



RENATA ANDRADE

**AGREGAÇÃO DE UM LATOSSOLO SUBMETIDO A
ELEVADAS DOSES DE GESSO NA CAFEICULTURA**

LAVRAS-MG

2018

RENATA ANDRADE

**AGREGAÇÃO DE UM LATOSSOLO SUBMETIDO A ELEVADAS DOSES DE
GESSO NA CAFEICULTURA**

Dissertação 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 Mestre.

Prof. Dr. Geraldo César de Oliveira
Orientador

Prof. Dr. Bruno Teixeira Ribeiro
Coorientador

LAVRAS-MG

2018

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

Andrade, Renata.

Agregação de um Latossolo submetido a elevadas doses de gesso na cafeicultura / Renata Andrade. - 2018.

43 p.

Orientador(a): Geraldo César de Oliveira.

Coorientador(a): Bruno Teixeira Ribeiro.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2018.

Bibliografia.

1. Ultrassom. 2. Agregação. 3. Cálcio. I. Oliveira, Geraldo César de. II. Ribeiro, Bruno Teixeira. III. Título.

RENATA ANDRADE

**AGREGAÇÃO DE UM LATOSSOLO SUBMETIDO A ELEVADAS DOSES DE
GESSO NA CAFEICULTURA**

**AGGREGATION OF AN OXISOL SUBJECTED TO HIGH DOSES OF GYPSUM IN
COFFEE CULTIVATION**

Dissertação 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 Mestre.

APROVADA em 26 de Fevereiro de 2018.

Prof. Dr. Eduardo da Costa Severiano IFGoiano/Campus Rio Verde

Prof. Dr. José Maria de Lima UFLA

Prof. Dr. Geraldo César de Oliveira
Orientador

Prof. Dr. Bruno Teixeira Ribeiro
Coorientador

Lavras – MG

2018

Aos meus amigos Lidiana Pereira Barrozo Guimarães e Jean Kellison Guimarães dos Santos por terem sido a expressão das mãos cuidadosas de Jesus em minha vida.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus por me conduzir para uma cidade tão abençoada e me permitir continuar os estudos.

A Jesus por todo amor e salvação.

Ao meu amigo Espírito Santo por me consolar e ensinar o bom caminho.

A minha família por tudo que fizeram por mim.

À Universidade Federal de Lavras e, principalmente, ao Departamento de Ciência do Solo por contribuírem para a minha formação acadêmica e profissional.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pela bolsa de estudos.

Ao professor Dr. Geraldo César de Oliveira por todo apoio e orientação. Pela oportunidade de trabalharmos como uma equipe e pelos conselhos.

Aos professores Bruno Teixeira Ribeiro e Bruno Montoani Silva e minha amiga Érika Andressa da Silva pelo apoio e ajuda em momentos essenciais.

Aos companheiros de estudo e amigos da Ufla Yasmmin Costa, Zélio Souza, Rodrigo Silva, Samara Barbosa, Laura Castro, Dirce de Cássia, Dulce Clarete, Bethânia Mansur e Geila Carvalho e tantos outros que trilharam essa jornada comigo.

À Primeira Igreja Batista de Lavras por me acolher com tanto carinho, e, principalmente, aos meus irmãos da célula, seremos sempre unidos em amor fraternal.

A todos que contribuíram para a minha formação profissional e crescimento na fé,

meus sinceros agradecimentos!

RESUMO

Os Latossolos, principal classe de solo em termos agrícolas no Brasil, são altamente intemperizados, com alto teor de alumínio tóxico para as plantas, ácidos, bem estruturados e com alta estabilidade de agregados. Em condições antrópicas o manejo desses solos normalmente afeta suas propriedades químicas e físicas. Assim, sistemas de manejo conservacionistas que promovam um aumento do teor de matéria orgânica e preservem sua estrutura são de extrema importância. Na região cafeeira de Minas Gerais vem sendo desenvolvido um sistema de manejo que, dentre outras práticas, utiliza-se de altas doses de gesso para melhorar as condições físico-químicas do solo. O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência das altas doses de gesso na agregação do solo através da sonificação por ultrassom, 8 anos após a implantação do sistema de manejo em um Latossolo Vermelho. Foram avaliadas as doses de gesso de 0; 14; 28 e 56 Mg ha⁻¹. Foram utilizados o equivalente a 5 g de agregados secos (peso seco em estufa a 105 °C), na fração de 4 - 8 mm de diâmetro para as avaliações. Os resultados foram ajustados para obtenção de índices de estabilidade de agregados. Após 8 anos da implantação do sistema, o gesso ainda continua atuando ao longo do perfil do solo e contribuiu positivamente para a formação e estabilização de macro e microagregados. O SDCC coloca em prática as premissas de sustentabilidade e conservação indicadas na sua filosofia de criação.

Palavras-Chave: Ultrassom. Agregação. Cálcio

ABSTRACT

Latosols, the main soil class in agricultural terms in Brazil, are highly weathered, with high content of aluminum toxic to plants, acidic, well structured and with high stability of aggregates. Under anthropic conditions the management of these soils usually affects their chemical and physical properties. Thus, conservation management systems that promote an increase in the content of organic matter and preserve its structure are of extreme importance. In the coffee region of Minas Gerais, a management system has been developed that, among other practices, uses high doses of gypsum to improve soil physicochemical conditions. The objective of this work was to evaluate the influence of high doses of gypsum on soil aggregation through ultrasonic sonification, 8 years after the implantation of the management system in a Red Latosol. For this work were evaluated the doses of gypsum of 0; 14; 28; 56 Mg ha⁻¹. The equivalent of 5 g of dry aggregates (oven dry weight at 105 ° C) was used, in the fraction of 4 - 8 mm in diameter for the evaluations. The results were adjusted to obtain aggregate stability indexes. After 8 years of system implantation, gypsum still continues to act along the soil profile and contributed positively to the formation and stabilization of macro and microaggregates. The DSCC implements the sustainability and conservation assumptions indicated in its creation philosophy.

Keywords: Ultrasound. Aggregation. Calcium

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE	9
1 INTRODUÇÃO	9
2 REFERENCIAL TEÓRICO	10
2.1 Formação e estabilização de agregados.....	10
2.2 Origem e balanço de cargas em Latossolos.....	11
2.3 Energia ultrassônica na avaliação da estabilidade de agregados.....	12
2.4 Manejo diferenciado do solo na cultura do café.....	14
3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	16
REFERÊNCIAS	17
SEGUNDA PARTE – ARTIGO	20
Artigo 1 – Uso da energia ultrassônica na quantificação do efeito da aplicação de altas doses de gesso na agregação de Latossolo.....	20

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO

Os Latossolos, dominantes no bioma Cerrado são, de maneira geral, altamente intemperizados, com alto teor de alumínio tóxico para as plantas, ácidos, bem estruturados e com alta estabilidade de agregados (FERREIRA et al., 1999). Em condições antrópicas o manejo desses solos normalmente afeta seu conteúdo de matéria orgânica e sua estrutura, diminuindo a agregação e, em consequência, sua macroporosidade e capacidade de infiltração de água (SANTOS et al., 2011). A manutenção da estrutura destes solos pode ser conseguida, em parte, pelo incremento nos teores de matéria orgânica, através de técnicas de manejo conservacionistas (SILVA et al., 2015).

Na região cafeeira de Minas Gerais foi implantado um sistema de manejo que se caracteriza pelo uso conjunto de práticas de conservação do solo e da água visando a melhoria das condições químicas e físicas do solo. O sistema de manejo preconiza a cobertura vegetal das entrelinhas do cafeeiro com o capim *Brachiaria*; preparo de sulco de plantio com 60 cm de profundidade corrigidos quimicamente pela calagem e gessagem e adubação de plantio, além de espaçamento adensado da lavoura, e corte periódico da *Brachiaria* visando incrementar o conteúdo de matéria orgânica no solo (SERAFIM et al., 2011).

Ainda não se conhece os efeitos do sistema de manejo sobre as propriedades eletroquímicas do solo. Contudo, os vários trabalhos publicados sobre as propriedades físicas (CARDUCCI et al., 2013; SILVA et al., 2015) indicam uma boa condição física do solo com alteração positiva em sua agregação (SERAFIM et al., 2013; SILVA et al., 2013) o que proporciona um bom desenvolvimento do sistema radicular (CARDUCCI et al., 2014) permitindo a exploração de um maior volume de solo e, conseqüentemente, maior aproveitamento da água em profundidade pelo cafeeiro (SANTOS et al., 2014; SERAFIM et al., 2011; SERAFIM et al., 2012). Contudo, ainda se fazem necessários estudos mais detalhados do estado de agregação do solo por meio de metodologias mais acuradas.

Dentre as metodologias de avaliação de agregação, destaca-se a sonificação pelo ultrassom que permite a quantificação da energia de agregação das partículas (RAINE; SO, 1994), viabilizando o conhecimento do grau de estabilidade dos agregados (FIELD; MINASNY, 1999). Assim, o objetivo principal do trabalho foi avaliar o grau de estabilidade dos agregados de um Latossolo submetido a elevadas doses de gesso na cafeicultura.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Formação e estabilização de agregados

O solo é constituído inicialmente por partículas primárias individuais que são classificadas de acordo com seu tamanho em areia, silte e argila (SANTOS et al., 2013). A associação dessas partículas primárias leva à formação dos agregados e, posteriormente, o arranjo dos agregados forma a matriz do solo.

A formação e estabilização dos agregados são processos distintos que ocorrem através de processos físicos, químicos e biológicos (TISDALL; OADES, 1982). Nos processos físicos, os agregados podem ser formados através do afastamento e aproximação das partículas, como por exemplo, através de ciclos de umedecimento e secagem (BASTOS et al., 2005). Os processos químicos iniciam-se com a floculação das partículas primárias. Já nos processos biológicos, as plantas e os microrganismos atuam diretamente na agregação através do crescimento radicular, liberação de substâncias orgânicas e desenvolvimento da população microbiana (HARRIS; CHESTERS; ALLEN, 1966).

A estabilidade dos agregados em solos depende das forças que ligam as partículas. Partículas individualizadas e agregados do tamanho de silte são unidas por fatores persistentes, como a matéria orgânica do solo (MOS) bem desenvolvida (humina) ou complexos com íons polivalentes (Fe e Al, por exemplo), óxidos de Ferro (hematita e goethita) e aluminossilicatos, constituindo os microagregados (diâmetro menor que 0,25 mm) (AZEVEDO; BONUMÁ, 2004). Os íons Ca, neste caso, são altamente desejáveis, uma vez que eles atuam como uma ponte, pois se ligam às partículas de argila e também à matéria orgânica, formando microagregados muito estáveis (CLOUGH; SKJEMSTAD, 2000).

Os microagregados são ligados entre si por fatores cimentantes efêmeros (sistema radicular, hifas de fungos, bem como seus exsudatos) formando os macroagregados (SALTON et al., 2008). Assim, os microagregados são considerados mais duráveis e menos vulneráveis aos sistemas de manejo (OADES, 1984). Estas interações entre os macro e microagregados e a matéria orgânica são conceituadas na teoria da hierarquia dos agregados definida por Tisdall e Oades (1982).

2.2 Origem e balanço de cargas em Latossolos

O solo é constituído por partículas de diversos tamanhos e composições e suas superfícies são carregadas eletricamente, apresentando um excesso ou um déficit de elétrons. Esse saldo de cargas pode ter duas origens, substituição isomórfica ou íons determinantes de potencial (FONTES et al., 2001).

