabalho, será tratado como 0,20; 0,80; 1,50 m).

Todas as inferências estatísticas foram consideradas em nível nominal de significância a 5%. Para os ajustes dos modelos e confecção dos gráficos, foi utilizado o aplicativo computacional R 2.15.1 (R Development Core Team, 2012) e o SigmaPlot 10.0 (Sigma Plot, 2015). Para avaliação das relações entre as estimativas da inclinação no ponto de inflexão (índice S) da CRA, com a distribuição do diâmetro de poros, aplicou-se o teste de correlação de Pearson.

3 Resultados e Discussão

A partir da análise das CRA, foi possível observar a heterogeneidade do sistema poroso devido à alta variabilidade estrutural do LVd (Carducci et al., 2015). Esta variabilidade da organização estrutural do solo fica bem clara quando se observa a inclinação acentuada da CRA, o que permite inferir sobre a presença de duas grandes classes de poros nas três profundidades avaliadas (Figura 1), os interagregados (Ψ_m menos negativos ou os macroporos) e os intragregados (Ψ_m mais negativos, representado pelos microporos), o que na realidade é uma característica dos Latossolos de mineralogia oxidica gibbsítica (Carducci et al., 2013; Severiano et al., 2013).

Para os tratamentos G28 e G0, as CRA referentes à profundidade de 0,20 m apresentaram formato semelhante, especialmente nos Ψ_m menos negativos, e com maior diferença nos potenciais mais negativos, diferente do ocorrido no G7 que teve os menores valores de retenção de água para todos os Ψ_m .

Esse fato pode ser explicado, pelos efeitos associados das práticas utilizadas no sistema conservacionista de manejo do solo avaliado, logo nos primeiros anos de implantação (\approx 3 anos). De acordo com Carducci et al. (2014), os tratamentos G28 e G0 apresentaram uma distribuição semelhante dos poros entre o intervalo de 1 a 0,2 mm (> 200 μm) de diâmetro e superior ao G7, fato este que pode explicar o formato da inclinação bem definida da CRA, pois estes poros também são responsáveis pela fácil disponibilidade de água para as plantas.

Essa maior retenção de água na camada superficial do G0, particularmente nos potenciais mais negativos, se deve ao maior volume de mesoporos finos (2,9-0,6 μm) e microporos (<0,6 μm) (Figuras 1 e 2), responsáveis pela retenção de água com alta energia (Klein & Libardi, 2002). Sugere-se que o revolvimento intenso promovido pelo equipamento de preparo da linha de plantio (Serafim et al., 2011) rompeu significativamente os agregados maiores, promovendo o aumento da microporosidade e, conseqüentemente, o fenômeno da capilaridade (Mafes Inteligência Agrônômica, 2015).

Com relação ao G28 e G7, em um primeiro momento, era esperado que a alta concentração de cálcio (Ca^{2+}) na solução do solo, proveniente da solubilização do gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), promovesse um desbalanço eletroquímico neste Latossolo gibbsítico (Cremon et al., 2009), causando sua dispersão. No entanto, de acordo com Silva et al. (2013), que trabalharam na mesma área, esses tratamentos apresentaram os seguintes teores de Ca^{2+} : 4,8 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ para o G28 e 5,3 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ para o G7, ou seja, essa concentração é adequada à flocculação das argilas (Ramos et al., 2013; Silva et al., 2013; Cremon et al., 2009), salientando que essa flocculação é condição fundamental para que ocorra a agregação do solo.

