



**ÉRIKA ANDRESSA DA SILVA**

**PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICAS DO SOLO E  
DESENVOLVIMENTO RADICULAR DO CAFEIEIRO**

**LAVRAS – MG**

**2017**

**ÉRIKA ANDRESSA DA SILVA**

**PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICAS DO SOLO E DESENVOLVIMENTO  
RADICULAR DO CAFEIRO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Recursos Ambientais e Uso da Terra, para a obtenção do título de Doutora.

Prof. Dr. Geraldo César de Oliveira  
Orientador

**LAVRAS – MG**

**2017**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Silva, Érika Andressa da.

Propriedades físico-hídricas do solo e desenvolvimento radicular do cafeeiro / Érika Andressa da Silva. - 2017.

110 p. : il.

Orientador: Geraldo César de Oliveira.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2017.

Bibliografia.

1. Estruturação do solo. 2. Configuração de poros. 3. Agregação do solo. I. Oliveira, Geraldo César de. II. Título.

**ÉRIKA ANDRESSA DA SILVA**

**PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICAS DO SOLO E DESENVOLVIMENTO  
RADICULAR DO CAFEIRO**

***PHYSICAL-HYDRIC PROPERTIES OF THE SOIL AND ROOT DEVELOPMENT OF  
COFFEE PLANT***

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Recursos Ambientais e Uso da Terra, para a obtenção do título de Doutora.

APROVADA em 03 de Março de 2017.

Prof. Dr. José Maria de Lima	UFLA
Prof. Dr. Bruno Teixeira Ribeiro	UFLA
Prof. Dr. Sérgio Henrique Godinho Silva	UFLA
Prof. Dr. Luiz Fernando Coutinho de Oliveira	UFLA
Dr. Paulo Tácito Gontijo Guimarães	EPAMIG

Prof. Dr. Geraldo César de Oliveira  
Orientador

**LAVRAS – MG**

**2017**

*Aos meus avôs, Pedro Matias da Silva e João Maria da Silva (**in memoriam**), por terem me ensinado que fazer a diferença é possível.*

**DEDICO**

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por me permitir vencer mais esta jornada.

A minha família, em especial aos meus pais, José Vítor da Silva e Maria Irene da Silva, por tudo que fizeram por mim, pelo exemplo de honestidade, humildade e bondade.

À Universidade Federal de Lavras e ao Departamento de Ciência do Solo, pela oportunidade e contribuição para minha formação profissional.

À Fundação de Amparo à pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapemig), pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Consórcio Embrapa Café, em especial do Dr. Paulo Tácito Gontijo Guimarães, pelo apoio logístico e auxílio nas pesquisas.

Ao Prof. Dr. Geraldo César de Oliveira, pela oportunidade de trabalhar em sua equipe e por todo apoio recebido nesses anos de orientação. Pelo zelo para com seus orientandos e conselhos para a vida.

Aos coorientadores Profª. Dra. Carla Eloize Carducci e Prof. Dr. Bruno Montoani Silva, agradeço o saber dividido, as valiosas contribuições para o trabalho, os conselhos e a amizade sincera.

Ao Prof. Dr. Moacir de Souza Dias Júnior, por todos os seus ensinamentos, confiança e amizade.

À coordenação do programa de pós-graduação em Ciência do Solo, por todo apoio e auxílio aos discentes do DCS/UFLA.

A todos os professores do DCS- UFLA que participaram da minha formação. Em especial aos professores, Dr. José Maria de Lima, Dr. Mozart Martins Ferreira, Dr. Luiz Roberto Guimarães Guilherme, Dr. Carlos Alberto Silva, Dr. Bruno Teixeira Ribeiro, Dr. Sérgio Henrique Godinho Silva, Dr. Júnior César Avanzi e Dr. Nilton Curi, por todo apoio a nossa equipe de trabalho, incentivo e sugestões construtivas.

Ao Dr. Luiz Fernando Coutinho, por todas as sugestões construtivas ao nosso trabalho.

As nossas queridas secretárias Dirce de Cássia e Maria Alice, por todo apoio aos discentes do DCS, carinho e amizade.

A Eng<sup>o</sup> Agr. Dulce Clarete e a Doroteo, pelo apoio técnico excepcional, apoio constante e amizade.

A Empresa AP - Agropecuária Piumhi, em especial a Eng<sup>o</sup> Agr. Msc. Joyce Cristina Costa e ao Eng<sup>o</sup> Agrônomo Alessandro S. De Oliveira, pelo apoio incondicional às pesquisas, confiança e profissionalismo.

A Isadora Bordini, “por estar sempre lá quando preciso”, pelos conselhos e preocupação.

A Pedro Benevenuto e Laura Melo, meus queridos coorientados de Iniciação Científica, não só pela disposição e apoio na condução dos trabalhos, mas por serem pessoas maravilhosas.

À Larissa Maia, Aline Antunes, Máira Toma, Franciane Diniz, Damiany Pádua, Danielle Guimarães e Emanuely Assis, pela amizade sincera e por tudo que já fizeram por mim nessa vida.

Aos meus queridos amigos da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Leticia Salvi e Jânio Barbosa, não só pelo saber compartilhado, mas por todos os bons momentos vividos.

A todos os colegas de pós- graduação pela convivência e amizade. Em especial a Samara, Zélio, Diego Tassinari, Carolline, Maria Luiza, Sérgio Henrique, Raphael Siqueira, Anita, Soraya, Elidiane, Giovana, por todos os anos compartilhados de Ciência do Solo.

Aos alunos de IC com os quais tive o prazer de conviver e aprender: Izabela Lima, Lucas Andrade, André Abelar, Petrus Peters, Jéssica Freitas, Yasmim Lima, Josué Alexandre, Lucas Ademir, Eveline Pereira e Helena Sanábio.

A todos os funcionários do DCS-UFLA, pelo carinho incondicional para com os discentes.

A todos os graduandos que fizeram parte da minha vida no período em que fui professora Substituta no DCS-UFLA. Agradeço pelo carinho e pelas amizades. Inspirações para toda vida.

A todos que contribuíram para a minha formação profissional e pessoal.

Meus sinceros agradecimentos !

“Viver é sempre dizer aos outros que eles são importantes. Que os amamos, porque um dia eles se vão, e ficamos com a nítida impressão de que não amamos o suficiente”.

(Chico Xavier)

*“As pessoas entram em nossas vidas por acaso, mas não é por acaso que elas permanecem”.* (Lilian Tonet)

*“Nenhum trabalho de qualidade pode ser feito sem concentração e autossacrifício, esforço e dívida”* (Max Beerbohm)

*“O único lugar onde o sucesso vem antes do trabalho é no dicionário.”* (Albert Einstein)

*“O saber a gente aprende com os mestres e os livros. A sabedoria se aprende é com a vida e com os humildes”-* (Cora Coralina)

*“A alegria está na luta, na tentativa, no sofrimento envolvido e não na vitória propriamente dita”* (Mahatma Gandhi)

*“O que vale na vida não é o ponto de partida e sim a caminhada”* - (Cora Coralina)

*Os sonhos não determinam o lugar em que você vai estar, mas produzem a força necessária para tirá-lo do lugar em que está* ( Augusto Cury)

## RESUMO GERAL

Na região do Alto São Francisco, em Minas Gerais, um sistema de manejo se utiliza de revolvimento intenso do solo e preparo profundo dos sulcos de plantio de cafeeiros, gramíneas com cortes periódicos nas entrelinhas e amontoa para a linha da cultura principal, além de doses de gesso acima da convencional recomendada na literatura. O objetivo principal, neste trabalho, é aumentar o teor de cálcio em profundidade no perfil do solo. Esse sistema vem sendo adotado por muitos cafeicultores e tem se destacado por promover o desenvolvimento radicular do cafeeiro em profundidade, como estratégia de fuga do problema da seca, por permitir um maior aproveitamento da água do subsolo. Contudo, ainda são incipientes os estudos científicos que respaldem sua implantação nas diferentes unidades pedológicas da região. Portanto, neste estudo, objetivou-se avaliar: i) o potencial do sistema de manejo em promover mudanças positivas na estrutura de Latossolo, Cambissolo e Nitossolo, ii) sua capacidade em condicionar melhorias físico-hídricas que favoreçam o desenvolvimento do sistema radicular do cafeeiro, ii) a influência do tempo de implantação na configuração dos poros e distribuição do sistema radicular de cafeeiros em Latossolo muito argiloso. Também foi realizado um estudo para comparar métodos de determinação da estabilidade de agregados do solo. O estudo está sendo divulgado em quatro artigos. Os métodos mais eficientes para a obtenção dos índices de agregação foram os provenientes de energia específica ultrassônica. No segundo artigo, estudando um Latossolo Vermelho oxidico gibbsítico, verificou-se que o manejo exerce influência na estabilidade de agregados das classes de tamanho 4-8 mm, pois a energia crítica necessária para desagregação dessa classe de agregados, no manejo, foi superior àquela observada na mata nativa. No terceiro artigo, avaliando Nitossolo, Cambissolo e Latossolo após 5 anos da implantação do sistema de manejo, verificou-se que todos esses solos sofreram mudanças estruturais, mas com impactos muito diferenciados, sendo os maiores benefícios observados no Cambissolo, em que o manejo, nas camadas de 0,20-0,40 m, promoveu aumento no volume dos macroporos grandes e finos ( $>147$ ;  $147-73 \mu\text{m}$ ) responsáveis pela maior aeração e rápida drenagem interna do solo, assim como aumento dos mesoporos grandes ( $73-49$  e  $49-29 \mu\text{m}$ ), poros estes responsáveis pela água prontamente disponível para as plantas. No quarto artigo, verificou-se que as lavouras cafeeiras sob Latossolo gibbsítico, com apenas 3 anos de idade, já apresentaram um sistema radicular com conformidade típica de uma planta adulta, atingindo profundidade acima de 1m. O sistema de manejo é indicado para Latossolos e Cambissolos dessa região.

**Palavras-chave:** Estruturação do solo. Configuração de poros. Agregação do solo. Sistema radicular.

## GENERAL ABSTRACT

In the region of the High São Francisco River, in Minas Gerais, Brazil, a management system uses intense soil revolving and deep preparation of the coffee-planting furrows, grass with periodic cuts in the interlines, and heaping to the line of the main culture, in addition to doses of gypsum above what is conventionally recommended in literature. The main objective is to increase the content of calcium in the depth of the soil profile. This system has been adopted by many coffee producers, gaining prominence for the promotion of coffee root development in depth as a strategy to escape the issue of drought, allowing better use of water from the subsoil. However, there are still few scientific studies regarding its implementation in the different pedological units of the region. Therefore, this study aimed at evaluating: i) the potential of the management system for promoting positive changes in the structure of Oxisol, Cambisol and Nitosol; ii) its capacity for conditioning physical-hydric aspects that favor the development of coffee root system; iii) the influence of implementation time over pore configuration and the distribution of the root system in very clayey Oxisol. We also conducted a study to compare methods for determining the stability of soil aggregates. The study is being published in four articles. The most efficient methods for obtaining the aggregation indexes derived from specific ultrasonic energy. In the second article, while studying gibbsitic oxidic Red Oxisol, we verified that the management influences aggregate stability in size 4-8 mm classes, given that the critical energy necessary for disaggregation of this class of aggregates was superior to that observed in native wood. In the third article, while evaluating Nitosol, Cambisol and Oxisol, after 5 years of implementing the management system, we verified that all soils underwent structural changes, but with distinct impacts. The most benefits occurred in the Cambisol, in which management, at layers of 0.20-0.40 m, caused the increase in the volume of large and thin macropores ( $>147$ ;  $147-73 \mu\text{m}$ ), responsible for the greater aeration and quick internal drainage of the soil, as well as increase of large macropores ( $73-49$  and  $49-29 \mu\text{m}$ ), responsible for the water available to the plants. In the fourth article, we verified that the coffee crops in gibbsitic Oxisol, with 3 years of age, already presented root system with conformity typical of an adult plant, reaching depth larger than 1 m. The management system is indicated for Oxisol and Cambisol of this region.

**Keywords:** Soil structuring. Pore configuration. Soil aggregation. Root system.

## SUMÁRIO

	<b>PRIMEIRA PARTE</b> .....	11
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	11
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	14
	<b>SEGUNDA PARTE – ARTIGOS</b> .....	17
	<b>ARTIGO 1 - <i>STABILITY OF AGGREGATES OF GYPSUM AMENDED SOILS: COMPARING WET SIEVING AND SONIFICATION METHODS</i></b> .....	17
	<b>ARTIGO 2 - AGREGAÇÃO DE LATOSSOLO SUBMETIDO A MANEJO CONSERVACIONISTA DURANTE 5 ANOS, MENSURADA POR ENERGIA ULTRASSÔNICA</b> .....	35
	<b>ARTIGO 3 - ALTERAÇÕES NA AGREGAÇÃO E NA POROSIDADE DE DIFERENTES SOLOS SUBMETIDOS A MANEJO CONSERVACIONISTA NA CAFEICULTURA</b> .....	59
	<b>ARTIGO 4 - <i>ROOT SPATIAL DISTRIBUTION IN COFFEE PLANTS OF DIFFERENT AGES UNDER CONSERVATION MANAGEMENT SYSTEM</i></b> .....	91

## PRIMEIRA PARTE

### 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a cafeicultura vem se expandindo para classes de solos mais limitadas física ou quimicamente, cujos principais problemas estão relacionados, normalmente, a adensamento ou limitação química, a exemplo do que acontece com Cambissolos, Latossolos e Nitossolos do Bioma Cerrado (SERAFIM et al., 2013a, 2013b). Para corrigir as limitações, novos pacotes tecnológicos são necessários para viabilizar a implantação da cafeicultura nesses solos, uma vez que as tecnologias convencionais de manejo não garantem uma produção economicamente sustentável sem degradação dos solos. Assim, para contornar limitações físicas e químicas de Nitossolos, Cambissolos e Latossolos, na região do Alto São Francisco, no oeste de Minas Gerais, produtores e técnicos adaptaram um sistema de manejo baseado em práticas vegetativas e mecânicas de conservação visando à melhorias químicas e físicas dos solos (CARDUCCI et al., 2015b; SERAFIM et al., 2011, 2013a, 2013b).

Nesse sistema de manejo, o condicionamento físico é obtido com preparo profundo do solo (sulcamento a 60 cm de profundidade) seguido de correções químicas e fertilização, além da aplicação, em superfície, de doses de gesso agrícola não convencionais, superiores àquelas recomendadas na literatura (SERAFIM et al., 2011; SILVA et al., 2016).

A manutenção de braquiária nas entre linhas da cultura é outro ponto de grande relevância nesse sistema. Essa gramínea é manejada com cortes periódicos e todo resíduo vegetal proveniente dos cortes é direcionado para a linha de plantio, constituindo-se em aporte contínuo de matéria orgânica para o solo (SILVA et al., 2014, 2016). O sistema de manejo também preconiza a adoção de terraços em patamar nas áreas mais declivosas que, associado à cobertura vegetal nas entre linhas, faz dele um eficiente sistema conservacionista do solo (SILVA et al., 2016).

Apesar dos efeitos positivos desse sistema de manejo (CARDUCCI et al., 2015a; SERAFIM et al., 2013a, 2013b; SILVA et al., 2012; SILVA et al., 2013), por ocasião do preparo, o revolvimento profundo provoca a pulverização do solo. Dessa forma persistem muitas dúvidas acerca da estabilidade do solo, com destaque para a dispersão, agregação, reajuste estrutural ou acomodação das partículas do solo, particularmente nos solos mais jovens onde é comum o problema de adensamento em condições naturais (BAMBERG et al., 2011; MARCOLAN et al., 2007).

De acordo Bamberg et al. (2011), camadas revolvidas são estruturalmente instáveis, apresentando elevada porosidade e baixos valores de densidade após a operação mecanizada, mais marcantes, ao longo do tempo, em razão, principalmente dos ciclos de umedecimento e secagem, com tendência das propriedades do solo retornarem ao seu estado original (MORET; ARRUE, 2007).

A recuperação de propriedades físicas e a reorganização estrutural, após intensa mobilização do solo, foi observada em sistemas conservacionistas, especialmente naqueles implantados há mais tempo (MARCOLAN et al., 2007; SPERA et al., 2009), em razão do grande aporte de resíduos orgânicos e nutrientes. Isso aconteceu, porque a matéria orgânica favoreceu a agregação do solo, reduziu a densidade do solo e elevou o volume de poros, favorecendo a infiltração de água e a aeração (CUNHA et al., 2011; JORDAN; ZAVALA; GIL, 2010).

Esse sistema de manejo, ao propiciar uma nova reorganização estrutural no solo, promove melhorias na configuração dos poros, favorecendo o incremento dos poros intermediários, responsáveis pela retenção da água prontamente disponível para as plantas (CARDUCCI et al., 2013, 2015b). Isso é relevante, particularmente para os Latossolos que apresentam uma distribuição bimodal dos poros (CARDUCCI et al., 2015b), ou seja, possuem elevada macroporosidade e elevada microporosidade, e uma pequena proporção de poros com diâmetro intermediário, fazendo com que haja moderada a baixa quantidade de água disponível, mesmo nos muito argilosos (CARDUCCI et al., 2011, 2013; LOPES; GUILHERME, 1992).

Considerando que a região do cerrado é caracterizada por longos períodos de seca edafológica (SANTOS et al., 2014; SILVA et al., 2015), estratégias de manejo que propiciam o incremento dos poros intermediários nos solos são de suma importância para a melhoria da disponibilidade hídrica para as plantas (BARBOSA et al., 2014). Ademais, é por meio do espaço poroso do solo que o sistema radicular das plantas se alonga (REICHERT et al., 2011). Portanto, ao promover modificações na organização, tamanho e distribuição de poros, o manejo pode influenciar diretamente na distribuição das raízes ao longo do perfil (CARDUCCI et al., 2014a, 2014b).

Em estudos de porosidade realizados com tomografia computada de raios-X, em um Latossolo muito argiloso sob o mesmo sistema de manejo aqui relatado, Carducci et al. (2014b), verificaram que os macroporos finos do solo ( $\emptyset < 1$  mm), assim como os mesoporos grandes ( $\emptyset < 0,2$  mm) favoreceram o desenvolvimento das raízes finas ( $\emptyset \leq 1$  mm). Em outro trabalho no mesmo solo, ao avaliar a distribuição de poros em imagens 3D e o sistema

radicular de cafeeiros em imagens 2D, Carducci et al. (2014b) observaram a presença de raízes finas em camadas abaixo de 0,80 m de profundidade especialmente em cafeeiros jovens (idade 3 anos), fato este ainda não relatado em literatura científica e que chama a atenção para a eficiência do referido sistema de manejo para a cultura cafeeira. Os autores atribuíram os resultados ao maior volume de poros de diâmetro  $< 2$  mm, que aparentemente favoreceram o desenvolvimento radicular.

Em recente estudo, Carducci et al. (2016) avaliaram os efeitos do tempo de implantação do sistema de manejo (3 e 6 anos) na variabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho muito argiloso por técnicas de análise visual, verificando que não houve modificação da estrutura do solo nas camadas superficiais, mas a alteração foi significativa nas camadas subsuperficiais do solo. Os autores observaram que houve reorganização estrutural no solo, com conseqüente homogeneização no tamanho dos poros no subsolo.

Salienta-se que muitos trabalhos científicos a respeito desse sistema de manejo já foram conduzidos em Latossolos (CARDUCCI et al., 2014a, 2014b, 2015a, 2015b, 2016; SANTOS et al., 2014; SILVA et al., 2013; SERAFIM et al., 2013a; SILVA et al., 2014, 2015, 2016) mas em Cambissolos e Nitossolos as pesquisas ainda são incipientes.

A dinâmica de agregação nas diferentes unidades pedológicas em que esse sistema é empregado é desconhecida; pesquisas a esse respeito são necessárias. Entretanto, como os resultados de estabilidade de agregados em água obtidos pelo método tradicional de tamisamento úmido são, às vezes, contrastantes, não permitindo ainda a definição do nível de energia ou força envolvida nessa análise, as técnicas de ultrassonificação serão usadas, neste trabalho, por permitirem a mensuração da energia necessária para a quebra do agregado e sua relação com os agentes de ligação, além de possibilitar a avaliação da existência de hierarquia de agregados em solos (KAISER et al., 2012; ZHU; FIELD; MINASNY, 2010).

É importante destacar que também são necessários mais estudos para verificar se o sistema de manejo propiciará condições favoráveis para o enraizamento contínuo da cultura, melhorando a disponibilidade de água para as plantas nos mais diferentes solos.

Diante do exposto, neste trabalho objetivou-se avaliar: i) o potencial do referido sistema de manejo em promover melhorias na agregação de Latossolo, Cambissolo e Nitossolo, com base na análise convencional e em análise utilizando ultrassom, após 5 anos da implantação do manejo ii) verificar a sua capacidade condicionadora de melhorias físico-hídricas que favoreçam o desenvolvimento do sistema radicular do cafeeiro; ii) verificar a influência do tempo de implantação do sistema de manejo na configuração dos poros e distribuição do sistema radicular de cafeeiros em Latossolo muito argiloso.

## REFERÊNCIAS

- BAMBERG, A. L. et al. Temporal changes of soil physical and hydraulic properties in strawberry fields. **Soil use and Management**, Oxford, v. 27, n. 3, p. 385–394, Sept. 2011.
- BARBOSA, S. M. et al. Potencialidade de uso de Zeólitas na atenuação do déficit hídrico em Latossolo do cerrado. **Semina: ciências agrárias**, Londrina, v. 35, n. 4, p. 2357-2368, 2014. Suplemento.
- CARDUCCI, C. E. et al. Bimodal pore distribution on soils under conservation management system for coffee crop. **Engenharia Agrícola**, Piracicaba, v. 33, n. 2, p. 291-302, mar./abr. 2013.
- CARDUCCI, C. E. et al. Distribuição espacial das raízes de cafeeiro e dos poros de dois Latossolos sob manejo conservacionista. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 3, p. 270-278, mar. 2014a.
- CARDUCCI, C. E. et al. Gypsum effects on the spatial distribution of coffee roots and the pores system in oxidic Brazilian Latosol. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 145, p. 171-180, Jan. 2015a.
- CARDUCCI, C. E. et al. Modelagem da curva de retenção de água de Latossolos utilizando a equação duplo van Genuchten. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 1, p. 77-86, jan./fev. 2011.
- CARDUCCI, C. E. et al. Retenção de água do solo sob sistema conservacionista de manejo com diferentes doses de gesso. **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, v. 58, n. 3, p. 284-291, jul./set. 2015b.
- CARDUCCI, C. E. et al. Spatial variability of pores in oxidic latosol under a conservation management system with different gypsum doses. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 38, n. 5, p. 45-460, set./out. 2014b.
- CARDUCCI, C. E. et al. Visual analysis and X-ray computed tomography for assessing the spatial variability of soil structure in a cultivated Oxisol. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 1, p. 12-24, Apr. 2016.
- CUNHA, E. Q. et al. Sistemas de preparo do solo e culturas de cobertura na produção orgânica de feijão e milho. I - Atributos físicos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 2, p. 589-602, mar./abr. 2011.
- JORDAN, A.; ZAVALA, L. M.; GIL, J. Effects of mulching on soil physical properties and runoff under semi-arid conditions in southern Spain. **Catena**, Amsterdam v. 81, n. 1, p. 77-85, Apr. 2010.
- KAISER, M. et al. Application of ultrasound to disperse soil aggregates of high mechanical stability. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Temuco, v. 175, n. 4, p. 521–526, Aug. 2012.

LIMA, V. M. P. et al. Intervalo hídrico ótimo como indicador de melhoria da qualidade estrutural de Latossolo degradado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 1, p. 71-78, jan./feb. 2012.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. **Solos sob cerrado: manejo da fertilidade para a produção agropecuária**. São Paulo: ANDA, 1992. 49 p. (Boletim técnico, 5).

MARCOLAN, A. L. et al. Recuperação de atributos físicos de um Argissolo em função do seu revolvimento e do tempo de semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 3, p. 571-579, maio/jun. 2007.

MORET, D.; ARRÚE, J. L. Dynamics of soil hydraulic properties during fallow as affected by tillage. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 96, n. 1-2, p. 103-113, Oct. 2007.

REICHERT, J. M. et al. Hidrologia do solo, disponibilidade de água as plantas e zoneamento agroclimático. In: KLAUBERG FILHO, O. K.; MAFRA, A. L.; GATIBONI, L. C. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo: volume 7**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2011. p. 1-54.

SANTOS, W. J. R. et al. Soil moisture in the root zone and its relation to plant vigor assessed by remote sensing at management scale. **Geoderma**, Amsterdam, v. 221-222, p. 91-95, June 2014.

SERAFIM, M. E. et al. Potencialidades e limitações de uso de Latossolos e Cambissolos, sob sistema conservacionista em lavouras cafeeiras. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 29, n. 6, p. 1640-1652, nov./dez. 2013a.

SERAFIM, M. E. et al. Qualidade física e intervalo hídrico ótimo em Latossolo e Cambissolo, cultivados com cafeeiro, sob manejo conservacionista do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 3, p. 733-742, maio/jun. 2013b.

SERAFIM, M. et al. Sistema conservacionista e de manejo intensivo do solo no cultivo de cafeeiros na região do Alto São Francisco, MG: estudo de caso. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 27, n. 6, p. 964-977, nov./dez. 2011.

SILVA, B. M. et al. Critical soil moisture range for a coffee crop in an oxidic Latosol as affected by soil management. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 154, p. 103-113, Dec. 2015.

SILVA, B. M. et al. Índice S no diagnóstico da qualidade estrutural de um Latossolo muito argiloso sob manejo intensivo. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 28, n. 3, p. 338-345, maio/jun. 2012.

SILVA, E. A. et al. Aggregate stability by the "high energy moisture characteristic" method in an oxisol under differentiated management. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 5, p. 1633-1642, set./out. 2014.

SILVA, É. A. et al. Aggregates morphometry of a Inceptisol under conservationist system. **Semina: ciências agrárias**, Londrina, v. 37, n. 3, p. 1165-1176, maio/jun. 2016.

SILVA, E. A. et al. Doses crescentes de gesso agrícola, estabilidade de agregados e carbono orgânico em Latossolo do Cerrado sob Cafeicultura. **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, v. 56, n. 1, p. 25-32, jan./mar. 2013.

SPERA, S. T. et al. Integração lavoura e pecuária e os atributos físicos de solo manejado sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 1, p. 129-136, jan./fev. 2009.

ZHU, Z.; FIELD, D. J.; MINASNY, B. Measuring and modelling the actual energy involved in aggregate breakdown. **Catena**, Amsterdam, v. 82, n. 1, p. 53-60, July 2010.

**SEGUNDA PARTE – ARTIGOS****ARTIGO 1 - *STABILITY OF AGGREGATES OF GYPSUM AMENDED SOILS:  
COMPARING WET SIEVING AND SONIFICATION METHODS***

**(Formatado de acordo com a versão publicada no periódico *African Journal of Agricultural Research*)**

Érika Andressa da Silva\*, Geraldo César de Oliveira<sup>1</sup>, Carla Eloize Carducci<sup>2</sup>, José Maria de Lima<sup>3</sup>, Laura Beatriz Batista de Melo<sup>4</sup>, Pedro Antônio Namorato Benevenuto<sup>5</sup>

---

\* Corresponding author .Substitute Professor, Soil Science Department, Federal University of Lavras - DCS-UFLA. Lavras, MG, Brazil. E-mail: erika.silva@dcs.ufla.br .Tel.: +55 35 3829 2165.

<sup>1</sup> Associate Professor, DCS-UFLA. E-mail: geraldooliveira@dcs.ufla.br Tel.: +55 35 3829 2165.

<sup>2</sup> Federal University of Santa Catarina – Curitibanos campi (UFSC), 89520-000 Curitibanos, SC, Brazil. E – mail: ec.carducci@ufsc.br . Tel.: +55 48 3721 6274.

<sup>3</sup> Full Professor, DCS-UFLA. E-mail: jmlima@dcs.ufla.br. Tel.: +55 35 3829 2165.

<sup>4</sup> Environmental and Sanitary Engineering,DCS-UFLA:lauramelo26@hotmail.com. Tel: +55 35 3829 2165

<sup>5</sup> Agronomy student, DCS-UFLA: pedrobenevenuto@hotmail.com. Tel.: +55 35 3829 2165.

## ABSTRACT

The results of aggregate stability using wet sieving are, sometimes contrasting, and do not express the energy level or force that are involved in aggregation. The objective of this study was to compare two methods to determine the geometric mean diameter and the percentage of aggregates > 2 mm in Latosol and Cambisol cultivated with coffee. Undisturbed material was sampled at the following depths: hilled layer (soil above the gypsum layer) and 0.0-0.20 m and 0.20-0.40 m below the gypsum layer, with three replicates, in two soil classes: Latosol and Cambisol. The aggregate stability was determined by wet sieving (standard method) and sonification. For the sonification, 5 g of aggregate were submitted to increasing levels of ultrasonic energy, 2.2; 6.4; 12.8; 25.5 J mL<sup>-1</sup>. After sonification, samples were sieved through the same sieve set as the standard method. Geometric mean diameter (GMD) of the aggregates and the percentage of > 2 mm aggregates were calculated. Variance of data was calculated and the means were compared by the Scott-Knott test ( $p < 0.05$ ). In Cambisol, the GMD and percentage of > 2 mm aggregates were higher when determined by the standard method, whereas sonification demonstrated a difference to depth regarding aggregate stability. The 0.20 to 0.40 m depth aggregates were more susceptible to breakdown. Sonification methods S15 and S30, which respectively correspond to ultrasonic energy levels 6.4 and 12.8 J mL<sup>-1</sup>, were more sensitive in detecting differences among depths in the GMD aggregation index of the soil.

Keywords: ultrasonic energy, wet sieving, aggregation.

## INTRODUCTION

In general, the measurement of aggregate stability of a soil in the laboratories aims to reproduce some mechanism that impose disruptive forces on the aggregates, and then to evaluate their resistance degree. There are at least four mechanisms which are responsible for soil aggregate breakdown: 1- hydration processes: the breakdown occur by compression of the entrapped air within the aggregate by water; 2- raindrop impact; 3- microcracking during wetting and drying cycles; 4- physicochemical dispersion processes (Le Bissonnais, 1996; Amézketa, 1999). Thus there are different methods to measure the aggregate stability of a soil, but all at them simulate a single mechanism.

The wet sieving (WS) of Yoder (1936) is recommended as the standard procedure to determine the aggregate stability. It has been used as a predictor of water erosion effect on soil structure. However, this method is limited, as it does not consider standardization of the water content of the aggregates under analysis and regarding the pre-wetting procedures (Castro Filho et al., 1998).

This method requires control of the aggregate wetting, in order to prevent rapid expulsion of entrapped air inside the aggregates, since these are forces responsible for aggregate breakdown in the weakness zones. The slower aggregate moistening, the lower the disintegrating effects generated by the saturation of the samples.

Moreover, according to Castro Filho et al. (1998), direct immersion of the air-dried aggregates into the water can simulate the soil disaggregation under natural flood conditions (Kemper; Chepil, 1965). Pre-wetting the aggregates allows them to get wet by capillary which can be compared to the conditions during rain, by considering that a flood is formed gradually and only an initial water depth flows slowly towards the slope.

On the other hand, the sonification method is based on cavitation (Chen & Zhu (2011), where ultrasonic waves are irradiated in a suspension of water and soil aggregates. This phenomenon only occurs if the acoustics of the ultrasound pressure is enough to stimulate cavitation (Mayer et al., 2002), which is characterized by the formation, growth and implosion of air bubbles in the suspension (Pilli et al., 2011), responsible for disintegration of the soil material (North, 1979).