As cargas estruturais estão presentes em qualquer valor de pH e são resultantes das substituições iônicas isomórficas na rede cristalina dos minerais. Entretanto, estas cargas estão presentes de maneira expressiva apenas nos minerais primários do tipo 2:1, como por exemplo as micas. Geralmente um átomo de menor valência substitui outro de maior valência fazendo com que ocorra um saldo de carga negativa na superfície das partículas ($\text{Al}^{+++} \rightarrow \text{Si}^{++++}$, $\text{Mg}^{++} \rightarrow \text{Al}^{+++}$) (GAST, 1977).

As cargas variáveis são resultantes da adsorção de íons, sendo a carga líquida estabelecida pelo íon que é adsorvido em excesso. Os íons mais comuns na determinação da carga líquida resultante são H^+ e OH^- , e por isso, os minerais mais intemperizados 1:1 e óxidos de Fe e Al são também chamados de minerais de carga dependente do pH (FONTES et al., 2001).

Como a superfície dos coloides do solo possui carga elétrica líquida predominantemente negativa, os íons de carga positiva (contra-íons), que estão presentes na solução do solo, tendem a permanecer na vizinhança da partícula, puxados pelo campo elétrico formado (BOLT, 1978). Por outro lado, as forças de difusão da solução do solo tendem a fazer com que estes cátions voltem à solução, onde sua concentração é menor. Com a ação simultânea destas duas forças contrárias, forma-se uma distribuição espacial de cátions numa “camada difusa”, na qual a concentração deles aumenta em direção à superfície da partícula (FONTES et al., 2001).

O Ponto de Carga Zero (PCZ) é o valor de pH em que a carga líquida da superfície da partícula, componente de um sistema de interface reversível, é igual a zero (BENITES; MENDONÇA, 1998). Quando o pH da solução em equilíbrio com os coloides do solo está acima do PCZ, há um saldo de cargas negativas na superfície dos coloides. Por outro lado, quando o pH está abaixo do PCZ, há o predomínio de cargas positivas na superfície das partículas. Próximo ao valor de PCZ, as partículas do solo possuem baixo valor em módulo de potencial elétrico superficial. Nesta condição as forças de repulsão são mínimas, o que propicia a floculação (GILLMAN, 1974).

A floculação das partículas é influenciada pela densidade de cargas líquida na superfície da partícula e pela espessura da dupla camada difusa. Fatores como: pH, valência e concentração do contra-íon presente na dupla camada difusa, potencial elétrico da superfície da partícula, matéria orgânica, etc, atuam influenciando a interação entre os colóides do solo, fazendo com que eles dispersem ou floculem na suspensão (FONTES et al., 2001).

2.3 Energia ultrassônica na avaliação da estabilidade de agregados

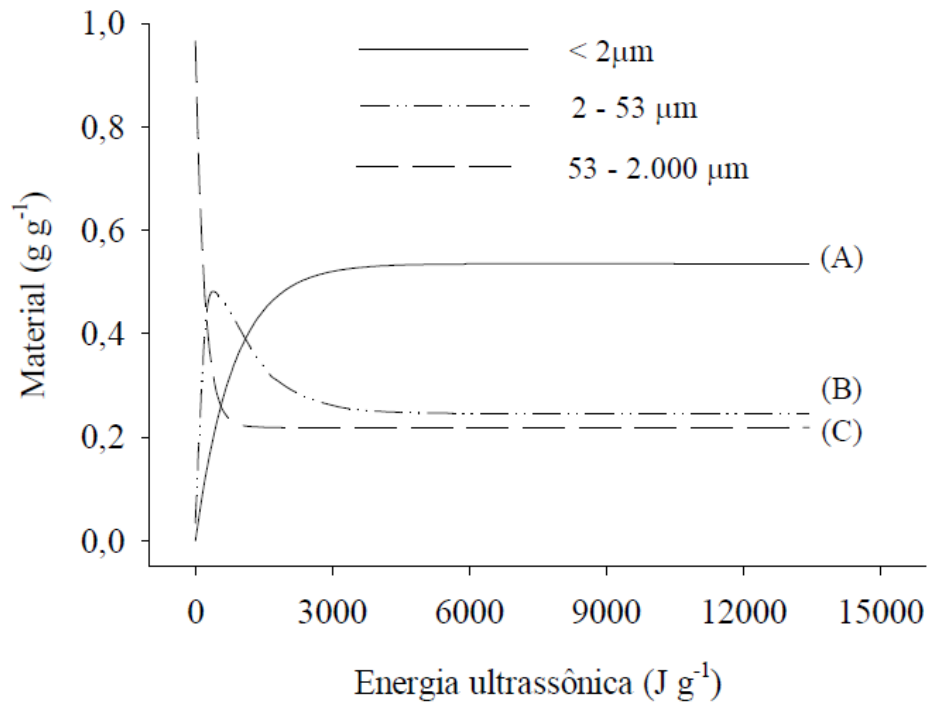
A energia ultrassônica vem sendo utilizada na avaliação da estabilidade de agregados (KAISER et al., 2012; SÁ et al., 2002; SCHOMAKERS et al., 2015; SILVA et al., 2016). A quebra dos agregados condicionada pelo uso desta forma de energia é ocasionada pela formação de bolhas de ar na água, através das ondas de energia ultrassônica, fenômeno denominado cavitação (CHEN; ZHU, 2011). O colapso das bolhas de ar na superfície e nas linhas de fraqueza dos agregados causa a desagregação e a dispersão das partículas (PILLI et al., 2011). A energia aplicada na amostra, que é função do tempo de sonificação, volume da suspensão e altura da haste, produz a desagregação, culminando com a dispersão total do solo (VITORINO et al., 2001).

Assim, com o ultrassom, é possível quantificar a energia necessária para dispersão dos agregados, e com isso, avaliar de maneira mais precisa a estabilidade dos agregados do solo (RAINE; SO, 1994), diferente de outros métodos que se limitam a comparações entre solos e tratamentos como por exemplo, o peneiramento úmido de Yoder (1936) e suas modificações (KEMPER; CHEPIL, 1965; KEMPER; ROSENAU, 1986; OLIVEIRA et al., 1983).

Uma das formas utilizadas para avaliar a estabilidade de agregados por energia ultrassônica é através das curvas de dispersão (NORTH, 1976; RAINE; SO, 1993). Nelas são plotados os valores de energia aplicados no eixo das abscissas e o conteúdo do material desagregado no eixo das ordenadas. Field e Minasny (1999) e Field, Minasny e Gaggin (2006) contribuíram com uma representação teórica do modelo de desagregação e dispersão das partículas, a qual está apresentada na Figura 1.

De acordo com Field e Minasny (1999) a curva de desagregação do solo (CDS) representa o processo de quebra dos agregados maiores (2000 - 53 μm). Ao passo que o nível de energia aplicada aumenta o conteúdo desses agregados diminui, mostrando que estes estão sendo quebrados em agregados menores. O momento de estabilização da curva representa a estabilização no conteúdo de areia do material, ou seja, obtém-se o valor real da fração areia do solo analisado.

Figura 1 – Curva característica de dispersão do solo - CCDS (A), curva de liberação de agregados e dispersão do solo - CLAD (B) e curva de desagregação do solo – CDS (C).



Fonte: extraído de Ribeiro (2009)

A curva característica de dispersão do solo (CCDS) representa a dispersão dos agregados tamanho silte (53 – 2 μm) e tamanho areia (2000 - 53 μm) liberando partículas de argila. Assim, com o aumento da energia aplicada sobre o solo há o aumento do processo de dispersão dos agregados e conseqüentemente, do conteúdo de argila, até o momento onde este conteúdo se estabiliza, representando o real conteúdo de argila deste solo.

Já a curva de liberação dos agregados e dispersão do solo (CLAD) é obtida a partir da diferença entre o conteúdo de areia e argila, resultando na fração de agregados do tamanho silte. Esta curva apresenta dois momentos: no primeiro momento (I) ocorre a liberação dos agregados de tamanho areia para agregados de tamanho silte, e no momento que cessa esta liberação, os agregados de tamanho silte se dispersam em partículas menores (argila), iniciando então o segundo momento (II) de dispersão dos agregados, onde se alcança o conteúdo real de silte do solo.

Tais curvas se baseiam no conceito de hierarquia do solo, sabendo que os agregados maiores são compostos por agregados menores, que por sua vez são compostos por partículas discretas. Neste procedimento metodológico são obtidas as constantes de desagregação (K_1) e de dispersão (K_2), geradas por equações elaboradas por Field e Minasny (1999) e usadas na construção das curvas apresentadas (FIGURA 1). Além disso, a energia necessária para cessar

a liberação dos agregados e iniciar a dispersão, indicada pelos momentos I e II, é definida como energia crítica (E_{crit}), também utilizada como parâmetro de análise da estabilidade dos agregados.

De acordo com Field e Minasny (1999) existe hierarquia entre as frações quando o índice K_1 é maior que o índice K_2 . Quando isto ocorre, a taxa de liberação dos agregados é maior que a taxa de dispersão, indicando que as ligações entre os microagregados liberados na CLAD são mais fracas que as ligações dentro do material que forma estes microagregados. Outros autores adaptaram os princípios descritos por Field e Minasny (1999) para outras frações de solo (FIELD; MINASNY; GAGGIN, 2006; ZHU; MINASNY; FIELD, 2009; ZHU et al., 2017).

2.4 Manejo diferenciado do solo na cultura do café

O café no Brasil é cultivado principalmente nos estados do Paraná, São Paulo, Minas Gerais e Bahia. Notadamente a cafeicultura empregada na região do cerrado tem atingido maior produtividade média em relação às demais regiões produtoras (CONAB, 2015), devido a adoção da irrigação, e também pela presença do relevo suavizado, o que favorece sobremaneira a mecanização. Soma-se a isso, solos dotados de excelentes condições físicas, principalmente os Latossolos, associado às condições naturais favoráveis, como estação seca e chuvosa bem definidas. Além disso, o nível tecnológico que vem sendo desenvolvido na região contribui sobremaneira para o sucesso da cafeicultura.

Neste contexto destaca-se a região do Alto São Francisco, sul de Minas Gerais, onde surgiu um sistema conservacionista de manejo do solo para o cultivo do café, que tem por objetivo preservar ou mesmo melhorar as condições físico-hídricas e químicas do solo, reduzindo as limitações de uso da terra e tornando viável o cultivo do cafeeiro em condições de sequeiro (SERAFIM et al., 2011). Vários produtores nos municípios de São Roque de Minas, Vargem Bonita e Piumhi já adotaram este sistema de manejo obtendo produtividades de café no regime de sequeiro próximas daquelas obtidas na cafeicultura da região, onde o uso de irrigação é uma das premissas (MARTINS et al., 2007).

O sistema diferenciado é caracterizado pela abertura do sulco de plantio até 0,60 m de profundidade, com correção e adubação até 0,40 m; cultivo de cultura de cobertura nas entrelinhas dos cafeeiros e; aplicação de doses de gesso agrícola na superfície do solo ao longo da linha de plantio em doses acima do recomendado na literatura. Sobre o gesso agrícola é feita

uma amontoa com uma mistura de terra e restos de braquiária proveniente da entrelinha, formando uma leira que atua protegendo o depósito de gesso (SERAFIM et al., 2011).

O sistema ainda engloba o cultivo semiadensado das plantas com estande médio de 5.333 plantas por hectare; plantio antecipado para a segunda metade do mês de outubro até a primeira metade do mês de novembro, pois coincide com as primeiras chuvas; uso de plantas de cafeeiros de porte baixo, e emprego de tração animal para realizar tratos culturais.