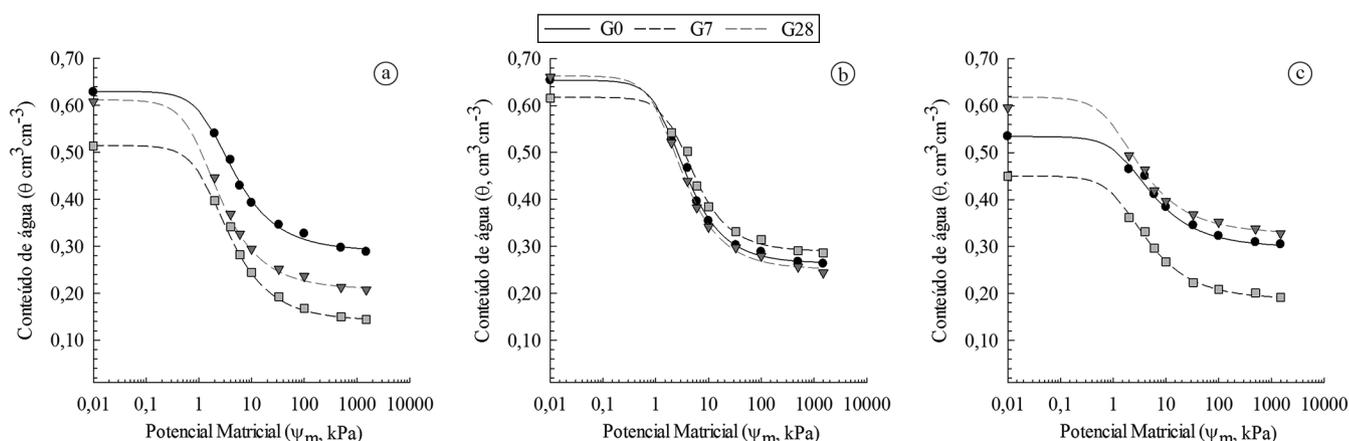


Figura 1. Valores observados e estimados da curva de retenção de água [conteúdo de água no solo (θ , $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) em função do potencial matricial, em escala logarítmica (Ψ_m , kPa)], de um Latossolo gibbsítico sob o sistema conservacionista de manejo do solo com diferentes doses de gesso (G0: sem gesso adicional, G7: 7 Mg ha^{-1} , G28: 28 Mg ha^{-1} de gesso adicional aplicado na superfície do solo na linha de plantio) em diferentes profundidades: (a) 0,20m; (b) 0,80m e (c) 1,50 m.

Figure 1. Observed and estimated values of water retention curve [soil water content (θ , $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) versus matric potential in a logarithmic scale (Ψ_m , kPa)], of gibbsitic Latosol under soil conservation management system with different gypsum doses (G0: absence of additional gypsum, G7: 7 Mg ha^{-1} and G28: 28 Mg ha^{-1} of additional gypsum applied to the soil surface of the plant row). (a) 0.20m; (b) 0.80m and (c) 1.50 m depth.