The main advantage of sonification method is that the energy level used to promote the breakdown of aggregates can be controlled, allowing comparison of the results among different soil types (Raine and So, 1993, 1994). However, several experimental conditions may influence the results: i) the output energy can be different from the applied energy, which requires previous calibration of the emitted power (Sá et al, 2000); the immersion depth and geometric shape of the ultrasonic probe can interfere with the energy spread (Mayer et al., 2002; Schmidt et al., 1999) (the deeper the probe, the higher the distribution energy in the medium), therefore, the immersion depth of the probe should be the same for all samples; ii) the water:aggregate ratio affects the effectiveness of the ultrasonic energy dispersion (Schomakers et al, 2011.); iii) the cavitation phenomenon is reduced as the temperature of the soil suspension exceeds 40°C (Roscoe et al., 2000), thus the temperature during the test procedure must be monitored and the equipment always cooled when reaching this temperature; iv) the probe vibration amplitude is influenced by the polishing state of its tip, therefore, the tips must be replaced when it gets worn (Mayer et al., 2002).

Both methods, wet sieving and sonification, provide soil aggregation indices such as geometric mean diameter (GMD) and percentage of aggregates > 2 mm (Kemper; Chepil, 1965). Therefore, this study aimed to compare the methods for determining these aggregation indices in a Latosol and Cambisol in a coffee (*Coffea arabica* L.) plantation area.

## MATERIAL AND METHODS

### Description of the study area and soil sampling

Undisturbed samples were collected in five-year-old areas of a commercial coffee field, under a conservation soil management system that has been used in São Roque de Minas and Vargem Bonita regions in the upper São Francisco river basin, Minas Gerais, Brazil (Serafim et al., 2013). The climate type is Cwa, according to the Köppen classification, with average annual rainfall of 1,344 mm and well-defined dry season from May to September (Menegasse et al., 2002).

We sampled two crops: Both stands are ca. two hectare in size and rectangular in shape. The soils of these areas originating from pelitic rocks (siltstones of the Canastra formation) were classified according to the Brazilian Classification System (Embrapa, 2013), as typic dystrophic Red Latosol and typic dystrophic Tb Haplic Cambisol. Physical and chemical characterization of the soils were conducted and the calculation of kaolinite and gibbsite content (Table 1) carried out by means of stoichiometric ratios derived from their ideal chemical formulas as proposed by Resende et al. (1987).

Table 1. Physical, chemical and mineralogical parameters of the diagnostic horizons “Bi” and “Bw” of the typic dystrophic Tb Haplic Cambisol and typic dystrophic Red Latosol.

Horizon/Prof	Clay	Silt	Sand	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
.....m.....	..... g kg <sup>-1</sup> .....						
Bi (0.1-0.31)	518	432	50	233	285	122	1.1
Bw (0.65-1.23 )	848	118	32	127	364	158	1.2
Horizon/Prof	Ki <sup>(1)</sup>	Kr	Ct <sup>(2)</sup>	Gb <sup>(3)</sup>			
.....m.....	.....%.....						
Bi (0.1-0.31)	1.45	1.14	50.08	13.29			
Bw (0.65-1.23 )	0.59	0.46	27.29	39.16			

<sup>(1)</sup> index weathering; <sup>(2)</sup> Ct: kaolinite, <sup>(3)</sup>Gb: gibbsite. Ki: SiO<sub>2</sub>: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> molecular ratio, Kr: SiO<sub>2</sub>: (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) molecular ratio. Fonte: Carducci et al. (2014) and Serafim (2011).

The same conservation soil management system was used in both soil classes. This system employs the use of soil and water conservation practices that seek to improve or maintain physical quality in different soil classes. To implement the primary soil tillage (plowing + two diskings) in the total area, dolomitic limestone ( $4 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) and gypsum ( $1.92 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) incorporated up to 0.20 m deep were applied. Subsequently, the planting furrows were opened to a depth of 0.60 m and 0.50 m wide, by means of a subsoiler coupled to a fertilizer spreader that allows, besides furrow opening, soil mixing and homogenization of lime and fertilizer to the depth of 0.40 m ( $2 \text{ kg gypsum m}^{-1}$  and formula 08-44-00 + 1.5% Zn and 0.5% B). Three months after the planting of the coffee seedlings, which is held in the first half of November,  $7 \text{ kg m}^{-1}$  of agricultural gypsum was surface-applied distributed along the row (Serafim et al., 2011; Serafim et al., 2013).

Thereafter, the application of gypsum is performed via the hilling process in the crop row. In this practice, brachiaria that was established before the coffee planting, after reaching 50 cm, is barred to 10 cm and the resulting plant material mixed in the soil is applied around the coffee trunk. Thus, the soil piled up along the crop row covers all the gypsum applied to the surface, forming a layer of 0.5 m of soil mixed with brachiaria waste from the interrows. This hilling over the gypsum reduces its solubilization rate, allowing a gradual release of the calcium sulfate throughout the years (Serafim, 2011).

The chemical characterization of the soil before and after five years of management system implementation is in Table 2.

Table 2. Chemical characterization of Cambisol and Latosol before and after five years of coffee emplantation.

Soil	Before planting		After five years from planting		
	0.0-0.20 m	0.20-0.40 m	Soil Layers (m) hilled	0.0-0.20 m	0.20-0.40 m
	pH (H <sub>2</sub> O)				
Cambiso	4.9	5.2	3.8	4.23	4.57
Latosol	4.4	4.7	4	4.23	4.33
	K <sup>+</sup> (mg dm <sup>-3</sup> )				
Cambiso	162.6	41.3	100.67	206	104.67
Latosol	73.33	38.67	84.67	37.33	35.33
	P (mg dm <sup>-3</sup> )				
Cambiso	1.71	0.65	18.25	7.58	0.75
Latosol	1.91	1.13	10.65	3.74	3.22
	Ca <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )				
Cambiso	0.5	0.1	6.23	4.33	2.3
Latosol	0.1	0.1	3.5	5.73	4.8
	Mg <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )				
Cambiso	0.47	0.1	0.1	0.2	0.1
Latosol	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2
	Al <sup>3+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )				
Cambiso	1.4	1.37	2.3	0.77	0.63
Latosol	1.37	0.87	2.63	1.5	1.13
	H+Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )				
Cambiso	7.87	4.87	13.24	8.8	4.7
Latosol	9.83	7.87	15.39	11.46	10.22
	SB (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )				
Cambiso	1.38	0.3	6.59	5.06	2.67
Latosol	0.38	0.3	3.82	5.93	5.09
	t (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )				
Cambiso	2.78	1.67	8.89	5.83	3.3
Latosol	1.75	1.17	6.45	7.43	6.22
	T (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )				
Cambiso	9.25	5.18	19.83	13.86	7.37
Latosol	10.21	8.17	19.21	17.39	15.31
	V (%)				
Cambiso	14.95	5.93	31.97	36.41	36.25
Latosol	3.8	3.66	19.76	34.24	33.27
	m (%)				
Cambiso	50.31	81.82	28.41	12.95	19.17
Latosol	78.08	74.23	41.17	20.2	18.24
	SOM (%)				
Cambiso	3.89	1	3.18	3.56	1.29
Latosol	3.89	2.96	3.7	3.32	3.24
	P-REM (mg L <sup>-1</sup> )				
Cambiso	12.95	5.26	10.5	11.54	5.3
Latosol	6.42	4.76	5.48	5.32	5.26

SB: sum of bases; t: effective cation exchange capacity; T: cation exchange capacity at pH7; V: base saturation; m: aluminum saturation; SOM: soil organic matter; P-REM: remaining phosphorus.

To conduct this study blocks of soil (0, 15 m x 0.10 m x 0.05 m) were collected in the hilled layer, in addition to the 0.20-0.40 and 0.0 to 0.20 m depths, in three repetitions, in both soil classes.

It is highlighted that the hilled layer was chosen for evaluation as it contributes to the increase of soil organic matter on the soil surface and this may promote the aggregation of mineral particles as observed by Silva et al. (2013). The layers of 0.0-0.20 m and 0.20-0.40 m are located in a row below the gypsum line that was applied to the surface, so the aggregation of these layers can be influenced by the gypsum.

Subsequently, the blocks were gently broken down and sieved manually through sets of sieves at intervals of 4.76-8 mm mesh widths, wherein the aggregates retained in the 4 mm sieve were packaged in open plastic containers to be air-dried and used for the physical analyzes.

### **Wet sieving method**

We weighed 25 g of aggregates with 4.76 to 8 mm of diameter. These were placed on filter paper and put into a tray with a thin layer of distilled water for pre-wetting for 12 hours. The wet sieving of the samples was then performed using of a set of sieves of 2.00; 1.00; 0.50; 0.25 and 0.105 mm in diameter, as described in Yoder (1936). The aggregates were agitated in the equipment with an oscillating movement of 32 rpm (revolutions per minute) for 15 minutes. Portions of aggregates retained in each sieve were transferred to aluminum containers with the aid of water jets and dried in an oven at 105-110°C for 24 h with subsequent weighing and obtaining of moisture content and aggregation indices, as described by Chepil and Kemper (1965): 1- percentage of aggregates larger than 2 mm; 2 - geometric mean diameter (GMD).

### **Sonification methods**

5 g of aggregates were used (dry weight, oven-dried at 105°) and placed on a base with adjustable inclination (45°) with the aid of a volumetric burette and subjected to slow pre-wetting by drip. The pre-moistened aggregates were then transferred to a 200 mL beaker, where the final volume of the beaker was completed with distilled water (soil:distilled water 1:40).

Sonifications were carried out with a Qsonica Q500 apparatus operating at 20 kHz, whose output was calibrated by the method described in Sa et al. (2000), for 5, 15, 30 and 60 seconds. In in this work the sonification times will be refered to as S5, S15, S30 and S60.

The material sonification exposure times correspond to specific energies applied (EA) of 2.2; 6.4; 12.8; 25.5 J mL<sup>-1</sup>, respectively, calculated from Sá et al (2000) according to Equation 1:

$$EA = \frac{PXT}{V} \quad \text{Eq.(1)}$$

Where: EA is the energy applied to the suspension (J mL<sup>-1</sup>); P is the power emitted by the apparatus (85 W) obtained by means of calibration described in Sa et al. (2000); T is the sonification time (seconds) and v is the suspension volume (mL).

We highlight that the shaft of the apparatus was introduced in the beaker with the sample (aggregate + water) to a depth of 20 mm and the temperature was controlled during the tests remaining at 35°C.

After sonification at each of the energies (one sample per energy level) the samples were passed through a series of sieves (2.00; 1.00; 0.50; 0.25 and 0.105 mm) equivalent to the standard method, and then GMD indices and percentage of aggregates larger than 2 mm were calculated for each sonification time, based on the initial sample.

### **Statistical Analysis**

The experimental design was completely randomized in a factorial arrangement (2 x 3 x 5), as follows: 2 soils (LVd and CXbd), 3 soil layers (hilled layer; 0.0- 0.20 m and 0.20-0.40 m ) and 5 methods (WS, S5, S15, S30 and S60). The data were submitted to the Shapiro-Wilk normality test and then the analysis of variance. When significant, data were compared using the mean test of Scott-Knott at a significance level of 5% probability with the aid of the Sisvar program (Ferreira, 2011). Correlation analyzes were performed using the R and Sigma programs.

## **RESULT AND DISCUSSION**

For Latosol, that has a strong microgranular structure largely favored by its oxidic mineralogy (Table 1), it became clear that a lot of energy would be necessary to breakdown the aggregates, in both methods (Table 3), independent of depth evaluated, to determine the aggregation indices; the opposite of that in Cambisol that has a kaolinitic mineralogy (Table 1), and therefore low aggregate resistance when wet (Ferreira et al. 1999).

Table 3. Aggregate stability indexes, aggregate class > 2 mm and geometric mean diameter in Latosolo and Cambisol submitted to the standard method (wet sieving -WS) and the modern method (sonification- S5, S15, S30, S60) at different depths.

Soil	Aggregate stability determination methods				
	WS	S5	S15	S30	S60
% of aggregates > 2.00 mm					
hilled layer					
Cambisol	97 A $\alpha$	87 A $\beta$	85 A $\beta$	79 A $\beta$	70 A $\beta$
Latosol	98 A $\alpha$	87A $\beta$	84 A $\beta$	80 A $\beta$	69 A $\gamma$
0.0-0.20 m					
Cambisol	96 A $\alpha$	73 A $\beta$	57 B $\gamma$	57 B $\gamma$	34 B $\delta$
Latosol	90 A $\alpha$	81 A $\alpha$	70 A $\beta$	66 B $\beta$	53 B $\gamma$
0.20-0.40 m					
Cambisol	89 A $\alpha$	30 B $\beta$	29 C $\beta$	17 C $\beta$	3C $\gamma$
Latosol	86 A $\alpha$	90 A $\alpha$	88 A $\alpha$	87 A $\alpha$	77B $\beta$
geometric mean diameter, mm					
hilled layer					
Cambisol	4.7A $\alpha$	3.0A $\beta$	3.2A $\beta$	2.6A $\beta$	1.7A $\gamma$
Latosol	4.8A $\alpha$	3.6A $\beta$	3.2B $\beta$	2.8B $\beta$	1.9A $\gamma$
0.0-0.20 m					
Cambisol	4.6A $\alpha$	2.0B $\beta$	1.1B $\gamma$	1.0B $\gamma$	0.33B $\delta$
Latosol	4.6B $\alpha$	3.0A $\beta$	2.1C $\gamma$	1.8C $\gamma$	1.2A $\delta$
0.20-0.40 m					
Cambisol	3.8B $\alpha$	0.7C $\beta$	0.4C $\beta$	0.18C $\beta$	0.07B $\beta$
Latosol	4.2B $\alpha$	3.6A $\alpha$	3.6A $\alpha$	3.5A $\alpha$	1.6A $\beta$

Means followed by the same letter do not differ by the Scott-Knott test ( $p < 0.05$ ): Greek letters compare methods within each depth (within each soil) and uppercase compare the depths of the same soil.

Thus, for Cambisol, we found significant differences between the WS (WS) and the S15 to S60 energies applied (Table 3). The aggregates of this soil disintegrated under these applied energies. There was a significant reduction of aggregates larger than 2 mm, decreased geometric diameter (Table 3), increased percentage of aggregates retained in smaller diameters classes (< 0.105 mm) (Figure 1).

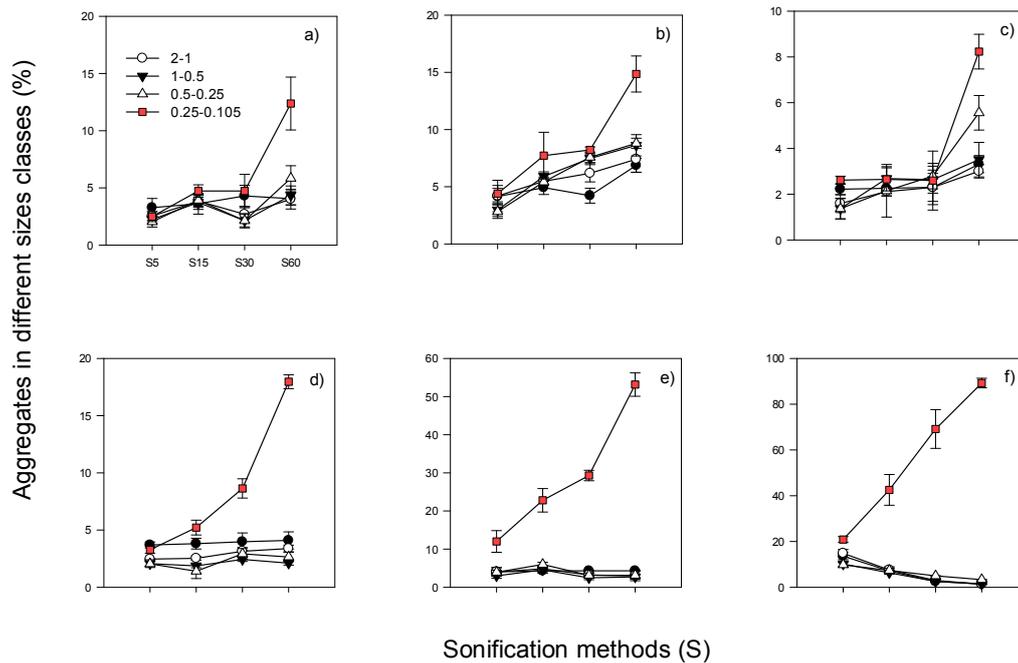


Figure 1. Aggregates distribution in different size classes obtained by the sonification method for the following soil layers: hilled layer, from 0.0 to 0.20 m, 0.20-0.40 m for Red Latosol (a, b, c) and a Cambisol (d, e, f), respectively. S5 , S15 , S30 and S60 , respectively correspond to energy levels of 2.2; 6.4; 12.8; 25.5  $\text{J mL}^{-1}$ .

The highest breakdown resistance of Cambisol in both the WS as well as at the lowest power, especially within the first depth (hilled layer and from 0.0 to 0.20 m) may be due to the soil management effects, that favored high organic matter and calcium content in that depth region (Table 2). As already pointed out, in this management system, *Brachiaria* grown in the rows is managed through periodic cuts with subsequent distribution of residue near the coffee plants in the crop row (SERAFIM et al., 2011; SILVA et al., 2013). Thus, the decomposition of plant residue, on releasing low molecular weight organic acids capable of forming organic complexes with aluminum, calcium and magnesium, has positive effects on aggregation, favoring the formation of macroaggregates in the surface layers (Amaral et al., 2004).

Calcium is a crucial element for the stabilization of soil organic matter and aggregates through its role in the formation of complexes with clay and organic matter via the cation bridge (Matkin and Smart, 1987; Muneer; Oades, 1989; Six et al., 2004; Bronick; Lal, 2005). This bond is a way to stabilize and increase the carbon residence time in the soil, due to the physical protection derived from the formation of microaggregates (Edwards; Bremner, 1967; Six et al., 2004; Bayer et al., 2011). Thus, it is suggested that the higher organic matter content found in the management systems with high gypsum doses, such as that studied here

(Table 2), are related to higher  $\text{Ca}^{2+}$  content and that the calcium and organic matter interaction favor improvements in soil aggregation properties (Silva et al., 2013).

In Latosol there was a macroaggregate reduction and a more homogenous redistribution of aggregates in the other size classes (Figure 1). In the 0.20-0.40 m depth of this soil it was found that the sonification methods S5, S15 and S30 used promoted the same breakdown as promoted by the WS (Table 3), confirming that low energy levels ( $2.2 - 12.8 \text{ J mL}^{-1}$ ) are insufficient to rupture the aggregates of very weathered soils rich in iron and aluminum oxides (Vitorino et al., 2003; Indá Júnior et al., 2007; Silva et al., 2015).

Sá et al. (1999) found that in the A horizon of a dystroferric Red Latosol total dispersion occurred at an energy level near  $476.53 \text{ J mL}^{-1}$ , while in Horizon A the aggregates of a Red Nitosol reached the maximum dispersion at an energy level near  $238.27 \text{ mL}^{-1}$ , which proves the greater aggregate stability of Latosols. Silva et al. (2015) studying the dispersion of oxidic soils derived from volcanic ash from Hawaii observed that for more weathered soils, like the Latosols of the present study, rich in carbon, aluminum oxides and crystalline and non-crystalline iron, and positively charged, power levels of approximately  $1600 \text{ J mL}^{-1}$  are required to cause total dispersion.

Particularly at a depth of 0.20-0.40 m in Cambisol, which coincides with the Bi horizon where the organic matter content is reduced (Table 2), the sonification promoted strong breakdown even at lower energy levels (Table 3, Figure 1). It should be noted that this horizon presents a weak structure, combined with high silt content (Table 1) which makes this soil more likely to breakdown (Ribeiro et al., 2009). The energy applied of  $25.5 \text{ J mL}^{-1}$  (U60), for example, left the soil completely dispersed, thus not being a good choice in the evaluation of the stability of these aggregates (North, 1979; Tippkötter, 1994). This value is much lower than those found by Sá et al. (1999), that is, energy higher than  $127 \text{ J mL}^{-1}$  leads fragile soils, like Cambisols, to total dispersion.

Ribeiro et al. (2009) also observed that due to low structure and low organic matter content, the maximum dispersion of aggregates in Horizons Bi and C of Haplic Cambisol typical tb was achieved with the application of only  $9.4 \text{ J mL}^{-1}$ . These findings highlight the need for more detailed studies with the lowest possible energy levels to improve understanding of the flocculation-dispersion phenomena in young soils.

The results of GMD for the Latosol profile showed that the S15 and S30 methods, which correspond, respectively, to the energy levels  $6.4$  and  $12.8 \text{ J mL}^{-1}$ , detected the soil management and mineralogy influences on the aggregation. At these energy levels a higher

GMD at the 0.20-0.40 m depth was observed, followed by the hilled layer, and finally the of 0.0 0.20 m depth (Table 3).

This fact may be related to the primary importance of mineralogy and secondary importance of organic matter in the aggregation processes of very weathered soils (Silva et al., 2015), since it is observed that a higher correlation coefficient ( $r = 0.71$ ,  $P < 0.001$ ) was found between GDM and soil organic matter when the aggregation rate was determined by the S5 sonification method (Figure 2), i.e., organic bonds are ruptured with ease at the first energy levels applied, and aggregate stability would possibly be maintained via more resistant bonds (covalent) from the minerals.

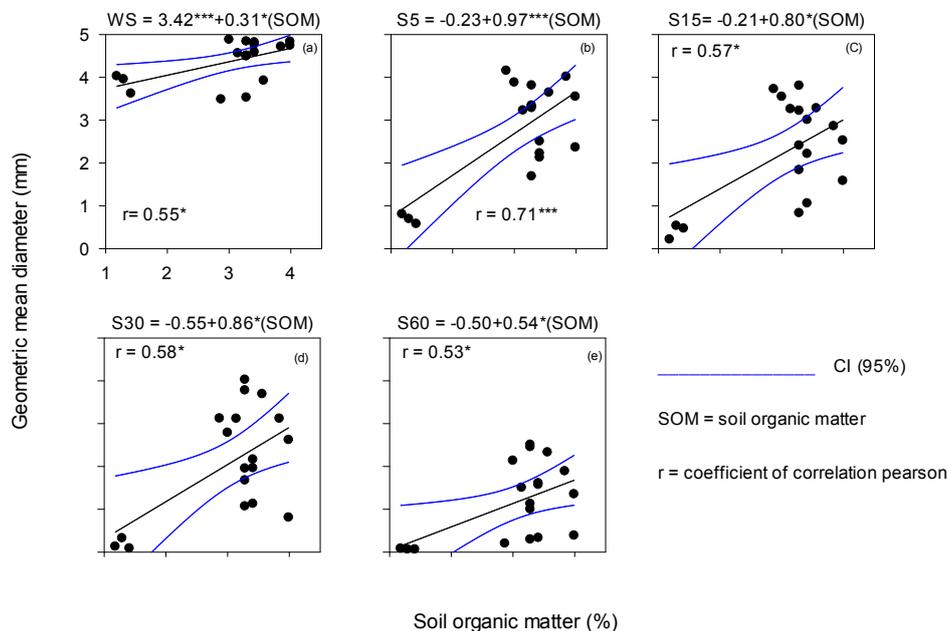


Figure 2. Correlations between soil organic matter content and geometric mean of aggregate diameters, obtained by different stability methods. WS (a) = Wet sieving method; S = Sonification methods: S5 (b), S15 (c), S30 (d) and S60 (e), respectively correspond to energy levels of 2.2; 6.4; 12.8; 25.5  $\text{J mL}^{-1}$ . IC = confidence interval. Note: The whole database was considered.

These results agree with those of Inda Junior et al. (2007), who when evaluating the organomineral complex stability in Brazilian tropical soils, found that the sonification energy required for complete dispersion of soils is related to clay mineralogy, particularly the levels of low crystalline iron oxide (hematite, goethite, maghemite, lepidocrocite and ferrihidrita) and kaolinite, and gibbsite ratios. Organomineral complexes and non-crystalline aluminum oxides (gibbsite) increase the aggregate stability, requiring application of higher energy levels

to soils rich in these elements when using ultrasonic energy (Asano; Wagai, 2014; Candan; Broquen, 2009; Igwe et al., 2013; Silva et al., 2015).

For each soil type, correlations were made between the GMD obtained by the WS and sonification (Figures 3 and 4). In general, in Cambisol high correlation coefficients were found between the methods (Figure 3), which indicates that there may be, for this soil class, a relationship between the ultrasonic energy levels and the energy applied by the WS.

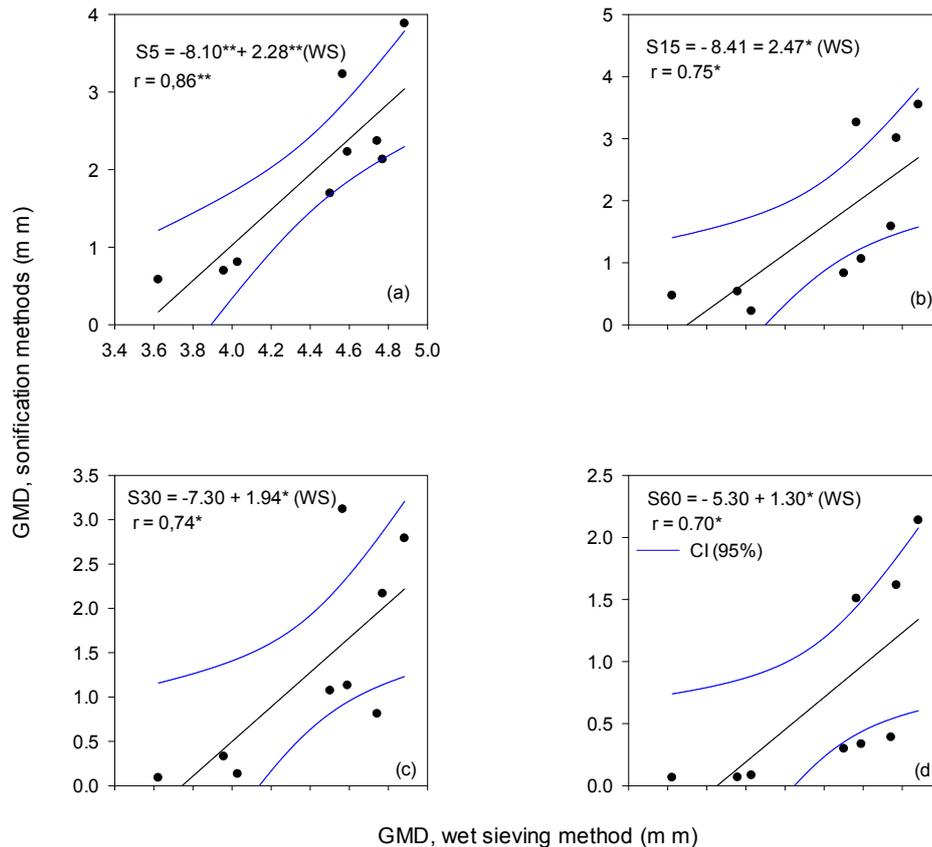


Figure 3. Correlation of geometric mean of aggregate diameters (GMD) between wet sieving (WS) and sonification method (S) in Cambisol. S5 (a), S15 (b), S30 (c) and S60 (d), respectively correspond to energy levels of 2.2; 6.4; 12.8; 25.5 J mL<sup>-1</sup>. IC = confidence interval. \* P < 0.05; \*\* p < 0.01.

In the Cambisol it was observed that the correlation coefficients of the equations decrease with the increase of the applied energy level, which is consistent since high energy levels tend to completely disintegrate the aggregates of this soil class (Table 3, Figure 1) (Ribeiro et al., 2009).

Sá et al. (2000b) evaluated the stability of aggregates in the A horizon of a Red Nitosol and found that sonification energy levels from 1.32 to 15.8 J mL<sup>-1</sup> were equivalent to the energy imposed by the WS, however, when assessing the aggregate stability of the Bt horizon of this soil class no relationship was observed between the sonification and the WS,

especially by the fact that low ultrasonic energy levels were sufficient to cause a strong breakdown of soil, while in the WS, aggregates remained stable.

For the aggregates of the A horizon of a distroferric Red Latosol, Sá et al. (2000b) observed the GMD, average weight diameter and aggregate class  $> 2$  mm, and the ultrasonic energy of  $1.32 \text{ J mL}^{-1}$  promoted the same breakdown as the WS. In our study, in Latosol, by the GMD and aggregates retained in the class  $> 2$  mm (Table 3), we observed that only in the 0.20-0.40 m layer did the WS promote the same breakdown as sonification methods S5, S15 and S30 ( $2.2$ ,  $6.4$  and  $12.8 \text{ J mL}^{-1}$ ) and only by the results of aggregates retained in the  $> 2$  mm class were the methods equivalent in the 0.0 to 0.20 m layer, wherein the WS promoted the same breakdown as the S5 sonification method.

Furthermore, for Latosol positive relationships were not found between the GMD results obtained by WS and sonification (Figure 4) at low energy levels (up to S30 =  $12.8 \text{ J mL}^{-1}$ ), possibly because the energy band used to promote the soil breakdown was not enough to disperse the microaggregates of this very weathered soil (Table 1).

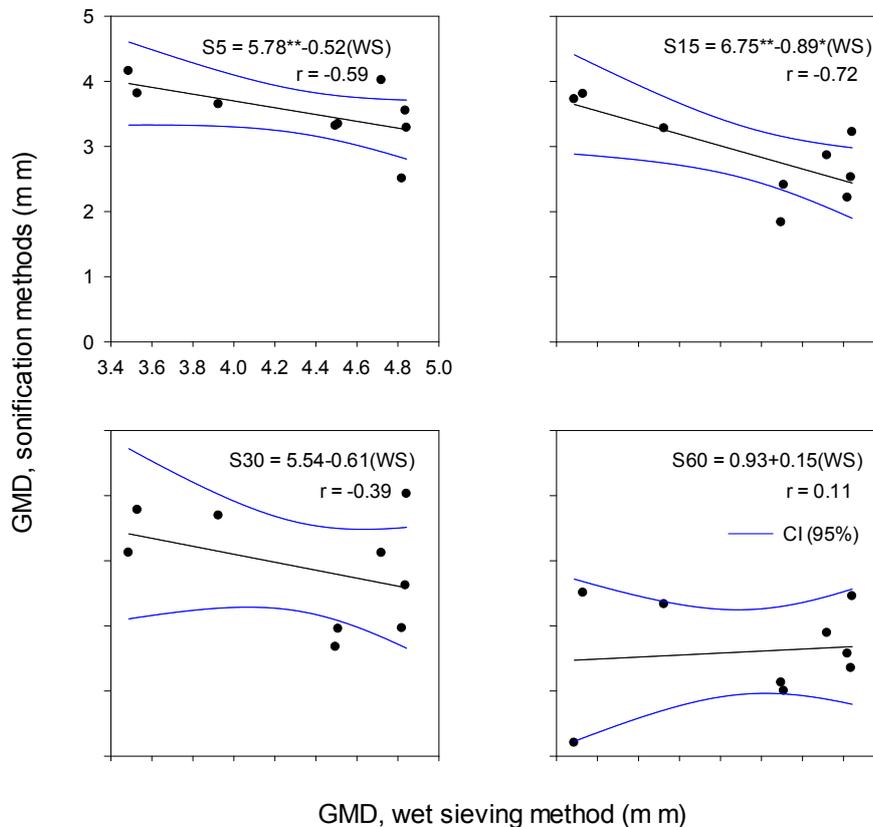


Figure 4. Correlation of geometric mean of aggregate diameters (GMD) between wet sieving (WS) and sonification method (S) in Latosol. S5 (a), S15 (b), S30 (c) and S60 (d), respectively correspond to energy levels of  $2.2$ ;  $6.4$ ;  $12.8$ ;  $25.5 \text{ J mL}^{-1}$ . IC = confidence interval.