As gramíneas na entrelinha contribuem com elevado aporte de matéria orgânica, que atua favoravelmente na agregação do solo (SILVA et al., 2013) podendo inclusive mitigar problemas advindos da compactação (FLAVIO NETO et al., 2015) devido à formação de bioporos que funcionam como rotas alternativas para o crescimento das raízes, além de promover aumento considerável na difusão de água, gases e nutrientes no solo (KONDO et al., 2012).

O gesso agrícola ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) aplicado ao solo é fonte de cálcio e enxofre às plantas e, também, um corretivo do alumínio tóxico em profundidade (RAMOS et al., 2013). Quando aplicado à superfície do solo, o íon sulfato (S-SO_4^{2-}) proveniente de sua dissolução tem a capacidade de carregar cátions (Ca^{2+} , Mg^{2+}) para as camadas subsuperficiais (SERAFIM et al., 2012) e alterar as formas tóxicas de alumínio (RAMPIM et al., 2011), condicionando o crescimento radicular em profundidade (CARDUCCI et al., 2014) e, conseqüentemente, a exploração de maior volume de solo, em busca de água e nutrientes. O aprofundamento da raiz é especialmente importante nas áreas de Cerrado brasileiro, onde existe estação seca pronunciada (de até 6 meses), além de veranicos na estação chuvosa, e solos pobres altamente intemperizados, que possuem, contudo, elevado potencial de armazenamento de água, função da profundidade dos mesmos.

Com ressalva para a utilização de doses de gesso acima do que é recomendado na agricultura, que precisa de maior embasamento científico, o sistema diferenciado de manejo tem mérito inovador por aliar práticas destacadas na literatura, de forma coerente com as exigências da cafeicultura (CARDUCCI et al., 2013; SANTOS et al., 2014; SILVA et al., 2015). Assim, todos os aspectos do sistema de manejo buscam em conjunto promover uma melhoria na qualidade do solo e na promoção das suas funções, maximizando suas potencialidades.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos sobre os efeitos do sistema de manejo adotado sobre as propriedades físicas do solo são muito importantes para avaliar seus efeitos sobre as funções que o solo exerce no sistema solo-planta-atmosfera. A utilização de subprodutos na agricultura são uma alternativa à sustentabilidade do meio ambiente. O gesso agrícola além dos benefícios químicos, pode também promover ganhos no condicionamento estrutural do solo.

Dentre as metodologias de avaliação de agregação, destaca-se a sonificação pelo ultrassom que permite a quantificação da energia de agregação das partículas viabilizando o conhecimento do grau de estabilidade dos 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, 2004.
- BASTOS, R. S.; MENDONÇA, E. S.; ALVAREZ, V. H.; CORRÊA, M. M.; COSTA, L. M. Formação e estabilização de agregados do solo influenciados por ciclos de umedecimento e secagem após adição de compostos orgânicos com diferentes características hidrofóbicas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 1, p. 21-31, 2005.
- BENITES, V.M.; MENDONÇA, E. S. Propriedades eletroquímicas de um solo eletropositivo influenciadas pela adição de diferentes fontes de matéria orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 2, p. 215-221, 1998.
- BOLT, G.H. Surface interaction between the soil solid phase and the soil solution. In: BOLT, G.H.; BRUGGENWERT, M.G.M., (ed). **Soil chemistry Part A. Basic Elements**. 2.ed. Amsterdam: Elsevier. cap.3, p. 43-53, 1978.
- CARDUCCI, C. E. et al. Bimodal pore distribution on soils under conservation management system for coffee crop. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 33, n. 2, p. 291-302, 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, 2014.
- CHEN Z.; ZHU C. Combined effects of aqueous chlorine dioxide and ultrasonic treatments on postharvest storage quality of plum fruit (*Prunus salicina* L.). **Postharvest Biology and Technology**, v. 61, p. 117-123, 2011.
- CLOUGH, A.; SKJEMSTAD, J. O. Physical and chemical protection of soil organic carbon in three agricultural soils with different contents of calcium carbonate. **Australian Journal of Soil Research**, v. 38, p. 1005–1016, 2000.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira: café**. Safra 2015: terceiro levantamento, Brasília, v. 2, n. 3, p. 1-58, setembro de 2015.
- FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 515-524, 1999.
- FIELD, D.J.; MINASNY, B. A description of aggregate liberation and dispersion in A horizons of Australian vertisols by ultrasonic agitation. **Geoderma**, v. 91, p. 11-26, 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**, v. 44, p. 497-502, 2006.
- FLAVIO NETO, J.; SEVERIANO, E. C.; COSTA, K. A. P.; JUNNYOR, W. S. G.; GONCALVES, W. G.; ANDRADE, R. Biological soil loosening by grasses from genus *Brachiaria* in crop-livestock integration. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 37, p. 375-383, 2015.
- FONTES, M. P. F.; CAMARGO, O. A.; SPOSITO, G. Eletroquímica das partículas coloidais e sua relação com a mineralogia de solos altamente intemperizados. **Scientia Agrícola**, v.58, n.3, p. 627-646, jul./set. 2001.

- GAST, R.G. Surface and colloid chemistry. In: DIXON, J.B.; WEED, S.B. (Ed.) **Minerals in soil environments**. Madison: Soil Science Society of America, p. 27-73, 1977.
- GILLMAN, G.P. The influence of net charge on water dispersible clays and sorbed sulfate. **Australian Journal of Soil Research**, v. 12, p. 173-176, 1974.
- HARRIS, R. F.; CHESTERS, G.; ALLEN, O. N. Dynamics of soil aggregation. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 18, n. 1, p. 107-169, 1966.
- KAISER, M.; BERHE, A. A.; SOMMER, M.; KLEBER, M. Application of ultrasound to disperse soil aggregates of high mechanical stability. **Journal Plant and Nutrition and Soil Science**, v. 175, p. 521-526, 2012.
- KEMPER, W.D.; CHEPIL, W.S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C.A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, v.1, p.499-509, 1965.
- KEMPER, W.D.; ROSENAU, R.C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, v.1, p.425-442, 1986.
- KONDO, M. K. et al. Efeito de coberturas vegetais sobre os atributos físicos do solo e características agronômicas do sorgo granífero. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 28, n. 1, p. 33-40, 2012.
- MARTINS, C. C. et al. Manejo da irrigação por gotejamento no cafeeiro (*Coffea arabica* L.). **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 23, n. 2, p. 61-69, abr./jun. 2007.
- NORTH, P. F. Towards an absolute measurement of soil structural stability using ultrasound. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 27, n. 4, p. 451-459, 1976.
- OADES, J.M. Soil organic-matter and structural stability: mechanisms and implications for management. **Plant and Soil Journal**, v. 76, p. 319-337, 1984.
- OLIVEIRA, M.; CURI, N.; FREIRE, J.C. Influência do cultivo na agregação de um podzólico vermelho-amarelo textura média/argilosa da região de Lavras, MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 7, n. 3, p. 317-322, set./dez. 1983.
- PILLI S.; BHUNIA P.; YAN S.; LEBLANC R. J.; TYAGI R. D.; SURAMPALLI R. Y. Ultrasonic pretreatment of sludge: A review. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 18, p. 1-18, 2011.
- RAINE, S. R.; SO, B. An energy based parameter for the assessment of aggregate bond energy. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 44, n. 2, p. 249-259, 1993.
- RAINE S. R; SO H. B. Ultrasonic dispersion of soil in water: the effect of suspension properties on energy dissipation and soil dispersion. **Australian Journal of Soil Research**, v. 32, p. 1157-1174, 1994.
- RAMOS, B. Z. et al. Doses de gesso em cafeeiro: influência nos teores de cálcio, magnésio, potássio e pH na solução de um Latossolo Vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 4, p. 1018-1026, 2013.
- RAMPIM, L. et al. Atributos químicos do solo e resposta do trigo e da soja ao gesso em semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 5, p. 1687-1698, 2011.
- RIBEIRO, B. T. **Aplicação da vinhaça em solos: efeito no balanço de cargas e dispersão de partículas**. 2009. Tese (Doutorado em Ciência do Solo), Departamento de Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

- SÁ, M. A. C.; LIMA, J. M.; MELLO, C. R. Nível de energia ultra-sônica para estudo da estabilidade de agregados de um Latossolo sob diferentes usos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 11, p. 1649-1655, 2002.
- SALTON, J. C. et al. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 11-21, 2008.
- SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. et al. **Sistema Brasileiro de classificação do solo**. 3.ed. Brasília: Embrapa Solos, 2013. 353p.
- 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**, v. 221–222 p. 91–95, 2014.
- SANTOS, G. G.; MARCHÃO, R. L.; SILVA, E. M.; SILVEIRA, P. M.; BECQUER, T. Qualidade física do solo sob sistemas de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, p. 1339-1348, 2011.
- SCHOMAKERS, J.; ZEHETNER, F.; MENTLER, A.; OTTNER, F.; MAYER, H. Study of soil aggregate breakdown dynamics under low dispersive ultrasonic energies with sedimentation and X-ray attenuation. **International Agrophysics**, v. 29, p. 501-508, 2015.
- 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.
- SERAFIM, M. E. et al. Alterações físico-químicas e movimentação de íon sem Latossolo gibbsítico sob doses de gesso. **Bragantia**, Campinas, v. 71, n. 1, p. 75-81, 2012.
- 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, p. 733-742, 2013.
- SILVA, E. A. et al. Increasing doses of agricultural gypsum, aggregate stability and organic carbon in Cerrado Latosol under Coffee crop. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 56, n. 1, p. 25-32, jan./mar. 2013.
- SILVA E. A. et al. Stability of soil aggregates in Latosols and Cambisols via standard method and sonification. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11(39), p. 3894-3903, 2016.
- SILVA, B. M. et al. Critical soil moisture range for a coffee crop in an oxidic latosol as affected by soil management. **Soil and Tillage Research**, v. 154, p. 103–113, 2015.
- TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science**, v. 33, p. 141–163. 1982.
- VITORINO et al. Níveis de energia ultra-sônica na dispersão de argila em solos da região de Lavras (MG). **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 25, n. 6, p. 1330-1336, nov./dez., 2001.
- YODER, R.E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion. **American Society of Agronomy Journal**, Madison, v. 28, p. 337-351, 1936.
- ZHU, Z. L.; MINASNY, B. FIELD, D. J. Measurement of aggregate bond energy using ultrasonic dispersion. **European Journal of Soil Science**, v. 60, p. 695–705, 2009.
- ZHU, Z.; ANGERS, D. A.; FIELD, D. J.; MINASNY, B. Using ultrasonic energy to elucidate the effects of decomposing plant residues on soil aggregation. **Soil and Tillage Research**, v. 167, p. 1-8, 2017.

SEGUNDA PARTE – ARTIGO

Artigo 1 – Uso da energia ultrassônica na quantificação do efeito da aplicação de altas doses de gesso na agregação de Latossolo.

RESUMO

Na região cafeeira de Minas Gerais vem sendo desenvolvido um sistema de manejo que se caracteriza pelo uso conjunto de práticas de conservação do solo e da água visando a melhoria das condições químicas e físicas do solo. O sistema de manejo preconiza, dentre outras práticas, a cobertura vegetal das entrelinhas do cafeeiro com o capim *Brachiaria*, preparo de sulco de plantio com 60 cm de profundidade e aplicação de elevadas doses de gesso sobre a superfície do solo. O objetivo deste trabalho foi avaliar a agregação do solo através da sonificação por ultrassom, 8 anos após a implantação do sistema de manejo em um Latossolo Vermelho. Foram avaliadas as doses de gesso de 0; 14; 28 e 56 Mg ha⁻¹. Foram utilizados o equivalente a 5 g de agregados secos (peso seco em estufa a 105 °C), na fração de 4 - 8 mm de diâmetro para as avaliações. Foram ajustadas curvas de dispersão e desagregação do solo. Os resultados foram ajustados para obtenção de índices de estabilidade de agregados. Foram realizadas análises do teor elementar de Ca⁺⁺ através da pXRF, e também o comportamento da fração argila através do Colorímetro. O trabalho permitiu elucidar os mecanismos envolvidos na formação dos agregados do solo quando submetidos ao SDCC e às altas doses de gesso. O gesso contribui indiretamente para a formação de macroagregados, e diretamente na estabilização de microagregados através da ação complexante do Ca⁺⁺. Ressalta-se que para a implantação do SDCC deve-se levar em consideração a adição de doses de gesso para melhor condicionamento do solo. Uma menor ADA nem sempre indica uma maior estabilidade dos agregados.