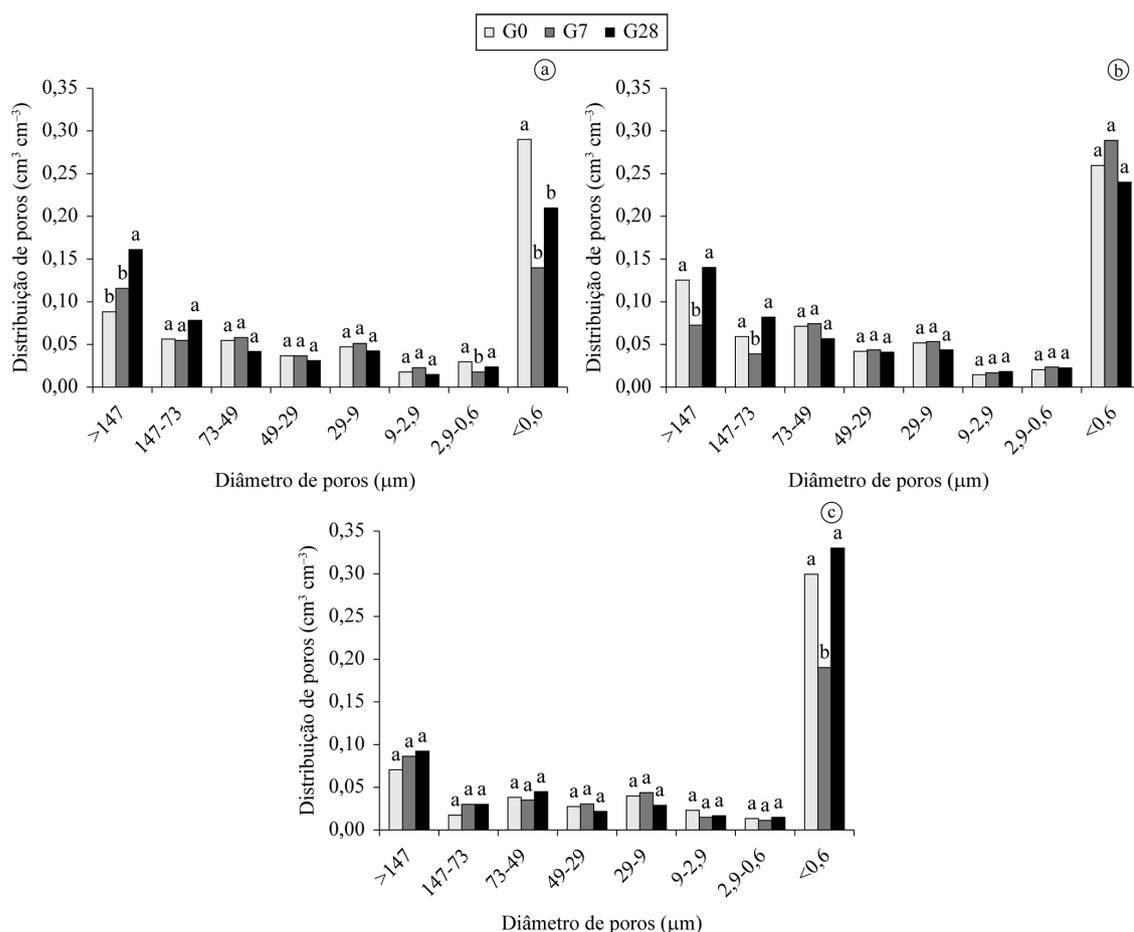


Figura 2. Distribuição de poros por tamanho do Latossolo gibbsítico sob sistema conservacionista de manejo do solo com diferentes doses de gesso (G0: sem gesso adicional, G7: 7 Mg ha^{-1} , G28: 28 Mg ha^{-1} gesso adicional aplicado na superfície do solo na linha de plantio). (a) 0,20 m; (b) 0,80 m e (c) 1,50 m de profundidade. Médias seguidas de mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Figure 2. Pores distribution in gibbsitic Latosol under soil conservation management system with different gypsum doses (G0: absence of additional gypsum, G7: 7 Mg ha^{-1} and G28: 28 Mg ha^{-1} of additional gypsum applied to the soil surface of the plant row). (a) 0.20m; (b) 0.80m and (c) 1.50 m depth. Means followed by the same lowercase letter do not differ by Tukey test ($p < 0.05$).

Ainda de acordo com Silva et al. (2013), os tratamentos promoveram uma melhoria na capacidade de troca de cátions do solo ($9,8 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, em ambos os tratamentos), ou seja, maior disponibilidade de cargas elétricas, destacando ainda a ausência de alumínio trocável na profundidade de 0,15 m, além do maior conteúdo de carbono orgânico total no tratamento G7 ($3,2 \text{ g kg}^{-1}$) em relação aos demais (G28: 2,8 e G0: $2,3 \text{ g kg}^{-1}$). Uma vez na solução do solo, o íon Ca^{2+} pode ter reagido no complexo de troca deslocando cátions como Al^{3+} para a solução, íon que estabiliza a estrutura do solo. Por outro lado, o aumento da força iônica da solução e da adsorção específica de Ca^{2+} e Mg^{2+} aos colóides minerais podem ter aumentado a espessura da dupla camada difusa. Pode ter ocorrido, também, a complexação do Al^{3+} e do Ca^{2+} excedentes, por compostos orgânicos de baixo peso molecular, provenientes do elevado aporte de resíduo vegetal (Albuquerque et al., 2000) tanto da *Brachiaria* sp., como do caféiro presentes nesse sistema conservacionista de manejo do solo (Silva et al., 2013).

É possível que a dose de 7 Mg ha^{-1} (G7) tenha facilmente se dissolvido (menor espessura do depósito de gesso sobre o solo), mesmo com menor intensidade de chuvas da região (Serafim et al., 2013) e, por isso, a fácil solubilização do gesso presente no G7 atuando primeiramente como dispersante dos agregados, como observado por Spera et al. (2008), e posteriormente atuando no equilíbrio químico dos colóides, favorecendo a floculação dos agregados.

A maior quantidade de água retida em todos os Ψ_m ocorreu na profundidade de 0,80 m (Figura 1), o que corrobora com o maior conteúdo de água detectado por sondas de umidade, observado por Santos et al. (2014), instaladas nessa mesma área experimental. Salienta-se que nesta profundidade e neste sistema conservacionista de manejo, há uma grande quantidade de raízes responsáveis pela absorção de água, como detectado por Carducci et al. (2015) em análise de imagens bidimensionais, o que garante o adequado desenvolvimento do caféiro, mesmo este sendo muito jovem (Rena & Guimarães, 2000).

Nesta profundidade, as CRA foram coincidentes, mesmo com menores valores de conteúdo de água para o G7 nos Ψ_m menos negativos, o que pode ser explicado pelo menor volume de macroporos grandes ($> 147 \mu\text{m}$). Sabe-se que, nestes poros, parte considerável da água drena rapidamente (Oliveira et al., 2004).

Na maior profundidade (1,50 m), ou seja, no horizonte Bw, este evidencia os atributos físicos intrínsecos aos Latossolos, no qual a retenção de água ocorreu na seguinte ordem: $\text{G28} > \text{G0} > \text{G7}$. Essas diferenças na retenção de água foram representadas pela diferença na amplitude da CRA, bem como pela variação no conteúdo de água no Ψ_m menos negativo (θ_s : 0,45 a 0,60 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) e mais negativo (θ_r : 0,20 a 0,33 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$).