It was found that at the energy level of 25.5 J mL<sup>-1</sup> (S60), the correlation coefficient ( $r = 0.11$ ) becomes positive, confirming, for Latosol, that there is a relationship between the methods at higher energy levels (Figure 4). In dispersion curve analysis, seeking to verify differences in the aggregate stability of a eutro eutroferric Red Latosol under different uses (*Eucalyptus* spp, *Pinus* sp, forest, pasture, 13-year-old coffee plantation, 2-year-old coffee plantation and annual crops), Sá et al. (2002) noted that the best range for detecting differences in aggregate stability of the soil was 30-90 J mL<sup>-1</sup>.

The results of this study corroborate Sá et al. (2000), demonstrating that the stability of the aggregates depends on the characteristics of each soil and the type of disruptive forces applied. Thus, differences in the aggregate stability can be related to the type and amount of energy applied, and the methodological procedures involved in each type of analysis.

## CONCLUSION

Sonication methods S15 and S30, which respectively correspond to ultrasonic energy levels 6.4 and 12.8 J mL<sup>-1</sup>, were more sensitive in detecting differences in depth in the GMD aggregation index of the soil used.

## REFERENCES

- Amaral AS, Anghinoni I, Deschamps FC (2004). Resíduos de plantas de cobertura e mobilidade dos produtos da dissolução do calcário aplicado na superfície do solo. R. Bras. Cienc. Solo 28:115-123.
- Amezketta E (1999). Soil aggregate stability: A review. J. Sustain. Agric. 14:83-151.
- Asano M, Wagai R (2014). Evidence of aggregate hierarchy at micro- to submicron scales in an allophanic Andisol. Geoderma 216:62-74.
- Beare MH, Bruce RRA (1993). comparison of methods for measuring water-stable aggregates: implications for determining environmental effects on soil structure. Geoderma 56:87-104.
- Bronick CJ, Lal R. (2005) Soil structure and management: A review. Geoderma 124:3-22.
- Candan F, Broquen P. (2009). Aggregate stability and related properties in NW Patagonian Andisols. Geoderma 154:42-47.
- Carducci CE, Oliveira GC, Curi N, Heck RJ, Rossoni DF, de Carvalho TS, Costa AL (2014). Gypsum effects on the spatial distribution of coffee roots and the pores system in oxidic Brazilian Latosol. Soil Till. Res. 145:171-180.

Castro Filho C, Muzilli O, Podanoschi AL (1998). Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo Roxo distrófico, em função de sistema de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. *Rev. Bras. Cienc. Solo* 22:527-38.

Chen Z, Zhu C (2011). Combined effects of aqueous chlorine dioxide and ultrasonic treatments on postharvest storage quality of plum fruit (*Prunus salicina* L.). *Postharv. Biol. Technol.* 61(2):117-123.

Edwards AP, Bremner J M (1967). Dispersion of soil particles by sonic vibration. *J. Soil Sci.* 18:47-63.

EMBRAPA -Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária (2013) Centro Nacional de Pesquisas de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3.ed. Rio de Janeiro 353 p.

Ferreira MM, Fernandes B, Curi N (1999a). Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos da região sudeste do Brasil. *R. Bras. Cienc. Solo* 23:515–524.

Ferreira MM, Fernandes B, Curi N (1999b). Mineralogia da fração argila e estrutura de Latossolos da região sudeste do Brasil. *Rev. Bras. Cienc. Solo* 23:507-514.

Igwe CA, Zarei M, Stahr K. (2013). Stability of aggregates of some weathered soils in south-eastern Nigeria in relation to their geochemical properties. *J. Earth Syst. Sci.* 122:1283-1294.

Inda Junior AV, Bayer C, Conceição PC, Boeni M, Salton JC, Tonin AT (2007). Variáveis relacionadas à estabilidade de complexos organominerais em solos tropicais e subtropicais brasileiros. *Cienc. Rural* 37:1301-1307.

Kemper WD, Chepil WS (1965). Size distribution of aggregates In: BLACK, C.A. (Ed.). *Methods of soil analysis.* Am. Soc. Agron.1:499- 509.

Lado M, Ben-Hur M, Shainberg I (2004). Soil wetting and texture effects on aggregate stability, seal formation, and erosion. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:1992-1999.

Le Bissonnais Y (1996). Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility. I. Theory and methodology. *Eur. J. Soil Sci.* 47:425-437.

Matkin EA, Smart PA (1987). Comparison of tests of soil structural stability. *J. Soil Sci.*38:123-135.

Mayer H, Mentler A, Papakyriacou M, Rampazzo N, Marxer Y, Blum WEH (2002). Influence of vibration amplitude on the ultrasonic dispersion of soils. *Int. Agrophys.* 16:53-60.

Menegasse LN, Gonçalves JM, Fantinel LM (2002). Disponibilidades hídricas na Província cárstica de Arcos-Pains-Doresopolis, Alto São Francisco, Minas Gerais, Brasil. *Rev. Águas Subterrâneas* 16:9–21.

- Muneer M, Oades JM (1989a). The role of Ca-organic interactions in soil aggregate stability. 1. Laboratory studies with  $^{14}\text{C}$ -glucose,  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . *Aus. J. Soil Res.* 27:389-399.
- Muneer M, Oades JM (1989b). The role of Ca-organic interactions in soil aggregate stability. 2. Field studies with  $^{14}\text{C}$ -labelled straw,  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . *Austr. J. Soil Res.* 27:401-409.
- Muneer M, Oades JM (1989c). The role of Ca-organic interactions in soil aggregate stability. 3. Mechanisms and models. *Austr. J. Soil Res.* 27:411-423.
- North PF (1979). Assessment of the ultrasonic method of determining soil structural stability in relation to soil management properties. *J. Soil Sci.* 30:463-472.
- Pilli S, Bhunia P, Yan S, Leblanc RJ, Tyagi RD, Surampalli RY (2011). Ultrasonic pretreatment of sludge: A review. *Ultrason. Sonochem.* 18:1-18.
- Raine SR, So HB (1993). An energy based parameter for the assessment of aggregate bond energy. *J. Soil Sci.* 44:249-259.
- Raine SR, So HB (1994). Ultrasonic dispersion of soil in water: the effect of suspension properties on energy dissipation and soil dispersion. *Austr. J. Soil Res.* 32:1157-1174.
- Resende M, Bahia F AFC, Braga JM. (1987). Mineralogia da argila de Latossolos estimada por alocação a partir do teor total de óxidos do ataque sulfúrico. *Rev. Bras. Cienc. Solo* 11:17-23.
- Ribeiro BT, Lima JM, Mello CR, Sá MAC, Oliveira GC (2009). Relationship between raindrops and ultrasonic energy on the disruption of a Haplic Cambisol. *Cienc. Agrotec.* 33:814-823.
- Roscoe R, Buurman P, Velthorst EJ (2000). Disruption of soil aggregates by varied amounts of ultrasonic energy in fractionation of organic matter of a clay Latosol: carbon, nitrogen, and  $\delta^{13}\text{C}$  distribution in particle-size fractions. *Eur. J. Soil Sci.* 5:445-454.
- Sá MAC, Lima JM, Lage G (2000a). Procedimento-padrão para medida da potência liberada pelo aparelho de ultra-som. *Cienc. Agrotechnol.* 24:300-306.
- Sá MAC, Lima JM, Mello CR (2002). Nível de energia ultra-sônica para o estudo da estabilidade de agregados de um Latossolo sob diferentes usos. *Pesqui. Agropecu. Bras.* 37:1649-1655.
- Sá MAC, Lima JM, Silva MLN, Dias Junior MS (1999). Índice de desagregação do solo baseado em energia ultra-sônica. *R. Bras. Cienc. Solo* 23:525-531.
- Sá MAC, Lima J M, Silva M L N, Dias Júnior M S (2000b). Comparação entre métodos para o estudo da estabilidade de agregados em solos. *Pesqui. Agropecu. Bras.* 35:1825-1834.
- Schmidt MWI, Rumpel C, Kögel-Knabner I (1999). Evaluation of an ultrasonic dispersion procedure to isolate primary organomineral complexes from soils. *Eur. J. Soil Sci.* 50:87-94.

Schomakers J, Mentler A, Steurer T, Klik A, Mayer H (2011). Characterization of soil aggregate stability using low intensity ultrasonic vibrations. *Int. Agrophys.* 25:165-172.

Serafim ME, Oliveira GC, Curi N, Lima JM, Guimarães SPTG, Lima VMP (2013). Potencialidades e limitações de uso de Latossolos e Cambissolos, sob sistema conservacionista em lavouras cafeeiras. *Biosci. J.* 29:1640-1652.

Serafim ME (2011). Sistema conservacionista e de manejo intensivo na melhoria de atributos do solo para a cultura do cafeeiro (2011) Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 120f.

Serafim ME, Oliveira GC, Oliveira AS, Lima JM, Guimarães PTG, Costa JC (2011). Sistema conservacionista e de manejo intensivo do solo no cultivo de cafeeiros na região do Alto São Francisco, MG: um estudo de caso. *Biosci. J.* 27:964-977.

Silva ÉA da, Oliveira GC, Silva BM, Oliveira LM de, Costa JC (2013). Increasing doses of agricultural gypsum, aggregate stability and organic carbon in cerrado latosol under coffee crop. *Rev. Ciênc. Agrárias/Amazonian J. Agric. Environ. Sci.* 56:25-32.

Silva JHS, Deenik JL, Russell S, Yost RS, Bruland GL, Crow ES (2015). Improving clay content measurement in oxidic and volcanic ash soils of Hawaii by increasing dispersant concentration and ultrasonic energy levels. *Geoderma* 1:211-223.

Six J, Bossuyt H, De Gryze S, Deneff K. (2004) A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil Till. Res.* 79:7-31.  
da Silva et al. 3903

Tippkötter R (1994). The effect of ultrasound on the stability of mesoaggregates (60-200  $\mu\text{m}$ ). *Zeitschrift fuer Pflanzenernährung und Bodenkunde* 157:99-104.

Vitorino ACT, Ferreira MM, Curi N, Lima JM, Silva MLN, Motta PMF (2003). Mineralogy, chemistry and stability of silt-size aggregates of soils from the Southeast Region of Brazil. *Pesqui. Agropecu. Bras.* 38:133-41.

Yoder RE (1936). A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion. *Am. Soc. Agron. J.* 28:337-351.

**ARTIGO 2 - AGREGAÇÃO DE LATOSSOLO SUBMETIDO A MANEJO  
CONSERVACIONISTA DURANTE 5 ANOS, MENSURADA POR ENERGIA  
ULTRASSÔNICA**

ERIKA ANDRESSA DA SILVA<sup>1\*</sup>

GERALDO CÉSAR DE OLIVEIRA<sup>2\*</sup>

**ARTIGO FORMATADO DE ACORDO COM A NBR 6022 (ABNT, 2003).**

---

<sup>1\*</sup> Engenheira Agrônoma, Mestre em Ciência do Solo pela Universidade Federal de Lavras. Email: andressaerikasilva@gmail.com.

<sup>2\*</sup> Orientador, prof. Dr. Associado do departamento de Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras. Email: geraldooliveira@dcs.ufla.br

## RESUMO

As técnicas de ultrassonificação têm sido usadas objetivando a melhor compreensão dos fenômenos que envolvem a formação de agregados em solos por permitirem a mensuração da energia necessária para a quebra do agregado e sua relação com os agentes de ligação, além de possibilitar a avaliação da existência de hierarquia de agregados em solos de clima tropical. Assim, o objetivo deste estudo foi avaliar, com base em índices obtidos em baixos níveis de energia ultrassônica, a influência do manejo de um Latossolo Vermelho oxidico gibbsitico na estabilidade de agregados da classe de tamanho 4-8 mm, além de calcular a energia crítica necessária para dispersão destes macro agregados, em solo submetido a manejo conservacionista na cafeicultura, comparado com a condição de mata nativa. Para a condução deste estudo foram coletados, em triplicata, blocos de solo com estrutura preservada nas camadas de 0,0-0,20 m e 0,20-0,40 m. Amostras de agregados das frações de 4-8 mm foram submetidas a níveis crescentes de energia ultrassônica ( $0-76,5 \text{ J mL}^{-1}$ ) e foi analisada a distribuição dos agregados de tamanho areia e silte, além da quantificação da fração argila. A massa de agregados de cada classe de tamanho foi modelada em função da energia ultrassônica aplicada, e parâmetros de estabilidade de agregados foram mensurados. Em comparação com o solo sob mata nativa, no manejo onde o solo é pulverizado inicialmente, mas recebe gesso agrícola na linha de cultivo e restos de braquiária proveniente dos cortes nas entrelinhas, observou-se menor desagregação dos agregados da classe de 4-8 mm. Baixas intensidades de energia ultrassônica são mais indicadas para trabalhos de pesquisas em que se deseja elucidar os mecanismos envolvidos na formação de macroagregados no solo. As curvas de liberação de agregados e dispersão não exibem a inflexão que caracteriza a presença de hierarquia de agregados, portanto, o Latossolo oxidico gibbsitico aqui estudado não apresenta hierarquia de agregados.

**Palavras-chave:** Dispersão ultrassônica. Macroagregados do solo. Sistema de manejo.

## 1 INTRODUÇÃO

As técnicas de ultrassonificação tem sido usadas para melhor compreensão dos fenômenos que envolvem a formação de agregados em solos por permitir determinar a energia necessária para a quebra dos agregados e sua relação com os agentes de agregação, além de possibilitar a avaliação da existência de hierarquia de agregados e das influências do manejo do solo na agregação (FIELD; MINASNY, 1999; KAISER et al., 2012; KAISER; BERHE, 2014; RIBEIRO et al., 2013; SÁ et al., 1999; SÁ; LIMA; MELLO, 2002; ZHU; MINASNY; FIELD, 2009a, 2009b; ZHU; FIELD; MINASNY, 2010).

Os primeiros modelos propostos para a avaliação da estabilidade de agregados por ultrassonificação se baseavam em curvas de dispersão, que relacionavam a energia aplicada a quantidade de material disperso (NORTH, 1976; SÁ et al., 1999, 2000).

Posteriormente, surgiram outras propostas para a representação da estabilidade de agregados mensurada por ultrassom. Sá et al.(1999) a partir da linearização de curvas de dispersão, propuseram o índice  $b/a$ , calculado pela razão entre os parâmetros “b” e “a” obtidos nas equações dos modelos linearizados. Em seus trabalhos, estes autores observaram que o índice  $b/a$ , ao representar o comportamento de toda a curva de dispersão, era mais sensível para avaliar as influências do manejo do solo na estabilidade de agregados, alcançando uma eficiência superior a métodos tradicionais de avaliação da agregação de solos como índices obtidos por peneiramento em água (RIBEIRO et al., 2013; SÁ et al., 2000, 2004).

Atualmente, por permitirem a modelagem da redistribuição de partículas ao longo dos processos de ultrassonificação, os modelos desenvolvidos por Field e Minasny (1999) tem sido muito utilizados. Pelos princípios descritos em Field e Minasny (1999) e Field, Minasny e Gaggin (2006), o processo de desagregação e dispersão de agregados ocorre de forma gradual, em que agregados de tamanho areia ao sofrerem perturbações por ondas ultrassônicas se fragmentam em frações menores, silte e argila (ZHU; FIELD; MINASNY, 2010).

Assim, pelos pressupostos destes autores, em trabalhos com agregados da classe de 1-2 mm, o comportamento dos agregados de tamanho areia durante a sonificação pode ser descrito por uma curva de desagregação (CDS). Já a desagregação e a liberação dos agregados de tamanho silte é representada pela curva de liberação de agregados e dispersão (CLAD), e a fração tamanho argila pode ser modelada por uma curva característica de dispersão do solo (CCDS) (RIBEIRO et al., 2013).

A partir das curvas de CDS e CCDS pode ser calculada a energia crítica necessária para a liberação total dos agregados de tamanho silte e o início de sua dispersão. Esta energia

correspondente ao pico da CLAD é utilizada para avaliar a estabilidade dos agregados, sendo os maiores valores relacionados a maior estabilidade estrutural dos agregados (RIBEIRO et al., 2013; ZHU; FIELD; MINASNY, 2010).

A dispersão de agregados do solo por ultrassonificação é usualmente conduzida utilizando altas intensidades de energia (FIELD; MINASNY; GAGGIN, 2006; ZHU; MINASNY; FIELD, 2009b), o que nem sempre permite uma liberação gradual de agregados e com isto o reconhecimento de uma hierarquia no sistema. Por isto, muitas pesquisas sugerem que baixos níveis de energia ultrassônica são mais eficientes para avaliação dos efeitos do manejo do solo na estabilidade dos agregados (SÁ et al., 1999), e que são mais sensíveis na discriminação da existência da hierarquia de agregados em solos (SCHOMAKERS et al., 2011; SILVA et al., 2016b).

Tem sido salientado que os macroagregados são os mais influenciados pelo uso do solo, entretanto ainda existem muitas controvérsias nos estudos envolvendo a quantificação da energia crítica para dispersão destes agregados em Latossolos, principalmente pelo fato desses solos não terem uma hierarquia reconhecida (AZEVEDO; BONUMÁ, 2004). Por outro lado, a maior parte das pesquisas existentes são relacionadas a fração de agregados da classe de tamanho de 1-2 mm, não havendo trabalhos relatando a energia crítica necessária para a ruptura de macroagregados da classe de tamanho de 4-8 mm (4000-8000  $\mu\text{m}$ ).

Por isto, o objetivo deste estudo é: i) avaliar, por índices obtidos em baixos níveis de energia específica ultrassônica (0-76,5  $\text{J mL}^{-1}$ ), a influência do manejo do solo na estabilidade de agregados das classes de tamanho 4,76 - 8 mm de um Latossolo Vermelho oxidico gibbsítico; ii) calcular a energia crítica necessária para dispersão desta fração de agregados em solo submetido a manejo conservacionista na cafeicultura, comparado à condição de mata nativa.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Descrição da área de estudo

As amostras do solo foram coletadas em área de lavoura comercial de cafeeiros com 5 anos de idade, implantada segundo as premissas de um sistema conservacionista de manejo do solo que vem sendo utilizado no município de São Roque de Minas, na região do Alto São Francisco, MG (Serafim et al., 2013). O clima da região é do tipo Cwa, segundo classificação de Köppen, com precipitação pluvial média anual de 1.344 mm e estação seca bem definida nos meses de maio a setembro (MENEGASSE; GONÇALVES; FANTINEL, 2002).

No campo, foi realizada análise morfológica do perfil complementada em laboratório por análise textural, método da pipeta (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 1997) e ataque sulfúrico, em amostras de terra fina seca ao ar, seguido de cálculos para obtenção dos teores de caulinita e gibbsita (Tabela 1) por meio de relações estequiométricas derivadas de suas fórmulas químicas ideais, como proposto por Resende, Bahia e Braga (1987), o que melhorou o nível de detalhamento classificando este solo como Latossolo Vermelho de textura muito argilosa e mineralogia gibbsítica-oxídica (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 2013).

Tabela 1. Caracterização física, química e mineralógica do horizonte diagnóstico “Bw” do Latossolo Vermelho.

Horizonte/Profundidade	Argila	Silte	Areia	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
.....m.....	..... g kg <sup>-1</sup> .....						
Bw (0,65-1,23 )	848	118	32	127	364	158	1,2
Horizonte/Profundidade	Ki <sup>(1)</sup>	Kr	Ct <sup>(2)</sup>	Gb <sup>(3)</sup>			
.....m.....	.....%.....						
Bw (0,65-1,23 )	0,59	0,46	27,29	39,16			

<sup>1</sup>: índice de intemperismo; <sup>2</sup>: Caulinita; <sup>3</sup>: Gibbsita.

Fonte: Serafim et al. (2011) e Carducci et al. (2014)

O sistema de manejo emprega uso de práticas de conservação do solo e água, que visam melhorar ou manter a qualidade física em diferentes classes de solo. O preparo primário do solo foi realizado em área total (aração + 2 gradagens) com a aplicação de calcário dolomítico (4 Mg ha<sup>-1</sup>) e gesso agrícola (1,92 Mg ha<sup>-1</sup>) incorporados até 0,20 m de profundidade. Posteriormente, os sulcos de plantio foram abertos a 0,60 m de profundidade e 0,50 m de largura, por meio de um subsolador acoplado a uma enxada rotativa e uma caixa adubadora, que permitem além da abertura, a pulverização, o revolvimento do solo e a

homogeneização dos corretivos e fertilizantes até a profundidade de 0,40 m (gesso 2 kg m<sup>-1</sup> e 980 kg ha<sup>-1</sup> do formulado 08-44-00 (NPK) enriquecido com 1,5% Zn e 0,5% B) (SERAFIM et al., 2011).

Nos demais anos a adubação de manutenção foi realizada conforme as recomendações técnicas para Minas Gerais (GUIMARÃES et al., 1999). Decorridos três meses após o plantio das mudas de cafeeiro, que foi realizado na primeira quinzena de novembro, foram aplicados 7 kg m<sup>-1</sup> em superfície de gesso agrícola distribuído 0,5 m de largura ao longo da linha de plantio (SERAFIM et al., 2011, 2013).

Posteriormente à aplicação do gesso agrícola na superfície do solo, foi realizado o processo de amontoa na linha de cultivo. Nessa prática o solo recoberto com *Brachiaria decumbens*, implantada antes do cafeeiro, foi gradeado e o material proveniente da camada de 10 cm foi laminado e amontoado junto ao tronco do cafeeiro.

Dessa forma, a amontoa de terra associada aos restos de braquiária ao longo da linha de cultivo recobriu todo o gesso aplicado em superfície na linha de cultivo. Segundo os idealizadores do sistema essa amontoa tem por objetivo regular a taxa de solubilização do gesso, o que permite uma liberação gradual do sulfato de cálcio (SERAFIM et al., 2011, SILVA et al., 2014) com perspectiva de ação por dez anos.

A *Brachiaria decumbens* reformada na entre linha da lavoura sofreu cortes periódicos ao longo dos últimos cinco anos, com roçadeira ecológica que direcionou o material cortado para a linha da cultura (SERAFIM et al., 2011, 2013). Portanto, neste sistema de manejo, o material vegetal proveniente dos cortes da braquiária representa um aporte contínuo de matéria orgânica para a linha do cafeeiro.

## 2.2 Amostragem do solo

Para a condução deste estudo foram coletados blocos de solo retangulares (0,15 m x 0,10 m x 0,05 m) nas camadas de 0,0-0,20 m e 0,20-0,40 m em três repetições, em área de lavoura comercial (sistema de manejo) e mata nativa. Os blocos foram levemente desagregados e peneirados manualmente em conjunto de peneiras de 4,76 mm – 8 mm. Foram selecionados para análise os agregados que passaram na peneira de 8 mm e ficaram retidos na peneira de malha 4,76 mm.

A caracterização do complexo sortivo para a fração de agregados da classe de 4,76 - 8 mm no solo sob mata nativa e sob manejo, após 5 anos da implantação dos cafeeiros, pode ser visualizada na tabela 2.

Tabela 2. Caracterização química da fração de agregados de 4,76 - 8 mm em solo submetido a manejo há 5 anos na cafeicultura e sob mata nativa.

Uso do solo	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	T	P	m	MOS	pH
	.....cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> .....					mg dm <sup>-3</sup>	-----%-----		
-----0,0-0,20 m-----									
MN	0,21	0,1	0,14	1,6	5,81	1,72	78,05	3,95	4,5
SM-5	0,15	3,68	0,19	0,3	10,16	22,77	6,94	2,63	5,0
-----0,20-0,40 m-----									
MN	0,08	0,1	0,1	0,9	6,03	0,64	76,27	2,64	4,7
SM-5	0,07	3,2	0,16	0,3	9,59	5,67	8,04	2,01	4,9

MN: mata nativa; SM-5: sistema de manejo com 5 anos; T: CTC potencial; m: saturação por alumínio; MOS: matéria orgânica do solo.

Fonte: Dados da autora (2016)

### 2.3 Estabilidade de agregados por sonificação

Na sonificação foram utilizados 5 g de agregados com tamanho entre 4,76 - 8 mm. Estes agregados foram submetidos a um pré-umedecimento lento por gotejamento. Em seguida foram transferidos para béquer de 200 mL, cujo volume foi completado com água destilada (com uma relação solo: água 1:40).

Foram realizadas sonificações com o auxílio de um aparelho marca Qsonica, modelo Q500 operando a 20 kHz, cuja potência foi calibrada pelo método descrito em Sá et al. (2000). Os agregados foram submetidos à sonificação durante 60, 120, 180 s. Cada tempo de sonificação corresponde, respectivamente, às energias específicas aplicadas 25,5; 51; 76,5 J mL<sup>-1</sup>, calculadas segundo Sá et al. (2000) conforme equação 1:

$$EA = \frac{P \times T}{V} \quad (1)$$

em que EA é a energia específica aplicada à suspensão (J mL<sup>-1</sup>), P é a potência emitida pelo aparelho (85 W), obtida por meio de calibração (W) descrita em Sá, Lage e Lima (2001), T é o tempo de sonificação (s), v é o volume da suspensão (mL). Salienta-se que o tempo 0s de sonificação consistiu apenas em colocar os agregados no béquer, completar o volume com água destilada e passar pela peneira, representando desta forma, a desagregação ocasionada pelo manuseio da amostra.

Buscando controlar fatores que afetam a eficiência da dispersão por sonificação, a ponta da haste do aparelho, de comprimento 17,5 cm e diâmetro 1,9 cm introduzida na suspensão foi imersa na água a uma profundidade fixa de 2 cm. Para reduzir o efeito da alta temperatura, as amostras foram colocadas em banho de água gelada durante a sonificação,

ficando a temperatura da suspensão abaixo de 40°C, conforme sugerido em diversos trabalhos (SÁ et al., 1999; SÁ; LIMA; MELLO, 2002).

#### 2.4 Determinação do índice b/a

Após cada processo de sonificação, as amostras foram passadas em peneira de malha de 0,053 mm. O material retido nesta peneira foi seco em estufa por 24 horas a 105°C e pesado. Os sólidos que passaram pela peneira (silte + argila) foram obtidos por diferença: silte + argila = amostra original (5 g) – material retido na peneira. Este procedimento possibilitou a determinação, em cada nível de energia específica aplicada, do índice de desagregação (ID), obtido pela relação (silte + argila dispersa (g))/amostra original (g), e também o índice de desagregação normalizado (IDN) pela relação  $ID/ID_{\text{máximo}}$  descrito em (SÁ et al., 1999).

Foram construídas curvas de desagregação, plotando-se no eixo das abscissas (X) a energia específica aplicada, em  $J mL^{-1}$ , e no eixo das ordenadas (Y), os índices de desagregação normalizados, ajustando-se modelos hiperbólicos modificados do tipo  $Y = X/(a + bX)$ , sendo a e b coeficientes específicos para cada camada de solo. As curvas de dispersão foram linearizadas, dividindo-se a energia específica pelo índice de dispersão, obtendo-se uma equação do tipo  $y = a + bx$ . Foi obtido o índice b/a segundo Sá et al. (1999).

#### 2.5 Modelagem das curvas de desagregação

Após cada sonificação quantificou-se os agregados de tamanho areia, retidos na peneira de 0,053 mm, enquanto os agregados de tamanho silte e a argila foram transferidos para proveta de 500 mL, que foi completada com água destilada e a suspensão agitada. Com base na Lei de Stokes foi calculado o tempo de sedimentação dos agregados de tamanho silte, e foi coletada com auxílio de pipeta volumétrica automática de 10 mL, mergulhada na profundidade de 5 cm, suspensão contendo partículas do tamanho argila.

A quantificação dos agregados de tamanho silte foi realizado por diferença, considerando que a soma das frações areia (2000 - 53  $\mu\text{m}$ ), silte (53 - 2  $\mu\text{m}$ ) e argila (< 2  $\mu\text{m}$ ) é igual a 1.

Os valores determinados de cada fração foram ajustados aos modelos propostos por Field e Minasny (1999) e Field, Minasny e Gaggin (2006), descritos em Ribeiro et al. (2013). Dessa forma, usando as expressões 2, 3 e 4 respectivamente, foi modelada a curva de desagregação do solo (CDS), a curva de dispersão do solo (CCDS) e a curva de liberação e dispersão de agregados (CLAD).

$$y_a = y_0 + a \cdot \exp(-k_1 \cdot x) \quad (2)$$

Em que  $y_a$  é a quantidade de agregados tamanho areia;  $x$  nível de energia específica ultrassônica aplicada;  $y_0$ ,  $a$  e  $k_1$  parâmetros de ajuste do modelo, e  $k_1$  referida como constante de desagregação ( $\text{g J}^{-1}$ ).

$$y_{ar} = a[1 - \exp(-k_2 \cdot x)] \quad (3)$$

Em que  $y_{ar}$  é a quantidade de agregados do tamanho argila,  $x$  nível de energia específica ultrassônica aplicada,  $a$  e  $k_2$  os parâmetros de ajuste do modelo, sendo  $k_2$  referenciado como constante de dispersão ( $\text{g J}^{-1}$ ).

$$y_s = 1 - y_a - y_{ar} \quad (4)$$

em que  $y_s$  é a quantidade de agregados de tamanho silte.

De posse destes modelos, calculou-se a energia crítica (EC) para o início da dispersão dos agregados pela expressão:

$$EC = \frac{\ln(k_2/k_1)}{k_2 - k_1} \quad (5)$$

## 2.6 Análises estatísticas

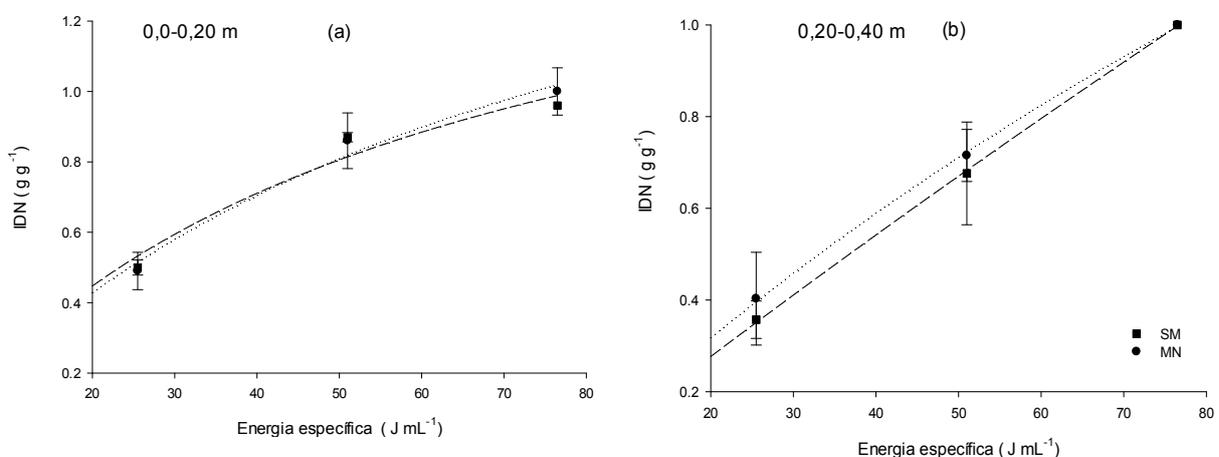
Os resultados foram submetidos à análise exploratória dos dados e a normalidade dos erros foi verificada pelo teste de Shapiro-Wilk. O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado, sendo dois usos do solo (Manejo e Mata), três repetições e duas profundidades (0-0,20 m, 0,20-0,40 m). As médias foram comparadas pelo teste Scott-Knott 5% de probabilidade, por meio do software estatístico Sisvar (FERREIRA, 2011). Os gráficos e modelos foram desenvolvidos com auxílio do aplicativo Sigma Plot 12.0.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Curvas de desagregação do solo

Para o intervalo de energia específica empregado neste estudo (0 - 76,5 J mL<sup>-1</sup>), os dados dos IDN dos agregados de tamanho 4,76-8 mm foram descritos por modelos lineares (Figura 1a,b).