Palavras-Chave: *Coffea arabica* L. Latossolo. Cálcio. Estabilidade de Agregados.

1 INTRODUÇÃO

O gesso agrícola é um subproduto no processo de fabricação do ácido fosfórico. É um resíduo que carece de cuidados no descarte e é produzido em larga escala, constituindo-se, assim, num grande passivo ambiental. Estima-se que a produção mundial de gesso se situa entre 100-280 milhões de toneladas por ano (HARIDASAN et al., 2002; PARREIRA et al., 2003).

No Brasil, alguns setores vêm incorporando o gesso em seus processos de produção, como a indústria cimenteira e a agricultura. A utilização agrícola do gesso visa corrigir a toxidez do solo por Al^{+++} e elevar os teores de Ca^{++} nas camadas mais profundas do solo (RAMOS et al., 2013), promovendo maior desenvolvimento do sistema radicular com consequente melhor aproveitamento da água do subsolo. Isto tem grande relevância principalmente para culturas perenes em solos com baixa capacidade de retenção de água, deficiência de Ca^{++} e toxidez por Al^{+++} no subsolo, como é o caso dos Latossolos (CARDUCCI et al., 2011; EMBRAPA, 2002), principal classe de solo utilizado na agricultura do país.

Contudo, a aplicação do gesso ao solo deve ser cautelosa, pois apesar de seus benefícios, seu uso indiscriminado pode acarretar em prejuízos. Serafim et al. (2012), Caires et al. (2003) e Soratto e Crusciol (2008) relataram lixiviação intensa de alguns nutrientes ao longo do perfil do solo, ocasionada pela aplicação de elevadas doses de gesso, o que leva a um desbalanço nutricional para a planta. Além disso, não se tem conhecimento dos efeitos no sistema produtivo e no meio ambiente das elevadas quantidades de Ca^{++} adicionadas ao solo ao longo do tempo, visto que os estudos científicos nessa área são, em sua maioria, em casa de vegetação ou realizados em período relativamente curto em condições de campo (RAMPIM et al., 2011; SUN et al., 2000).

Apesar do alerta científico, na região sudoeste de Minas Gerais, principal estado produtor de café do Brasil, vem sendo desenvolvido há quase duas décadas um sistema de manejo do solo diferenciado na cultura do cafeeiro (SDCC). Este sistema ganhou notoriedade pelo uso de elevadas doses de gesso agrícola distribuídas na superfície do solo em conjunto com práticas que buscam conciliar a conservação do solo e da água (SERAFIM et al., 2011, 2013).

Dos vários trabalhos publicados sobre esse sistema de manejo (CARDUCCI et al., 2013; SANTOS et al., 2014; SERAFIM et al., 2013; SILVA et al., 2013; SILVA et al., 2015), alguns indicam uma boa condição física do solo com alteração positiva em sua agregação e bom desenvolvimento do sistema radicular (CARDUCCI et al., 2014) permitindo a exploração de um maior volume de solo e, conseqüentemente, melhor aproveitamento da água em

profundidade pelo cafeeiro (SERAFIM et al., 2011; SERAFIM et al., 2012). Contudo, estudos ainda necessitam ser feitos para avaliar a influência das elevadas doses de gesso na estabilidade dos agregados do solo.

Nesse sentido, para alcançar este objetivo, a adoção de metodologias mais acuradas é de fundamental importância. Assim, destaca-se o uso da energia ultrassônica na avaliação do grau de estabilidade dos agregados do solo (FIELD e MINASY, 1999; RIBEIRO et al., 2013), que além de permitir observar o comportamento das frações do solo com o aumento da energia, também permite quantificar e variar a energia total aplicada à solução solo:água. Dos vários trabalhos publicados, muitos têm utilizado agregados de tamanho menor que 2 mm (FIELD et al., 2006; FIELD, MINASNY, 1999; RIBEIRO et al., 2013; ZHU et al., 2009;). Contudo, para efeitos de manejo, os agregados maiores são os mais afetados (SIX et al., 2004), e por isso, os mais indicados para fornecer informações sobre o sistema de manejo.

Os objetivos deste trabalho foram: Avaliar a estabilidade de agregados na fração de 8 – 0,25 mm; Avaliar o processo de desagregação e dispersão e sua relação com os agentes de agregação; Avaliar a existência de hierarquia entre as frações; Avaliar o comportamento de suas partículas primárias individuais oito anos após a aplicação de altas doses de gesso agrícola à superfície do solo, utilizando-se da energia ultrassônica.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área do experimento

O estudo foi conduzido em área experimental com lavoura cafeeira localizada no município de São Roque de Minas, região fisiográfica do Alto São Francisco, MG, 20°15'45" S e 46°18'17" W, com altitude de 848 m. O clima da região é do tipo Cwa, segundo a 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).

Para a caracterização do solo, a dispersão mecânica para a análise granulométrica foi realizada com o auxílio de um aparelho da marca Qsonica, modelo Q700 operando a 20 kHz, cuja potência foi calibrada pelo método descrito em Sá et al. (2000). Foi realizada a sonificação de 10 g de TFSE durante 30 minutos usando 10 mL de NaOH 1 mol L⁻¹, totalizando 14.400 J g⁻¹. Após a sonificação, todo o material foi passado em peneira de 0,053 mm e procedeu-se a análise textural pelo método da pipeta (GEE; BAUDER, 1986). A densidade de partículas foi determinada pelo método do balão volumétrico (BLAKE; HARTGE, 1986). Os teores de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ foram determinados no extrato do ataque sulfúrico e utilizados nos cálculos das relações moleculares Ki e Kr (TABELA 1) (SANTOS et al., 2013). Procedeu-se também cálculos de alocação dos teores de caulinita (Al₂Si₂O₅(OH)₄) e gibbsita (Al(OH)₃), das amostras por meio de sua relação estequiométrica derivada de suas fórmulas químicas ideais, de acordo com Resende; Bahia Filho e Braga (1987). O solo foi, então, classificado como Latossolo Vermelho distrófico de textura muito argilosa e mineralogia gibbsítica-oxídica (SANTOS et al., 2013).

Tabela 1 - Caracterização física, química e mineralógica do horizonte diagnóstico "Bw" do Latossolo Vermelho em estudo.

LVD	Argila	Silte	Areia	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
	 g Kg ⁻¹				
Bw	894,8	71,0	34,2	159,9	356,2	162,9
LVD	Ki ⁽¹⁾	Kr	Ct ⁽²⁾	Gb ⁽³⁾		
	 %				
Bw	0,76	0,59	34,37	52,39		

¹: índice de intemperismo; ²: Caulinita; ³: Gibbsita.

Fonte: Dados da autora (2018)

O preparo inicial do solo foi realizado nos meses de julho e agosto de 2008, consistindo de uma aração e duas gradagens com aplicação de corretivos em área total (calcário dolomítico 4 Mg ha^{-1} , visando elevar a saturação por bases para 70%, e gesso agrícola $1,92 \text{ Mg ha}^{-1}$) 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 (calcário dolomítico 8 Mg ha^{-1} e 980 kg ha^{-1} do formulado 08-44-00 (NPK) enriquecido com 1,5% Zn e 0,5% B) (SERAFIM et al., 2011).

A área experimental em estudo está sendo cultivada com café desde novembro de 2008, ocasião do plantio das mudas da cultivar Catucaí Amarelo Multilínea (*Coffea arabica* L.). A adubação de manutenção é realizada conforme as recomendações técnicas para Minas Gerais (GUIMARÃES et al., 1999). O monitoramento nutricional do cafeeiro e o gerenciamento da adubação são realizados com base em análise foliar.

Decorridos três meses após o plantio das mudas, foram aplicadas 0; 14; 28; 56 Mg ha^{-1} gesso agrícola distribuídas a 0,5 m de largura na superfície do solo e ao longo da linha de cultivo (SERAFIM et al., 2011; SERAFIM et al., 2013). Posteriormente, foi realizado o processo de amontoa na linha do café (“chegada de terra” junto ao tronco do cafeeiro). Nessa prática, o solo recoberto com *Brachiaria ducumbens* (Syn. *Urochloa*) na entre linha, implantada antes do cafeeiro, foi gradeado e o material proveniente da camada de 0,10 m foi laminado e amontoado junto ao tronco do cafeeiro.

Dessa forma, a amontoa de terra juntamente com os restos de *Braquiaria* ao longo da linha de cultivo recobriram todo o gesso aplicado na superfície do solo. A amontoa teve como objetivo proteger a camada de gesso contra a ação direta da água da chuva e do vento, atuando, assim, como um reservatório regulando a taxa de solubilização do gesso, o que permite uma liberação gradual do sulfato de cálcio (SERAFIM et al., 2011; SILVA et al., 2014). Após 8 anos a amontoa diminuiu de espessura, restando apenas uma fina camada de solo por cima da camada de gesso que ainda é espessa, principalmente nas maiores dosagens.

A planta de cobertura nas entrelinhas é cortada periodicamente por meio de uma roçadora ecológica, que atua direcionando o resíduo vegetal produzido para a linha da cultura principal (SERAFIM et al., 2011; SERAFIM et al., 2013), garantindo um aporte contínuo de matéria orgânica para o solo na linha do cafeeiro.

2.2 Amostragem do solo

Para a caracterização do solo, a coleta de amostras foi feita em triplicata em trincheiras abertas longitudinais à linha dos cafeeiros e mata nativa. Foram coletadas amostras indeformadas logo abaixo da amontoa nas profundidades de 0-15; 15-30; 30-45 e 45-60 cm.

No laboratório as amostras foram secadas ao ar e passadas por peneiras de 4 a 8 mm, para obtenção dos agregados, e na peneira de 2 mm, obtendo-se assim amostras para serem utilizadas em diferentes análises químicas e físicas do solo. A caracterização do complexo sortivo nas profundidades de coleta no solo sob mata nativa e sob manejo, após 8 anos da implantação do café, pode ser visualizada na Tabela 2.

Tabela 2 - Caracterização química do solo submetido a diferentes dosagens de gesso há 8 anos e sob mata nativa.