Este resultado está associado ao alto conteúdo de argila deste solo e à sua mineralogia oxidada como observado por Severiano et al. (2013) e Carducci et al. (2013) em CRA de Latossolos, além da distribuição espacial da rede radicular nesta profundidade (Carducci et al., 2015), bem como o decréscimo dos macroporos (Figura 2). Destaca-se que esses atributos combinados contribuem para o aumento da retenção de água no solo (Serafim et al., 2013).

Independente da dose de gesso, os conteúdos de água retidos, tanto em Ψ_m mais ou menos negativos, foram altos ao

longo do perfil avaliado. A retenção de água é positivamente influenciada pelo conteúdo de argila e pela matéria orgânica, no entanto, quando há alguma homogeneidade no conteúdo de argila, como no caso deste Latossolo, a matéria orgânica se torna o atributo principal (Beutler et al., 2002; Severiano et al., 2013), o que explica a retenção homogênea do G7 entre as profundidades, promovido pelo maior conteúdo de matéria orgânica segundo Silva et al. (2013) ao avaliarem os atributos orgânicos do Latossolo na mesma área desse estudo.

Dessa forma, o uso de práticas de manejo que favoreçam o aporte contínuo de resíduo vegetal sobre o solo, como o emprego de plantas de cobertura permanente, associado às práticas que melhoram o desenvolvimento das raízes em profundidade, como as correções de ordem química e física, caso do sistema conservacionista de manejo em estudo (Carducci et al., 2015; Silva et al., 2013; Serafim et al., 2013), promovem a maior exploração do solo pelo caféiro, visto que os solos tropicais, como o Latossolo, são muito profundos e, esta propriedade favorece a ampliação da capacidade de armazenamento de água em períodos de estiagem (van Raij, 2008; Serafim et al., 2013; Santos et al., 2014).

A distribuição do diâmetro de poros permitiu identificar a intensidade das alterações estruturais promovidas pelo sistema conservacionista de manejo do solo e, são obtidas com base na CRA (Figuras 1 e 2).

Na profundidade de 0,20 m, foram observados valores significativos para as classes dos macroporos grandes ($> 147 \mu\text{m}$), microporos ($< 0,6$) e valores expressivos de macroporos finos ($147\text{-}73 \mu\text{m}$), mesoporos médios ($29\text{-}9$ e $9\text{-}2,9 \mu\text{m}$) e mesoporos finos ($2,9\text{-}0,2 \mu\text{m}$), especialmente para os tratamentos G0 e G28, e confirmados em análises de imagem tridimensional, geradas especialmente para os macroporos, obtida pela tomografia de raios X por Carducci et al. (2014), que desenvolveram trabalho na mesma área experimental.

Na profundidade de 0,80 m, o mesmo não foi observado e as diferenças ocorreram somente na classe dos macroporos. Entretanto, foi possível verificar um incremento em todas as classes de mesoporos e microporos em relação às demais profundidades, com distribuição do volume de poros mais homogênea em todos os tratamentos, porém sem a elevação de densidade do solo (Figura 2 e Tabela 1).

A dissipação da carga aplicada pelo equipamento utilizado no preparo primário e profundo (0,60 m) na linha de plantio chega a aproximadamente 0,20 m abaixo do limite de contato da lâmina ou da aplicação de carga em si, como verificado por Araujo Júnior et al. (2011) em Latossolos sob cultivo caféiro. Este fato pode ter contribuído para a alteração observada na classe dos macroporos, transformando-os em meso e microporos na profundidade de 0,80 m (Figura 2), bem como o estreitamento das CRA (Figura 1).

A maior homogeneidade na distribuição dos poros foi observada a 1,50 m, fator este intrínseco ao Latossolo, exceto aos microporos que indicam a bimodalidade desse solo (Carducci et al., 2013). Essa característica foi expressa pela forma suave das CRA nesta profundidade (Figura 1).

O maior volume de macroporos ($> 73 \mu\text{m}$) ocorreu no G28 a 0,20 m de profundidade e o menor volume, na profundidade de 1,50 m, na qual foram verificados os valores elevados

Tabela 1. Atributos físicos e hídricos do Latossolo gibbsítico sob o sistema de manejo conservacionista em estudo com diferentes doses de gesso (G0: sem gesso adicional, G7: 7 Mg ha⁻¹, G28: 28 Mg ha⁻¹ gesso adicional aplicado na superfície do solo na linha de plantio) e nas profundidades de 0,20; 0,80 e 1,50 m.

Table 1. Physical and hydric attributes in gibbsitic Latosol under soil conservation management system with different gypsum doses (G0: absence of additional gypsum, G7: 7 Mg ha⁻¹ and G28: 28 Mg ha⁻¹ of additional gypsum applied to the soil surface of the plant row) in 0.20; 0.80 and 1.50 m depth.