Figura 1- Curvas de desagregação de agregados de tamanho 4,76-8 mm nas camadas de 0,0-0,20 m (a) e 0,20-0,40 m (b) de um Latossolo sob mata nativa (MN) e manejo conservacionista na cafeicultura (SM).



Fonte: Dados da autora (2016)

Tabela 3. Modelos ajustados para as curvas de desagregação de agregados de tamanho 4,76-8 mm nas diferentes camadas de um Latossolo sob mata nativa e manejo conservacionista na cafeicultura.

Camada (m)	Equação ajustada	R <sup>2</sup>
Fração 4,76 - 8 mm		
-----Mata Nativa-----		
0,0-0,20	IDN = EA/(33,1184 + 0,5788EA)	0,87*
0,20-20,40	IDN = EA/( 58,1243+ 0,2433 EA)	0,93*
-----Sistema de Manejo-----		
0,0-0,20	IDN = EA/( 36,6692 + 0,5014EA)	0,81*
0,20-20,40	IDN = EA/(70,7159 + 0,0780 EA)	0,99***

IDN: índice de desagregação normalizado; EA: energia específica aplicada (J mL<sup>-1</sup>); \* P < 0,05; \*\*\* P < 0,001.

Fonte: Dados da autora (2016)

Nos trabalhos descritos por Sá, Lima e Mello (2002), observou-se um comportamento hiperbólico das curvas de desagregação de Latossolos sob mata, só alcançando um patamar a partir do nível de energia específica de 90 J mL<sup>-1</sup>.

No presente estudo, na camada de 0,0-0,20 m, observou-se uma tendência em atingir o patamar de desagregação do solo quando se aplicou energia específica de  $76,5 \text{ J mL}^{-1}$ , ou seja, níveis de energia específica superiores àquele valor não seriam sensíveis para a avaliação dos efeitos do uso do solo sobre a macroagregação.

Estes resultados corroboram com os observados por Schomakers et al. (2011) que ao avaliarem Chernossolo e Cambissolo sob diferentes manejos na Austria verificaram que altas intensidades de energia específica ultrassônica promoveram uma desintegração rápida e total dos macroagregados de solo, não permitindo a avaliação hierárquica da ruptura destes agregados.

Assim, com base nos resultados aqui apresentados, verifica-se que nas condições deste trabalho, apenas em baixos níveis de energia específica ultrassônica seria possível obter o fracionamento dos macroagregados da camada de 0,0-0,20 m em diferentes classes de tamanho, sem que haja sua desintegração completa. Isto demonstra que trabalhos que utilizaram baixas intensidades de energia específica ultrassônica podem ser base para pesquisas em que se deseja elucidar os mecanismos envolvidos na formação dos macroagregados do solo.

### 3.2 Índices de desagregação normalizados

Em todos os níveis de energia específica aplicados, ficou demonstrado com base nos índices de desagregação normalizados não haver diferenças na estabilidade dos agregados formados na condição de manejo e de mata nativa (tabela 4).

Tabela 4 - Índices de desagregação normalizados (IDN) para a fração de agregados de tamanho 4-8 mm de um Latossolo sob mata nativa e manejo conservacionista na cafeicultura.

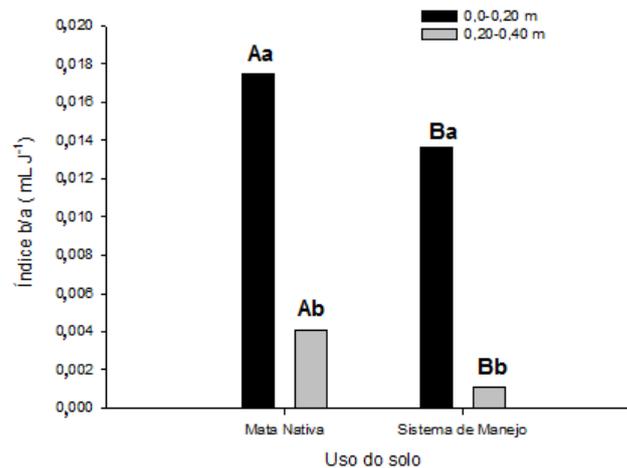
Uso do solo	Energia específica ( $\text{J mL}^{-1}$ )		
	25,5	51	76,5
MN	0,43a	0,78a	1,0 a
SM	0,43a	0,77a	1,0 a

MN: mata nativa; SM: sistema de manejo. Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ( 5%).

Fonte: Dados da autora (2016)

Entretanto, com base no índice b/a que mede a susceptibilidade do solo à desagregação foi verificada a superioridade do solo sob manejo em relação a mata nativa (Figura 2). Sá et al. (1999) consideraram este índice como o de maior sensibilidade na avaliação de solos quanto à vulnerabilidade à desagregação quando submetidos a diferentes usos e manejos.

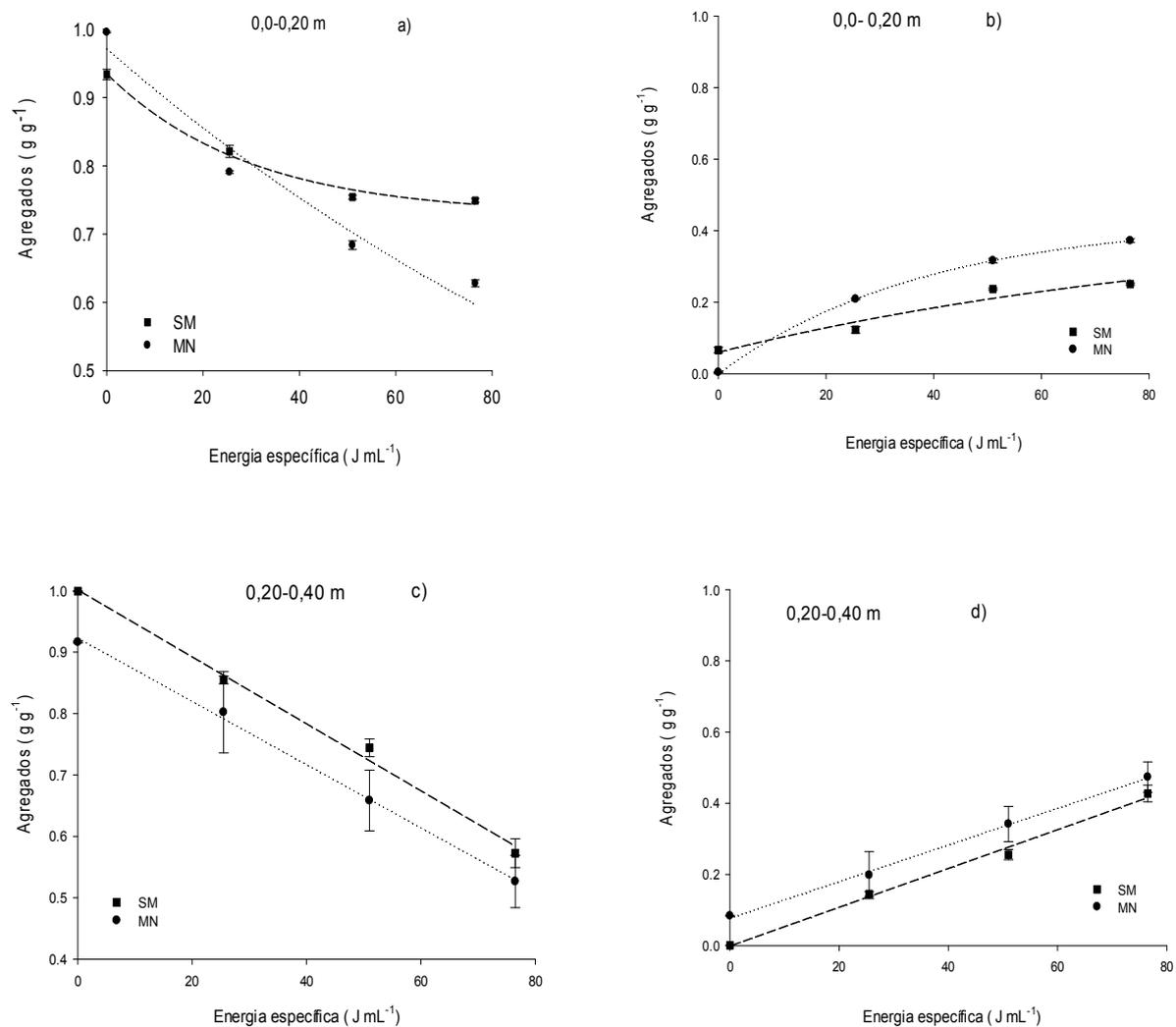
Figura 2 - Índice b/a para fração de agregados de tamanho 4,76-8 mm das diferentes camadas de Latossolo sob mata nativa e manejo conservacionista na cafeicultura. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott 5%. Letras maiúsculas comparam sistemas de manejo numa mesma profundidade e minúsculas as profundidades do mesmo sistema de manejo.



Fonte: Dados da autora (2016)

Confirmando a ação do sistema de manejo na melhoria da estabilização dos agregados do solo, ao se analisar as curvas de liberação dos agregados das camadas de 0,0-0,20 e 0,20-0,40 m verificou-se que em toda faixa de energia específica estudada ( $0-76,5 \text{ J mL}^{-1}$ ), o solo submetido ao manejo apresenta maiores quantidades de agregados de tamanho areia (Figuras 3a,c) e menores quantidades de agregados de tamanho silte/argila (Figuras 3b,d) comparado ao solo sob mata nativa.

Figura 3 - Curvas de liberação dos agregados de tamanho areia (a,c) e silte + argila (b,d) da fração 4,76-8 mm das camadas de 0,0-0,20 e 0,20-0,40 m.



Fonte: Dados da autora (2016)

Legenda: As barras nos gráficos representam o erro padrão da média (n= 3). SM: sistema de manejo, MN: mata nativa.

Salienta-se que na implantação do sistema de manejo foi realizado na linha de plantio um sulcamento a 60 cm, seguido de revolvimento a 40 cm de profundidade com equipamento semelhante a uma enxada rotativa que causa a pulverização dos agregados do solo. Entretanto, as práticas de manejos subsequentes como a aplicação 28 t ha<sup>-1</sup> de gesso na superfície do solo em associação com resíduos de braquiária cortada e proveniente das entrelinhas favoreceu a formação de novos agregados (SILVA et al., 2013, 2014, 2016a, 2016b).

Os resíduos de braquiária das entrelinhas que são adicionados a linha de plantio, após operações de cortes periódico, propiciam um acúmulo de matéria orgânica no solo (SILVA et al., 2014). Os produtos derivados dessa matéria orgânica são fontes de nutrientes e energia

específica para os microorganismos do solo que desempenham um importante papel na agregação, uma vez que os produtos da decomposição microbiana, os polissacarídeos e mucilagens são agentes cimentantes de macroagregados do solo (INAGAKI et al., 2016; SILVA et al., 2016a).

Assumindo a teoria do modelo conceitual de agregação proposto por Six et al. (2000), a partir das premissas postuladas por Oades (1984), a formação destes macroagregados pode estar ocorrendo preferencialmente no entorno da matéria orgânica particulada (MOP) adicionado ao solo (resíduos frescos de braquiária) que com o tempo é decomposta e se transforma em matéria orgânica particulada fina (MOPF) intra-macroagregados.

Desta forma, a manutenção dos macroagregados do sistema de manejo aqui reportado pode estar diretamente relacionada ao aporte de matéria orgânica menos humificada, proveniente dos restos de braquiária, que se encontra em estágio de constante ciclagem no sistema edáfico (SIX; JASTROW, 2002).

Esta hipótese corrobora com Tivet et al. (2013), que em seus estudos sobre a dinâmica da formação e estabilização de agregados em áreas com intensas práticas de revolvimento do solo, demonstrou que o plantio convencional promoveu a dispersão das partículas de argila, silte e microagregados de argila interrompendo a formação de novos agregados do solo. Mas posteriormente, com a substituição deste sistema por manejos conservacionistas, a formação de novos agregados foi favorecida pelos diferentes compartimentos de carbono adicionados por meio da constante entrada de resíduos vegetais.

O gesso atua indiretamente nos processos formação dos agregados, ao favorecer o desenvolvimento do sistema radicular. As raízes atuam nos processos de formação e estabilização dos agregados do solo por processos físicos ou bioquímicos. Na agregação estão envolvidos processos físicos ligados à aproximação das partículas minerais, ocasionado pela pressão exercida durante o crescimento destas raízes, e processos bioquímicos relacionados com a liberação de substâncias orgânicas na rizosfera devido a sua decomposição que, por sua vez, ativa os microorganismos, e estes exsudam compostos orgânicos e, ou emitem hifas (fungos micorrízicos) que são agentes cimentantes temporários dos macroagregados do solo (COSTA JÚNIOR et al., 2012).

O alumínio e o cálcio trocável também podem ter se combinado com alguns elementos e formado complexos atuantes na agregação do solo (PEDROTII et al., 2003). Nos trabalhos realizados por Zambrosi, Alleoni e Caires (2007), a adição de gesso em sistema de plantio direto incrementou a percentagem de alumínio trocável ligado ao carbono orgânico dissolvido. Pedrotii et al. (2003) avaliando a relação entre a mineralogia da fração argila,

formas de Al e atributos físicos de diferentes solos observaram que as formas de Al amorfas e menos cristalinas favoreceram uma maior estabilidade dos agregados do solo, provavelmente pela maior afinidade destas formas de alumínio com a matéria orgânica.

Assim as formas de alumínio no solo podem ser influenciadas pelo tipo de matéria orgânica presente, e, portanto diferentes complexos Al-MOS podem ser formados, o que pode refletir na atuação de vários processos de agregação no solo (PEDROTII et al., 2003).

Enfatiza-se ainda que o  $Al^{3+}$  deslocado pelo  $Ca^{2+}$  pode reagir com o  $SO_4^{2-}$  oriundo da dissociação do gesso, formando  $AlSO_4^+$  que é um composto menos tóxico para as plantas (RAMPIM et al., 2011), e se reagir com as  $OH^-$  liberadas da superfície de óxidos e hidróxidos pode ocorrer a formação de precipitados como o  $Al(OH)_3$  (RAMPIM; LANA; FRANDOLOSO, 2013; SOUZA et al., 2012). A formação desse par iônico resultará na redução da saturação por alumínio (m) nas camadas subsuperficiais (Tabela 2) (RAMPIM et al., 2011), permitindo o desenvolvimento do sistema radicular (CARDUCCI et al., 2014, 2015) e um melhor aproveitamento de água e nutrientes pelas plantas, conforme já observado em diversos trabalhos (SANTOS et al., 2014; SERAFIM et al., 2013).

### 3.3 Modelagem das Curvas de liberação e dispersão de agregados

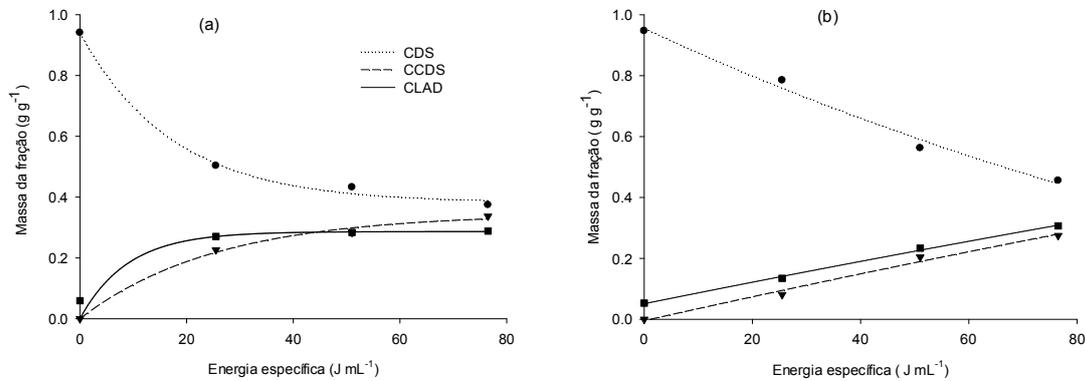
Na Tabela 5 são apresentados os modelos ajustados para as curvas de desagregação do solo (CDS), curvas de liberação de agregados e dispersão (CLAD) e curvas características de dispersão do solo (CCDS) para amostras de um Latossolo sob cultivo de cafeeiro em sistema de manejo conservacionista (Figura 4a) e mata nativa (figura 4b). Os modelos ajustados pelos métodos propostos por Field e Minasny (1999) e Field, Minasny e Gaggin (2006) foram significativos ( $P < 0,0001$ ), e os coeficientes de determinação variaram de 0,94 a 0,99.

Tabela 5 - Modelos ajustados para as curvas de desagregação do solo (CDS), curva de liberação de agregados e dispersão (CLAD) e curva característica de dispersão do solo (CCDS).

Curva	Modelos ajustados ( $P < 0,0001$ – Teste F)	$R^2$
Fração 4-8 mm		
Mata Nativa		
CDS	Areia = $0,0886 + [0,8556(\exp(-0,0005E))]$	0,98
CLAD	Silte = $1 - [0,0886 + (0,8556x(1 - \exp(-0,0005E)))] + [0,13050x(\exp(-0,0022E))]$	0,96
CCDS	Argila = $0,1305[1 - \exp(-0,0022E)]$	0,94
Sistema de Manejo		
CDS	Areia = $0,2749 + [0,6671(\exp(-0,0021E))]$	0,99
CLAD	Silte = $1 - [0,2749 + (0,6671x(1 - \exp(-0,0021E)))] + [0,1197(\exp(-0,0025E))]$	0,99
CCDS	Argila = $0,1197[1 - \exp(-0,0025E)]$	0,99

Fonte: Dados da autora (2016)

Figura 4 - Distribuição das partículas do solo após aplicação de níveis de energia específica ultrassônica em Latossolo sob sistema de manejo (a) e mata nativa (b).



Fonte: Dados da autora (2016)

Neste estudo a energia crítica calculada para os agregados da fração de 4,76-8 mm foi maior no sistema de manejo que na mata nativa (Tabela 6).

Tabela 6 - Energia crítica e constantes  $k_1$  e  $k_2$  obtidas das curvas de liberação de agregados e dispersão (CLAD).

Uso do solo Solo	$k_1$ (g J <sup>-1</sup> )	$k_2$ ( g J <sup>-1</sup> )	EC (J g <sup>-1</sup> )	$k_1/k_2$
	----- 4-8 mm -----			
SM	0,0003 <sup>(0,0002)</sup>	0,0004 <sup>(0,0003)</sup> B	2876 A	0,75
MN	0,0003 <sup>(0,0001)</sup>	0,0008 <sup>(0,0008)</sup> A	1961 B	0,38

SM = sistema de manejo; MN = mata nativa;  $k_1$  = constante de desagregação;  $k_2$  constante de dispersão; EC = energia crítica. Valores entre parênteses representam o erro padrão da média (n = 3). Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de skott-knott (5%).

Fonte: Dados da autora (2016)

Os maiores valores das constantes  $k_1$  e  $k_2$  inferem menor resistência a desagregação, assim como maiores valores de EC indicam maior estabilidade estrutural dos agregados de solo (RIBEIRO et al., 2013). De acordo com Zhu, Field e Minasny (2010), os maiores valores de  $k_1$  e  $k_2$  estão relacionados a uma rápida liberação dos agregados, em função das fracas energias de ligação existentes entre eles. Neste trabalho, observou-se que o valor para a constante  $k_2$  sofreu uma redução quando o solo recebeu o manejo, em outras palavras, a taxa de liberação de agregados no solo manejado é mais lenta, e certamente esses agregados foram formados por ligações mais fortes e estáveis.

Em ambas as situações estudadas, as curvas de liberação de agregados e dispersão (CLAD) não exibem a inflexão (“pico”) que caracteriza um solo em que há hierarquia de agregados (Figura 4a,b). Estes resultados corroboram com Zhu, Field e Minasny (2010) que ao mensurar e modelar, em função da energia específica aplicada, a distribuição de agregados de Ferrasols, também não observou esta inflexão. De acordo com o apresentado por Azevedo e Bonumá (2004), isto demonstra que em Latossolos, a hierarquia observada na morfologia nem sempre está relacionada a uma hierarquia de estabilidade dos agregados.

Se os agentes de ligação interagregados são muito mais fracos do que os agentes de ligação entre os materiais que compõe os agregados (intra-agregados), a razão  $k_1/k_2$  deve ser grande, ao passo que, a proporção deve ser pequena quando os agentes de ligação entre e dentro dos agregados proporcionam resistência semelhante (FIELD; MINASNY; GAGGIN, 2006; RIBEIRO et al., 2013; ZHU; FIELD; MINASNY, 2010). Portanto, os dados reportados neste estudo demonstram que no sistema de manejo com gesso na linha de cultivo e braquiária nas entrelinhas é provável que distintos agentes de ligação, em diferentes níveis de resistência, atuam na formação dos novos agregados de solo (Tabela 6).

Na estabilização dos agregados da fração de 4-8 mm do sistema de manejo é possível que os compostos orgânicos sejam mais humificados e estáveis. Em consonância com estes resultados, Cogo (2016) avaliando efeitos de doses crescentes de gesso agrícola em uma área experimental localizada sobre o mesmo solo aqui estudado, verificou na classe de agregados de 8-2 mm, em relação a agregados de classes inferiores, maiores teores de Proteína do solo relacionada à glomalina facilmente extraível. A glomalina é parte de uma matéria orgânica recalcitrante, persistindo no solo por longos períodos, e sua propriedade de cola auxilia na fixação das partículas do solo, favorecendo a formação de agregados estáveis (WU et al., 2014; XIE et al., 2015).

Em sistemas conservacionistas, como o aqui estudado, em que os níveis de perturbações são mínimos após a implantação, e há uma constante adição de material vegetal pode estar ocorrendo uma ciclagem mais lenta dos macroagregados e, dessa forma, a matéria orgânica presente nessa fração se torna mais estabilizado ao longo do tempo (INAGAKA et al., 2016; TIVET et al., 2013).

Salienta-se que muitas pesquisas tem reportado que a maior estabilidade de macroagregados também pode ser devida ao maior aporte de matéria orgânica nesta classe de agregados (BRIEDIS et al., 2012; FERREIRA et al., 2012; HICKMAN; COSTA; 2012; TIVET et al., 2013), entretanto este aspecto não foi contemplado neste trabalho.

Na mata nativa foram verificadas correlações significativas e positivas apenas entre fósforo (P) e  $Al^{3+}$  ( $r = 0,80$ ,  $P < 0,01$ ), P e MOS ( $r = 0,63$ ;  $P < 0,05$ ),  $Al^{3+}$  e MOS ( $r = 0,95$   $P < 0,0001$ ). Enquanto no sistema de manejo foram observadas correlações significativas e positivas entre  $Ca^{2+}$  e P ( $r = 0,79$ ;  $P < 0,01$ ),  $Ca^{2+}$  e  $Al^{3+}$  ( $r = 0,91$ ,  $P < 0,0001$ ),  $Ca^{2+}$  e MOS ( $r = 0,57$ ,  $P < 0,05$ ), P e  $Al^{3+}$  ( $r = 0,67$ ;  $P < 0,05$ ) o que sugere que pode estar ocorrendo a formação de fosfatos de Cálcio, fosfatos de alumínio, complexos alumínio e MOS, complexos cálcio e MOS, que podem estar agindo ativamente nos processos de reagregação do solo.

Em consonância com esta hipótese, verificaram-se correlações significativas negativas entre os agentes de agregação do solo ( $Al^{3+}$ ;  $Ca^{2+}$ ; MOS) e  $k_1$  e  $k_2$ , e positivas com a EC. Resultados semelhantes foram reportados por Ribeiro et al. (2013), que avaliou o efeito da vinhaça na agregação de um LVdf, LVAd e um PVAd.

A adição de gesso incrementou os teores de  $Ca^{2+}$  em ambas as frações de agregados estudadas (Tabela 2) e este cátion, em combinação com  $Al^{3+}$ , MOS e argilominerais pode estar influenciando os processos de reagregação do solo. Além disto, essas correlações também se justificam pelo efeito indireto do cálcio que promove um expressivo desenvolvimento do sistema radicular (CARDUCCI et al., 2014), que atua na agregação do solo (SILVA et al., 2013).

As ligações argila -  $Ca^{2+}$  - MOS também é capaz de estabilizar e aumentar o tempo de residência do carbono no solo, devida à proteção física derivada da formação de microagregado (BAYER et al., 2011; SIX et al., 2004). Assim, sistemas de manejo que promovem o aumento cálcio trocável no solo, como o do presente estudo, podem contribuir para o incremento de carbono (BRIEDIS et al., 2012, 2016; INAGAKI et al., 2016; TIVET et al., 2013), constituindo-se em uma prática que, além de promover a melhoria da fertilidade do solo, ocasiona também positivo impacto ambiental por atuar no sequestro de carbono no solo.

Desta forma o manejo que se utiliza de braquiária na entre linha e gesso em altas doses está promovendo a formação de macroagregados mais resistentes, confirmando informações obtidas em outros trabalhos que se utilizaram do mesmo sistema de manejo (SILVA et al., 2013, 2014, 2016a, 2016b), porém utilizando outras metodologias.

## 4 CONCLUSÕES

1. Após 5 anos do revolvimento profundo do solo, observou-se que as práticas de manejo subsequentes, adição de gesso e de resíduos de braquiária na linha de cultivo do cafeeiro, promoveram a formação de agregados da classe de 4-8 mm mais estáveis que os encontrados no ambiente de mata nativa.

2. No nível máximo de energia específica aplicado ( $76,5 \text{ J mL}^{-1}$ ) verificou-se nas curvas de desagregação do solo sob sistema de manejo, uma tendência em atingir o patamar de desagregação máxima, ou seja, níveis de energia específica superiores não seriam sensíveis para a avaliação dos efeitos do uso do solo sobre a macroagregação.

3. Nas condições deste trabalho, apenas em baixos níveis de energia específica ultrassônica seria possível obter o fracionamento dos macroagregados em diferentes classes de tamanho.

4. Baixas intensidades de energia específica ultrassônica são mais indicadas para trabalhos de pesquisas em que se deseja elucidar os mecanismos envolvidos na formação de macroagregados no solo.

5. A energia específica crítica necessária para causar a dispersão e liberação dos agregados da fração de 4-8 mm em solo sob sistema de manejo é maior que aquela observada para o solo sob mata nativa.

6. As curvas de liberação de agregados e dispersão não exibem a inflexão que caracteriza a presença de hierarquia de agregados, portanto, o Latossolo oxidico gibbsítico aqui estudado não apresenta hierarquia de agregados.

## REFERÊNCIAS

- AZEVEDO, A. C.; BONUMÁ, A. S. Partículas coloidais, dispersão e agregação em Latossolos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 2, p. 609-617, mar./abr. 2004.
- BARTHES, B.; ROOSE, E. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion; validation at several levels. **Catena**, Amsterdam, v. 47, n. 2, p. 133–149, Apr. 2002.
- BAYER, C. et al. Estabilização do carbono no solo e mitigação das emissões de gases de efeito estufa na agricultura conservacionista. In: KLAUBERG FILHO, O.; MAFRA, A. L.; GATIBONI, L. C. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**: volume 7. Viçosa: SBCS, 2011. Cap. 2, p. 55-118.
- BRESSON, L. M.; MORAN, C. J. Role of compaction versus aggregate disruption on slumping and shrinking of repacked hardsetting seedbeds. **Soil Science**, Baltimore, v. 168, n. 8, p. 585–594, Aug. 2003.
- BRIEDIS, C. et al. Can highly weathered soils under conservation agriculture be C saturated? **Catena**, Amsterdam, v. 147, p. 638-649, Dec. 2016.
- BRIEDIS, C. et al. Soil organic matter pools and carbon-protection mechanisms in aggregate classes influenced by surface liming in a no-till system. **Geoderma**, Amsterdam, v. 170, p. 80-88, Jan. 2012.
- BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, Amsterdam, v. 124, n. 1–2, p. 3-22, Jan. 2005.
- CARDUCCI, C. E. et al. Distribuição espacial das raízes de caféiro e dos poros de dois Latossolos sob manejo conservacionista. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, p. 270-278, mar. 2014.
- CARDUCCI, C. E. et al. Gypsum effects on the spatial distribution of coffee roots and the pores system in oxidic Brazilian Latosol. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 145, p. 171-180, Jan. 2015.
- COGO, F. D. **Doses de gesso e distribuição em profundidade no solo de fungos micorrízicos arbusculares e glomalina em caféiro no cerrado**. 2016. 103 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.
- COSTA JÚNIOR, C. et al. Carbono em agregados do solo sob vegetação nativa, pastagem e sistemas agrícolas no bioma Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 4, p. 1-12, jul./ago. 2012.
- EDWARDS, A. P.; BREMMER, J. M. Microaggregates in soils. **The Journal Soil Science**, Oxford, v. 18, n. 1, p. 64-73, Mar. 1967.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2013. 353 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA — EMBRAPA. **Manual de métodos de análises de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1997. 212 p.

FERREIRA, A. O. et al. Relação de estratificação como indicador do sequestro de carbono em macroagregados de Latossolo sob plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 42, n. 4, p. 645-652, abr. 2012.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, nov./dez. 2011.

FIELD, D. J.; MINASNY, B. A description of aggregate liberation and dispersion in A horizons of Australian Vertisols by ultrasonic agitation. **Geoderma**, Amsterdam, v. 91, n. 1, p. 11–26, Aug. 1999.

FIELD, D. J.; MINASNY, B.; GAGGIN, M. Modelling aggregate liberation and dispersion of three soil types exposed to ultrasonic agitation. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 44, n. 5, p. 497–502, Jan. 2006.

GUIMARÃES, P. T. G. et al. Cafeeiro. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; VIEGAS, V. H. A. (Ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. p. 289-302.

HANKE, D. **Gênese, interação organo-mineral e estabilidade de agregados de solos desenvolvidos de basalto**. 2012. 116 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

HICKMANN, C.; COSTA, L. M. Estoque de carbono no solo e agregados em Argissolo sob diferentes manejos de longa duração. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 10, p. 1055–1061, 2012.

INAGAKI, T. M. et al. Lime and gypsum application increases biological activity, carbon pools, and agronomic productivity in highly weathered soil. **Agricultural Economics Research**, Washington, v. 231, p. 156–165, Sept. 2016.

KAISER, M. et al. Application of ultrasound to disperse soil aggregates of high mechanical stability. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Temuco, v. 175, n. 4, p. 521–526, Aug. 2012.

KAISER, M.; BERHE, A. A. How does sonication affect the mineral and organic constituents of soil aggregates? A review. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Temuco, v. 177, n. 4, p. 479–495, Aug. 2014.

MENEGASSE, L. N.; GONÇALVES, J. M.; FANTINEL, L. M. Disponibilidades hídricas na Província cárstica de Arcos-Pains-Doresópolis, Alto São Francisco, Minas Gerais, Brasil. **Revista Águas Subterrâneas**, São Paulo, v. 16, n. 16, p. 9-21, maio 2002.