Uso do Solo	pH	K mg/dm ³	S mg/dm ³	P mg/dm ³	Ca ²⁺ cmolc/dm ³	Mg ²⁺ cmolc/dm ³	Al ³⁺ cmolc/dm ³	T	m %	MO
----- 0,0 - 0,15 m -----										
MN	4,4	59,3	9,7	2,6	0,2	0,2	2,00	16,07	78,12	4,13
G0	6,2	108,4	4,9	2,0	2,7	1,3	0,02	7,94	0,47	2,88
G14	5,8	73,6	30,8	2,3	4,0	0,4	0,04	7,85	0,87	2,53
G28	6,1	112,5	48,2	4,8	6,4	0,2	0,03	9,15	0,43	2,43
G56	5,2	57,2	52,4	3,5	6,5	0,3	0,06	11,94	0,86	2,21
----- 0,15 - 0,30 m -----										
MN	4,6	51,1	3,7	1,0	0,2	0,1	1,28	12,00	77,11	3,29
G0	6,0	167,8	4,1	1,7	2,0	0,5	0,03	7,82	1,01	2,50
G14	6,0	163,7	38,4	2,7	2,7	0,5	0,02	7,45	0,55	2,64
G28	5,7	96,1	47,9	1,8	3,6	0,1	0,03	6,96	0,74	2,09
G56	5,1	49,0	51,0	1,3	3,8	0,2	0,10	8,69	2,37	2,08
----- 0,30 - 0,45 m -----										
MN	4,9	38,8	4,1	0,6	0,2	0,1	0,95	8,31	73,08	2,59
G0	6,2	169,9	5,0	1,5	2,3	0,6	0,03	7,98	0,91	2,36
G14	5,3	102,3	31,1	0,8	1,2	0,2	0,08	5,54	4,68	2,01
G28	5,5	42,9	48,0	1,0	3,1	0,1	0,04	7,80	1,19	1,97
G56	5,2	53,1	51,8	0,9	4,2	0,1	0,07	8,17	1,56	1,96
----- 0,45 - 0,60 m -----										
MN	4,8	24,5	3,4	0,5	0,2	0,1	0,61	8,46	65,59	1,94
G0	5,7	57,2	17,2	0,8	1,7	0,4	0,04	6,00	1,71	2,21
G14	5,2	24,5	43,2	0,7	1,8	0,2	0,07	5,74	3,32	1,72
G28	5,5	18,3	47,1	0,8	2,3	0,1	0,05	5,84	1,97	1,38
G56	5,6	61,3	51,4	0,7	5,1	0,1	0,06	8,60	1,11	1,63

MN: mata nativa; G0, G14, G28 G56: doses de gesso; T: CTC potencial; m: saturação por alumínio; MO: matéria orgânica.

Fonte: Dados da autora (2018)

2.3 Análises laboratoriais

2.3.1 Energia Ultrassônica

Foram utilizados o equivalente a 5 g de agregados secos (peso seco em estufa a 105 °C), na fração de 4 - 8 mm de diâmetro, e colocadas em um béquer completando-se o volume até 200 ml com água destilada (com uma relação solo: água destilada de 1:40). Utilizando-se de uma bureta de 50 mL, realizou-se um pré-umedecimento dos agregados. Para isso, com o béquer inclinado em aproximadamente 45° foi realizado o gotejamento com água destilada nas paredes do béquer a uma taxa de aproximadamente 30 gotas min⁻¹. Quando todos os agregados estavam submersos em água, o volume foi completado para 200 mL e realizada a sonificação.

A sonificação foi realizada com o auxílio de um aparelho marca Qsonica, modelo Q700 operando a 20 kHz durante 15, 30, 60, 120, 240, 480 e 960 segundos. O tempo de exposição do material à sonificação corresponde à energia específica aplicada (EA) de 240, 480, 960, 1920, 3840, 7680, 15360 J g⁻¹, calculadas segundo Sá et al. (2000) conforme equação 1:

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

Em que: EA é a energia aplicada a suspensão (J g⁻¹); P é a potência emitida pelo aparelho (80 W); T é o tempo de sonificação (s) e g é a massa dos agregados (g).

Salienta-se que a haste do aparelho foi introduzida no béquer com a amostra (agregados + água) a uma profundidade de 20 mm e a temperatura controlada durante os ensaios chegando a um valor máximo de 40 °C procedendo-se com o banho de gelo nas amostras para que a temperatura não chegasse a atingir esse valor.

Após cada sonificação, a suspensão solo:água foi passada por um conjunto de peneiras sobrepostas (0,25 mm e 0,053 mm) colocadas no interior de um funil, o qual estava inserido em uma proveta de 500 mL para recolhimento do material menor que 0,053 mm, ou seja, agregados tamanho silte, silte e argila. Foram obtidas, assim, as seguintes frações: 0,25 a 8 mm; 0,053 a 0,25 mm; <0,053 mm. Esperou-se o tempo de sedimentação para determinação da fração < 0,002 mm pelo método da pipeta, e calculou-se a argila dispersa em água (ADA). O Índice de Dispersão (ID) foi calculado conforme Sá et al., 1999.

Foi feita uma adaptação das equações propostas por Field e Minasny (1999) para o ajuste das frações 0,25 – 8, 0,053 – 0,25 e <0,053 mm (Equações 2, 3 e 4). A curva característica de dispersão do solo (CCDS) pode ser representada pela seguinte equação:

$$CCDS = A_0 [1 - \exp^{-K_2 * x}] \quad (2)$$

onde CCDS é a fração <0,053 mm dispersa usando um dado nível de energia ultrassônica (x), A_0 e K_2 são os parâmetros do ajuste, K_2 representa a constante de dispersão ($g J^{-1}$).

A curva de desagregação do solo (CDS) pode ser representada pela seguinte equação:

$$CDS = y_0 + A_0 \cdot \exp^{-K_1 \cdot x} \quad (3)$$

onde CDS representa os agregados de tamanho 0,25 – 8 mm ou a fração areia média em um dado nível de energia ultrassônica (x); y_0 , A_0 e K_1 são os parâmetros do ajuste; K_1 é a constante de desagregação ($g J^{-1}$).

Considerando que em um dado nível de energia ultrassônica, a soma das massas dos agregados é igual a 1, a curva de liberação dos agregados e dispersão do solo (CLAD) pode ser descrita como:

$$CLAD = 1 - [y_0 + A_0 \cdot \exp^{-K_1 \cdot x} + A_0 \cdot (1 - \exp^{-K_2 \cdot x})] \quad (4)$$

A energia crítica necessária para iniciar a dispersão dos agregados de 0,25 – 0,053 mm foi calculada pela seguinte equação:

$$E_{crit} = \ln(K_2/K_1)/(K_2-K_1) \quad (5)$$

A distribuição de partículas por tamanho das amostras obtidas após a sonificação foram ajustadas pelas equações 2 – 4 usando um método não linear de mínimos quadrados (com o programa R) o qual minimiza a soma dos quadrados dos resíduos dos dados observados e dos valores preditos. Uma vez que as equações 2 e 3 compartilham o mesmo parâmetro (A_0), e para minimizar a variação na estimação dos valores dos parâmetros, as equações foram ajustadas simultaneamente para as frações 0,25 – 8 mm e <0,053 mm.

2.3.2 Teor total de Ca

As amostras passadas em peneira de 2 mm foram analisadas em laboratório utilizando-se de aparelho de Fluorescência de raios-X portátil (pXRF) de Bruker modelo S1 Titan LE como descrito em Silva et al. (2017). Este equipamento contém tubos de raios-X de 50 kV e 100 μ A. O software utilizado foi GeoChem, na configuração Trace (Dual Soil), recomendada para solos, por 60 segundos, incluindo dois feixes de raios-X. As 20 amostras coletadas foram submetidas a análise em triplicata por pXRF e a precisão do equipamento foi avaliada através da digitalização de materiais de referência padrão 2710a e 2711a certificados pelo Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia (NIST). Do NIST, a recuperação dos teores de

Ca obtidos por pXRF (% de recuperação = $100 \times \text{Conteúdo obtido} / \text{Conteúdo certificado total}$) foi calculada e permaneceu entre 26 a 50%, respectivamente.

2.3.3 Transmitância das amostras

Esta metodologia foi adaptada através da análise do Ponto de Efeito Salino Nulo descrita em Raij (1973). Foram preparadas soluções para a titulação potenciométrica que tinham seu pH variando de 2 até 12, em duas forças iônicas (5 mM e 50 mM). Pesou-se 2 g da amostra que foram transferidos para o tubo de centrífuga. Em cada tubo de centrífuga foram adicionados 20 mL das soluções preparadas anteriormente. Seguiu-se a agitação e após 16 h coletou-se uma alíquota de 5mL para leitura em um Colorímetro de marca MultiDirect Lovibond obtendo-se um valor de transmitância das amostras. Assim, quanto maior o valor da transmitância mais a luz conseguiu passar através da amostra, ou seja, menos partículas de argila estavam em suspensão. Utilizou-se essa metodologia para se obter o comportamento da fração argila do solo em um amplo intervalo de pH do solo.

2.3.4 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 em blocos casualizados com esquema de parcelas subdivididas no espaço, sendo os tratamentos na parcela (MN, G0, G14, G28, G56), e as profundidades na subparcelas (0 – 15; 15 – 30; 30 – 45; 45 -60 cm) com três repetições. As médias foram comparadas pelo teste Scott-Knott à 5% de probabilidade, por meio do software estatístico Sisvar (FERREIRA, 2011). Os gráficos e modelos foram desenvolvidos com auxílio do software R versão 3.2.3 e Sigma Plot 12.5.

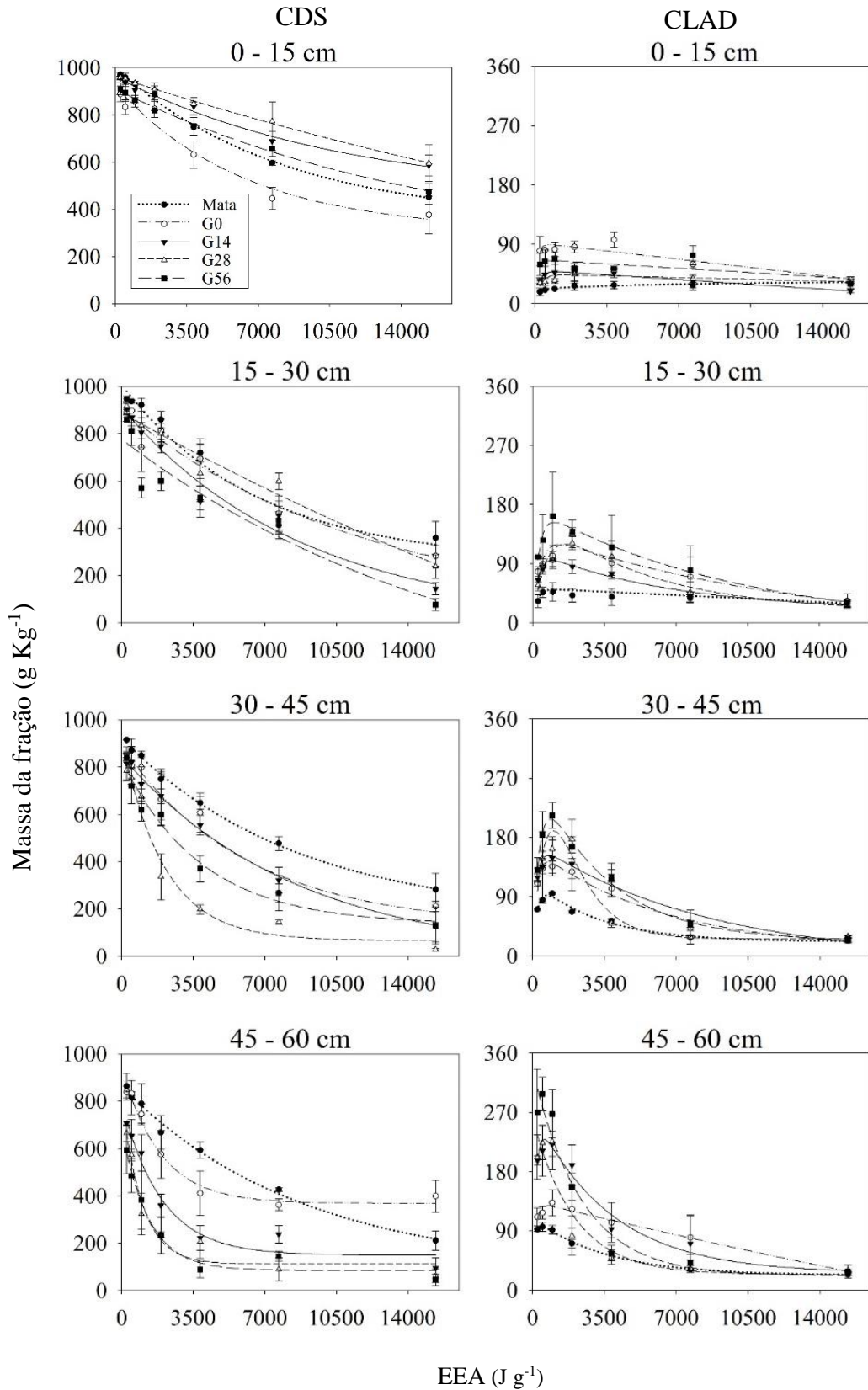
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As CDS e CLAD resultantes das amostras de solo estão apresentadas na Figura 1. Os parâmetros obtidos de todas as amostras estão sumarizados na Tabela 3.

Observa-se na Figura 1 que os níveis de energia aplicados permitiram contemplar passo a passo a quebra dos agregados, bem como a existência ou não de hierarquia entre as frações estudadas. Na energia específica aplicada de 1920 J g^{-1} praticamente todos os microagregados liberados já começaram a ser dispersos em partículas individuais de silte e argila. Ressalta-se que os macroagregados são os mais sensíveis às alterações de manejo e, portanto, a fração mais indicada para avaliar os efeitos do mesmo. Assim, níveis de energia muito altos que promovam a rápida desagregação do solo não são indicados para observar efeitos de manejo sobre as frações do solo (SCHOMAKERS et al., 2011).

No geral, a estabilidade dos macroagregados diminuiu com a profundidade, sendo que na camada de 45 – 60 cm praticamente todos os tratamentos avaliados atingiram o máximo platô de desagregação (FIGURA 1). Na camada de 0 – 15 cm a estabilidade dos macroagregados do G0 foi o único que diferiu significativamente dos demais, sendo o mais instável. Na ocasião de implantação do SDCC são realizadas várias práticas que causam a pulverização dos agregados do solo (SERAFIM et al., 2011). Pode-se perceber através do índice K_1 que o sistema de manejo sem a adição de gesso (G0) mesmo após 8 anos de sua implantação continua com sua matriz dispersa (TABELA 3). Com a adição e o aumento da dose de gesso aplicada ao solo o índice K_1 diminuiu, demonstrando um maior efeito da gessagem na estabilidade dos agregados do solo nas dosagens G14, G28 e G56 em relação ao G0.

Figura 1 - Relação entre a energia específica aplicada (EEA) e a massa de agregados mostradas pelas Curvas de Desagregação do Solo (CDS) e Curva de Liberação dos Agregados e Dispersão do solo (CLAD) para as doses de gesso e mata nativa. As barras de erros indicam o desvio padrão (n=3).



Fonte: Dados da autora (2018)

Inicialmente sugere-se que a amontoa de material proveniente da entrelinha da cultura sobre o gesso protegeu a superfície do solo contra as variações bruscas de temperatura e umidade durante todos esses anos na linha de cultivo e, também, do efeito mecânico de desagregação causado pelo impacto da gota de chuva. Além disso, restos de braquiária adicionadas na linha de cultivo constantemente associado ao efeito do gesso na promoção de melhorias do ambiente para o desenvolvimento do sistema radicular, aumentaram a atividade microbiana e os estoques de matéria orgânica lábil (INAGAKI et al., 2017) o que favorece a formação e estabilização dos macroagregados como já observado em outros estudos nesta mesma área de pesquisa (SILVA et al., 2013, 2014, 2016a, 2016b).

Com relação aos efeitos provenientes da dissociação do gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$), além do efeito direto do cálcio na agregação, o SO_4^{2-} reage com o Al^{+++} presente no solo formando complexos que possuem menor toxicidade para as plantas (AlSO_4^+) (PAVAN; BINGHAM; PRATT, 1984; RAMPIM et al., 2011), favorecendo o desenvolvimento do radicular da cultura, que por sua vez aproxima as partículas minerais devido à pressão exercida durante seu crescimento (BRANDÃO; SILVA, 2012). Além disso, com a renovação das raízes do cafeeiro há liberação de exsudatos que servem de fonte de energia para a atividade microbiana, cujos subprodutos, constituídos de moléculas orgânicas, atuam como agentes de formação e estabilização dos macroagregados (OADES, 1978). Assim, o sistema de manejo que se utiliza de altas doses de gesso atuou na reestruturação do solo, formando macroagregados estáveis semelhante ao encontrado na camada superficial do solo na mata (TABELA 3). Bonini e Alves (2011) também encontraram efeitos positivos do gesso agrícola, utilizado conjuntamente com calcário, adubos verdes e braquiária, sobre a estabilidade de agregados em um Latossolo Vermelho degradado.

Em profundidade, os macroagregados do solo na mata também são os mais estáveis (TABELA 3). Sugere-se que na condição de manejo os macroagregados são instáveis devido à menor atividade microbiológica e também pela menor densidade do sistema radicular em profundidade como observado por Carducci et al. (2015). Além disso, como pode ser visto na Tabela 2, a matéria orgânica está presente em menor teor em profundidade, e, ao contrário da superfície, a matéria orgânica em profundidade é mais humificada (MILORI et al., 2006). Com isso, a estabilização dos macroagregados fica prejudicada pois de acordo com Six et al., (2000) os macroagregados são formados e estabilizados preferencialmente no entorno da matéria orgânica particulada, ou seja, que ainda não está em processo avançado de decomposição, condição essa encontrada em superfície.

Na Figura 1 é possível observar a forma das curvas CLAD para todos os tratamentos. Como reportado por Field e Minasny (1999) para que essas curvas apresentem a inflexão (pico), a constante K_1 deve ser maior que a constante K_2 , indicando que as ligações entre os agregados são mais fracas do que as ligações dentro dos agregados, caracterizando, assim, a presença de uma hierarquia entre as frações. Como pode ser visto na Tabela 3, em superfície a mata nativa não apresentou hierarquia entre as frações estudadas, indicando que os macroagregados liberam diretamente agregados de tamanho silte, e silte e argila quando submetidos à energia ultrassônica. Estes resultados estão de acordo com Zhu, Field e Minasny (2010) e Oades e Water (1991) que também não observaram hierarquia entre os agregados de Latossolo.

Entretanto, o índice K_1 apresentou-se maior que o K_2 no solo sob o SDCC até 45 cm de profundidade. Isto indica que as ligações dentro dos microagregados formados pelo sistema de manejo são mais fortes que as ligações presentes nos microagregados da mata nativa, demonstrando a existência de hierarquia nos agregados do solo sob o SDCC até a profundidade destacada entre as frações avaliadas neste estudo (FIELD; MINASNY; GAGGIN, 2006).

Pode se observar na Tabela 3 que o valor da constante K_2 diminuiu quando o solo recebeu o manejo com altas doses de gesso, diferindo da mata nativa e do G0 em superfície. Ou seja, a liberação de agregados tamanho silte e partículas individuais de silte e argila é mais lenta, certamente porque os microagregados foram formados por ligações mais fortes e estáveis. Além disso, a Ecrit até os 30 cm de profundidade foi maior principalmente nas altas dosagens de gesso, onde se observou a presença de microagregados mais estáveis, sendo necessário mais de 1000 J g^{-1} para iniciar sua dispersão. Isto sugere que o produto da solubilização do gesso atua diretamente na formação e estabilização dos microagregados.

De acordo com Tisdall e Oades (1982), a floculação é o primeiro passo químico para que ocorra a agregação. De acordo com Beckett et al. (2015) o Ca^{++} é um agente floculante pois além de ser bivalente, possui um raio hidratado pequeno, o que faz com que as partículas sejam atraídas. Assim, sugere-se que o Ca^{++} liberado da dissolução do gesso atuou na formação de complexos argila-Ca-matéria orgânica de alta estabilidade (CLOUGH; SKJEMSTAD, 2000) formando microagregados que precisam de uma maior Ecrit para iniciar sua dispersão. Nesse sentido, o SDCC por não incorporar o gesso à matriz do solo se destaca, pois neste caso o cálcio é liberado gradualmente em função de condições ambientais favoráveis, fazendo com que as camadas do solo logo abaixo da amontoa recebam um aporte frequente deste elemento permitindo a formação de complexos que auxiliam na agregação.

Entretanto, na profundidade de 45 – 60 cm do solo, para todos os tratamentos, o índice K_2 foi maior que o índice K_1 , indicando que nesta profundidade não há hierarquia entre as

frações e, portanto, o conceito da E_{crit} não se aplica a esta condição. Nesta profundidade a reestruturação dos microagregados ainda não ocorreu visto que o índice K_2 é maior sob o sistema de manejo diferindo estatisticamente da mata nativa.

Tabela 3 - Índices de estabilidade de agregados K_1 , K_2 , E_{crit} , e Ca obtido através da pXRF.

Uso do Solo	K_1 10^{-3} g J^{-1}	K_2	E_{crit} J g^{-1}	Ca ppm
0 - 15 cm				
Mata	1,03 bA	1,20 aB	901,06 dB	436,43 eA
G0	1,45 aA	1,39 aA	713,79 dC	1459,76 dA
G14	0,91 bA	0,87 bB	1130,33 cA	2465,24 cA
G28	0,64 bC	0,64 bC	1614,68 aB	3931,9 bA
G56	0,85 bC	0,71 bB	1311,32 bA	4951,43 aA
15 - 30 cm				
Mata	1,17 aA	1,47 aA	774,34 dB	390,95 dA
G0	0,71 bB	0,62 cC	1539,30 bA	1356,67 cA
G14	1,14 aA	0,99 bB	948,25 dA	1470,48 cB
G28	0,58 bC	0,53 cC	1859,01 aA	1982,50 bB
G56	1,06 aC	0,65 cB	1213,15 cA	2426,90 aB
30 - 45 cm				
Mata	0,81 cB	0,65 cC	1446,81 aA	276,19 dA
G0	1,22 bA	1,05 bB	895,17 bB	937,14 cB
G14	1,20 bA	0,88 cB	975,12 bA	762,38 cC
G28	1,54 aB	1,33 aB	710,80 cC	1480,71 bC
G56	1,31 bB	0,81 cB	963,37 bB	1969,52 aC
45 - 60 cm				
Mata	0,55 dB	0,81 dC	1539,43 aA	134,05 cA
G0	0,64 dB	1,46 cA	1031,94 bB	627,62 bB
G14	1,04 cA	1,58 cA	776,97 cB	797,86 bC
G28	3,62 bA	5,34 bA	227,18 dD	1451,43 aC
G56	4,30 aA	6,40 aA	188,04 dC	1540,71 aC

K_1 – constante de desagregação; K_2 – constante de dispersão; E_{crit} – energia crítica; Ca – cálcio recuperado pela pXRF. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott 5%. Letras maiúsculas comparam as profundidades do mesmo tratamento e minúsculas comparam os tratamentos numa mesma profundidade.

Fonte: Dados da autora (2018)

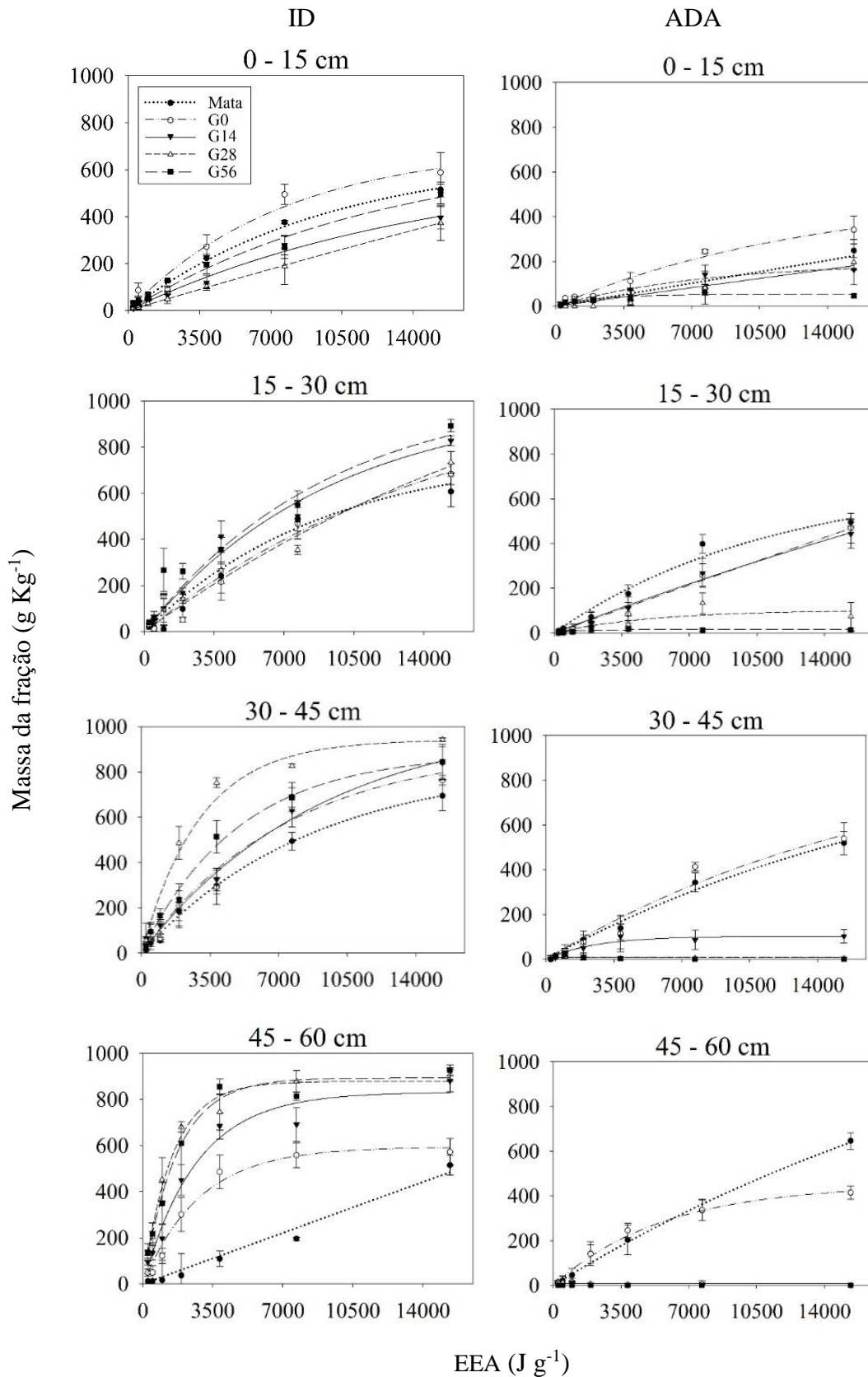
Observa-se na Figura 2 que embora o ID aumenta proporcionalmente com a energia ultrassônica aplicada, a quantidade de ADA tem um comportamento diferente do observado na literatura. Geralmente a menor quantidade de ADA é indicativa de uma maior agregação do solo, pois as partículas de argila ficam retidas nas unidades estruturais (AZEVEDO; BONUMÁ, 2004; HAO et al., 2016). Contudo, neste estudo a menor, ou até mesmo a nulidade

de ADA, nem sempre foi resultante de uma maior agregação, mas sim da precipitação dos flocos de argila provenientes de coagulação, (ABOUBARAKA; ABOELFETOH; EBEID, 2017).

Como descrito em Choumane et al. (2017) a coagulação-floculação é um processo comumente utilizado para o tratamento de água bruta e, em particular, para o tratamento de águas residuais. Inicialmente adiciona-se à suspensão um coagulante químico, como por exemplo o Sulfato de Alumínio ($Al_2(SO_4)_3$). Os coagulantes realizam a floculação das partículas, contrabalanceando as cargas dos coloides suspensos formando flocos. Estes flocos, uma vez formados, crescem e se tornam susceptíveis à ação da gravidade e, assim, precipitando no fundo dos tanques permitindo que as águas sejam filtradas. Neste estudo sugere-se que com o aumento da energia ultrassônica as partículas foram dispersas, porém a concentração eletrolítica do Ca^{++} em suspensão atuou contrabalanceando as cargas da superfície das partículas de argila formando flocos que se tornaram susceptíveis à ação da gravidade e por isso descenderam rapidamente na proveta, ao ponto que, antes mesmo do tempo de sedimentação definido com base na Lei de Stokes, as partículas já estavam todas precipitadas, como foi observado.

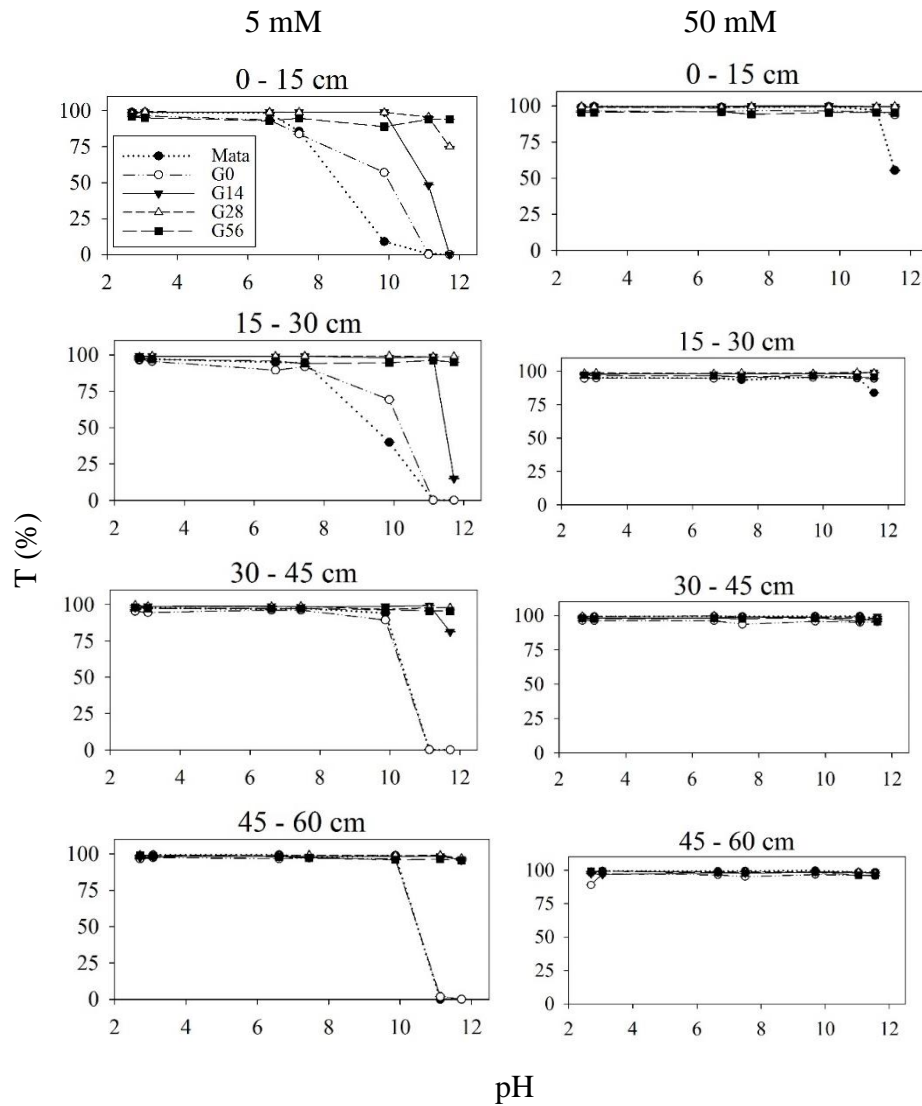
Nas provetas o pH permaneceu próximo ao da água destilada, em torno de 6,8. Ao se expandir o intervalo de pH e em baixa força iônica (5 mM) (FIGURA 3) observa-se a mesma ação do Ca^{++} em promover a formação de flocos entre as partículas de argila que se tornam susceptíveis à ação da gravidade e, com isso, precipitaram rapidamente.

Figura 2 - Relação entre a energia específica aplicada (EEA) e o Índice de Dispersão (ID) e a argila dispersa em água (ADA). As barras de erros indicam o desvio padrão (n=3).



Fonte: Dados da autora (2018)

Figura 3 - Transmitância (%) demonstrando o comportamento da fração argila na força iônica de 5 mM e 50 mM de acordo com o pH. As barras de erros indicam o desvio padrão (n=3).



Fonte: Dados da autora (2018)

Em altos valores de pH o saldo de cargas da superfície das partículas é negativo (RAIJ, 1973). A dominância de cargas repulsivas causa dispersão (SIX et al., 2004) fazendo com que as partículas fiquem em suspensão. Isto foi observado na mata nativa, principalmente em superfície onde as cargas negativas da matéria orgânica potencializaram a repulsão e as partículas de argila ficaram em suspensão diminuindo a transmitância.

Por outro lado, observou-se que a medida que o teor de Ca^{++} aumentou na suspensão, função de doses mais elevadas de gesso, as cargas negativas ficaram contrabalanceadas e a precipitação ocorreu mesmo nos mais altos valores de pH; ação semelhante foi observada por

Fontes, Camargo e Sposito (2001) quando utilizaram força iônica de 50 mM. É importante salientar que uma alta força iônica comprime a dupla camada difusa das partículas de argila fazendo com que elas se aproximem, formem flocos e, então, precipitem. A ação do Ca^{++} neste estudo assemelhou-se à alta força iônica de 50 mM em que a transmitância esteve bem próxima de 100% em ambas as situações.

4 CONCLUSÕES

O SDCC, mesmo após 8 anos de sua implantação, coloca em prática as premissas de sustentabilidade e conservação indicadas na sua filosofia de criação. O trabalho permitiu elucidar os mecanismos envolvidos na formação dos agregados do solo quando submetidos ao SDCC e às altas doses de gesso. Após 8 anos da implantação do sistema, o gesso ainda continua atuando ao longo do perfil do solo. O gesso contribui indiretamente para a formação de macroagregados, e diretamente na estabilização de microagregados através da ação complexante do Ca^{++} . Ressalta-se que para a implantação do SDCC deve-se levar em consideração a adição de doses de gesso para melhor condicionamento do solo. Uma menor ADA nem sempre indica uma maior estabilidade dos agregados.

REFERÊNCIAS

- ABOUBARAKA, A. E.; ABOELFETO, E. F.; EBEID, E. M. Coagulation effectiveness of graphene oxide for the removal of turbidity from raw surface water. **Chemosphere**, v. 181, p. 738 – 746, 2017.
- 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.
- BECKETT, C. T. S.; SMITH, J. C.; CIANCIO, D.; AUGARDE, E. Tensile strengths of flocculated compacted unsaturated soils. **Géotechnique Letters**, v. 5, p. 254–26, 2015.
- BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Particle density. In: KLUTE, A., ed. **Methods of soil analysis**. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, v.1, p.377-82, 1986.
- BRANDÃO, E. D.; SILVA, I. F. Formação e estabilização de agregados pelo sistema radicular de braquiária em um Nitossolo Vermelho. **Ciência Rural**, v. 42, n. 7, 2012.
- BONINI, C. dos S. B.; ALVES, M. C. Estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho degradado em recuperação com adubos verdes, calcário e gesso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 1263-1270, 2011.
- CAIRES, E. F.; BLUM, J.; BARTH, G.; GARBUIO, F. J.; KUSMAN, M. T. Alterações químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na implantação do sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 275-286, 2003.
- CARDUCCI, C. E.; OLIVEIRA, G. C. de.; LIMA, J. M.; ROSSONI, D. F.; COSTA, A. L.; OLIVEIRA, L. M. Distribuição espacial das raízes de cafeeiro e dos poros de dois Latossolos sob manejo conservacionista. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 3, p. 270–278, 2014.
- CARDUCCI, C. E.; OLIVEIRA, G. C. de.; SEVERIANO, E. da C.; ZEVIANI, W. M. Modelagem da curva de retenção de água de Latossolos utilizando a equação duplo Van Genuchten. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 77-86, 2011.
- CARDUCCI, C. E.; OLIVEIRA, G. C. de.; ZEVIANI, W. M.; LIMA, V. M. P.; SERAFIM, M. E. Bimodal pore distribution on soils under conservation management system for coffee crop. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 33, n. 2, p. 291-302, mar./abr. 2013.
- CARDUCCI, C. E.; OLIVEIRA, G. C. de.; OLIVEIRA, L. M.; BARBOSA, S. M.; SILVA, E. A. Retenção de água do solo sob sistema conservacionista de manejo com diferentes doses de gesso. **Revista Ciências Agrárias**, v. 58, n. 3, p. 284-291, jul./set. 2015.
- CHOUMANE, F. Z.; BENGUELLA, B.; MAACHOUA, B.; SAADI, N. Valorisation of a bioflocculant and hydroxyapatites as coagulation-flocculation adjuvants in wastewater treatment of the steppe in the wilaya of Saida (Algeria). **Ecological Engineering**, v. 107, p. 152–159, 2017.
- CLOUGH, A.; SKJEMSTAD, J. O. Physical and chemical protection of soil organic carbon in three agricultural soils with different contents of calcium carbonate. **Australian Journal of Soil Research**, v. 38, p. 1005–1016, 2000.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Uso agrícola dos solos brasileiros**. 1.ed. . – Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002.
- 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.; GAGGIN, M. Modelling aggregate liberation and dispersion of three soil types exposed to ultrasonic agitation. **Australian Journal of Soil Research**, v. 44, p. 497–502, 2006.

- FIELD, D. J.; MINASNY, B. A description of aggregate liberation and dispersion in A horizons of Australian Vertisols by ultrasonic agitation. **Geoderma**, v. 91, p. 11 – 26, 1999.
- FONTES, M. P. F.; CAMARGO, O. A.; SPOSITO, G. Eletroquímica das partículas coloidais e sua relação com a mineralogia de solos altamente intemperizados. **Scientia Agrícola**, v. 58, n. 3, p. 627-646, jul./set. 2001.
- GEE, G. W.; BAUDER, J. W. **Particle-size analysis**. In: Methods of soil analysis. Part 1, 2nd ed., Madison, American Society of Agronomy, p. 383-411, 1986.
- GUIMARÃES, P. T. G. et al. Cafeeiro. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVARES, V. H. (Eds.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, MG: UFV, p. 289-302, 1999.
- HAO, Y.; YANG, Y.; LIU, B.; LIU, Y.; GAO, X.; GUO, Q. Size characteristics of sediments eroded from three soils in China under natural rainfall. **Journal of Soils and Sediments**, v. 16, p. 2153–2165, 2016.
- HARIDASAN, P. P.; MANIYAN, C. G.; PILLAI, P. M. B.; KHAN, A. H. Dissolution characteristics of 226Ra from phosphogypsum. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 62, p. 287–294, 2002.
- INAGAKI, T. M.; SÁ, J. C. M.; CAIRES, E. F.; GONÇALVES, D. R. P. Why does carbon increase in highly weathered soil under no-till upon lime and gypsum use? **Science of the Total Environment**, v. 599–600, p. 523–532, 2017.
- 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. 1, p. 1-19, 2002.
- MILORI, D. M. B. P.; GALETI, H. V. A.; MARTIN-NETO, L.; DIECKOW, J.; GONZÁLEZ-PÉREZ, M.; SALTON, J. Organic Matter Study of Whole Soil Samples Using Laser-Induced Fluorescence Spectroscopy. **Soil Science Society of America Journal**, v. 70, p. 57-63, 2006.
- OADES, J. M. Mucilages at the root surface. **Journal of Soil Science**, v. 29, p. 1-16, 1978.
- OADES, J. M.; WATERS, A. C. Aggregate hierarchy in soils. **Australian Journal of Soil Research**, v. 29, p. 815–828, 1991.
- PAVAN, M. A.; BINGHAM, F. T.; PRATT, P. F. Redistribution of exchangeable calcium, magnesium, and aluminum following lime or gypsum applications to a Brazilian Oxisol. **Soil Science Society of America Journal**, v. 48, p. 33-38, 1984.
- PARREIRA, A. B.; KOBAYASHI, A. R. K.; SILVESTRE JÚNIOR, O. B. Influence of Portland cement type on unconfined compressive strength and linear expansion of cement-stabilized phosphogypsum. **Journal of Environmental Engineering**, v. 129, p. 956–960, 2003.
- RAIJ, B. V. Determinação do ponto de carga zero em solos. **Bragantia**, v. 32, n. 18, 1973.
- RAMOS, Z. B.; TOLEDO, J. P. V. F.; LIMA, J. M. de L.; SERAFIM, M. E.; BASTOS, A. R. R.; GUIMARÃES, P. T. G.; COSCIONE, A. R. Doses de gesso em cafeeiro: influência nos teores de cálcio, magnésio, potássio e ph na solução de um Latossolo Vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, p. 1018-1026, 2013.
- RAMPIM, L.; LANA, M. do C.; FRANDOLOSO, J. F.; FONTANIVA, S. 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, p. 1687-1698, 2011.
- RESENDE, M.; BAHIA FILHO, 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**, v. 11, p. 17–23, 1987.

RIBEIRO, B. T.; LIMA, J. M.; CURI, N.; OLIVERA, G. C. Aggregate breakdown and dispersion of soil samples amended with sugarcane vinasse. **Scientia Agricola**, v. 70, n. 6, p. 435-441, 2013.

SÁ, M. A. C. de.; LIMA, J. M. de.; LAGE, G. Procedimento-padrão para medida da potência liberada pelo aparelho de ultra-som. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 24, p. 300-306, 2000.

SÁ, M. A. C.; LIMA, J. M.; SILVA, M. L. N.; DIAS JÚNIOR, M. S. Índice de desagregação do solo baseado em energia ultra-sônica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 3, p. 525-531, jul./set. 1999.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. et al. **Sistema Brasileiro de classificação do solo**. 3.ed. Brasília: Embrapa Solos, 2013. 353p.

SANTOS, W. J. R.; SILVA, B. M.; OLIVEIRA, G. C. de.; VOLPATO, M. M. L.; LIMA, J. M.; CURI, N.; MARQUES, J. J. Soil moisture in the root zone and its relation to plant vigor assessed by remote sensing at management scale. **Geoderma**, v. 221-222, p. 91-95, 2014.

SCHOMAKERS, J.; MENTLER, A.; STEURER, T.; KLIK, A.; MAYER, H. Characterization of soil aggregate stability using low intensity ultrasonic vibrations. **International Agrophysics**, v. 25, p. 165-172, 2011.

SERAFIM, M. E.; LIMA, J. M. de.; LIMA, V. M. P.; ZEVIANI, W. M.; PESSONI, P. T. Alterações físico-químicas e movimentação de íons em Latossolo gibbsítico sob doses de gesso. **Bragantia**, Campinas, v. 71, n. 1, p.75-81, 2012.

SERAFIM, M. E.; OLIVEIRA, G. C. de.; CURI, N.; LIMA, J. M. de.; GUIMARÃES, P. T. G.; LIMA, V. M. P. 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./Dec. 2013.

SERAFIM, M. E.; OLIVEIRA, G. C.; OLIVEIRA, A. S.; LIMA, J. M.; GUIMARAES, P. T. G.; COSTA, J. C. Sistema conservacionista e de manejo intensivo do solo no cultivo de cafeeiros na Região do Alto São Francisco, MG: um estudo de caso. **Bioscience Journal** (UFU. Impresso), v. 27, p. 971-984, 2011.

SILVA, E. A.; OLIVEIRA, G. C. de.; SILVA, B. M.; CARDUCCI, C. E.; AVANZI, J. C.; SERAFIM, M. E. Aggregate stability by the "high energy moisture characteristic" method in an oxisol under differentiated management. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 1633-1642, 2014.

SILVA, E. A.; OLIVEIRA, G. C. de.; CARDUCCI, C. E.; SILVA, B. M.; OLIVERA, L. M. de.; COSTA, J. C. Increasing doses of agricultural gypsum, aggregate stability and organic carbon in Cerrado Latosol under Coffee crop. **Revista Ciência Agrárias**, v. 56, n. 1, p. 25-32, jan./mar. 2013.

SILVA, B. M.; OLIVEIRA, G. C. de.; SERAFIM, M. E.; SILVA, E. A.; FERREIRA, M. M.; NORTON, L. D.; CURI, N. Critical soil moisture range for a coffee crop in an oxidic latosol as affected by soil management. **Soil and Tillage Research**, v. 154, p. 103-113, 2015.

SILVA, E. 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. Stability of soil aggregates in Latosols and Cambisols via standard method and sonification. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11(39), p. 3894-3903, 2016b.

SILVA, S. H. G.; TEIXEIRA, A. F. dos S.; MENEZES, M. D. de.; GUILHERME, L. R. G.; MOREIRA, F. M. de S.; CURI, N. Multiple linear regression and random forest to predict and map soil properties using data from portable X-ray fluorescence spectrometer (pXRF). **Ciência e Agrotecnologia**, v. 41(6), p. 648-664, Nov/Dec. 2017.

- SIX, J.; BOSSUYT, H.; DEGRYZE, S.; DENEFF, K. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. **Soil and Tillage Research**, v. 79, p. 7–31, 2004.
- SIX, J.; ELLIOT, E. T.; PAUSTIAN, K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 32, p. 2099 – 2103, 2000.
- SORATTO, R.P.; CRUSCIOL, C. A. C. Atributos químicos do solo decorrentes da aplicação em superfície de calcário e gesso em sistema plantio direto recém-implantado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 675-688, 2008.
- SUN, B.; POSS, R.; MOREAU, R.; AVENTURIER, A.; FALLAVIER, P. Effect of slaked lime and gypsum on acidity alleviation and nutrient leaching in an acid soil from Southern China. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 57, p. 215–223, 2000.
- TISDALL, J. M., OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science**, v. 33, p. 141-163, 1982.
- ZHU, Z. L.; MINASNY, B.; FIELD, D. J. Measurement of aggregate bond energy using ultrasonic dispersion. **European Journal of Soil Science**, August, v. 60, p. 695–705, 2009.
- ZHU, Z. L.; MINASNY, B.; FIELD, D. J. Measuring and modelling the actual energy involved in aggregate breakdown. **Catena**, v. 82, p. 53–60, 2010.