Trat.	S**			Ds** (Mg m ⁻³)		
	0,20	0,80	1,50	0,20	0,80	1,50
G0	0,09aAB	0,13aA	0,06aB	0,89aAB	0,78aB	1,06aA
G7	0,11aA	0,13aA	0,07aA	0,97aAB	0,91aB	1,13aA
G28	0,12aAB	0,13aA	0,08aB	0,91aA	0,79aA	0,97aA
	θi* (cm ³ cm ⁻³)			Ψi* (kPa)		
	0,20	0,80	1,50	0,20	0,80	1,50
G0	0,50aA	0,50aA	0,44abA	3,2aA	2,8abA	4,0aA
G7	0,45aA	0,48aA	0,35bA	2,8aA	4,2aA	2,8abA
G28	0,37aA	0,50aA	0,51aA	1,8aA	2,4bA	2,2bA

θi: conteúdo de água no ponto de inflexão. Ψi: potencial matricial no ponto de inflexão. S: índice de qualidade estrutural (Dexter, 2004). Ds: densidade global. *significativo a 5% de probabilidade. **significativo a 1% de probabilidade. ^{ns} não significativo pelo teste F. Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey (p<0,05).

de microporos com destaque para os tratamentos G0 e G28 (Figura 2).

Salienta-se que os macroporos são correlacionados com uma alta condutividade hidráulica (Oliveira et al., 2004); em outras palavras, parte considerável da água destes poros é facilmente drenada, desempenhando importante papel ambiental, pois são estes os poros responsáveis pela recarga de água do lençol freático.

Além disso, o menor volume de macroporos nas profundidades avaliadas não foi restritivo ao pleno desenvolvimento do sistema radicular dos cafeeiros como preconizado pelo valor de 0,10 cm³cm⁻³ como limite inferior da porosidade livre de água (Klein & Libardi, 2002). Apesar disso, a manutenção dos poros > 147 μm no solo (Figura 2) em níveis adequados é de fundamental importância nos processos dinâmicos da água no solo e, conseqüentemente, na conservação e sustentabilidade ambiental, sendo este um dos principais focos do sistema conservacionista de manejo do solo em estudo.

Os microporos, responsáveis pelo armazenamento de água potencialmente disponível para as plantas, apresentam diâmetro inferior a 0,6 μm e, conforme a redução do diâmetro, essa água pode permanecer fortemente retida (Klein & Libardi, 2002; Carducci et al., 2013). Vale lembrar que este atributo apenas é incrementado quando há o decréscimo da macroporosidade ocasionada pelos efeitos diretos dos sistemas de manejo (Oliveira et al., 2004), como foi possível detectar a 0,20 m de profundidade (Figura 2).

Essa distribuição de poros obtida pela CRA apresentou semelhanças com a calculada em imagens tomográficas realizadas por Carducci et al. (2014), porém com diferenças nos intervalos de diâmetros avaliados, devido à resolução espacial utilizada nas imagens tomográficas (60 μm). Pela tomografia de raios X foi possível quantificar um maior número e volume de poros na profundidade de 0,20 m para o G28 seguido do G0, com superioridade em volume de poros no G28 a 0,80 m e similaridades na distribuição dos poros deste com o G7 a 1,50 m de profundidade, o que promoveu o equilíbrio na dinâmica de ar e água no solo e do crescimento radicular.

Entretanto, nos dois métodos de avaliação de distribuição de poros por tomografia de raios X (Carducci et al., 2014) e/ou a CRA, foi possível confirmar o efeito gradativo do gesso no tratamento G28, pelo aumento no volume de poros em diferentes classes de diâmetro (Figura 2).

Para a avaliação da qualidade física do Latossolo sob o sistema de manejo conservacionista em estudo, foram determinados os parâmetros hídricos relacionados à estrutura, que estão apresentados na Tabela 1.

Os maiores valores de S encontrados (S 0,035) estão expressos na maior inclinação da CRA, o que indica uma boa distribuição dos poros (Dexter, 2004). Detectaram-se elevados valores do índice S (S 0,050) em todas as combinações de nível e significativo em profundidade, corroborando com o que foi encontrado por Carducci et al. (2013), que verificaram a excelente qualidade física (S>0,05) promovida pelo sistema conservacionista de manejo do solo em estudo, em área submetida a aproximadamente cinco anos a este mesmo sistema de manejo em Latossolos de mineralogia gibbsítica e caulinitica.

Ressalta-se que o índice S neste trabalho foi calculado com dados experimentais de θ em base volumétrica (cm³cm⁻³). De acordo com Maia (2011), os valores de S superiores em base volumétrica, geralmente ocorrem se Ds > 1,0 Mg m⁻³, entretanto nas condições deste experimento, as Ds foram menores ou iguais a 1,0 Mg m⁻³. Esse índice foi influenciado pelos demais atributos do solo, por exemplo, o alto conteúdo de argila, a estrutura granular, o conteúdo de matéria orgânica e as práticas conservacionistas, que estão diretamente relacionados à distribuição do diâmetro de poros (Oliveira et al., 2004).