NORTH, P. F. Towards an absolute measurement of soil structural stability using ultrasound. **The Journal Soil Science**, Oxford, v. 27, n. 4, p. 451-459, Dec. 1976.

OADES, J. M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. **Plant Soil**, The Hague, v. 76, n. 1, p.319-37, Feb. 1984.

PEDROTTI, A. et al. Relação entre atributos físicos, mineralogia da fração argila e formas de alumínio no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 1, p. 1-9, jan./fev. 2003.

RAMPIM, L. et al. Atributos químicos de solo e resposta do trigo e da soja ao gesso em sistema semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 5, p. 1687-1698, set./out. 2011.

RAMPIM, L.; LANA, M. C.; FRANDOLOSO, J. F. Fósforo e enxofre disponível, alumínio trocável e fósforo remanescente em Latossolo Vermelho submetido ao gesso, cultivado com trigo e soja. **Semina: ciências agrárias**, Londrina, v. 34, n. 4, p. 1623-38, 2013.

RESENDE, M.; BAHIA, F. A. F. C.; BRAGA, J. M. Mineralogia da argila de Latossolos estimada por alocação a partir do teor total de óxidos do ataque sulfúrico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 11, p. 17-23, 1987.

RIBEIRO, B. T. et al. Aggregate breakdown and dispersion of soil samples amended with sugarcane vinasse. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 70, n. 6, p. 435-441, nov./dez. 2013.

SÁ, M. A. C. de et al. Estimativa da erodibilidade pela desagregação por ultra-som e atributos de solos com horizonte B textural. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 7, p. 691-699, jul. 2004.

SÁ, M. A. C. de et al. Índice de desagregação do solo baseado em energia ultra-sônica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 3, p. 525-531, jul./set. 1999.

SÁ, M. A. C. de; LAGE, G.; LIMA, J. M. de. **Calibração da potência emitida pelo sonificador para uso em análises de solo**. Lavras: Editora da UFLA, 2001. 17 p. (Boletim agropecuário, 41).

SÁ, M. A. C.; LIMA, J. M.; MELLO, C. R. Nível de energia ultra-sônica para o estudo da estabilidade de agregados de um Latossolo sob diferentes usos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 11, p. 1649-1655, nov. 2002.

SÁ, M. A. C. et al. Comparação entre métodos para o estudo da estabilidade de agregados em solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 9, p. 1825-1834, set. 2000.

SANTOS, W. J. R. et al. Soil moisture in the root zone and its relation to plant vigor assessed by remote sensing at management scale. **Geoderma**, Amsterdam, v. 221-222, p. 91-95, June 2014.

SCHAEFER, C. E. R. et al. Perdas de solo, nutrientes, matéria orgânica e efeitos microestruturais em argissolo vermelho-amarelo sob chuva simulada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 5, p. 669-678, maio 2002.

SCHOMAKERS, J. et al. Characterization of soil aggregate stability using low intensity ultrasonic vibrations. **International Agrophysics**, Lublin, v. 25, n. 2, p. 165-172, 2011.

SERAFIM, M. E. et al. Potencialidades e limitações de uso de Latossolos e Cambissolos, sob sistema conservacionista em lavouras cafeeiras. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 29, n. 6, p. 1640-1652, nov./dez. 2013.

SERAFIM, M. E. et al. 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**, Uberlândia, v. 27, n. 6, p. 964-977, nov./dez. 2011.

SILVA, É. A. et al. Aggregate stability by the high energy moisture characteristic method in an oxisol under differentiated management. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 5, p. 1633-1642, 2014.

SILVA, É. A. et al. Aggregates morphometry of a Inceptisol under conservationist system. **Semina: ciências agrárias**, Londrina, v. 37, n. 3, p. 1165-1176, maio/jun. 2016a.

SILVA, É. A. et al. Increasing doses of agricultural gypsum, aggregate stability and organic carbon in Cerrado Latosol under coffee crop. **Revista Ciências Agrárias**, Belém, v. 56, n. 1, p. 25-32, 2013.

SILVA, É. A. et al. Stability of soil aggregates in latosols and cambisols via standard method and sonification. **African Journal of Agricultural Research**, Essex, v. 11, n. 39, p. 3894-3903, Sept. 2016b.

SIX, J. et al. A history of research on the link between (micro) agregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 79, n. 1, p. 7-31, Sept. 2004.

SIX, J. et al. Soil structure and organic matter: I. Distribution of aggregates size classes and aggregate-associated carbon. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 64, n. 2, p. 681-689, Mar. 2000.

SIX, J.; JASTROW, J. D. Soil organic matter turnover. In: LAL, R. (Ed.). **Encyclopaedia of soil science**. New York: CRC Press Book, 2002. p. 936-42.

SOUZA, F. R. et al. Efeito do gesso nas propriedades químicas do solo sob dois sistemas de manejo. **Semina: ciências agrárias**, Londrina, v. 33, n. 5, p. 1717-1732, set./out. 2012.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **The Journal of Soil Science**, Oxford, v. 33, n. 2, p. 141-163, June 1982.

TIVET, F. et al. Aggregate C depletion by plowing and its restoration by diverse biomass-C inputs under no-till in sub-tropical and tropical regions of Brazil. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 126, p. 203-218, Jan. 2013.

WU, Q. S. et al. Direct and indirect effects of glomalin, mycorrhizal hyphae, and roots on aggregate stability in rhizosphere of trifoliolate orange. **Scientific Reports**, London, v. 4, p. 5823, July 2014.

XIE, H. et al. Long-term manure amendments reduced soil aggregate stability via redistribution of the glomalin-related soil protein in macroaggregates. **Scientific Reports**, London, v. 5, p. 14687, Oct. 2015.

ZAMBROSI, F. C. B.; ALLEONI, L. R. F.; CAIRES, E. F. Aplicação de gesso agrícola e especiação iônica da solução de um Latossolo sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 1, p. 110-117, jan./fev. 2007.

ZHU, Z. L.; MINASNY, B.; FIELD, D. J. Measurement of aggregate bond energy using ultrasonic dispersion. **European Journal Soil Science**, Oxford, v. 60, n. 4, p. 695-705, Aug. 2009b.

ZHU, Z.; FIELD, D. J.; MINASNY, B. Measuring and modelling the actual energy involved in aggregate breakdown. **Catena**, Amsterdam, v. 82, n. 1, p. 53-60, July 2010.

ZHU, Z.; MINASNY, B.; FIELD, D. J. Adapting technology for measuring soil aggregate dispersive energy using ultrasonic dispersion. **Biosystems Engineering**, London, v. 104, n. 2, p. 258-265, Oct. 2009a.

**ARTIGO 3 - ALTERAÇÕES NA AGREGAÇÃO E NA POROSIDADE DE  
DIFERENTES SOLOS SUBMETIDOS A MANEJO CONSERVACIONISTA NA  
CAFEICULTURA**

ERIKA ANDRESSA DA SILVA<sup>1\*</sup>

GERALDO CÉSAR DE OLIVEIRA<sup>2\*</sup>

**ARTIGO FORMATADO DE ACORDO COM A NBR 6022 (ABNT, 2003).**

---

<sup>1\*</sup> Engenheira Agrônoma, Mestre em Ciência do Solo pela Universidade Federal de Lavras. Email: andressaerikasilva@gmail.com.

<sup>2\*</sup> Orientador, prof. Dr. Associado do departamento de Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras. Email: geraldooliveira@des.ufla.br

## RESUMO

O manejo do solo promove alterações em sua estrutura com consequências na dinâmica do sistema poroso. Assim, este trabalho foi realizado com o objetivo de diagnosticar as prováveis mudanças na agregação e distribuição dos poros de Latossolo, Nitossolo e Cambissolo após cinco anos sob manejo na cafeicultura. Para a avaliação dos atributos físico hídricos destes solos comparando-os aos ambientes de referência sob vegetação natural foram coletadas amostras deformadas e indeformadas, em 4 repetições, nas camadas de 0-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m em áreas sob mata nativa e na linha de cultivo nas áreas sob cafeicultura. A agregação do solo foi mensurada por energia específica ultrassônica e, para isto, 5 g de agregados foram submetidos a níveis crescentes de energia específica. Os dados de agregação foram ajustados a modelos exponenciais e foi calculado o índice b/a. A distribuição de poros por tamanho e o Índice S foi determinado a partir das curvas de retenção de água quando amostras dos solos foram submetidas aos potenciais matriciais ( $\Psi_m$ ) de  $-2$  a  $-1500$  kPa e ajustadas à equação de van Genuchten. Neste trabalho, observou-se que o revolvimento profundo no sulco de plantio com correção e fertilização do solo em associação à adição de gesso agrícola e resíduos de braquiária, promoveu reagregação dos solos e conseqüentemente uma nova organização do espaço poroso. Contudo, este sistema de manejo alterou de forma diferenciada a estrutura nos solos avaliados. Os índices de agregação indicam uma maior susceptibilidade à desagregação do Nitossolo e do Cambissolo sob manejo, comparados à condição de vegetação natural. Por outro lado, o Latossolo sob manejo apresentou agregados mais estáveis em comparação à condição de mata nativa. Contudo, na camada de 0,20-0,40 m, do Cambissolo observou-se que o sistema de manejo promoveu aumento no volume dos macroporos grandes ( $>147 \mu\text{m}$ ) e macroporos finos ( $147-73 \mu\text{m}$ ) responsáveis pela maior aeração e rápida drenagem interna do solo, assim como aumento dos mesoporos grandes ( $73-49$  e  $49-29 \mu\text{m}$ ), poros estes responsáveis pela água prontamente disponível para as plantas. No Latossolo, também entre 0,20 e 0,40 m, verificou-se que o manejo proporcionou um incremento expressivo do volume de poros das classes  $9,0-2,9$ ;  $2,9-0,6$ ;  $0,6-0,2 \mu\text{m}$  (mesoporos), o que é relevante, visto que nesta porosidade a água está disponível para as plantas. No Nitossolo manejado, entretanto, foi observado que nas camadas de 0,0 - 0,20 m e 0,40-0,60 m houve uma diminuição do volume de macroporos grandes ( $> 145 \mu\text{m}$ ), o que pode comprometer a rápida drenagem interna do perfil aumentando a susceptibilidade à erosão deste solo.

**Palavras-chave:** Manejo conservacionista. Cobertura vegetal. Sulcamento profundo.

## 1 INTRODUÇÃO

Na região do Alto São Francisco (MG), um sistema de manejo que se utiliza de revolvimento intenso do solo e preparo com correção e fertilização profundos dos sulcos de plantio de cafeeiros, gramíneas nas entre linhas com cortes periódicos, e material amontoado para a linha da cultura principal, além de altas doses de gesso no solo para aumentar o teor de Cálcio em profundidade, vem sendo indicado por muitos agrônomos (SERAFIM et al., 2011). Este sistema tem se destacado na região por promover o desenvolvimento radicular do cafeeiro em profundidade, permitindo um maior aproveitamento da água do subsolo (SILVA et al., 2015).

Apesar dos efeitos positivos desse sistema de manejo (CARDUCCI et al., 2015a; SERAFIM et al., 2013a, 2013b; SILVA et al., 2012, 2013), o revolvimento profundo provoca a pulverização do solo. Assim, persistem muitas dúvidas sobre agregação, organização do sistema poroso, e reacomodação das partículas do solo, particularmente nos solos jovens onde é comum o problema de adensamento em condições naturais por apresentarem menor estabilidade de agregados (BAMBERG et al., 2011; MARCOLAN et al., 2007).

A medida que se intensifica o uso agrícola, os atributos físico-hídricos dos solos sofrem alterações, geralmente adversas para o crescimento vegetal. Esse efeito fica mais evidente quando os sistemas de uso são comparados com o estado do solo ainda sob vegetação natural (SANTOS et al., 2011). Para medir a magnitude e duração das alterações provocadas pelos sistemas de manejo na estrutura dos solos normalmente são utilizados os parâmetros físicos como densidade do solo, macro e microporosidade, estabilidade de agregados, tamanho e continuidade de poros, taxa de infiltração de água, retenção de água e aeração (REICHERT; REINERT; BRAIDA, 2003; REICHERT et al., 2009).

A recuperação de propriedades físicas e a reorganização estrutural, após intensa mobilização do solo, foi observada em sistemas conservacionistas, especialmente naqueles implantados há mais tempo (MARCOLAN et al., 2007; SPERA et al., 2009), devido ao grande aporte de resíduos orgânicos e nutrientes. Isto aconteceu porque a matéria orgânica favorece a agregação do solo, eleva o volume de poros favorecendo a infiltração de água e a aeração (CUNHA et al., 2011; JORDAN; ZAVALA; GIL, 2010).

De acordo com Bamberg et al. (2011), camadas revolvidas são estruturalmente instáveis, apresentando elevada porosidade e baixos valores de densidade após a operação mecanizada. Entretanto, ao longo do tempo, devido principalmente aos ciclos de umedecimento e secagem, tendem a sofrer uma reconsolidação natural, com retorno das

propriedades do solo ao estado original (BAMBERG et al., 2011). Como a dinâmica da reconsolidação do solo é um processo desconhecido, estudos objetivando esclarecer este assunto devem ser necessários, sobretudo se forem consideradas as peculiaridades de diferentes classes de solos.

Além disso, existe a expectativa de que este sistema de manejo, ao propiciar uma nova reorganização estrutural ao solo, possa promover melhorias na configuração dos poros, favorecendo o aumento do volume dos poros intermediários, responsáveis pela retenção da água prontamente disponível para as plantas (CARDUCCI et al., 2013, 2015b; OLIVEIRA et al., 2003).

A região do cerrado é caracterizada por longos períodos de seca edafológica (SANTOS et al., 2014; SILVA et al., 2015), portanto, estratégias de manejo que propiciam o incremento dos poros intermediários nos solos são de suma importância para a melhoria da disponibilidade hídrica para as plantas (BARBOSA et al., 2014).

Contudo, práticas de manejo do solo devem ser recomendadas com base em estudos científicos. Em função das incipientes pesquisas direcionadas ao estudo de reestruturação nas diferentes unidades pedológicas em que este manejo é empregado, e tendo em vista que ao promover uma reorganização estrutural, o mesmo pode afetar a dinâmica de poros dos solos, este trabalho tem por objetivo diagnosticar as prováveis mudanças na agregação e distribuição dos poros de Latossolo, Nitossolo e Cambissolo após cinco anos sob manejo na cafeicultura.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Descrição das áreas experimentais

A pesquisa foi realizada no ano de 2013 em solos sob lavouras cafeeiras comerciais com cinco anos de cultivo, implantadas segundo as premissas de um sistema de manejo do solo que emprega práticas conservacionistas (SERAFIM et al., 2011) e vem sendo utilizado nos municípios de São Roque de Minas e Vargem Bonita, na Região do Alto São Francisco (MG). O clima da região é do tipo Cwa, segundo classificação de Köppen. A precipitação média anual é de 1.344 mm, com estação seca bem definida nos meses de maio a setembro. A temperatura média anual é de 20,7°C, a umidade relativa média é 60% e a altitude média é 900 m (MENEGASSE; GONÇALVES; FANTINEL, 2002).

Os solos em estudo foram descritos de acordo com Santos et al. (2013) e classificados segundo Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2013) como Cambissolo Háplico distrófico Tb típico (CXbd), Latossolo Vermelho distrófico (LVd) e Nitossolo Háplico distrófico (NXd), sendo o primeiro de textura argilosa e os dois últimos de textura muito argilosa (Tabela 1). Todos originados de rochas pelíticas, principalmente siltitos.

Tabela 1 - Análise textural\* dos solos estudados: Cambissolo Háplico distrófico Tb típico (CXbd), Latossolo Vermelho distrófico (LVd) e Nitossolo Háplico distrófico (NXd).

Horizontes	Areia	Silte	Argila
.....g kg <sup>-1</sup> .....			
CXbd			
A	122	337	540
Bi	50	432	518
LVd			
A	32	118	848
Bw	37	95	867
NXd			
A	89	141	769
Bt	79	138	781

\*Método da pipeta (Embrapa, 1997)

Fonte: Dados da autora (2016)

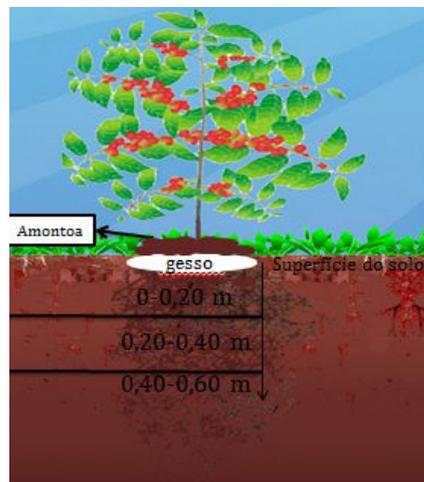
Anteriormente à implantação das lavouras comerciais, as áreas de Latossolo, Cambissolo e Nitossolo eram cobertas por pastagem com *Braquiaria decumbens*, que foram implantadas após supressão da vegetação nativa de Cerrado (savana brasileira) em setembro de 2008.

Os solos foram preparados entre os meses de Julho e Agosto de 2008, com uma aração e duas gradagens, conforme manejo tradicional da região, além da correção química, incorporando, independente do solo, 4 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário (16-17% MgO) em área total, e posteriormente aplicados 2 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso agrícola em superfície.

Na segunda quinzena de outubro de 2008, foi feito o plantio do cafeeiro (*Coffea arabica* L.), cultivar Catucaí Amarelo, no espaçamento semi-adensado 2,50 x 0,65 m. Para o plantio, foi feito sulcamento com cavadeira-adubadora que prepara a 0,60 m de profundidade e 0,50 m de largura, e promove mistura de corretivos e fertilizantes em toda a extensão do sulco. No sulco de plantio foram aplicadas adicionalmente 2 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário (16-17% MgO) e 220 kg m<sup>-1</sup> de 08-44-00 com 1,5% Zn e 0,5% B), visando construir a fertilidade na camada de 0,60 m (SERAFIM et al., 2011, 2013a).

No início de 2009 foram adicionados outros 7 kg de gesso agrícola/metro linear na linha do plantio de cafeeiros. Quando a braquiária da entre linha atingiu 0,50 m de altura, o solo foi gradeado a 0,10 m de profundidade e este material vegetal foi amontoado junto ao tronco do cafeeiro numa faixa de 0,5 m, configurando uma amontoa sobre o gesso adicionado na superfície do solo na linha do cafeeiro, conforme figura 1 (SERAFIM et al., 2011). No primeiro ano após o plantio, foram aplicados, em área total, 100 kg ha<sup>-1</sup> de nitrato de amônio em cobertura. No segundo ano de cultivo, objetivando o bom rendimento de material cortado e incremento de material orgânico, o solo recoberto com a gramínea (entre linhas) recebeu uma adubação com 600 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O, fracionada em 4 aplicações durante o ano (SILVA et al., 2014).

Figura 1 - Esquema ilustrativo das camadas do solo sob manejo.



Fonte: Dados da autora (2016)

## 2.2 Análises laboratoriais

### 2.2.1 Agregação do solo

A agregação do solo foi avaliada por sonificação. Amostras compostas por 5 g de agregados com tamanho entre 4,76 - 8 mm, obtidos em peneiramento à seco, foram transferidas para béquer de 200 mL e o volume foi completado com água destilada (com uma relação solo: água destilada de 1:40). Foram realizadas sonificações com o auxílio de um aparelho marca Qsonica, modelo Q500 operando a 20 kHz, cuja potência foi calibrada pelo método descrito em Sá et al. (2000). Amostras dos agregados foram submetidos à sonificação durante 60, 120, 180 s. Cada tempo de sonificação corresponde, respectivamente, às energias específicas aplicadas 25,5; 51; 76,5 J mL<sup>-1</sup> calculadas segundo Silva et al. (2015) conforme equação 1:

$$EA = \frac{P \times T}{V} \quad (1)$$

Em que EA é a energia específica aplicada à suspensão (J mL<sup>-1</sup>), P é a potência emitida pelo aparelho (85 W), obtida por meio de calibração (W) descrita em Silva et al. (2015), T é o tempo de sonificação (s), v é o volume da suspensão (mL).

Após cada sonificação, as amostras foram passadas em peneira de malha de 0,053 mm. O material retido nesta peneira foi seco em estufa por 24 horas a 105°C e pesado. Os sólidos que passaram pela peneira (correspondente às frações silte + argila) foram obtidos por diferença: silte + argila = amostra original (5 g) – material retido na peneira. Este procedimento possibilitou a determinação, em cada nível de energia específica aplicado, do índice de desagregação (ID), obtido pela relação (silte + argila dispersa em g)/amostra original (g), e também o índice de desagregação normalizado (IDN) pela relação ID/ID<sub>máximo</sub>. Assim, o índice de desagregação (b/a) foi calculado conforme metodologia descrita em Sá et al. (1999).

Também foram construídas curvas de desagregação, plotando-se no eixo das abscissas (X) a energia aplicada, em J mL<sup>-1</sup>, e no eixo das ordenadas (Y), os índices de desagregação normalizados. Os modelos mais adequados para ajuste dos dados foram selecionados com base nos critérios propostos em Silva et al. (2015). Dessa forma, os dados foram ajustados aos modelos exponenciais, conforme equações 2 e 3, que apresentaram menor valor de P, variância constante e menor erro quadrático médio.

$$y = y_0 + a \exp(-bx) \quad (2)$$

$$y = y_0 + a \exp(bx) \quad (3)$$

Em que  $y$  é a quantidade de agregados;  $x$  nível de energia específica ultrassônica aplicado;  $y_0$ ,  $a$  e  $b$  parâmetros de ajuste do modelo.

### 2.2.2 Retenção de água no solo

Amostras de solo com estrutura preservada foram coletadas nas camadas de 0-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m em áreas sob mata nativa e na linha de cultivo nas áreas sob cafeicultura (Figura 1). Foram preparadas, sendo que o solo excedente, proveniente da parte superior e inferior do cilindro, foi seco ao ar e passado por peneiras de dois milímetros, obtendo-se assim as amostras deformadas que foram utilizadas para determinação da textura (Tabela 1).

Após preparadas, as amostras indeformadas foram saturadas e submetidas aos potenciais matriciais de  $\Psi_m$  -2, -4, -6 e -10 kPa nos funis de Buchner e nos potenciais de -33, -100, -500 e -1500 kPa nas câmaras de Richard. Em seguida, as amostras foram secas em estufa, a 105-110 °C, por 48 h, para a determinação do conteúdo de água correspondente aos  $\Psi_m$  em cada tensão e cálculo da densidade do solo ( $D_s$ ) (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 2011). Com os dados obtidos, foram ajustadas as curvas de retenção de água do solo, plotando-se os valores de conteúdo de água volumétrico em função do potencial matricial da água no solo (kPa), por meio do modelo proposto por Van Genuchten (1980). Os parâmetros empíricos foram obtidos mediante o *software* SWRC (DOURADO NETO et al., 2001).

Com base nas curvas de retenção de água ajustadas com os dados de conteúdo de água volumétrico, no intuito de calcular a distribuição de poros e quantificá-los por tamanho, fez-se o uso da expressão matemática descrita em Bouma (1991):

$$D = 4 \sigma \cos\theta / \Psi_m \quad (4)$$

Onde:  $D$  é o diâmetro do poro ( $\mu\text{m}$ );  $\sigma$  a tensão superficial da água (73.43 kPa a 20 °C);  $\theta$  é o ângulo de contato entre o menisco e a parede do tubo capilar (considerado como zero); e  $\Psi_m$  o potencial matricial (kPa). Para o cálculo do índice  $S$  utilizou-se a equação 5:

$$S = -n(U_s - U_r) [1 + 1/m] - (1 + m) \quad (5)$$

Sendo: S = valor da inclinação da curva de retenção de água no seu ponto de inflexão;  $U_s$  = conteúdo de água gravimétrico saturado ( $\text{g g}^{-1}$ );  $U_r$  = conteúdo de água gravimétrico residual ( $\text{g g}^{-1}$ ); m, n = parâmetros de ajustes do modelo, para a qual foram seguidas as recomendações sugeridas por Dexter (2004): onde a umidade do solo foi expressa em  $\text{g g}^{-1}$  (umidade gravimétrica), e durante os ajustes das CRA, aplicou-se a restrição  $m = 1-1/n$  (REYNOLDS et al., 2009).

Neste trabalho, as classes de poros geradas, conforme sugerido em Carducci et al. (2015b), foram denominadas de acordo com os critérios micromorfológicos propostos em Bullock et al. (1985): macroporos grandes ( $>145 \mu\text{m}$ ); macroporos finos ( $145-73 \mu\text{m}$ ); mesoporos grandes ( $73-49$  e  $49-29 \mu\text{m}$ ); mesoporos médios ( $29-9$  e  $9-2,9 \mu\text{m}$ ); mesoporos finos ( $2,9-0,2 \mu\text{m}$ ); e microporos ( $< 0,2 \mu\text{m}$ ).

### **2.2.3 Análises estatísticas**

Os dados foram submetidos a análise exploratória e a normalidade dos erros foi verificada pelo teste de Shapiro-Wilk. Para os dados de cada classe de solo (Latosolo, Nitossolo e Cambissolo), o delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado, sendo dois usos do solo (Manejo e vegetação natural), quatro repetições e três profundidades ( $0-0,20$ ,  $0,20-0,40$  e  $0,40-0,60$  m). Os dados foram comparados pelo teste Scott-Knott 5% de probabilidade, por meio do aplicativo estatístico Sisvar (FERREIRA, 2011).

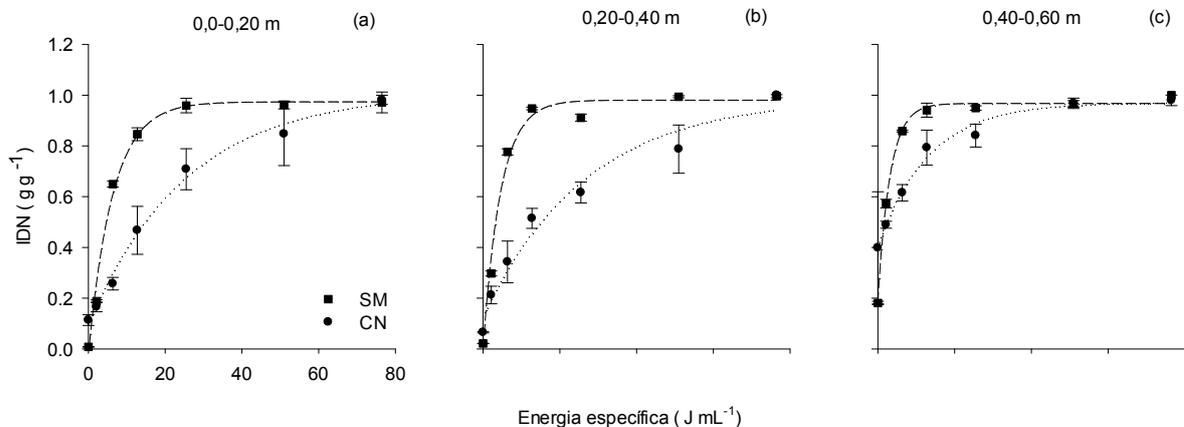
### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Agregação do solo

Para o intervalo de energia específica empregado neste estudo ( $0 - 76,5 \text{ J mL}^{-1}$ ), os modelos exponenciais foram os que melhor descreveram o comportamento de desagregação dos diferentes solos em estudo (Tabela 2).

Verificou-se que baixo nível de energia específica ( $< 20 \text{ J mL}^{-1}$ ) foram suficientes para causar a dispersão total dos agregados do Cambissolo (Figura 1a,b,c), resultado que reflete a alta vulnerabilidade natural deste solo a processos erosivos (RESENDE et al., 2014; SILVA et al., 2005). Este resultado, conforme já salientado por Silva et al. (2016a) também demonstra que baixos níveis de energia específica ultrassônica são necessários e suficientes para avaliar com maior sensibilidade a influência do manejo na desagregação de solos mais susceptíveis.

Figura 2 - Curvas de desagregação para as camadas de 0,0-0,20 m (a), 0,20-0,40 m (b) e 0,40-0,60 m (c) do Cambissolo sob sistema de manejo (SM) e Cerrado Nativo (CN).



Fonte: Dados da autora (2016)

Tabela 2 - Coeficientes para os modelos de desagregação ajustados para as camadas dos diferentes solos estudados.

Prof (m)	Coeficientes dos modelos ajustados ( P < 0,0001 – Teste F)			R <sup>2</sup>
Cambissolo				
	Yo	a	b	
----- Cerrado -----				
0,0-0,20	0,0946	0,9143	0,0394	0,99
0,20-0,40	0,1261	0,865	0,0372	0,99
0,40-0,60	0,404	0,5669	0,0757	0,99
----- Sistema de Manejo -----				
0,0-0,20	-0,0263	1,0002	0,1579	0,99
0,20-0,40	-0,0056	0,9859	0,2179	0,99
0,40-0,60	0,1835	0,784	0,3157	0,99
Nitossolo				
	Yo	a	b	
----- Mata -----				
0,0-0,20	0,1358	2,6532	0,0051	0,99
0,20-0,40	0,0838	2,6896	0,0056	0,99
0,40-0,60	0,0188	1,2307	0,0224	0,99
----- Sistema de Manejo -----				
0,0-0,20	-0,025	1,0116	0,0708	0,99
0,20-0,40	-0,0453	1,1349	0,0366	0,99
0,40-0,60	-0,0334	1,2538	0,022	0,99
Latossolo				
	Yo	a	b	
----- Mata -----				
0,0-0,20	0,226	1,9219	0,007	0,99
0,20-0,40*	-1,9092	2,0986	0,0043	0,99
0,40-0,60	0,0496	1,6242	0,0114	0,99
----- Sistema de Manejo -----				
0,0-0,20	0,0372	1,2538	0,0196	0,99
0,20-0,40	0,0292	10,4923	0,0013	0,99
0,40-0,60	0,0317	1,4172	0,0148	0,99

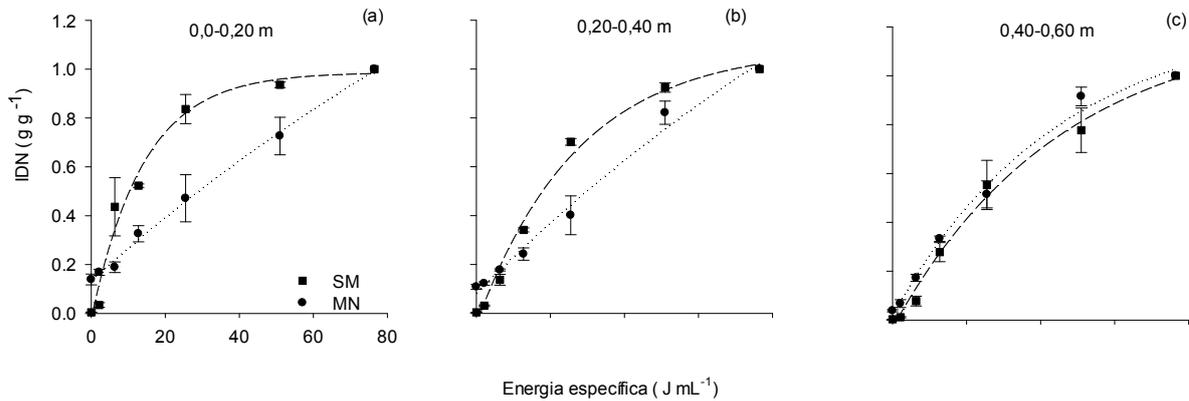
\* ajustado pelo modelo:  $f = y_0 + a \exp(bx)$ .

Fonte: Dados da autora (2016)

Com relação ao Nitossolo (Figura 2), ficou evidente que nas camadas de 0,0-0-0,20 m e 0,20-0,40 m o sistema de manejo promoveu uma maior desagregação. Estes resultados reforçam a necessidade da implantação nestes solos de sistemas de manejo mais conservacionistas, como aqueles que empregam práticas integradas de conservação do solo, a exemplo do que foi utilizado nesta área em que as entrelinhas foram mantidas com cobertura vegetal, salientando que não foram encontrados indícios de erosão. Relativamente comparado

ao Cambissolo, foram necessários níveis mais elevados de energia específica para dispersão (desintegração total).

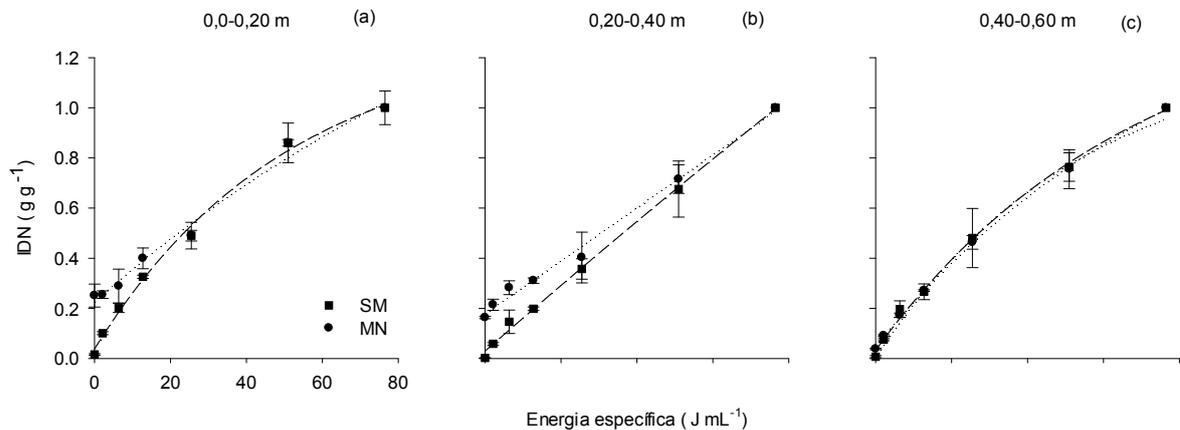
Figura 3 - Curvas de desagregação para as camadas de 0,0-0,20 m (a), 0,20-0,40 m (b) e 0,40-0,60 m (c) do Nitossolo sob sistema de manejo (SM) e mata (CN).



Fonte: Dados da autora (2016)

No Latossolo, entretanto (Figura 3), o comportamento mais linearizado observado nas curvas de desagregação confirma a presença de microagregados de elevada estabilidade. Os níveis de energia específica aplicados neste trabalho não foram suficientes para ocasionar a completa dispersão. Sá et al. (1999) estudando a estabilidade de agregados dos horizontes A de um LVdf observaram que a dispersão total ocorreu a um nível de energia específica próximo de  $476,53 J mL^{-1}$ , enquanto que os agregados do horizonte A de um NV atingiram a máxima dispersão em um nível de energia específica bem inferior,  $238,27 J mL^{-1}$ , comprovando em seus trabalhos a elevada estabilidade dos microagregados dos Latossolos.

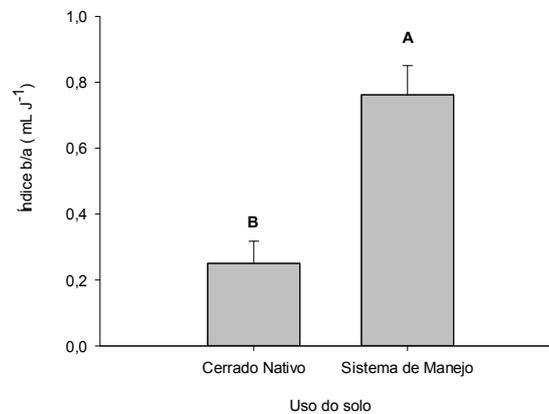
Figura 4 - Curvas de desagregação para as camadas de 0,0-0,20 m (a), 0,20-0,40 m (b) e 0,40-0,60 m (c) do Latossolo sob sistema de manejo (SM) e Mata Nativa (MN).



Fonte: Dados da autora (2016)

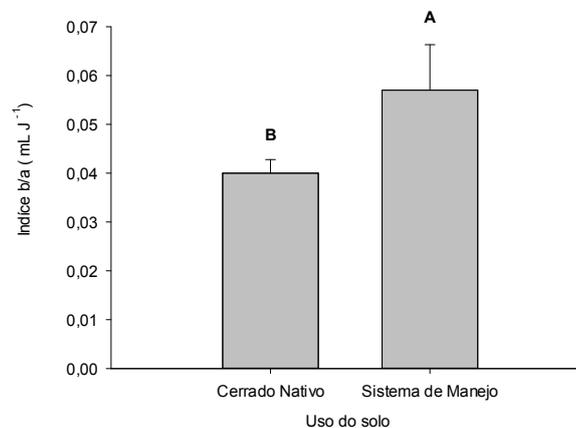
O índice de desagregação (b/a) proposto por Sá et al. (1999) expressa a susceptibilidade do solo à desagregação por ultrassom, sendo seu valor tanto menor quanto mais estáveis os agregados do solo. Este índice demonstrou uma maior susceptibilidade a desagregação do Nitossolo e do Cambissolo sob manejo, quando comparados a vegetação natural (Figuras 4 e 5). Isto pode ser devido à pulverização dos agregados decorrente do preparo dos sulcos de plantio.

Figura 5 - Índice b/a em Cambissolo sob Cerrado nativo e sistema de manejo. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott 5%.



Fonte: Dados da autora (2016)

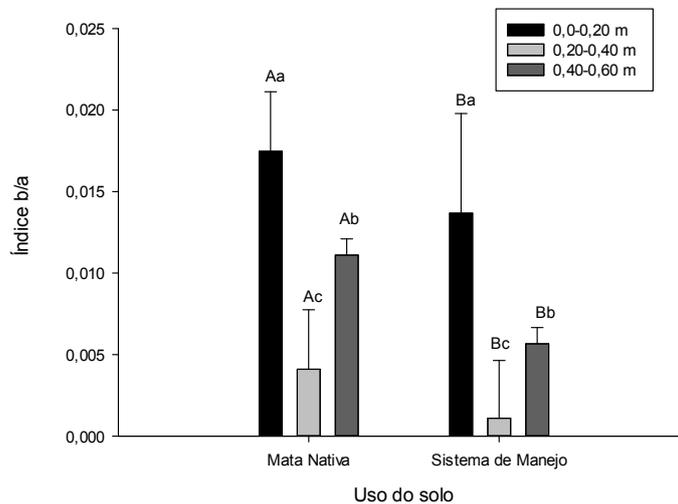
Figura 6 - Índice b/a em Nitossolo sob mata e sistema de manejo. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott 5%.



Fonte: Dados da autora (2016)

Por outro lado, o Latossolo sob manejo apresentou agregados mais estáveis comparado ao uso sob mata nativa, o que provavelmente se deve também ao revolvimento do solo por trazer para a superfície material menos susceptível à desagregação (Figura 6). A elevada resistência à desagregação dos Latossolo foi confirmada nos estudos de Sá et al. (1999), o que segundo Inda Junior et al. (2007), está relacionado com a estabilidade dos complexos organo-minerais, a qual está diretamente relacionada aos teores de carbono orgânico e à mineralogia.

Figura 7 - Índice b/a para fração de agregados de tamanho 4-8 mm das diferentes camadas de Latossolo sob mata nativa e manejo conservacionista na cafeicultura. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott 5%. Letras maiúsculas comparam uso numa mesma profundidade e minúsculas as profundidades do mesmo sistema de manejo.



Fonte: Dados da autora (2016)

Na camada de 0,40-0,60 m, em todas as classes de solos estudadas, observa-se que a distância entre as curvas (manejo x vegetação natural) foi menor (figuras 1c,2c,3c), evidenciando menor ou mesmo ausente efeito do manejo. Portanto, o comportamento visualizado na camada de 0,40-0,60 m provavelmente é reflexo da mineralogia típica de cada solo, uma vez que as curvas do solo sob manejo e vegetação natural não apresentam comportamento distintos.

Verificou-se, pelas curvas de desagregação, que o Latossolo em relação aos demais solos apresentou maior resistência a desagregação, em ambos os ambientes, manejo e vegetação natural (Figuras 3a,b,c). Observou-se que o Cambissolo atingiu desagregação máxima com aplicação de apenas  $20 \text{ J mL}^{-1}$  (Figuras 1a,bc), enquanto para o Nitossolo (Figuras 2a,b,c) verificou-se uma tendência em alcançar um patamar próximo a  $80 \text{ J mL}^{-1}$ , não sendo possível estabelecer o patamar do Latossolo para os níveis de energia específica

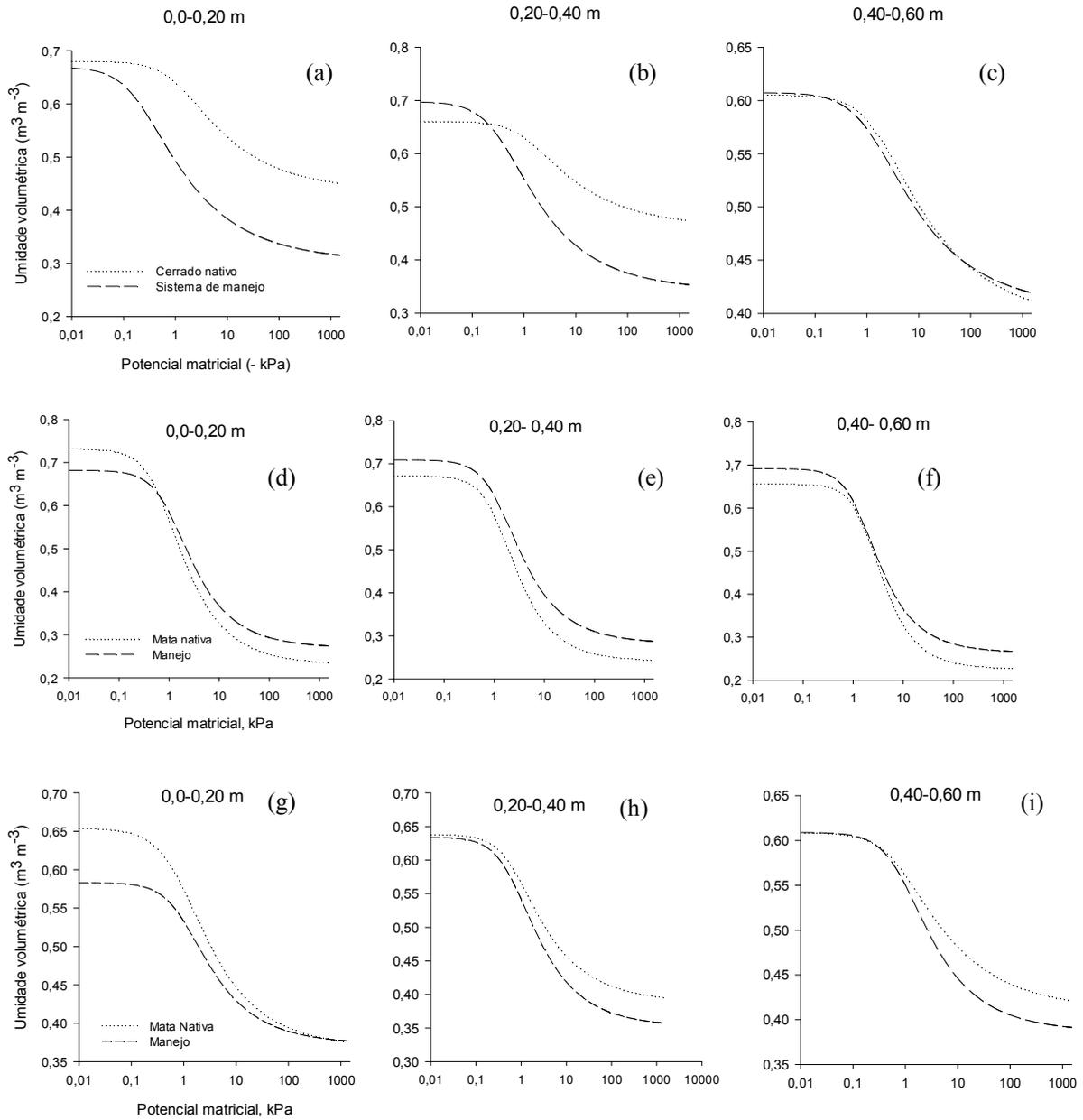
utilizados. A gibbsita dominante neste Latossolo (CARDUCCI et al., 2014a), responsável pela formação de agregados muito pequenos, porém muito resistentes à desagregação (FERREIRA; FERNANDES; CURI, 1999; SILVA et al., 2016b), é causa importante da maior resistência deste solo. No Cambissolo a caulinita é o mineral dominante e que condiciona a formação de agregados bem menos resistentes (RESENDE et al., 2014; SILVA et al., 2016a).

### **3.2 Retenção de água no solo**

A partir da análise visual das CRA (Figura 7, Tabela 3) dos solos sob vegetação natural e manejo, pode-se observar grande diversidade no comportamento entre o conteúdo de água e o potencial matricial (sistema poroso).

Os diferentes usos e práticas de manejo adotados em um solo interferem diretamente nos atributos físicos do solo, como a porosidade, densidade e formação de agregados (DONAGEMMA et al., 2011). Portanto, o revolvimento profundo do solo e a fertilização no sulco de plantio em associação ao uso de gesso agrícola, insumo rico em cálcio, promoveu reorganização da estrutura do solo (SILVA et al., 2016a, 2016b) e conseqüentemente uma nova organização do espaço poroso (CARDUCCI et al., 2015b). Assim, conforme já salientado por Carducci et al.(2015b), esse sistema de manejo altera a capacidade de retenção de água dos solos.

Figura 8 - Curvas de retenção de água em Cambissolo (a,b,c), Latossolo(d, e, f) e Nitossolo(g,h,i).



Fonte: Dados da autora (2016)

Tabela 3 - Parâmetros empíricos da equação de van Genuchten ( $\alpha$ ,  $m$ ,  $n$ ), umidade de saturação ( $\Theta_{sat}$ ), umidade residual ( $\Theta_{res}$ ) dos modelos ajustados para as diferentes camadas de um Cambissolo, Nitossolo e Latossolo sob vegetação natural e sistema de manejo.

Cambissolo					
Prof (m)	$\Theta_{sat}$	$\Theta_{res}$	$\alpha$	$m$	$n$
	..... $m^3 m^{-3}$ .....				
----- Cerrado -----					
0,0-0,20	0,6799	0,4356	0,9306	0,2795	1,3885
0,20-0,40	0,6608	0,4613	0,8635	0,2817	1,3951
0,40-0,60	0,6052	0,3908	0,6775	0,2526	1,339
----- Sistema de Manejo -----					
0,0-0,20	0,6693	0,3035	5,434	0,2773	1,3837
0,20-0,40	0,6978	0,3433	3,1674	0,2961	1,421
0,40-0,60	0,6075	0,403	1,03433	0,26985	1,3729
Nitossolo					
Prof (m)	$\Theta_{sat}$	$\Theta_{res}$	$\alpha$	$m$	$n$
	..... $m^3 m^{-3}$ .....				
----- Mata -----					
0,0-0,20	0,6535	0,3688	1,6419	0,3289	1,4928
0,20-0,40	0,6381	0,3881	1,5973	0,3175	1,4671
0,40-0,60	0,5117	0,3808	1,7804	0,3959	1,9496
----- Sistema de Manejo -----					
0,0-0,20	0,583	0,3725	1,1221	0,3496	1,5414
0,20-0,40	0,634	0,352	1,7848	0,3413	1,5201
0,40-0,60	0,609	0,3865	1,31868	0,34025	1,5189
Latossolo					
Prof (m)	$\Theta_{sat}$	$\Theta_{res}$	$\alpha$	$m$	$n$
	..... $m^3 m^{-3}$ .....				
----- Mata -----					
0,0-0,20	0,7318	0,231	1,4959	0,3808	1,6153
0,20-0,40	0,6718	0,2412	0,8868	0,4203	1,7303
0,40-0,60	0,6555	0,2263	0,5336	0,4607	1,8567
----- Sistema de Manejo -----					
0,0-0,20	0,682	0,2693	1,0604	0,3831	1,6249
0,20-0,40	0,7088	0,2818	0,8527	0,3827	1,6227
0,40-0,60	0,6915	0,264	0,73283	0,4172	1,7173

Obs: Média de 4 repetições.

Fonte: Dados da autora (2016)

Com relação ao Cambissolo e o Nitossolo, na camada superficial (0,0-0,20 m) o cerrado nativo, quando comparado ao sistema de manejo, apresentou, em todos os potenciais

matriciais, maior retenção de água no solo (figura 7a,g), o que se deve provavelmente a espessa camada de serapilheira presente no cerrado e a influência dos ciclos intensos de umedecimento/secagem que normalmente ocorrem nas camadas superficiais, afetando o arranjo dos agregados do solo, e conseqüentemente, a porosidade (REICHERT et al., 2009). Por outro lado, verificou-se que o Latossolo sob mata nativa apresentou maior volume de água a baixos potenciais (até aproximadamente -1 kPa) (Figura 7d), o que indica maior volume de poros de drenagem comparado ao solo sob manejo.

Na camada de 0,20-0,40 m do Cambissolo, o manejo proporcionou maior conteúdo de água até aproximadamente -0,5 kPa, podendo-se inferir que a macroporosidade deste solo, nesta camada, foi afetada positivamente, o que, em parte, está relacionado com o revolvimento por ocasião do preparo do solo. Com potencial matricial de água mais negativo que -0,5 kPa o cerrado nativo apresenta comportamento semelhante à camada superficial da condição solo sob manejo, apresentando maior conteúdo de água até o potencial matricial de -1500 kPa. Salienta-se ainda que em qualquer valor de potencial matricial, o manejo favoreceu uma maior retenção de água nessa camada do Latossolo (Figura 1e), mas desfavoreceu a retenção de água no Nitossolo (Figura 7h).

Na camada de 0,40-0,60 m, as curvas de retenção de água dos três solos, tanto na condição de manejo quanto na vegetação natural, apresentam um padrão de comportamento semelhante (Figuras 7c,f), indicando que as práticas de manejo adotadas possibilitam melhorias no caso do Cambissolo e manutenção no Latossolo, de suas características físico-hídricas. É por isso que a adoção deste sistema de manejo para estes solos pode ser considerada uma prática sustentável para o cultivo de cafeeiros.

O manejo proporcionou significativas melhorias na qualidade física do Cambissolo. Verificaram-se menores valores de  $D_s$  (Tabela 4) nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m da área submetida ao manejo, comparadas com a área de cerrado nativo. Embora após 5 anos de manejo, tenha se observado um aumento da  $D_s$  no Latossolo manejado em relação a mata, estes valores são considerados baixos e não restritivos ao desenvolvimento do cafeeiro. Reichert; Reinert e Braida (2003) consideram que valores de  $D_s$  em torno de 1,30 a 1,40  $\text{Mg m}^{-3}$  em solos argilosos é que podem ser restritivos ao desenvolvimento do sistema radicular, mas Reynolds et al. (2009) afirmam que  $D_s$  em torno de 1,25  $\text{Mg m}^{-3}$  podem ser prejudiciais a produtividade de culturas. Entretanto, em Latossolos com elevada macroporosidade, uma pequena compactação do solo (aumento de  $D_s$ ) é benéfica, por aumentar a retenção de água.

Tabela 4 - Densidade dos solos ( $\text{Mg m}^{-3}$ ) para as diferentes camadas de Cambissolo argiloso, Nitossolo muito argiloso e Latossolo muito argiloso sob vegetação natural e sistema de manejo.

Uso do solo	Cambissolo		
	0,0-0,20 m	0,20-0,40 m	0,40-0,60 m
Manejo	0,96 Bb	1,04 Bb	1,23 Aa
Cerrado	1,25 Aa	1,31 Aa	1,28 Aa
Nitossolo			
Manejo	1,13Aa	1,02Aa	1,11Aa
Mata	1,03Aa	1,09Aa	1,18Aa
Latossolo			
Manejo	0,92Ba	0,98Aa	0,92Ba
Mata	0,68Bb	0,81Ab	0,79Ab

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott (5%). Letras maiúsculas comparam as profundidades do mesmo uso do solo e minúsculas comparam usos do solo na mesma profundidade.

Fonte: Dados da autora (2016)

Por outro lado, o sistema de manejo não foi efetivo em proporcionar alterações na  $D_s$  do Nitossolo (Tabela 4). Como este solo também foi revolvido por ocasião do preparo, esses resultados podem ser uma consequência do processo de consolidação do solo e rearranjo interno da estrutura ao longo dos anos, devido aos ciclos de umedecimento e secagem conforme observado por Reichert et al. (2009). Os resultados deste estudo confirmam a necessidade de pesquisas que visem explorar a longevidade do condicionamento físico proporcionado por práticas de revolvimento em solos com horizonte B textural, uma vez que nestes solos parece ocorrer uma reconsolidação em curto espaço de tempo (REICHERT et al., 2009).

Salienta-se que a durabilidade das alterações físicas, proporcionadas no solo pelo revolvimento, é dependente das características intrínsecas a cada solo, como textura e mineralogia. Portanto, conforme observado em Argissolo por Marcolan e Anghinoni (2006) é possível que no Nitossolo, processos de gênese, como iluviação de argila, possam ser atuantes nos mecanismos de reconsolidação.

No que diz respeito ao Latossolo, os resultados deste estudo corroboram o que já foi discutido por Silva et al. (2012) após estudo com o mesmo sistema de manejo, e Muller et al. (2012), que confirmaram efeitos positivos de doses crescentes de gesso (0; 4; 8 e  $12 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) em parâmetros relacionados com a estrutura de um Latossolo Vermelho sob plantio direto após 50 meses da aplicação, sendo observado diminuição da  $D_s$  (Tabela 4) e aumentos de VTP e da macroporosidade nas camadas superficiais.

Entretanto, efeitos efêmeros do revolvimento nas propriedades físicas de um Latossolo muito argiloso foi observado por Fidalsky, Yagi e Tormena (2015). Neste trabalho os autores verificaram que o revolvimento do solo com aração e gradagem diminuiu a Ds da camada de 0,00-0,10 m por seis meses e da camada de 0,10-0,20 m apenas no 1º mês após intervenção mecânica.

De modo similar, ao avaliar a Ds de um solo após 5 anos de intervenções mecânicas com escarificador, arado de disco e arado de aivecas, Wortmann, Drijber e Franti (2010) não observaram diferenças entre a área escarificada com aquela mantida sobre plantio direto. Assim sendo, em reafirmação aos comentários anteriores, verifica-se que ainda permanecem dúvidas com relação à duração dos efeitos das práticas de revolvimento nas propriedades físicas de solos.

#### *Distribuição de poros por tamanho*

Nas camadas 0,0-0,20 m e 0,20-0,40 m do Cambissolo sob manejo foram encontrados um maior volume de Macroporos grandes ( $> 145 \mu\text{m}$ ) (Tabela 5). Estes resultados são indicativos de que o manejo foi muito benéfico para esse solo, visto que estes são poros efetivos para a rápida drenagem interna do solo (LIMA et al., 2012).

Tabela 5 - Distribuição de poros ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) em Cambissolo distrófico sob sistema de manejo e Cerrado nativo.

Uso do solo	-----Diâmetro de poros ( $\mu\text{m}$ )-----						
	>145	145-73	73.43-49	49-29	29-9,0	9,0-2,9	<0,2
	-----0,0-0,20 m-----						
SM	0,210 Aa	0,033 Aa	0,016 Ba	0,017 Ab	0,029 Ab	0,017 Ab	0,30 Bb
CN	0,069Ab	0,033 Aa	0,018 Aa	0,020 Aa	0,037 Aa	0,022 Aa	0,43 Aa
	-----0,20-0,40 m-----						
SM	0,192 Aa	0,039 Aa	0,018 Aa	0,019 Aa	0,033 Aa	0,018 Aa	0,34 Bb
CN	0,050 Ab	0,027 Bb	0,015 Bb	0,017 Aa	0,030 Aa	0,018 Aa	0,46 Aa
	-----0,40-0,60 m-----						
SM	0,056 Aa	0,025 Ba	0,014 Ba	0,016 Aa	0,030 Aa	0,019 Aa	0,40 Aa
CN	0,043 Aa	0,025 Ba	0,015 Ba	0,018 Aa	0,035 Aa	0,023 Aa	0,39 Aa

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott (5%). Letras maiúsculas comparam as profundidades do mesmo manejo e letras minúsculas comparam sistema de manejo na mesma profundidade. SM: Sistema de manejo; CN: cerrado nativo.

Fonte: Dados da autora (2016)

Em observação visual na condição de cerrado nativo, verificou-se que o Cambissolo em estudo apresentou estrutura adensada na camada de 0,20-0,40 m, o que foi confirmado nas análises laboratoriais tendo em vista o baixo volume de macroporos (poros  $> 50 \mu\text{m}$ ) (Tabela 5). Contudo, quando submetido às práticas de manejo adequadas, como revolvimento profundo seguido de correção química até 0,60 m, este solo respondeu de forma positiva com aumento dos macroporos grandes ( $>147 \mu\text{m}$ ); macroporos finos ( $147-73 \mu\text{m}$ ); mesoporos grandes ( $73-49$  e  $49-29 \mu\text{m}$ ). Serafim et al. (2013a), avaliando este solo após 6 meses da implantação do sistema de manejo observou redução da densidade do solo e aumento da porosidade total. Portanto, o sistema de manejo ao aumentar o volume desses poros também contribuiu para o melhor desenvolvimento radicular do cafeeiro nesse solo, pois Serafim et al. (2013b) ao avaliar o sistema radicular do cafeeiro no mesmo Cambissolo deste estudo, após 1,5 anos da implantação do manejo, observaram muitas raízes no horizonte Bi, localizado na profundidade entre 0,10 e 0,31 m. Na camada de 0,40-0,60 m não foram observadas diferenças na distribuição de poros entre os usos avaliados, o que pode ser explicado pelo fato do revolvimento não ter sido efetivo nesta profundidade a longo prazo.

Em estudos de porosidade realizados com tomografia computada de raios-X em Latossolo muito argiloso submetido ao mesmo manejo em área experimental, Carducci et al. (2014b) demonstraram que os macroporos finos e os mesoporos grandes favoreceram o desenvolvimento das raízes finas ( $\emptyset \leq 1\ 000 \mu\text{m}$ ).

No Latossolo muito argiloso deste estudo verificou-se na camada de 0,0-0,20 m que o manejo proporcionou uma redução no volume dos macroporos grandes (Tabela 5). Oliveira et al. (2003), avaliando diferentes sistemas de manejo em um Latossolo Vermelho Distrófico observaram um grande volume de poros  $>145 \mu\text{m}$  (aeração) somente no ambiente de Cerrado. Além disso, os autores observaram que o plantio direto foi o sistema que mais afetou o arranjo desta classe de poros, demonstrando que mesmo nos sistemas conservacionistas há uma alteração negativa nos solos, em termos ambientais, tendo em vista o papel destes poros na condutividade hidráulica saturada do solo.

Por outro lado, na camada de 0,20-0,40 m desse Latossolo verificou-se que na área de manejo houve um aumento expressivo do volume de poros das classes  $9,0-2,9$ ;  $2,9-0,6$ ;  $0,6-0,2 \mu\text{m}$  (mesoporos) quando comparado ao da Mata nativa (Tabela 6), apresentando uma relevância bastante significativa, visto que, a água destes poros estará disponível para as plantas (BARBOSA et al., 2014).

Conforme observado por Barbosa et al. (2014), mediante manejo adequado é possível incrementar os poros intermediários em Latossolos do Cerrado, sendo de suma importância

para a melhoria da disponibilidade hídrica para as plantas, uma vez que a região do cerrado é caracterizada por longos períodos de seca edafológica (SANTOS et al., 2014; SILVA et al., 2015).

Tabela 6 - Distribuição de poros ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) em Latossolo muito argiloso sob sistema de manejo e mata nativa.

SISTEMA	-----Diâmetro de poros ( $\mu\text{m}$ )-----								
	>145	145-73	73,43-49	49-29	29-9,0	9,0-2,9	2,9-0,6	0,6-0,2	< 0,2
	-----0,0-0,20 m-----								
Manejo	0,17 Ab	0,07 Aa	0,03 Aa	0,03 Aa	0,050 B a	0,023 Ba	0,014 Aa	0,009 Aa	0,26 Aa
Mata	0,25 Aa	0,07 Ba	0,03 Ba	0,03 Ba	0,049 B a	0,022 Aa	0,014 Aa	0,008 Aa	0,23 Ab
	-----0,20-0,40 m-----								
Manejo	0,15 Aa	0,07 A a	0,03 Aa	0,03 Aa	0,058 Aa	0,027 Aa	0,017 Aa	0,010 Aa	0,28 Aa
Mata	0,17 Ba	0,08 B a	0,04 Ba	0,03 Ba	0,051 Ba	0,020 Ab	0,011 Ab	0,005 Ab	0,24 Ab
	-----0,40-0,60 m-----								
Manejo	0,15 Aa	0,08 Aa	0,04 Ab	0,04 Ab	0,057 Aa	0,024 Ba	0,013 Aa	0,006 Aa	0,26 Aa
Mata	0,12 Ca	0,10 Aa	0,05 Aa	0,05 Aa	0,063 Aa	0,022 Aa	0,010 Aa	0,003 Aa	0,22 Ab

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott (5%). Letras maiúsculas comparam as profundidades do mesmo manejo e letras minúsculas comparam sistema de manejo na mesma profundidade.

Fonte: Dados da autora (2016).

Com relação ao Nitossolo, nas camadas de 0,0-0,20 m e 0,40-0,60 m, foi verificado que o manejo proporcionou baixo volume de macroporos grandes ( $> 145 \mu\text{m}$ ) (Tabela 7), o que pode afetar a drenagem interna do solo (OLIVEIRA et al., 2003).

Tabela 7 - Distribuição de poros ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) no Nitossolo sob sistema de manejo e sob condição de Cerrado Nativo.

SISTEMA	-----Diâmetro de poros ( $\mu\text{m}$ )-----								
	>145	145-73	73,43-49	49-29	29-9,0	9,0-2,9	2,9-0,6	0,6-0,2	< 0,2
	-----0,0-0,20 m-----								
Manejo	0,08 Ab	0,03 Aa	0,01 Aa	0,01 Ab	0,02 Ab	0,01 Ab	0,009 Ab	0,007 Ab	0,37 Aa
Mata	0,16 Aa	0,02 Aa	0,02 Aa	0,02 Aa	0,04 Aa	0,02 Aa	0,01 Aa	0,01 Aa	0,36 Aa
	-----0,20-0,40 m-----								
Manejo	0,13 Aa	0,03 Aa	0,01 Aa	0,01 Aa	0,030 Aa	0,015 Aa	0,011 Aa	0,009 Aa	0,35 Aa
Mata	0,14 Aa	0,04 Aa	0,02 Aa	0,02 Aa	0,036 Ba	0,019 Aa	0,015 Aa	0,01 Aa	0,38 Aa
	-----0,40-0,60 m-----								
Manejo	0,09 Aa	0,03 Aa	0,01 Aa	0,01 Aa	0,02 Aa	0,014 Aa	0,01 Aa	0,008 Aa	0,386 Aa
Mata	0,10 Aa	0,07Aa	0,03 Aa	0,02 Aa	0,02 Ca	0,011 Ba	0,009 Ba	0,0004 Aa	0,380 Aa

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott (5%). Letras maiúsculas comparam as profundidades do mesmo manejo e letras minúsculas comparam sistema de manejo na mesma profundidade.