Solos gibbsíticos (Ki ≤ 0,75), como o Latossolo em estudo (Carducci et al., 2013), exibem valores de Ds próximos a 1,0 Mg m⁻³, porosidade elevada com maior proporção de poros grandes e bem conectados, com valores superiores a 0,18 cm³cm⁻³, como resultado da sua estrutura granular muito pequena e muito bem expressa (Ferreira et al., 1999), promovida pela presença dos óxidos na fração argila desses Latossolos da região do Cerrado, independentemente da sua classe textural, o que foi confirmado nas condições deste experimento (Figura 2 e Tabela 1).

O θ e Ψ_m no ponto de inflexão (θ_i e Ψ_i , respectivamente) apresentaram valores altos para θ_i e pequena variação do Ψ_i . No entanto, estes parâmetros têm significado físico, pois, de acordo com Dexter & Bird (2001), estes representam o ponto exato em que o conteúdo de água promove uma grande proporção de agregados menores e estáveis, ou seja, a faixa de friabilidade do solo onde o ponto de ruptura dos agregados ocorre nas suas zonas de fraqueza e é identificado pela rápida entrada de ar. Em outras palavras, este ponto está intimamente ligado ao limite de separação dos macroporos dos demais diâmetros.

Não houve diferença significativa entre os tratamentos para o θ_i nas primeiras profundidades (Tabela 1), entretanto, para o G28, um menor conteúdo de água é necessário para que este atinja o conteúdo de água no ponto de inflexão que pode ser interpretado matematicamente como a capacidade de campo (Dexter & Bird, 2001). Valores de θ_i semelhantes foram observados por Carducci et al. (2013) neste mesmo sistema conservacionista de manejo do solo, porém, em área com maior tempo de implantação (≈ 5 anos), este fato pode estar associado à atuação gradativa do gesso na formação de agregados do solo mais estáveis.

O índice S é considerado um indicador de qualidade estrutural, uma vez que a degradação física do solo pode ser detectada por meio de suas alterações. Ressalta-se que se deve ter atenção ao utilizar esse índice como indicador de qualidade física em solos tropicais, pois foi desenvolvido para solos presentes em regiões de clima temperado (Dexter, 2004).

Assim, como Carducci et al. (2011), obteve-se correlação negativa entre S e conteúdo de argila ($r = -0,756$, $p < 0,05$) na profundidade de 0,20 m, bem como com D_s ($r = -0,713$, $p < 0,05$) e mesoporos médios ($r = -0,862$, $p < 0,01$) a 0,80 m. Entretanto, houve alta correlação do S com os macroporos finos (147-73 μm) ($r = 0,88$, $p < 0,01$) a 0,80 m e, a 1,50 m ($r = 0,914$, $p < 0,001$) como também com os mesoporos grandes ($r = 0,693$, $p < 0,05$).

Esse índice, como ressaltado anteriormente, é influenciado por todos os fatores que alteram a estrutura do solo e não somente a densidade do solo (Maia, 2011), o que ficou evidente na sua forte relação com poros de maior diâmetro. O Latossolo apresenta por si só elevada porosidade e friabilidade, em decorrência de sua estrutura microgranular, o que promove um equilíbrio na dinâmica ar e água no solo (Oliveira et al., 2004; Severiano et al., 2013) e está mantida pelos efeitos benéficos do sistema conservacionista de manejo do solo em estudo, comprovado pelos atributos físico-hídricos verificados neste trabalho.

A agricultura conservacionista, citada por van Raij (2008), tem por princípios a redução do revolvimento do solo, para evitar os processos erosivos e a redução da oxidação da matéria orgânica; a adoção de medidas para minimizar o efeito da compactação pela manutenção contínua da cobertura vegetal sobre o solo, o que propicia ainda o aumento do teor de carbono orgânico.

Estes fatores citados acima, quando associados a medidas corretivas de ordem química no subsolo ácido dos solos tropicais, melhoram o ambiente físico para o crescimento das plantas. Em outras palavras, o sistema conservacionista de manejo do solo avaliado neste trabalho, tem por base as práticas citadas por van Raij (2008), com efeito principal e diferenciado desse sistema de manejo: a preparação profunda e construção da

fertilidade da linha de cultivo (0,60m), manutenção de cultura de cobertura na entrelinha (*Brachiaria* sp.). O uso de gesso sobre a superfície do solo foi relevante na condição de estabilização dos agregados, contudo apresentou efeito secundário. Estes fatores contribuem positivamente na melhoria físico-hídrica do solo, particularmente pela redução de impedimentos restritivos ao desenvolvimento vertical das raízes do cafeeiro e acesso à água armazenada em profundidade.

4 Conclusão

O sistema conservacionista de manejo do solo promoveu a melhoria da qualidade estrutural do Latossolo, observada pela maior retenção de água a 0,80 m de profundidade em todos os tratamentos, redução de impedimentos físicos ao longo do perfil nos diferentes tratamentos. Maior volume de poros em diferentes classes ocorreu nas primeiras profundidades, especialmente no G28. O preparo profundo e a manutenção do resíduo vegetal sobre a superfície do solo podem ser considerados o fator principal desse sistema de manejo do solo e o gesso aplicado em superfície, como o fator coadjuvante na estruturação do Latossolo.

Referências

- ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; ERNANI, P. R.; FONTANA, E. C. Propriedades físicas e eletroquímicas de um Latossolo Bruno afetadas pela calagem. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, v. 24, n. 2, p. 295-300, 2000.
- ARAÚJO JUNIOR, C. F.; DIAS JUNIOR, M. S.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALCÂNTARA, E. N. Capacidade de suporte de carga e umidade crítica de um Latossolo induzida por diferentes manejos. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, v. 35, n. 1, p. 115-131, 2011.
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SOUZA, Z. M.; ANDRIOLI, I.; ROQUE, C. G. Retenção de água em dois tipos de Latossolos sob diferentes usos. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, v. 26, n. 3, p. 829-834, 2002.
- BOUMA, J. Influence of soil macroporosity on environmental quality. *Advances in Agronomy*, v. 46, n. 1, p. 1-37, 1991.
- BULLOCK, P.; FEDOROFF, N.; JONGERIUS, A.; STOOPS, G.; TURSINA, T. *Handbook for soil thin section description*. Edinburgh: Waine Research Publications, 1985, 152 p.
- CARDUCCI, C. E.; OLIVEIRA, G. C.; CURI, N.; HECK, R. J.; ROSSONI, D. F.; CARVALHO, T. S.; COSTA, A. L. Gypsum effects on the spatial distribution of coffee roots and the pores system in oxidic Brazilian Latosol. *Soil & Tillage Research*, v. 145, p. 171-180, 2015.
- CARDUCCI, C. E.; OLIVEIRA, G. C.; CURI, N.; ROSSONI, D. F.; COSTA, A. L.; HECK, R. J. Spatial variability of pores in oxidic Latosol under a conservation management system with different gypsum doses. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 38, n. 5, p. 445-460, 2014.
- CARDUCCI, C. E.; OLIVEIRA, G. C.; ZEVIANI, W. M.; LIMA, V. M. P.; SERAFIM, M. E. Bimodal pore distribution on soils under conservation management system for coffee crop. *Engenharia Agrícola*, v. 33, n. 2, p. 291-302, 2013.
- CARDUCCI, C. E.; OLIVEIRA, G. C.; SEVERIANO, E. C.; ZEVIANI, W. M. Modelagem da curva de retenção de água de Latossolos