Fonte: Dados da autora (2016).

### Índice S

O manejo proporcionou ao Cambissolo um aumento nos valores de índice S (Tabela 8), quando comparado à área de mata, para as camadas de 0,0-0,20 e 0,20-0,40 m, o que merece destaque, pois segundo Dexter (2004), maiores valores de índice S, ou seja, a maior inclinação da curva de retenção de água nos baixos potenciais é indicativo de melhorias na distribuição do tamanho de poros atrelada às condições estruturais, favorecendo assim um adequado funcionamento físico do solo. Salienta-se que os menores valores de Índice S no solo sob mata e mesmo na camada entre 0,40-0,60 m na área manejada, é indicativo de adensamento, comum nestes Cambissolos (OLIVEIRA; FERREIRA; CURI, 1994; PEREIRA et al., 2010).

Tabela 8 - Índice S em Cambissolo sob sistema de manejo e Cerrado.

Uso do solo	0,0-0,20 m	0,20-0,40 m	0,40-0,60 m
Manejo	0,069 Aa	0,065 Aa	0,027 Ba
Cerrado	0,039 Ab	0,029 Bb	0,029 Ba

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott (5%). Letras maiúsculas comparam as profundidades do mesmo manejo e letras minúsculas comparam sistema de manejo na mesma profundidade.

Fonte: Dados da autora (2016)

Na área manejada sob cafeicultura foram observados valores de  $S > 0,060$  para as profundidades de 0,0-0,20 e 0,20-0,40 m, quando comparado com a mata nativa, sendo que este fato apresenta relação direta com o manejo incorporado ao solo, no qual está associado ao revolvimento do solo, seguido de uma estruturação condicionada pelas práticas edáficas e vegetativas (CARDUCCI et al., 2015b; SERAFIM et al., 2011).

De acordo com Dexter (2004) valores de índice  $S > 0,035$  são indicativos de condições física do solo favoráveis para o crescimento das raízes das plantas, ou seja, o solo apresenta boa qualidade estrutural. Andrade e Stone (2009) ao correlacionarem o índice S à densidade e porosidade de diferentes solos do cerrado com diferentes texturas constataram que este índice se adequa no que diz respeito ao diagnóstico da qualidade física dos solos, e propuseram que valores de  $S > 0,045$  estão relacionados com a boa qualidade estrutural dos solos de cerrado.

Na camada de 0,40-0,60 m do solo observou-se que os valores de “S” na área manejada e na área sob mata se igualaram (Tabela 8). Este resultado pode ser indicativo de que o preparo não alcançou a profundidades de 0,60 m, mas também pode ser que o

revolvimento nesta camada teve um efeito provisório, ocorrendo uma reorganização das partículas com o passar do tempo, sendo que essa hipótese carece de melhor investigação.

Os menores valores de índice S foram observados no Latossolo e no Nitossolo sobre manejo, quando os solos foram comparados aos seus respectivos ambientes de vegetação nativa (Tabela 9). Mas, em nenhuma condição avaliada foram observados valores de “S” inferiores a 0,045, portanto, de acordo este índice, estes solos apresentam boa qualidade estrutural.

Tabela 9 - Índice S em Latossolo e Nitossolo sob sistema de manejo e vegetação nativa.

	LVd	NXd
Mata	0,175 a	0,111 a
Manejo	0,120 b	0,047 b
Profundidade (m)	LVd	NXd
0,0 - 0,20	0,149 a	0,063 a
0,20 - 0,40	0,137 a	0,062 a
0,40 - 0,60	0,157 a	0,112 a

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott 5%.

Fonte: Dados da autora (2016)

Há ainda muito o que discutir sobre o índice S, pois os valores propostos por Dexter (2004) são provisórios no que diz respeito à classificação da qualidade física dos solos e ainda há carencia de pesquisas mais aprofundadas que comprovem a eficiência desse índice como real indicador da qualidade física dos solos (VAN LIER, 2014). Entretanto, a sensibilidade deste índice na comparação da eficiência do sistema de manejo em afetar a qualidade estrutural do Cambissolo, Latossolo e Nitossolo em estudo, é inegável.

#### 4 CONCLUSÕES

O revolvimento profundo do solo e a fertilização do sulco de plantio em associação a incorporação de gesso agrícola e resíduos de braquiária promoveu melhoria na agregação dos solos e conseqüentemente uma nova organização do espaço poroso. Contudo, estas práticas de manejo não trouxeram os mesmos benefícios para a qualidade estrutural de todas as classes de solos avaliadas.

No Latossolo, o sistema de manejo comparado à área de vegetação natural, favoreceu a formação de agregados mais estáveis. Porém, no Cambissolo e no Nitossolo o sistema de manejo promoveu a formação de agregados mais susceptíveis a desagregação.

Para 0,20-0,40 m, no Cambissolo o sistema de manejo promoveu o aumento dos macroporos grandes ( $>147 \mu\text{m}$ ); macroporos finos (147-73  $\mu\text{m}$ ); mesoporos grandes (73-49 e 49-29  $\mu\text{m}$ ), e, por conseqüência, a aeração e drenagem interna do solo.

No Latossolo, camada de 0,20-0,40 m, verificou-se que o manejo proporcionou um incremento expressivo do volume de poros das classes 9,0-2,9; 2,9-0,6; 0,6- 0,2  $\mu\text{m}$  (mesoporos), o que é relevante, visto que boa porção da água do solo estará disponível para as plantas.

No Nitossolo, nas camadas de 0,0 - 0,20 m e 0,40-0,60 m, foi verificado que o manejo proporcionou diminuição no volume de macroporos grandes ( $> 145 \mu\text{m}$ ), o que pode afetar a drenagem interna do perfil.

O índice "S" apresentou sensibilidade para comparar a influência do manejo na estrutura dos diferentes solos.

## REFERÊNCIAS

- ANDRADE, R. S.; STONE, L. F. Índice S como indicador da qualidade física de solos do cerrado brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 4, p. 382-388, jul./ago. 2009.
- BAMBERG, A. L. et al. Temporal changes of soil physical and hydraulic properties in strawberry fields. **Soil Use and Management**, Oxford, v. 27, n. 3, p. 385–394, Sept. 2011.
- BARBOSA, S. M. et al. Potencialidade de uso de Zeólitas na atenuação do déficit hídrico em Latossolo do cerrado. **Semina: ciências agrárias**, Londrina, v. 35, n. 4, p. 2357-2368, 2014. Suplemento.
- BOUMA, J. Influence of soil macroporosity on environmental quality. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 46, p. 1-37, 1991.
- BULLOCK, P. et al. **Handbook for soil thin section description**. Wolverhampton: Waine Research Publications, 1985. 152 p.
- CARDUCCI, C. E. et al. Bimodal pore distribution on soils under conservation management system for coffee crop. **Engenharia Agrícola**, Piracicaba, v. 33, n. 2, p. 291-302, mar./abr. 2013.
- CARDUCCI, C. E. et al. Distribuição espacial das raízes de cafeeiro e dos poros de dois Latossolos sob manejo conservacionista. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 3, p. 270-278, mar. 2014a.
- CARDUCCI, C. E. et al. Gypsum effects on the spatial distribution of coffee roots and the pores system in oxidic Brazilian Latosol. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 145, p. 171-180, Jan. 2015a.
- CARDUCCI, C. E. et al. Modelagem da curva de retenção de água de Latossolos utilizando a equação duplo van Genuchten. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 1, p. 77-86, jan./fev. 2011.
- CARDUCCI, C. E. et al. Retenção de água do solo sob sistema conservacionista de manejo com diferentes doses de gesso. **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, v. 58, n. 3, p. 284-291, jul./set. 2015b.
- CARDUCCI, C. E. et al. Spatial variability of pores in oxidic latosol under a conservation management system with different gypsum doses. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 38, n. 5, p. 45-460, set./out. 2014b.
- CUNHA, E. Q. et al. Sistemas de preparo do solo e culturas de cobertura na produção orgânica de feijão e milho. I - Atributos físicos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 2, p. 589-602, mar./abr. 2011.
- DEXTER, A. R. Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, n. 3-4, p. 201-214, June 2004.

DONAGEMMA, G. K. et al. Indicadores de qualidade do solo: descrição, uso e integração para fins de estudo em agroecossistemas. In: FERREIRA, J. M. L. et al. (Ed.). **Indicadores de sustentabilidade em sistemas de produção agrícola**. Belo Horizonte: Epamig, 2011. p. 143-202.

DOURADO NETO, D. et al. **Soil water retention curve**. Piracicaba: SWRC, 2001.

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.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2013. 353 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de métodos de análises de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1997. 212 p.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, nov./dez. 2011.

FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURTI, N. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 3, p. 515–524, jul./set. 1999.

FIDALSKI, J.; YAGI, R.; TORMENA, C. A. Revolvimento ocasional e calagem em latossolomuito argiloso em sistema plantio direto consolidado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 5, p. 1483-1489, set./out. 2015.

INDA JUNIOR, A. V. et al. Variáveis relacionadas à estabilidade de complexos organo-minerais em solos tropicais e subtropicais brasileiros. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 5, p. 1301-1307, set./out. 2007.

JORDAN, A.; ZAVALA, L. M.; GIL, J. Effects of mulching on soil physical properties and runoff under semi-arid conditions in southern Spain. **Catena**, Amsterdam, v. 81, n. 1, p. 77-85, Apr. 2010.

LIMA, V. M. P. et al. Intervalo hídrico ótimo como indicador de melhoria da qualidade estrutural de Latossolo degradado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 1, p. 71-78, jan./fev. 2012.

MARCOLAN, A. L. et al. Recuperação de atributos físicos de um Argissolo em função do seu revolvimento e do tempo de semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 3, p. 571-579, maio/jun. 2007.

MARCOLAN, A. L.; ANGHINONI, I. Atributos físicos de um Argissolo e rendimento de culturas de acordo com o revolvimento do solo em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 1, p. 163-170, fev. 2006.

MENEGASSE, L. N.; GONÇALVES, J. M.; FANTINEL, L. M. Disponibilidades hídricas na Província cárstica de Arcos-Pains-Doresópolis, Alto São Francisco, Minas Gerais, Brasil. **Revista Águas Subterrâneas**, São Paulo, v. 16, n. 16, p. 9-21, maio 2002.

MÜLLER, M. M. L. et al. Structural quality of a no-tillage red latosol 50 months after gypsum application. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 3, p. 1005-1013, maio/jun. 2012.

OLIVEIRA, G. C. et al. Alterações estruturais e comportamento compressivo de um Latossolo Vermelho distrófico argiloso sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 2, p. 291-299, fev. 2003.

OLIVEIRA, G. C.; FERREIRA, M. M.; CURI, N. Caracterização físico-hídrica de Cambissolos da microrregião Campos da Mantiqueira (MG). **Ciência Prática**, Lavras, v. 18, n. 4, p. 341-348, out./dez. 1994.

PEREIRA, T. T. C. et al. Gênese de Latossolos e Cambissolos desenvolvidos de rochas pelíticas do grupo bambuí – Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 4, p. 1283–1295, jul./ago. 2010.

REICHERT, J. M. et al. Temporal variation of soil physical proprieties and root growth in beans under four management systems. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, n. 3, p. 310-319, mar. 2009.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência & Ambiente**, Santa Maria, v. 27, p. 29-48, jul./dez. 2003.

RESENDE, M. et al. **Pedologia: base para distinção de ambientes**. 6. ed. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2014. 378 p.

REYNOLDS, W. D. et al. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. **Geoderma**, Amsterdam, v. 152, n. 3-4, p. 252-263, Sept. 2009.

SÁ, M. A. C. et al. Índice de desagregação do solo baseado em energia ultra-sônica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 3, p. 525-531, jul./set. 1999.

SÁ, M. A. C. et al. Comparação entre métodos para o estudo da estabilidade de agregados em solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 9, p. 1825-1834, set. 2000.

SANTOS, G. G. et al. Qualidade física do solo sob sistemas de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 10, p. 1339-1348, out. 2011.

SANTOS, H. G. dos et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília: Embrapa, 2013. 353 p.

SANTOS, W. J. R. et al. Soil moisture in the root zone and its relation to plant vigor assessed by remote sensing at management scale. **Geoderma**, Amsterdam, v. 221-222, p. 91-95, June 2014.

- SERAFIM, M. E. et al. Potencialidades e limitações de uso de Latossolos e Cambissolos, sob sistema conservacionista em lavouras cafeeiras. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 29, n. 6, p. 1640-1652, nov./dez. 2013a.
- SERAFIM, M. E. et al. Qualidade física e intervalo hídrico ótimo em Latossolo e Cambissolo, cultivados com cafeeiro, sob manejo conservacionista do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 3, p. 733-742, maio/june 2013b.
- SERAFIM, M. et al. Sistema conservacionista e de manejo intensivo do solo no cultivo de cafeeiros na região do Alto São Francisco, MG: estudo de caso. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 27, n. 6, p. 964-977, nov./dez. 2011.
- SILVA, A. M. et al. Perdas de solo, água, nutrientes e carbono orgânico em Cambissolo e Latossolo sob chuva natural. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v. 40, n. 12, p. 1223-1230, dez. 2005.
- SILVA, B. M. et al. Critical soil moisture range for a coffee crop in an oxidic Latosol as affected by soil management. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 154, p. 103–113, Dec. 2015.
- SILVA, B. M. et al. Índice S no diagnóstico da qualidade estrutural de Latossolo muito argiloso sob manejo intensivo. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 28, n. 3, p. 338-345, maio/jun. 2012.
- SILVA, É. A. et al. Aggregate stability by the high energy moisture characteristic method in an oxisol under differentiated management. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 5, p. 1633-1642, 2014.
- SILVA, É. A. et al. Aggregates morphometry of a Inceptisol under conservationist system. **Semina: ciências agrárias**, Londrina, v. 37, n. 3, p. 1165-1176, maio/jun. 2016a.
- SILVA, E. A. et al. Doses crescentes de gesso agrícola, estabilidade de agregados e carbono orgânico em Latossolo do Cerrado sob Cafeicultura. **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, v. 56, n. 1, p. 25-32, jan./mar. 2013.
- SILVA, É. A. et al. Stability of soil aggregates in latosols and cambisols via standard method and sonification. **African Journal of Agricultural Research**, Essex, v. 11, n. 39, p. 3894-3903, Sept. 2016b.
- SILVA, J. H. S. et al. Improving clay content measurement in oxidic and volcanic ash soils of Hawaii by increasing dispersant concentration and ultrasonic energy levels. **Geoderma**, Amsterdam, v. 237–238, p. 211-223, 2015.
- SPERA, S. T. et al. Integração lavoura e pecuária e os atributos físicos de solo manejado sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 1, p. 129-136, jan./fev. 2009.
- VAN GENUCHTEN, M. T. A. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society America Journal**, Oxford, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980.

VAN LIER, Q. de J. Revisiting the S-index for soil physical quality and its use in Brazil.

**Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 1, p. 1-10, jan./fev. 2014.

WORTMANN, C. S.; DRIJBER, R. A.; FRANTI, T. G. One-time tillage of no-till crop land five years post-tillage. **Agronomy Journal**, Madison, v. 102, n. 4, p. 1302-1307, Feb. 2010.

**ARTIGO 4 - *ROOT SPATIAL DISTRIBUTION IN COFFEE PLANTS OF DIFFERENT AGES UNDER CONSERVATION MANAGEMENT SYSTEM***

**(Formatado de acordo com a versão publicada no periódico *African Journal of Agricultural Research*, v. 11(49), p. 4970-4978, 2016)**

**Érika Andressa da Silva<sup>1</sup>, Sérgio Henrique Godinho Silva<sup>2</sup>, Geraldo César de Oliveira<sup>3</sup>  
and Carla Eloize Carducci<sup>4\*</sup>**

---

\* Corresponding author. E-mail: ec.carducci@ufsc.br. Tel: +55 48 3721 6274.

<sup>1</sup> Department of Soil Science, Federal University of Lavras, DCS-UFLA, Lavras, MG, Brazil.

<sup>2</sup> Federal University of Vales Jequitinhonha and Mucuri, Brazil.

<sup>3</sup> Federal University of Lavras, DCS-UFLA, Lavras, MG, Brazil.

<sup>4</sup> Federal University of Santa Catarina, Curitibanos campi (UFSC), 89520-000 Curitibanos, SC, Brazil.

**ABSTRACT:** Root system growth and soil structure are interdependent, and the threshold of separation between both of them is complex. However, by the evaluation of soil pore space, it is possible to characterize the root system growth environment. The aim of this study was to evaluate the effect of conservation management system over time on pore distribution and on root system development of coffee plantation in Cerrado Oxisol, located in the state of Minas Gerais, Brazil. Two coffee plantation areas were sampled (3 or 6 yrs old). Trenches were dug lengthwise along the planting row to expose the root system, and the vertical profiles were divided into 0.05 x 0.05 m grid cells (0.70 x 1.50 m grid), totaling 420 sample sites. Digital images were taken, and using the computer software Safira, it was measured the length, the surface area and the volume of the root system at different layers along the soil profile, which was spaced 0.10 m apart. Disturbed and undisturbed soil cores were sampled at 0.20 to 0.34, 0.80 to 0.94 and 1.50 to 1.64 m depths layers, in order to determine particle size, total porosity and pore size distribution. The 3-yr coffee stand had the greatest volume of macropores and the largest number of absorbent roots, besides a noticeable root system growth below 1 m depth. The 6-yr old coffee stand presented pores reconfiguration due to increase in the intermediate-sized pores and to the uniform root distribution in both horizontal and vertical directions up to 0.9 m depth.

**Keywords:** gibbsitic Oxisol, pore system, 2D images, geostatistics, root system distribution.

## 1.Introduction

Soil pore space results from mineral particles organization into water-stable aggregates. During soil structural organization, there are alterations in pore distribution and configuration, which interfere with root system distribution and plant growth (Carducci et al., 2013; Carducci et al., 2014a,b; Silva et al., 2014; Carducci et al., 2016).

Among several reasons, soil structural organization may be related to the use of soil conditioners, such as agricultural gypsum associated with soil organic matter, which influences the formation of organo-mineral complexes, especially calcium and organic radicals derived from the decomposition of plant residues (Silva et al., 2013; Silva et al., 2014).

Based on this premise, some coffee growers in Minas Gerais have adopted a soil management system which consists of periodically mowed grass cultivation (*Brachiaria decumbens*) between planting rows as a permanent source of organic matter, associated with the building of fertility in deep soil layers, which is possible due to the adoption of a deep, fertilized planting furrow and to the gypsum application on soil surface. This management improves physical and chemical soil conditions, as well as increases root system depth (van Raij, 2008; Serafim et al., 2013a,b,c; Silva, 2012; Carducci et al., 2014b; Silva et al., 2014).

Cerrado Biome, one of the main coffee-producing regions of Brazil, has faced prolonged and more frequent dry spells. The region has the highest proportion of oxidic Latosols (Oxisols). Although these soils present good physical quality, they have bimodal pore size distribution, i.e, this soil has high values of macro and microporosity, but have low proportion of intermediate diameter pores, which hold the readily available soil water to plant roots (Oliveira et al., 2004; Carducci et al., 2013).

Thus, the adoption of water conservation practices might mitigate soil water deficit in Cerrado, which is partly possible due to the increase in intermediate pores in Latosols (Barbosa et al., 2014), and to plant root system development, especially in plants younger than 3-yrs (Carducci et al., 2016), which improves the use of deep water stored in the soil. This practice is possible and was confirmed by other authors (Silva et al., 2014; Santos et al., 2014; Serafim et al., 2013a,b,c).

The increment of intermediate sized pores, and the increase in effective root zone depth in oxidic Latosols contributed to increase coffee production. However, the adoption of new management practices able of altering the pore distribution and promote root growth must be preceded by scientific studies. Thus, the aim of this study was to evaluate the effect

of conservation management system over time on pore distribution and on root system development of coffee plantation in Cerrado Oxisol located in the state of Minas Gerais, Brazil.

## 2. Material and Methods

### 2.1. Study area description

The study was carried out in two coffee plantations near São Roque de Minas, in the upper São Francisco river basin, Minas Gerais, Brazil. The soil studied is a very clayey Rhodic Haplustox (*Latosolo Vermelho* in the Brazilian System of Soil Classification – Embrapa, 2013; Santos et al., 2013), with ca. 86% clay, from which 55% is gibbsite, and 25% is kaolinite, according to thermal analyses (Carducci et al., 2014a,b) (Table 1). Two plantations were sampled: a young stand (3 yrs-old, planted in Nov. 2008) stand, at 20°15'45" S and 46°8'17" W, at 850 m asl, and an old stand (6 yrs-old, planted Nov. 2005), at 20°11'35" S and 46°22'07" E, at 841 m asl. Both plantations were planted and conducted according to the soil conservation management system described below.

Table 1. Particle size distribution of a very clayey Rhodic Haplustox at different depth under soil conservation management system.

Depth (m)	3-yrs <sup>(1)</sup>			6-yrs <sup>(2)</sup>		
	Clay	Silt	Sand	Clay	Silt	Sand
	.....g kg <sup>-1</sup> .....					
0.20-0.34	869	65	66	819	24	157
0.80-0.94	895	59	46	848	25	127
1.50-1.64	904	57	39	886	25	89

<sup>(1)</sup> 3 yrs-old; <sup>(2)</sup> 6 yrs-old.

The fields were managed by using soil conservation practices for coffee cultivation. Planting was carried out in a narrow row, with spacing of 2.5 m between plants, and 0.65 m between rows; one plowing and two harrowing were carried out to prepare the land, followed by application of dolomitic limestone (4 Mg ha<sup>-1</sup>) and agricultural gypsum (1.92 Mg ha<sup>-1</sup>) in the total area. Furrows of 0.60 m depth and 0.50 m width were made with a subsoiler coupled to a rotary tiller, which enabled homogeneous distribution of liming and fertilizers to 0.40 m depth.

It was applied 8 mg ha<sup>-1</sup> (2 kg m<sup>-1</sup>) of dolomitic limestone and basic fertilizer in the furrow. Afterwards, *Brachiaria decumbens* was planted between rows as cover crop, and mowed periodically (Serafim et al., 2013; Silva et al., 2013). After the grass had been established, coffee seedlings were planted. Three months later, 7 kg m<sup>-1</sup> of agricultural gypsum was applied on soil surface of the coffee rows, followed by hilling around the base of the plants (Serafim et al., 2011; Serafim et al., 2013a,b,c) .

In order to designate the treatment types, terms were chosen according to the age of the coffee plants in each field. According to Nutman (1933ab, 1934), who published the most comprehensive study about the root system of Arabic coffee, the main morphological and physiological characteristics of the root system complete their development between 5 and 6 years after planting. After this period, the coffee plant is considered adult, and its roots renew constantly; however, it maintains the typical conformation to the end of life cycle.

## 2.2. Soil sampling and physical characterization

Three random trenches were dug lengthwise along the plant row, and three replications of disturbed and undisturbed soil cores were sampled from 0.20 to 0.34, 0.80 to 0.94 and 1.50 to 1.64 m depth layers. The choice of depths was based on the cultural profile method (Tavares Filho et al., 1999), which detects morphological alterations caused by the management system. The disturbed samples were used to determine soil particle size by the pipette method (Embrapa, 2011).

Undisturbed soil cores were collected in volumetric rings (80 cm<sup>3</sup>) in the middle of the spacing between plants (0.65m), using a Uhland-type sampler in order to obtain the water retention curve. Samples were subjected to the following matric potentials of water in the soil: -2, -4, -6, -10 kPa, using Buchner funnels, and -33, -100, -500, -1500 kPa in the porous plate, with the saturated soil samples placed in pressure chambers. After samples stabilization in each of thematric potential ( $\Psi_m$ ), they were weighed and kept in incubators at 105 -110°C for 48 h, to determine the soil bulk density (BD) and the corresponding water content ( $\theta$ ). Macroporosity was calculated by the difference between total porosity ( $TP = (1 - D_s / D_p)$ ) and microporosity (water retained at  $\Psi_m$  -6 kPa) (Embrapa, 2011).

In order to better discriminate the soil pore diameter, it was used information from the water retention curve, by using the Bouma equation (1991), which considers cylindrical-shaped pores:

$$D = 4 \sigma \text{Cos } \theta / \Psi_m$$

In which:  $D$  is the pore diameter ( $\mu\text{m}$ );  $\sigma$  is the water surface tension (73.43 kPa at  $20^\circ\text{C}$ );  $\theta$  is the contact angle between the meniscus and the capillary tube wall (considered 0), and  $\Psi_m$  the matric potential (kPa). The Mesopores (intermediate-sized pores) were classified according to Barbosa et al. (2014).

After reaching equilibrium at the matric potential of -6 kPa (considered as the field capacity for Latosols - Oxisols) (Ferreira et al., 1983; Silva et al., 2014), some samples were weighted and used to determine the soil resistance to penetration (RP), by using a bench top electronic penetrometer (Tormena et al., 1998; Lima et al., 2012).

### *2.3. Assessment of the root system of the Coffee plants*

For the study of the root system distribution in the 3 and 6-yr old stand, three 0.70 x 1.50 x 1.50 m trenches were dug lengthwise the planting row. The vertical trench wall stood in the projection of the coffee canopy at 0.10 m distance from the plant stem. Considering the spacing between plants of 0.65 m, the trench was arranged in order to have a coffee plant in its center. Subsequently, the soil was scarified at 0.03 m to expose the roots, and a grid (0.05 x 0.05 m cells) with the same dimensions as the trench, which consisted of 420 sample units, as detailed by Carducci et al. (2014 a, 2015a). The following variables were analyzed: volume ( $\text{mm}^3$ ), surface area ( $\text{mm}^2$ ), length (mm), and root diameter (mm), by using the computer software Safira (Jorge and Silva, 2010), as described in Carducci et al. (2015a).

### *2.4. Statistical analyses*

The experiments consisted of complete randomized split-plot design, in both stand age, in which the plot referred to the age of the plantation, and the subplot referred to the depth. . After the data normality generated by the Shapiro-Wilk method was checked, analysis of variance was carried out, and the means were compared by the Scott-Knott test at 5% of probability, using the computer statistical analysis system Sisvar (Ferreira, 2011).

Data on volume, surface area and root length were subjected to the frequency distribution test, and the classes were defined by the Stunges formula:

$$K = 1 + 3.22 * \log n$$

In which:  $K$  is the number of classes and  $n$  is the total number of individuals in the population (420 sample units [grid with 0.70 m wide x 1.50 m long, subdivided into 0.05 x 0.05 m cells]).

Roots were classified in three different diameters: 1 - fine or absorbent roots ( $\emptyset \leq 1$  mm), 2 - intermediate or support for the absorbent roots ( $1 < \emptyset \leq 3$  mm), 3 - thick or permanent roots ( $\emptyset > 3$  mm), according to Rena and Guimarães (2000) and Motta et al. (2006).

The surface maps of the root spatial distribution in all soil profiles for both stand ages was carried out by interpolation through the inverse square of the distance method (ISD), using the ArcGIS 9.3 software (ESRI, 2009).

### 3. Results and Discussion

#### 3.1. Characterization of the soil physical properties

In both stand ages, it was verified that soils were very clayey in all the the profile. Clayey Oxisols generally have low bulk density (BD) and resistance to penetration, as observed in the present study (Table 2).

Table 2. Rhodic Haplustox physics attributes under 3- and 6-yrs old coffee stand in different depth.

Depth (m)	3-yrs	
	PR <sup>ns(1)</sup> MPa	Bd <sup>*(2)</sup> Mg dm <sup>-3</sup>
0.20-0.34	0.26a ( $\pm 0.02$ )	0.78b ( $\pm 0.05$ )
0.80-0.94	0.20a ( $\pm 0.003$ )	0.91a ( $\pm 0.005$ )
1.50-1.64	0.37a ( $\pm 0.07$ )	0.96a ( $\pm 0.03$ )
Depth (m)	6-yrs	
	PR <sup>ns</sup> MPa	Bd <sup>ns</sup> Mg dm <sup>-3</sup>
0.20-0.34	0.19a ( $\pm 0.03$ )	0.95a ( $\pm 0.05$ )
0.80-0.94	0.14a ( $\pm 0.04$ )	1.04a ( $\pm 0.01$ )
1.50-1.64	0.13a ( $\pm 0.04$ )	1.03a ( $\pm 0.03$ )

<sup>(1)</sup>PR: penetration resistance on -6kPa potencial matric <sup>(2)</sup>Bd: bulk density. ns: no significant, \*significant ( $p < 0.05$ ). Means followed by the same letter in the columns do not differ by the Scott Knott test at 5%. Between parenthesis: mean standard error (n=3).

The soil layer at 1.50 - 1.64 m depth (Bw horizon) is a reference that reflects the intrinsic structural condition of very clayey Oxisols (Ferreira et al., 1999; Severiano et al., 2011a,b). The bulk density (BD) and resistance to penetration (RP) values at other depths confirm the good physical condition of the soil, partly due to the initial effects of the tillage adopted, and to the maintenance of soil organic matter in this management system (Serafim et al., 2013a,b,c; Silva et al., 2012; Silva et al., 2013).

Thus, in order to detect the influence of conservation management practices over time and sampling depth on the pore diameter distribution, factor analysis was carried out with a view towards possible interactions between both factors. The interaction was not observed for all pore diameter classes. However, it was detected differences between the

conservation management practices over time for some pore diameter classes, as presented in Tables 3 and 4.

The Oxisol under 3-yrs coffee stand showed higher pore volume in the diameter classes  $> 147 \mu\text{m}$ , and  $2.9$  to  $0.6 \mu\text{m}$  (referring to the  $\Psi_m$  between  $-100$  to  $-500$  kPa), while in the condition of 6 yrs coffee stand, it was observed higher pores volume in the classes of  $147$ - $9 \mu\text{m}$  (referring to  $\Psi_m$  between  $-2$  to  $-33$  kPa), and these classes present inter-aggregated pores (macropores and intermediate pores), which suggests a more homogeneous arrangement of the pores with better distribution between intermediate pores (Carducci et al., 2015b), as the management system is consolidated (Table 3)

Table 3. Means values of pores diameter distribution in Rhodic Haplustox under 3- and 6- yrs old coffee stand.

Stande	Pores diameter distribution ( $\mu\text{m}$ )						TP <sup>ns</sup>
	$>147^{**}$	$147$ - $73^*$	$49$ - $29^{**}$	$29$ - $9^*$	$2.9$ - $0.6^{**}$	$< 0.2^{\text{ns}}$	
Age	..... $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ .....						
3-yrs	$0.130\text{a}^{(\pm 0.01)}$	$0.063\text{b}^{(\pm 0.009)}$	$0.031\text{b}^{(\pm 0.004)}$	$0.038\text{b}^{(\pm 0.003)}$	$0.020\text{a}^{(\pm 0.001)}$	$0.259\text{a}^{(\pm 0.02)}$	$0.62\text{a}^{(\pm 0.01)}$
6-yrs	$0.087\text{b}^{(\pm 0.006)}$	$0.092\text{a}^{(\pm 0.006)}$	$0.048\text{a}^{(\pm 0.01)}$	$0.050\text{a}^{(\pm 0.002)}$	$0.008\text{b}^{(\pm 0.001)}$	$0.260\text{a}^{(\pm 0.007)}$	$0.61\text{a}^{(\pm 0.01)}$

Means followed by the same letter in the column do not differ by the Scott-Knott test at 5% probability. ns: no significant; \* significant ( $p < 0.05$ ); \*\* significant ( $p < 0.01$ ). TP: total porosity. ). Between parenthesis: mean standard error ( $n = 3$ ).

For the diameter classes  $< 0.2 \mu\text{m}$  ( $\Psi_m$   $-1500$  kPa), it was observed high volume of micropores (intra-aggregate pores) in both plantations, which means that strong water retention in these gibbsitic Oxisol makes the water unavailable to plants, as previously reported by Carducci et al. (2011).

In both stand ages, the soil at  $0.20$ - $0.34$  m and  $0.80$ - $0.94$  m depth, in comparison with the soil at  $1.50$ - $1.64$  m depth, showed higher intermediate and inter-aggregate pore volume, especially of the class  $> 147 \mu\text{m}$ . However, it presented lower pore volume in relation to potential under  $-1500$  kPa (pores  $< 0.2 \mu\text{m}$ ), which means that there was higher volume of pores with larger diameter at shallow depths (Table 4).

Table 4. Means values of pores diameter distribution at different depth under soil conservation management system.

Depth (m)	Pore diameter distribution ( $\mu\text{m}$ )						
	>147***	147-73**	49-29**	29 -9*	2.9-0.6*	< 0.2 <sup>ns</sup>	TP*
	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$						
0.20-0.34	0.128a <sup>(<math>\pm 0.01</math>)</sup>	0.087a <sup>(<math>\pm 0.006</math>)</sup>	0.041a <sup>(<math>\pm 0.004</math>)</sup>	0.051a <sup>(<math>\pm 0.004</math>)</sup>	0.015a <sup>(<math>\pm 0.003</math>)</sup>	0.231a <sup>(<math>\pm 0.02</math>)</sup>	0.63a <sup>(<math>\pm 0.01</math>)</sup>
0.80-0.94	0.118a <sup>(<math>\pm 0.01</math>)</sup>	0.093a <sup>(<math>\pm 0.006</math>)</sup>	0.046a <sup>(<math>\pm 0.003</math>)</sup>	0.044a <sup>(<math>\pm 0.001</math>)</sup>	0.016a <sup>(<math>\pm 0.002</math>)</sup>	0.241a <sup>(<math>\pm 0.006</math>)</sup>	0.63a <sup>(<math>\pm 0.01</math>)</sup>
1.50-1.64	0.080b <sup>(<math>\pm 0.008</math>)</sup>	0.052b <sup>(<math>\pm 0.01</math>)</sup>	0.031b <sup>(<math>\pm 0.005</math>)</sup>	0.037b <sup>(<math>\pm 0.004</math>)</sup>	0.010b <sup>(<math>\pm 0.002</math>)</sup>	0.306a <sup>(<math>\pm 0.01</math>)</sup>	0.58b <sup>(<math>\pm 0.01</math>)</sup>

Means followed by the same letter in the column do not differ by the Scott-Knott test at 5% probability. ns no significant; \* significant ( $p < 0.05$ ); \*\* significant ( $p < 0.01$ ). TP: total porosity. ). Between parenthesis: mean standard error ( $n = 3$ ).

Soil tillage in the row, carried out due to the coffee planting, significantly altered the soil pore distribution, confirming what was observed by Carducci et al. (2013) regarding the pores bimodality of the these Oxisols.

Since intermediate diameter pores are important for roots penetration, aeration and retention of readily available water (Carducci et al., 2015b), a study was carried out with soil pore classes between 73-49  $\mu\text{m}$  (referring to  $\Psi_m$  from -4 to -6 kPa) and from 9 to 2.9  $\mu\text{m}$  (referring to  $\Psi_m$  from -33 to -100 kPa) (Table 5) due to significant interaction between field and sampling depth.

Table 5. Means values of pores diameter ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) of intermediate class (73-49 e 9-2,9  $\mu\text{m}$ ) at different depth under 3 – and 6- yrs old coffee stand with soil conservation management system.

Depth (m)	3-yrs		6-yrs	
	73-49* ( $\mu\text{m}$ )			
0.20-0.34	0.041 bA <sup>(<math>\pm 0.007</math>)</sup>		0.053 a B <sup>(<math>\pm 0.003</math>)</sup>	
0.80-0.94	0.056 bA <sup>(<math>\pm 0.004</math>)</sup>		0.104 a A <sup>(<math>\pm 0.007</math>)</sup>	
1.50-1.64	0.044 aA <sup>(<math>\pm 0.006</math>)</sup>		0,043 a B <sup>(<math>\pm 0.006</math>)</sup>	
	9-2.9**(μm)			
0.20-0.34	0.015 a A <sup>(<math>\pm 0.0006</math>)</sup>		0.019 a B <sup>(<math>\pm 0.003</math>)</sup>	
0.80-0.94	0.018 b A <sup>(<math>\pm 0.0009</math>)</sup>		0.044 a A <sup>(<math>\pm 0.001</math>)</sup>	
1.50-1.64	0.016 a A <sup>(<math>\pm 0.001</math>)</sup>		0.013 a B <sup>(<math>\pm 0.002</math>)</sup>	

Means followed by the same capital letter in the column and small letter on the line do not differ by the Scott-Knott test at 5% probability; \* significant ( $p < 0,05$ ); \*\* significant ( $p < 0,01$ ). ). Between parenthesis: mean standard error ( $n = 3$ ).

For the diameter classes referring to these intervals, the highest values were found in the 6-yrs stand age, and were more noticeable at 0.80 to 0.94 m depth. At this depth, it was observed the highest water uptake by plants, as verified by Santos et al. (2014), when monitoring the spatial distribution of soil moisture at the same depths and experimental area. Sampling depth was not significant in the 3-yrs coffee stand, which could be related to the plants at younger stage (3 years age), being insufficient to cause alterations in these pore diameter classes.

It is suggested that subsoil tillage at 0.60 m depth allowed sharp increase in macroporosity along the soil profile (Table 4). Since with the increase in the implantation time, new soil structure reorganization occurred.

This fact was promoted by the joint action of climatic processes and conservation practices carried out in this management system, which caused the inter-aggregate pores go from the largest c diameter pore class to the intermediate class (Tables 3 and 5). This alteration is positive since intermediate diameter pores are responsible for the greater water availability to plants, which may minimize hydric stress during dry spell periods, a typical phenomenon in the Brazilian Cerrado region.

### 3.2. Root classification of the Coffee plants

By the frequency distribution tests, roots were clustered into three different classes (Figures 1 and 2). It was verified that the 3-yrs coffee stand presented greater number of roots with lower surface area ( $< 77 \text{ mm}^2$ ) and lower volume ( $< 35 \text{ mm}^3$ ), besides being short ( $< 21 \text{ mm}$ ) along the whole soil profile.

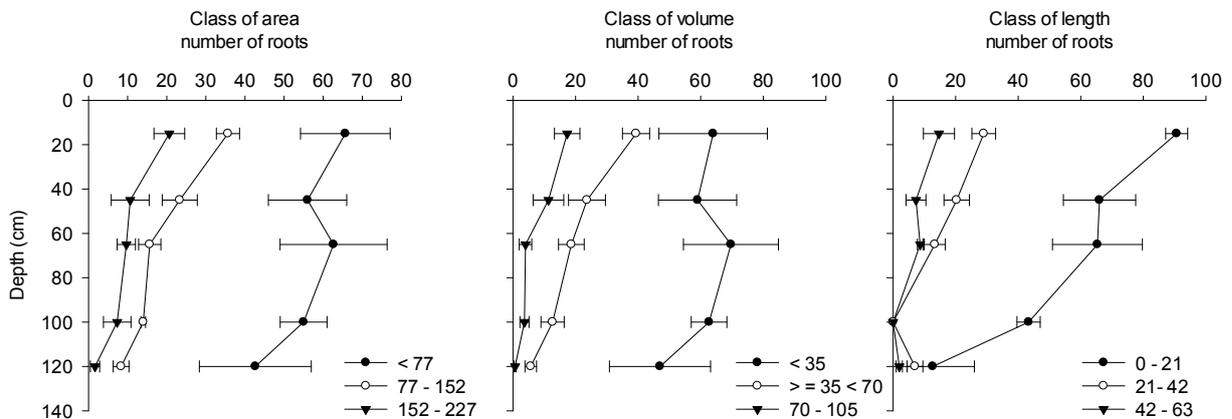


Figure 1. Distribution in classes of the variables: superficial area ( $\text{mm}^2$ ), volume ( $\text{mm}^3$ ) and length (mm) of roots in 3-yrs tillage under conservation system. The Error bars are mean standard error.

It is important to highlight that roots growth had excellent performance in 3-yr stand age, since they reached depth greater than 1 m, showed typical conformity of a mature plant, and had greater root concentration near the trunk, decreasing the number of roots and the depth gradually in areas close to the periphery of the canopy projection of the coffee plant (Rena and Guimarães, 2000).

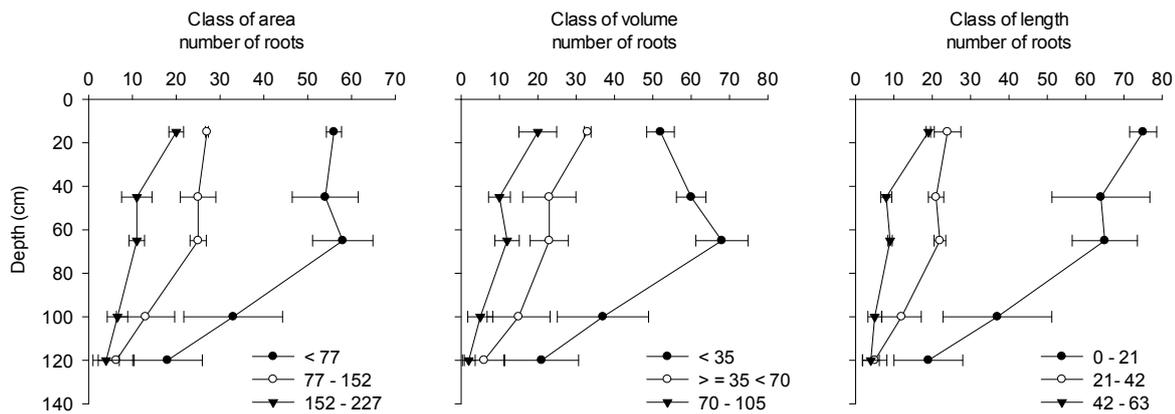


Figure 2. Distribution in classes of the variables: superficial area ( $\text{mm}^2$ ), volume ( $\text{mm}^3$ ) and length (mm) of roots in 6-yr tillage under conservation system. The Error bars are mean standard error.

Figures 1 and 2 show a great number of the roots with small area and volume (fine roots) in all the soil profile. Since fine roots are the most efficient in water absorption and nutrient uptake (Jesus et al., 2006), this may suggest positive plant response to edaphological conditions caused by management practices.

In both stand age, a great number of fine roots with lower volume ( $< 35 \text{ mm}^3$ ) was observed along the soil profile, which may be related to the compatibility between the root diameter with some pore diameter classes. This fact is relevant when considering the suggestions of Carducci et al. (2014b) on porosity studies carried out with X-ray CT scan on the 6-yr stand age, in which the soil fine macropores ( $\text{Ø} = 1 \text{ mm}$ ), as well as the large mesopores ( $\text{Ø} = 0.2 \text{ mm}$ ), favored the development of fine roots ( $\text{Ø} \leq 1 \text{ mm}$ ).

From the classification of roots by diameter (Rena and Guimarães, 2000), it was observed that in the 3-yr coffee stand a greater number of fine roots ( $\text{Ø} \leq 1 \text{ mm}$ ) at the 0.60 to 0.90 m depth layer and intermediate roots ( $1 < \text{Ø} \leq 3 \text{ mm}$ ) predominated at 0.60 m depth. On the other hand, in the 6-yr coffee stand there was a higher concentration of roots with a diameter range of  $1 < \text{Ø} < 2 \text{ mm}$  at 0.90 -1.20 m depth, and the  $2 < \text{Ø} \leq 3 \text{ mm}$  diameter class at the 0.60 to 0.90 depth layer, and fewer fine roots along the profile (Table 6).

Table 6. Mean values of diameter roots class to 3-yr old coffee stand under soil conservation system.

Depth (m)	$\emptyset \leq 1$	$1 > \emptyset < 2$	$2 > \emptyset \leq 3$	$\emptyset > 3$
0-0.30	0cB <sup>(±0.3)</sup>	74aA <sup>(±3)</sup>	55aA <sup>(±6)</sup>	34bA <sup>(±10)</sup>
0.30-0.60	4bB <sup>(±2)</sup>	52aA <sup>(±7)</sup>	55aA <sup>(±9)</sup>	12bB <sup>(±5)</sup>
0.60-0.90	44aA <sup>(±9)</sup>	34aB <sup>(±5)</sup>	13bB <sup>(±4)</sup>	3bB <sup>(±1)</sup>
0.90-1.20	20aB <sup>(±11)</sup>	40aB <sup>(±2)</sup>	14aB <sup>(±3)</sup>	3aB <sup>(±0.5)</sup>
1.20-1.50	15aB <sup>(±10)</sup>	27aB <sup>(±6)</sup>	9aB <sup>(±2)</sup>	1aB <sup>(±0.3)</sup>

Means followed by the same capital letter in the column and small letter on the line do not differ by the Scott-Knott test ( $p < 0.05$ ).  $\emptyset$  (mm). Between parenthesis: mean standard error (n=3). Average roots number refers to 0.21 m<sup>2</sup>.

Pore distribution 3D images and coffee root system 2D images were evaluated in the same experimental study area by Carducci et al. (2015a), who also observed the presence of fine roots in layers below 0.80 m depth, especially in younger coffee plants (3 years old), a fact that has not been reported yet in the scientific literature on coffee crop management (Tables 6 and 7).

Table 7. Mean values of roots diameter class to 6-yr old coffee stand under soil conservation management system

Depth (m)	$\emptyset \leq 1$	$1 > \emptyset < 2$	$2 > \emptyset \leq 3$	$\emptyset > 3$
0-0.30	0bA <sup>(±0.3)</sup>	77aA <sup>(±1.5)</sup>	52aA <sup>(±5)</sup>	26bA <sup>(±5)</sup>
0.30-0.60	1bA <sup>(±0.8)</sup>	65aA <sup>(±4)</sup>	25bB <sup>(±9)</sup>	10bA <sup>(±8)</sup>
0.60-0.90	19bA <sup>(±18)</sup>	54aA <sup>(±11)</sup>	28bB <sup>(±10)</sup>	8bA <sup>(±5)</sup>
0.90-1.20	7aA <sup>(±6)</sup>	33aB <sup>(±14)</sup>	17aB <sup>(±10)</sup>	3aA <sup>(±2)</sup>
1.20-1.50	4aA <sup>(±3)</sup>	17aB <sup>(±9)</sup>	7aB <sup>(±5)</sup>	2aA <sup>(±2)</sup>

Means followed by the same capital letter in the column and small letter on the line do not differ by the Scott-Knott test ( $p < 0.05$ ).  $\emptyset$  (mm). ). Between parenthesis: mean standard error (n=3). Average roots number refers to 0.21 m<sup>2</sup>.

In the same study, the authors attributed their results to the higher volume of pores with diameter  $< 2$  mm detected by X-ray CT scan. These pores are related to good root system development (Table 3 and 4). The Pearson's correlation tests showed that the root distribution was associated with the pore distribution of the gibbsitic Oxisol under the same management system.

The occurrence of dry spells and prolonged drought periods are common in the study area. Thus, the presence of deep fine or absorption roots is positive, since the water content will be almost always available to coffee plants in these layers, as reported by Silva (2012) and Santos et al. (2014), which may minimize the hydric stress and increase yield.

### 3.3. Spatial Distribution of Coffee Root System

In order to simplify the visualization of regions with and without roots, a surface map was made for the root spatial distribution of both stand ages (3- and 6-yrs old) (Figure 3).

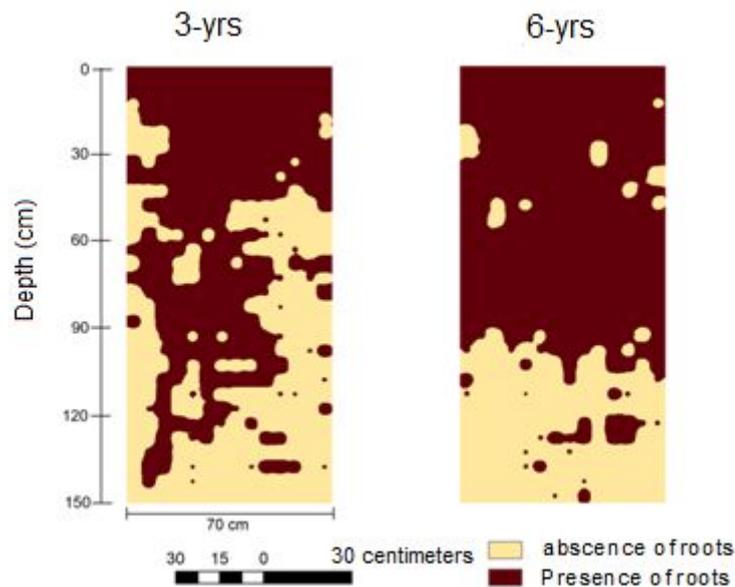


Figure 3. Spatial distribution of roots system in Rhodic Haplustox under 3- and 6-yrs old coffee stand.

Greater root growth at depth (roots presence detectable at 1.45 m depth), and root concentration in the upper soil layer, with an irregular profile distribution in the profile horizontal direction occurred in the 3-yrs coffee stand. This result was due to the conservation practices that influenced the increase in organic matter, the fertility building, the erosion control, and boosted the root growth at depth, favored rapid plant establishment during its first years of planting.

The root distribution was relatively uniform in the vertical direction until 0.90 m depth, and reached 0.70 m horizontally in the 6-yrs stand age. Therefore, it had good soil exploration and root growth in both directions, which allows greater water absorption and

nutrients uptake. Thus, it is evident the development of the root system in all the soil profile over the time analyzed for the management practices employed in the area.

It was observed root system growth stabilization, which was verified by a clear homogeneous occupancy of the area at depth (Figure 4) in the 6-yrs stand age. The plant evaluated in the 3-yrs stand age revealed root growth at depth, but lower lateral root branching, differently from the plant in the 6-yrs stand age, which showed horizontal branching along the profile, up to approximately 0.90 m depth. It should be mentioned that coffee plants are considered physiologically mature at the age of three years; however, their root system completes its development only at the age of 5-6 years.

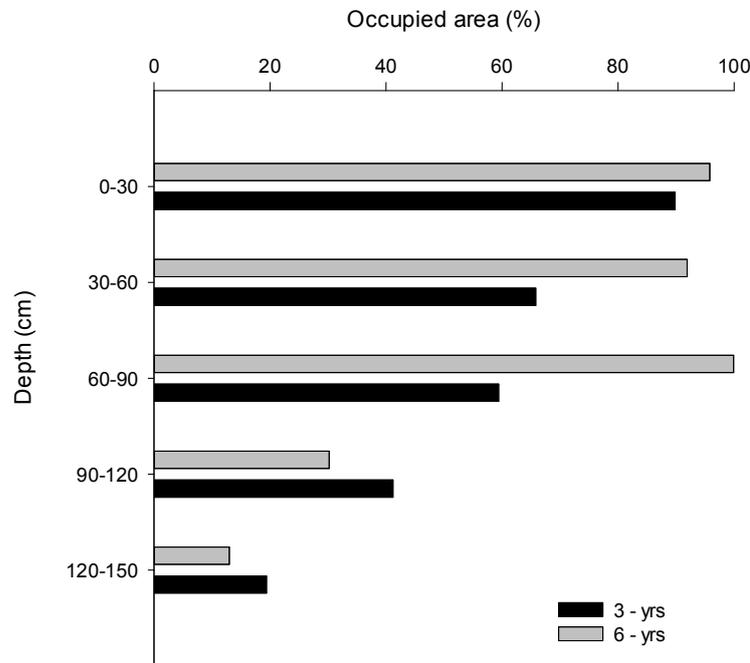


Figure 4. Area occupied by the coffee plant roots along the profile of a Rhodic Haplustox.

In both stand ages, the percentage of the area occupied by roots follows a decreasing trend, according to the soil depth (Figure 4), which is explained by the reduction in the number of intermediate roots  $1 < \varnothing < 2$  mm;  $2 < \varnothing \leq 3$  mm (Tables 5 and 6), along the soil profile. It was observed that the 3-yrs coffee stand compared with the 6-yrs coffee stand presented higher percentage of area occupied by the roots at deeper layers (from 0.90 to 1.20 and m 1.20 -1.50), while the 6-yrs coffee stand presented most of the area occupied by the roots down through the 0.90 m layer.

Ramos et al. (2013), using the same experimental area, verified that even at 0.80 m depth,  $\text{Ca}^{2+}$  concentration was approximately  $2 \text{ mmol}_e \text{ dm}^{-3}$ , which according to Ritchey et al. (1980) is sufficient to normalize root growth and ensure rooting of coffee plants at depth.

Furthermore, the chemical improvement promoted by liming and fertilizers, in addition to the  $7 \text{ kg m}^{-1}$  of agricultural gypsum applied to the surface associated with the increase of organic residues on the soil surface (Caires et al., 2001) from the grasses grown inter-row (*Brachiaria* sp.), as well as the coffee itself, should have acted jointly for the construction and maintenance of soil fertility, as well as for the  $\text{Al}^{3+}$  toxicity reduction, which is primarily responsible for root growth retardation (Carvalho-Pupatto et al., 2003), justifying the uniform growth of the coffee plant roots in the 6-yrs coffee stand to 0.9 m depth (Figure 4).

#### **4. Conclusions**

Management practices that adopt deep tillage promoted beneficial alteration in the soil pore configuration, which associated with the use of agricultural inputs, such as gypsum, limestone, together with a balanced fertilization program, and the increase in organic matter, provided the deep root system development of the coffee plants.

During the first years, there was significant amounts of inter-aggregate soil pores. However, there was pores reconfiguration with the adoption of management practices over time, which increased the amount of intermediate diameter pores. Coffee plants at the age of three years in the absence of chemical and physical soil limitations had their root system deeper than 1m. Six years later, there was uniform distribution of roots, both laterally and along the soil profile, reaching up to 0.90 m depth, which evidences the effect of management practices over time on the stabilization of the root network along the gibbsitic Oxisol profile.

#### **5. Acknowledgements**

To FAPEMIG for funding the research; to Consórcio Embrapa Café for loaning the vehicles; to CNPq for granting the scholar- ships; to UFLA for institutional support; to Empresa AP for technical and logistical support.

#### **6. References**

Bouma J (1991). Influence of soil macroporosity on environmental quality. *Adv. Agron.* 46:2-37.

Barbosa SM, Oliveira G C, Carducci CE, Silva BM (2014). Potencialidade de uso de zeólitas na atenuação do déficit hídrico em Latossolo do cerrado. *Sem: Ciênc. Agric.* 35: 2357-2368.

Caires EF, Feldhaus IC, Blum J (2001). Crescimento radicular e nutrição da cevada em função da calagem e aplicação de gesso. *Bragantia.* 60:213–223.

Carducci CE, Zinn YL, Rossoni DF, Heckd RJ, Oliveira GC (2016). Visual analysis and X-ray computed tomography for assessing the spatial variability of soil structure in a cultivated Oxisol. *Soil. Till. Res.* 1:12-24.

Carducci CE, Oliveira GC, Oliveira LM, Barbosa SM, Silva ÉA (2015b). Retenção de água do solo sob sistema conservacionista de manejo com diferentes doses de gesso. *Rev. Ciênc. Agr.* 58:284-291.

Carducci CE, Oliveira GC, Curi N, Heck RJ, Rossoni DF, Carvalho TS, Costa AL (2015a). Gypsum effects on the spatial distribution of coffee roots and the pores system in oxidic Brazilian Latosol. *Soil. Till. Res.* 145:171-180.

Carducci CE, Oliveira GC, Lima JM, Rossoni DF, Souza AL, Oliveira LM (2014a). Distribuição espacial das raízes de café e dos poros de dois Latossolos sob manejo conservacionista. *R. Bras. Eng. Agríc. Amb.* 18:270-278.

Carducci CE, Oliveira GC, Curi N, Heck R J, Rossoni DF (2014b). Scaling of pores in 3D images of Latosols (Oxisols) with contrasting mineralogy under conservation management system. *Soil Res.* 52: 231-243.

Carducci CE, Oliveira GC, Zeviani WM, Lima VMP, Serafim ME (2013). Bimodal pore distribution on soils under conservation management system for coffee crop. *Eng.Agríc.* 33:291–302.

Carducci CE, Oliveira GC, Severiano EC, Zeviani WM (2011). Modelagem da curva de retenção de água de Latossolos utilizando a equação duplo van Genuchten. *R. Bras. Ci. Solo.* 35:77-86.

Carvalho-Pupatto JG, Büll LT, Crusciol CAA, Mauad M, Silva RH (2003). Efeito de escória de alto forno no crescimento radicular e na produtividade de arroz. *Pesq. Agropec. Bras.* 38: 1323–1328.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA (2013). Centro Nacional de Pesquisas de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 3.ed. Rio de Janeiro. 353p.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária –EMBRAPA (2011).Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2. ed. revista. Rio de Janeiro. 225p.

Environmental Systems Research Institute - ESRI. ArcGIS. Professional GIS for the desktop. versão 9.3.1. CA: 2009.

Ferreira DF. (2011). SISVAR 5.0. Sisvar: a computer statistical analysis system. *Ci. Agrotec.* 35:1039-1042.

Ferreira MM, Fernandes B, Curi N (1999). Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos da região sudeste do Brasil. *R. Bras. Ci. Solo.* 23: 515–524.1999.

Ferreira MM, Marcos ZZ (1983). Estimativa da capacidade de campo de Latossolo Roxo Distrófico e Regossolo através do ponto de inflexão da curva característica de umidade. *Ci. Práctic.* 7:96-101.

Jesus MAS, Carvalho SP, SOARES AM (2006). Comparação entre sistemas radiculares de mudas de coffee arabica obtidas por estaquia e por sementes. *Coffee Sci.* 1:14-20.

Jorge LAC, Silva D JCB (2010). SAFIRA: Manual de utilização. São Carlos: Embrapa CPDIA. 29p.

Lima VMP, Oliveira GC, Serafim ME, Curi N, Evangelista AR ( 2012). Intervalo hídrico ótimo como indicador de melhoria da qualidade estrutural de Latossolo degradado. *R. Bras. Ci. Solo.* 36:71–78.

Motta ACV, Nick JA, Yorinori GT, Serrat BM (2006). Distribuição horizontal e vertical da fertilidade do solo e das raízes de cafeeiro (*Coffea arabica* L.) cultivar Catuaí. *Acta Sci. Agron.* 28: 455–463.

Nutman FJ (1934). The root system of *C. arabica*. Pt. III. The spatial distribution of the absorbing area of the root. *Emp. J. Exp. Agric.* 2: 294-302.

Nutman FJ (1933a). The root system of *C. arabica*. Pt. II. The effect of some soil conditions in modifying the normal root-system. *Emp. J. Exp. Agric.* 1: 285-296.

Nutman FJ(1933b). The root system of *C. arabica*. Pt. I. Root-systems in typical soils of British East Africa. *Emp. J. Exp. Agric.* 1:271-284.

Oliveira GC, Dias Junior MS, Resck DVS, CURI N (2004). Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após vinte anos de Manejo e cultivo do solo. *R. Bras. Ci. Solo.* 28:327-336.

Ramos BZ, Toledo JPVF, Lima JM, Serafim ME, Bastos ARR, Guimarães PTG, Coscione, AR (2013). Doses de gesso em cafeeiro: influência nos teores de cálcio, magnésio, potássio e pH na solução de um Latossolo Vermelho distrófico. *R. Bras. Ci. Solo.* 37:1018–1026.

Rena AB, GUIMARÃES PTG (2000). Sistema radicular do cafeeiro: estrutura, distribuição, atividade e fatores que o influenciam. Belo Horizonte: EPAMIG. 80 p.

Ritchey KD, Souza DMG, Lobato E, Correa O (1980). Calcium leaching to increase rooting depth in a Brazilian Savannah Oxisol. *Agron. J.* 72:40–44.

Santos WJR, Silva BM, Oliveira GC, Volpato MML, Lima JM, Curi N, Marques JJ (2014). Soil moisture in the root zone and its relation to plant vigor assessed by remote sensing at management scale. *Geoderma.* 221:91-95.

Santos HG, Jacomine PKT, Anjos LHC, Oliveira VA, Lumbreras JF, Coelho MR, Almeida JA, Cunha TJF, Oliveira JB (2013). Sistema brasileiro de classificação de solos. 3. ed. Embrapa. 353 p.

Serafim ME, Oliveira GC, Vitorino ACT, Silva, BM, Carducci CE (2013a). Qualidade física e intervalo hídrico ótimo em Latossolo e Cambissolo, cultivados com cafeeiro sob manejo conservacionista do solo. *R. Bras. Ci. Solo.* 37: 733-742.

Serafim M E, Oliveira GC, Curi N, LIMA JM, Guimarães PTG, LIMA VMP (2013b). Potencialidades e limitações de uso de Latossolos e Cambissolos sob sistema conservacionista em lavouras cafeeiras. *Biosci. J.* 29:1640-1652.

Serafim ME, Oliveira GC, Lima JM, Silva BM, Zeviani WM, Lima VMP (2013c). Disponibilidade hídrica e distinção de ambientes para cultivo de cafeeiros. *R. Bras. Eng. Agríc. Amb.* 17: 362–370.

Serafim ME, Oliveira GC, Oliveira AS, Lima JM, Guimarães TG, Costa JC (2011). Sistema conservacionista e de manejo intensivo do solo no cultivo de cafeeiros na região do alto são francisco, MG: um estudo de caso. *Biosci. J.* 27: 964-977.

Severiano EC, Oliveira GC, Dias Junior MDS, Costa KAP, Silva, FG, Ferreira Filho SM (2011a). Structural changes in Latosols of the Cerrado region: I – Relationships between soil physical properties and least limiting. *R. Bras. Ci. Solo.* 35:773–782.

Severiano EC, Oliveira GC, Dias Junior MS, Costa KAP, Benites VDM, Ferreira Filho SM (2011b). Structural changes in Latosols of the Cerrado region : ii – Soil compressive behavior and modeling of additional compaction. *R. Bras. Ci. Solo.* 35:783–791.

Silva BM, Silva ÉA, Oliveira GC, Ferreira MM, Serafim ME (2014). Plant-available soil water capacity: Estimation methods and implications. *R. Bras. Ci. Solo.* 38:464–475.

Silva EA, Oliveira GC, Carducci, CE, Silva BM, Oliveira LM, COSTA, JC (2013). Increasing doses of agricultural gypsum, aggregate stability and organic carbon in Cerrado Latosol under coffee crop. *R. Ciências Agrárias*, 56:25-32.

Silva BM (2012). Dinâmica espaço-temporal da água no solo cultivado com cafeeiro nas condições climáticas do Alto São Francisco – MG. Universidade Federal de Lavras (UFLA).

Tavares Filho J, Ralisch R, Guimarães MF, Medina CC, Balbino LC, Neves CSVJ (1999). Método do perfil cultural para avaliação do estado físico de solos em condições tropicais. R. Bras. Ci. Solo. 23:393–399.

Tormena CA, Silva AP, Libardi PL (1998). Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um latossolo roxo sob plantio direto. R. Bras. Ci. Solo. 22:573–581.

Van Raij B (2008). Gesso na agricultura. Instituto Agronômico, Campinas, 233p.