- utilizando a equação duplo van Genuchten. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 35, n. 1, p. 77-86, 2011.
- CREMON, C.; ROSA JÚNIOR, E. J.; SERAFIM, M. E.; ONO, F. B. Análise micromorfológica de um latossolo vermelho distrófico em diferentes sistemas de manejo. *Acta Scientiarum Agronomy*, v. 31, n. 1, p. 139-146, 2009.
- DEXTER, A. R. Soil physical quality part I: theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, v. 120, n. 1, p. 201-214, 2004.
- DEXTER, A. R.; BIRD, N. R. A. Methods for predicting the optimum and the range of soil water contents for tillage based on the water retention curve. *Soil & Tillage Research*, v. 57, n. 7, p. 203-212, 2001.
- DEXTER, A. R.; RICHARD, G. Tillage of soils in relation to their bi-modal pore size distributions. *Soil & Tillage Research*, v. 103, n. 2, p. 113-118, 2009.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Manual de métodos de análise de solo*. 2. ed. rev. Rio de Janeiro: Embrapa, 2011. 225 p.
- FERREIRA, M. M.; FERNADES, B.; CURTI, N. Mineralogia da fração argila e estrutura de Latossolos da região sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 23, n. 1, p. 507-514, 1999.
- KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 26, n. 1, p. 857-867, 2002.
- MAFES INTELIGÊNCIA AGRONÔMICA. *Equipamentos Agromecânicos – Big Mix*. 2015. Disponível em: <www.mafes.com.br>. Acesso em: 21 julho 2015.
- MAIA, C. E. Índice S para avaliação da qualidade física de solos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 35, n. 1, p. 1959-1965, 2011.
- MAURI, J.; RUIZ, H. A.; FERNANDES, R. B. A.; KER, J.C.; REZENDE, L. R. M. Dispersantes químicos na análise granulométrica de latossolos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 35, n. 4, p. 1277-1284, 2011.
- OLIVEIRA, G. C.; DIAS JUNIOR, M. S.; RESCK, D. V. S.; CURTI, N. Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após vinte anos de Manejo e cultivo do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 28, n. 2, p. 327-336, 2004.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM. *R: a language and environment for statistical computing*. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2012. Disponível em: <http://www.R-project.org>. Acesso em: 2 maio. 2012.
- RAMOS, B. Z.; TOLEDO, J. P. V. F.; LIMA, J. M.; SERAFIM, M. E.; BASTOS, A. R. R.; GUIMARÃES, P. T. G.; COSCIONE, A. R. Doses de gesso em cafeeiro: influência nos teores de cálcio, magnésio, potássio e pH na solução de um latossolo vermelho distrófico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 37, n. 4, p. 1018-1026, 2013.
- RENA, A. B.; GUIMARÃES, P. T. G. *Sistema radicular do cafeeiro: estrutura, distribuição, atividade e fatores que o influenciam*. Belo Horizonte: EPAMIG, 2000. 80 p. (Documentos, 37).
- SANTOS, W. J. R.; SILVA, B. M.; OLIVEIRA, G. C.; VOLPATO, M. M. L.; LIMA, J. M.; CURTI, N.; MARQUES, J. J. Soil moisture in the root zone and its relation to plant vigor assessed by remote sensing at management scale. *Geoderma*, v. 221-222, n. 1, p. 91-95, 2014.
- SEVERIANO, E. C.; OLIVEIRA, G. C.; DIAS JUNIOR, M. S.; CURTI, N.; COSTA, K. A. P.; CARDUCCI, C. E. Preconsolidation pressure, soil water retention characteristics, and texture of Latosols in the Brazilian Cerrado. *Soil Research*, v. 51, n. 3, p. 193-202, 2013.
- SERAFIM, M. E.; OLIVEIRA, G. C.; OLIVEIRA, A. S.; LIMA, J. M.; GUIMARÃES, P. T. G.; COSTA, J. C. Sistema conservacionista e de manejo intensivo do solo no cultivo de cafeeiros na região do Alto São Francisco, MG: um estudo de caso. *Bioscience Journal*, v. 27, n. 6, p. 964-977, 2011.
- SERAFIM, M. E.; OLIVEIRA, G. C.; LIMA, J. M.; SILVA, B. M.; ZEVIANI, W. M.; LIMA, V. M. P. Disponibilidade hídrica e distinção de ambientes para cultivo de cafeeiros. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 17, n. 4, p. 362-370, 2013.
- SIGMA PLOT. *Sigma Plot Instrumentation Framework*. 2015. Disponível em: <http://www.sigmaplot.com/products/sigmaplot/sif.php>. Acesso em: 1 julho 2015
- SILVA, E. A.; OLIVEIRA, G. C.; CARDUCCI, C. E.; SILVA, B. M.; OLIVEIRA, L. M.; COSTA, J. C. Doses crescentes de gesso agrícola, estabilidade de agregados e carbono orgânico em Latossolo do Cerrado sob Cafeicultura. *Revista de Ciências Agrárias. Amazonian Journal*, v. 56, n. 1, p. 25-32, 2013.
- SPERA, S. T.; DENARDIN, J. E.; ESCOSTEGUY, P. A. V.; SANTOS, H. P.; FIGUEROA, E. A. Dispersão de argila em microagregados de solo incubado com calcário. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, n. esp., p. 2613-2620, 2008.
- TIRLONI, C.; VITORINO, A. C. T.; BERGAMIN, A. C.; SOUZA, L. C. F. Physical properties and particle-size fractions of soil organic matter in crop-livestock integration. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 36, n. 4, p. 1299-1309, 2012.
- VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980.
- VAN RAIJ, B. *Gesso na agricultura*. Campinas: Instituto Agrônomo, 2008. 233 p.

Contribuição dos autores: Cada autor participou de forma direta na execução deste trabalho. Carla Eloize Carducci, Geraldo César de Oliveira, especificamente na fase intelectual; Larissa Maia de Oliveira, Samara Martins Barbosa, Érika Andressa Silva, nas execuções laboratoriais, organização de dados científicos, revisão do artigo.

Agradecimentos: À FAPEMIG pelo financiamento da pesquisa; ao Consórcio Embrapa Café pelo empréstimo de veículos; ao CNPq pela concessão da bolsa de estudos; à UFLA pelo apoio institucional; à Empresa AP pelo apoio técnico e logístico.

Fontes de financiamento: FAPEMIG, CNPq, Empresa AP.

Conflito de interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesse.