



CARLA ELOIZE CARDUCCI

**TOMOGRAFIA COMPUTADA DE RAIOS-X NA
AVALIAÇÃO DA POROSIDADE DE
LATOSSOLOS E SUA RELAÇÃO COM O
DESENVOLVIMENTO RADICULAR DE
CAFEEIROS**

LAVRAS - MG

2013

CARLA ELOIZE CARDUCCI

**TOMOGRAFIA COMPUTADA DE RAIOS-X NA AVALIAÇÃO DA
POROSIDADE DE LATOSSOLOS E SUA RELAÇÃO COM O
DESENVOLVIMENTO RADICULAR DE CAFEEIROS**

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 Doutor.

Orientador

Dr. Geraldo César de Oliveira

LAVRAS – MG

2013

**Ficha Catalográfica Elaborada pela Coordenadoria de Produtos e
Serviços da Biblioteca Universitária da UFLA**

Carducci, Carla Eloize.

Tomografia computada de raios-X na avaliação da porosidade de latossolos e sua relação com o desenvolvimento radicular de cafeeiros / Carla Eloize Carducci. – Lavras : UFLA, 2013.

146 p. : il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 2013.

Orientador: Geraldo César de Oliveira.

Bibliografia.

1. Qualidade estrutural. 2. Sistema de cultivo conservacionista.
3. Distribuição de poros. 4. Geoestatística. 5. Random Forest. 6.
Manejo do solo na cafeicultura. I. Universidade Federal de Lavras.
II. Título.

CDD – 631.432

CARLA ELOIZE CARDUCCI

**TOMOGRAFIA COMPUTADA DE RAIOS-X NA AVALIAÇÃO DA
POROSIDADE DE LATOSSOLOS E SUA RELAÇÃO COM O
DESENVOLVIMENTO RADICULAR DE CAFEEIROS**

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 Doutor.

APROVADA em 03 de setembro de 2013.

| | |
|---------------------------------------|--------|
| Dr. Carlos Rogério de Mello | UFLA |
| Dr. João Tavares Filho | UEL |
| Dr. Mozart Martins Ferreira | UFLA |
| Dr. Nilton Curi | UFLA |
| Dr. Paulo de Tácito Gontijo Guimarães | EPAMIG |
| Dr. Walmes Marques Zeviani | UFPR |

Dr. Geraldo César de Oliveira
Orientador

LAVRAS - MG

2013

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela certeza de que esta comigo durante toda minha caminhada.

A minha família pelo apoio e confiança, e por sempre me perguntarem: Por que você estuda tanto? Hoje posso responder com essa conquista...

À Universidade Federal de Lavras e ao Departamento de Ciência do Solo pela oportunidade de realização do curso de Doutorado.

Ao conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa do doutorado.

A Fundação De Amparo À Pesquisa Do Estado De Minas Gerais – Fapemig pelo apoio financeiro nos projetos e pela bolsa sanduiche que me permitiu realizar parte do doutorado na University of Guelph, Guelph-ON, Canadá.

A Embrapa café pelo apoio logístico.

Ao amigo, conselheiro, Prof. Dr. Geraldo César de Oliveira, por todos os ensinamentos, confiança e paciência.

Aos coorientadores e conselheiros de toda a jornada acadêmica e profissional, Prof. Dr. Nilton Curi e Prof. Dr. José Maria de Lima.

A todos os professores da UFLA que participaram da minha formação.

Aos técnicos dos laboratórios de Conservação do Solo e Água e Física do Solo, pelo apoio. E todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para à realização deste trabalho.

A Empresa AP - Agropecuária Piumhi pelo apoio em toda a execução deste trabalho, em especial a Eng^o Agr. Msc. Joyce Cristina Costa e ao Eng^o Agrônomo Alessandro S. De Oliveira.

Aos amigos queridos que encontrei aqui em Lavras-MG, e que são muitos, pela amizade, pela convivência agradabilíssima, pelos nossos momentos de enriquecimento cultural, científico e momentos de passar momentos...

RESUMO GERAL

Os sistemas de manejo agrícola por alterarem os atributos físicos do solo, reorganizam a distribuição espacial do diâmetro dos poros, especialmente os interagregados, onde ocorrem todos os processos dinâmicos do solo, além de permitirem o crescimento das raízes das plantas. Objetivou-se, neste estudo, quantificar a variabilidade espacial da distribuição dos poros em Latossolos, por meio da tomografia computada de raios-X, e pelo método do perfil cultural, avaliar as relações com o desenvolvimento radicular do cafeeiro sob um sistema de manejo que utiliza sulco profundo de plantio, cultura de cobertura na entrelinha e gesso agrícola adicional na superfície do solo. Foram realizados dois experimentos, um em lavoura comercial com seis anos em Latossolo gibbsítico e outro caulínítico e outro em lavoura experimental, com três anos, em Latossolo gibssítico, ambos conduzidos pelo sistema citado acima. Para ambos os estudos, foram abertas trincheiras longitudinais à linha de plantio, onde amostras de solo com estrutura preservada foram coletadas nas profundidades de 20-34; 80-94 e 150-164 cm, em três repetições. Na lavoura experimental, foram selecionados os seguintes tratamentos: G0: ausência de gesso adicional; G7: 7 Mg ha⁻¹ e G28: 28 Mg ha⁻¹ de gesso adicional aplicado na superfície do solo na linha de plantio. Nos dois estudos, os poros foram quantificados com base em imagens 3D, obtidas por meio da tomografia de raios-X. Com vistas à possível relação da distribuição dos poros com o crescimento das raízes do cafeeiro foi avaliada a distribuição do sistema radicular, pelo método do perfil cultural. Utilizou-se um gride (70 cm x 150 cm, espaçado em quadrículas de 5 x 5 cm), para determinação das variáveis radiculares: área superficial (mm²), comprimento (mm) e volume (mm³), obtidos em diferentes diâmetros de raízes. Nos dois estudos a maior variabilidade espacial da estrutura do solo ocorreu na direção horizontal (X e Y), em todos os eventos avaliados e melhor continuidade dos poros na direção vertical (Z), devido ao efeito conjunto das práticas adotadas pelo sistema de manejo. No primeiro estudo, a distribuição dos poros visíveis foi distinta entre os Latossolos, principalmente na profundidade de 20-34 cm. Com a diminuição do volume de poros de diâmetro menor que 0,4 mm, estes tenderam a maior esfericidade no Latossolo gibbsítico. No segundo estudo, verificou-se que as doses crescentes de gesso favoreceram o desenvolvimento de raízes mais finas, além de uma distribuição espacial mais homogênea e verticalizada do sistema radicular. A distribuição mais homogênea do volume dos poros visíveis, em cada classe, ocorreu no G7 especialmente a 20-34 cm de profundidade, porém o maior número e volume de poros foram detectados no G28, na profundidade de 20-34 cm.

Palavras-chave: Variabilidade estrutural. Distribuição de poros. Continuidade espacial. Imagem tridimensional. Manejo do solo na cafeeicultura.

GENERAL ABSTRACT

The agricultural management systems, by altering the soil's physical attributes, reorganize the spatial distribution of the pore diameter, especially those with inter-aggregate, in which all of the dynamic processes of the soil occur, in addition to allowing the growth of plant roots. The objective of this study was to quantify the spatial variability of pore distribution in Latosols (Oxisols) by means of CT X-ray scan and by the soil profile method in order to evaluate the relations with coffee root development under a management system using deep groove planting, cover crop between rows and gypsum added to the soil surface. Two experiments were conducted, one in a six year old commercial crop in gibbsite and kaolin Latosol, and the other in a three year old experimental crop in gibbsite Latosol, both conducted by the system quoted above. For both studies, trenches were dug lengthwise to the planting row, in which samples of soil with preserved structure were collected at the depths of 20-34, 80-94 and 150-164 cm, in three replicates. In the experimental crop, we selected the following treatments: G0 - absence of additional gypsum; G7 - 7 Mg ha⁻¹ and G28 - 28 Mg ha⁻¹ of gypsum added to the soil surface on the planting row. In both studies, the pores were quantified based on 3D images obtained by the CT X-ray scan. Viewing the possible relation of pore distribution with the growth of coffee roots, we evaluated the root system distribution by means of the soil profile method. We used a sampling grid (70 cm x 150 cm, spaced in squares of 5 x 5 cm) to determine the root variables: surface area (mm²), length (mm) and volume (mm³) obtained in different root diameters. In both studies, the larger soil structure spatial variability occurred in the horizontal direction (X and Y) in all evaluated events, in addition to better pore continuity in the vertical direction (Z), due to the combined effect of the practices adopted by the management systems. In the first study, the visible pore distribution was different between the Latosols, especially in the depth of 20-34 cm. With the decrease in the volume of pores with diameter smaller than 0.4 mm, these tended to a higher sphericity in the gibbsite Latosol. In the second study, we verified that increasing doses of gypsum favored the development of thinner roots, in addition to a more homogeneous vertical spatial distribution of the root system. The more homogeneous distribution of pore volume in each class occurred in G7, especially at 20-34 cm of depth, however, the greatest number and volume of pores were detected in G28 at a depth of 20-34 cm.

Keywords: Structural variability. Pore distribution. Spatial continuity. Three-dimensional images. Coffee crop soil management system.

SUMÁRIO

| | |
|-----------------------|---|
| PRIMEIRA PARTE | |
| 1 | INTRODUÇÃO 8 |
| 2 | REFERENCIAL TEÓRICO 13 |
| 2.1 | Sistema conservacionista de manejo do solo na cafeicultura..... 13 |
| 2.2 | Relação do sistema radicular do cafeeiro com os atributos físicos do solo 17 |
| 2.3 | Uso da tomografia computada na avaliação da estrutura do solo..... 22 |
| 3 | CONSIDERAÇÕES FINAIS..... 27 |
| | REFERÊNCIAS 28 |
| | SEGUNDA PARTE - ARTIGOS 39 |
| | ARTIGO 1 Scaling of pores in 3D images of latosols (Oxisols) with contrasting mineralogy under conservationist management system..... 39 |
| | ARTIGO 2 Variabilidade espacial de poros 3D de um latossolo oxidico sob um sistema de manejo com diferentes doses de gesso..... 71 |
| | ARTIGO 3 Distribuição do sistema radicular do cafeeiro e dos poros de latossolo sob manejo com diferentes doses de gesso..... 111 |

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO

As inovações tecnológicas relativas ao uso de insumos e de máquinas agrícolas posicionam o Brasil como uma grande potencia agrícola mundial (TOLLEFSON, 2010). Isso viabiliza a expansão da fronteira agrícola no País, com destaque para a região do Bioma Cerrado, onde estão inseridos mais de 50% dos Latossolos que, apesar de apresentarem restrições de ordem química (SOUZA et al., 2003) possuem atributos físicos que, aliados à topografia suavizada (RESCK; PEREIRA; SILVA, 1991), apresentam elevado potencial ao desenvolvimento de uma agricultura altamente tecnificada.

Dessa forma, a cafeicultura no Brasil destaca-se na região pela significativa importância econômica e pela grande área de cultivo, com destaque para o estado de Minas Gerais que é o maior produtor do país, com mais de 50 % da produção total (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2012), sendo grande parte da área cultivada em solos presentes no Cerrado.

Para elevar a produtividade e se manterem competitivos com o mercado externo os produtores precisam ser cada vez mais eficientes no manejo e conservação do solo e da água, para melhorar a qualidade físico-hídrica e química do solo, com vistas à sustentabilidade do agroecossistema (ALBIERO, 2013).

Neste contexto, o emprego de sistemas de manejo que visam aumentos da produção aliados a padrões normalmente encontrados na literatura que evidenciam uma possível qualidade estrutural do solo e sustentabilidade, têm ganhado notoriedade.

Na região do Cerrado mineiro, mais precisamente na região do Alto São Francisco, um sistema de manejo vem sendo utilizado com o propósito de buscar melhorias do ambiente radicular do cafeeiro e para isso propõe-se o uso de correções químicas e fertilizações em sulcos profundos de plantio, bem como o emprego de doses de gesso agrícola na superfície do solo, fato ainda muito polêmico no século XXI, a fim de potencializar o desempenho radicular com vistas ao melhor aproveitamento da água disponível em profundidade e uso eficiente dos nutrientes, porventura lixiviados, da camada superficial (SERAFIM et al., 2011).

Em princípio, essas melhorias reduzem as limitações químicas e físico-hídricas dos solos da região, tornando viável o cultivo empresarial de cafeeiros em condições de sequeiro. Entretanto, pesquisas usando ferramentas com alto poder de predição precisam ser utilizadas para confirmar se realmente os ganhos no desenvolvimento radicular das plantas justificam o alto custo do referido sistema de manejo.

Algumas investigações relacionadas ao condicionamento físico-hídrico de diferentes classes de solos em lavouras comerciais e sob as premissas desse sistema já foram realizadas. Serafim et al. (2011, 2013) evidenciaram que as práticas de manejo adotadas no sistema apresentam potencial para reduzir limitações relacionadas ao déficit hídrico das classes de solos da região, haja visto o significativo conteúdo de água encontrado em profundidade. Dessa forma, em princípio é possível inferir que, essas práticas de manejo que compõem o sistema, convergem para a desejável sustentabilidade ambiental, assegurando particularmente o uso mais racional da água, notadamente na bacia do rio São Francisco.

Em Latossolos com mineralogia contrastante, sob lavouras comerciais conduzida pelo mesmo sistema de manejo, Carducci et al. (2013) quantificaram um grande volume de poros estruturais (macroporos) e, também um grande

volume de poros texturais (microporos) , com base no estudo da curva de retenção de água, o que caracterizou a bimodalidade desses solos e justificou a baixa disponibilidade de água dos mesmos pela baixa proporção de mesoporos.

Segundo os autores citados acima, neste estudo foram observadas diferenças contrastantes entre as profundidades (20, 40, 80, 120, 160 cm) nas posições linha e entrelinha. Ficou clara a grande quantidade de água retida, além dos valores elevados do parâmetro que indicam a qualidade física do solo (I_{est} ou índice S), o que está relacionado com a grande quantidade de poros em baixa tensão matricial, o que aponta para a excelente qualidade física desses solos, sob o referido manejo.

No que diz respeito ao condicionamento químico do Latossolo gibbsítico, na mesma área experimental aqui discutida, Ramos (2012) encontrou valores crescentes de cálcio trocável, de acordo com as doses de gesso aplicadas, variando de 2 a 22 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ após 16 meses de implantação, em seu trabalho de especiação química.

As formas livres de sulfato (SO_4^{-2}), cálcio (Ca^{+2}) e magnésio (Mg^{+2}) trocáveis foram predominantes na solução do solo e seus pares iônicos atingiram a profundidade de 75-85 cm, minimizando a crítica relativa à lixiviação potencial de nutrientes carregados pelo SO_4^{-2} contido no gesso, visto que, nessa profundidade, Serafim et al. (2011) encontraram uma grande concentração de raízes do cafeeiro, o que será corroborado pelas constatações que aqui serão apresentadas. Nesta profundidade, também foram encontrados níveis adequados de cálcio ($\approx 1,4 \text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$) que garantiram o crescimento radicular (RAMOS et al., 2013).

Por outro lado, Silva et al. (2013) encontraram a 15 cm de profundidade valores de Ca^{+2} , variando até 48 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ após $\approx 2,5$ anos da implantação da lavoura nessa mesma área experimental, o que evidencia a solubilização

gradativa do gesso colocado na superfície do solo, provavelmente por funcionar como um reservatório.

Ao estudar a disponibilidade hídrica do solo para o cafeeiro, Silva (2012), trabalhando com monitoramento da umidade do solo com sondas de multisensores, na mesma área experimental, verificou que a camada mais superficial do solo é a que apresenta maior variabilidade do conteúdo de água no solo, e foi na camada de 50 a 75 cm onde foi encontrado o menor conteúdo de água, em média, sugerindo que é nessa camada que ocorre a maior absorção de água pelas plantas, função da maior atividade do sistema radicular. Observação que precisa ser melhor investigada, utilizando-se técnicas mais refinadas. O autor ainda cita que abaixo de 100 cm foi encontrada água disponível para as plantas na fase mais crítica do ano de 2010, que foi considerado como muito seco.

Isto demonstra a importância de se avaliar a distribuição das raízes do cafeeiro, ao longo do perfil, pela análise digital de imagens 2D, o que permite a distinção entre raízes de diferentes diâmetros, com possibilidades de subsidiar estudos de fisiologia de raízes que poderão elucidar o potencial de aproveitamento de água e de nutrientes redistribuídos, pelas plantas, com efeito na redução de estresse hídrico e ganhos de produtividade, quando se sabe que, na região em estudo, o período seco é extenso e são muito comuns períodos de veranico na época de chuvas.

A partir dos estudos relatados, alguns questionamentos foram respondidos, porém, novos questionamentos surgiram. Para melhor descrever o desenvolvimento radicular do cafeeiro e definir a realidade dos processos dinâmicos que ocorrem no sistema poroso dos Latossolos, sob o sistema em estudo, é exigido um maior nível de detalhamento em microescala das alterações promovidas pelas práticas empregadas.

Para isso, a presente tese buscou, por meio do uso de tomografia computada de raios-X, visualizar e quantificar as possíveis interferências provocadas pelo sistema na organização microestrutural desses solos, por ser fator de intervenção em uma vasta gama de processos dinâmicos que interagem no solo e, desses solos com o desenvolvimento radicular.

A técnica da tomografia computada de raios-X possibilita o mapeamento tridimensional dos componentes estruturais do solo, o que permite uma avaliação tanto qualitativa como quantitativa (BORGES; PIRES, 2012; SANDER; GERKE; ROGASIK, 2008). Além disso, essa será associada ao estudo da distribuição do sistema radicular do cafeeiro, pela análise do perfil cultural, para detectar mudanças morfológicas das raízes do cafeeiro, ao longo do perfil do solo.

Assim, no presente trabalho, objetivou-se avaliar os efeitos de um sistema de manejo do solo que associa práticas de preparo do solo, com a aplicação de gesso adicional na superfície do solo, na organização microestrutural de Latossolos e a influência desse sistema no desenvolvimento radicular do cafeeiro, por meio da análise de imagens 2 e 3D geradas pela tomografia computada de raios-X e pela análise do perfil cultural.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O monitoramento da qualidade do solo é importante para a manutenção da sustentabilidade dos agroecossistemas, propiciando melhor qualidade dos produtos agrícolas, redução da compactação pela entrada de máquinas em baixo conteúdo de água, criação de ambientes mais saudáveis para o homem e a racionalização no uso dos recursos naturais o que, conseqüentemente, reduzirá a degradação ambiental (DORAN; PARKIN, 1994).

2.1 Sistema conservacionista de manejo do solo na cafeicultura

Cerca de 2,34 milhões de hectares de terras são cultivados com cafeicultura no País. Desses, em Minas Gerais concentra-se a maior área plantada, com cerca 1,20 milhão de hectares cultivados em sua maioria pela espécie arábica, o que faz dessa cultura uma das principais *commodities* brasileiras. Na safra de 2012, foram produzidas 50,48 milhões de sacas o que superou as expectativas do mercado ao se sobressair à safra de 2002/2003, considerada recorde até então (CONAB, 2012).

Dessa forma, o agronegócio cafeeiro é um dos principais responsáveis pela ascensão econômica e social do País, especialmente nas regiões produtoras, com destaque para o Brasil que lidera, há mais de dois séculos, a produção mundial de café beneficiado. O estado de Minas Gerais é o principal produtor brasileiro, respondendo por mais de 50 % da produção nacional, além de liderar as pesquisas que destacam a geração de novas tecnologias que são rapidamente incorporadas aos sistemas de produção, garantindo a máxima eficiência, produtividade e qualidade do produto final. Dessa forma, as estruturas dos sistemas produtivos e do manejo das lavouras são aprimoradas, o que garante

uma produção socialmente justa, ambientalmente sustentável, economicamente viável e, culturalmente aceitável (ARAÚJO-JUNIOR et al., 2011).

Entretanto, para manter a competitividade com o mercado internacional, os cafeicultores precisam se enquadrar em algumas exigências impostas pelos consumidores mundiais. Dentre as exigências a serem cumpridas, destacam-se os critérios sócioambientais e os métodos que considerem a conservação da biodiversidade e suas condições de sobrevivência para promover um manejo sustentável, proporcionando melhoria ou manutenção da estrutura dos solos (ARAÚJO-JUNIOR et al., 2008).

A sustentabilidade da cafeicultura nacional depende, no entanto, do retorno econômico ao produtor como forma de garantir sua permanência no mercado cafeeiro. Fato esse associado aos sistemas de cultivo que proporcionam maior longevidade para as lavouras e produtividades elevadas ao longo dos anos (PETEK; PATRÍCIO, 2007), já que, com o uso dos sistemas convencionais de manejo na cafeicultura, esse retorno normalmente não tem sido almejado por apresentarem como principais pontos fracos a baixa capacidade de utilização dos recursos naturais renováveis e a perda gradual dos recursos naturais de baixa renovabilidade (SARCINELLI; RODRIGUES, 2006).

Neste sentido, o cafeicultor tem demonstrado muita disposição em adotar novas tecnologias ou adaptá-las, em alguns casos e, mesmo desenvolver suas próprias tecnologias para contornar as adversidades, a exemplo dos produtores da região do Cerrado em Minas Gerais, especialmente da região do Alto São Francisco, cujo maior problema está relacionado com períodos de seca e veranicos prolongados que contribuem para que ocorra déficit hídrico para as plantas. Salienta-se que, nessa região, os Latossolos são maioria e apresentam problemas relacionados à baixa fertilidade natural e toxidez por alumínio (PEREIRA et al., 2010; RAIJ, 2008) o que limita o desenvolvimento radicular e o acesso à água retida no perfil (CARDUCCI et al., 2011). As chuvas nessa

região são concentradas em apenas seis meses do ano e no período mais seco, as camadas superficiais do solo normalmente apresentam conteúdos de água abaixo do ponto de murcha permanente (RENA; GUIMARÃES, 2000).

Existem práticas de manejo do solo que visam à correção dos problemas de ordem química (baixa fertilidade) e física (compactação) que possibilitam o desenvolvimento do sistema radicular em profundidade, atuando no sentido de melhorar o aproveitamento das potencialidades intrínsecas do solo em fornecer água para as plantas, o que pode minimizar e até mesmo solucionar os efeitos de escassez de água na região do Cerrado.

O plantio de cafeeiros no país, preferencialmente situa-se em regiões em que as condições climáticas e o balanço hídrico são favoráveis. Dessa forma, regiões com estiagem prolongada, como a região do Cerrado brasileiro, foram por muito tempo, marginalizadas para a cafeicultura, porém com o progresso técnico-científico e a utilização de práticas agrícolas modernas, essas regiões estão sendo gradativamente incorporadas ao cultivo, tanto para *C. arábica*, quanto para *C. canephora* (MARTINS et al., 2007).

A cafeicultura da região do Alto São Francisco, devido às limitações de precipitação, tem sua viabilidade atrelada à recomendação de irrigação (MARTINS et al., 2007). Entretanto, como em muitas propriedades não existem reservas adequadas de água para irrigação, ou mesmo disponibilidade econômica, a adoção de sistemas de cultivo capazes de mitigar o déficit hídrico, como, por exemplo, a preservação ou a melhoria da qualidade física e química do solo, se torna imperativa. Foi dessa forma que, nesta região, surgiu o sistema que emprega práticas de manejo do solo para o cultivo de cafeeiros. Isso foi desenvolvido e, vem sendo praticado em propriedades agrícolas, nos municípios de São Roque de Minas, Vargem Bonita e Piumhi, além de outras regiões nos estados de Minas Gerais e São Paulo.

Esse sistema é caracterizado pela preparação, correção e adubação do sulco de plantio muito profundo (60 cm), cultivo de cultura de cobertura nas entrelinhas dos cafeeiros, aplicação de altas doses de gesso agrícola (7 kg m^{-1}) na superfície do solo e na linha de plantio. Posteriormente, a aplicação do gesso agrícola é realizado o processo de amontoa na linha de cultivo, configurado como uma leira ou 'chegada de terra', e que apresenta, aproximadamente, 50 cm de altura, funcionando como um protetor ou mesmo reservatório de gesso adicionado na superfície do solo (SERAFIM, 2011).

Outros pontos marcantes do sistema são: o plantio semiadensado com estande médio de 5.333 plantas por hectare, plantio antecipado para a segunda quinzena de outubro até a primeira quinzena de novembro, uso de variedades de cafeeiros de porte baixo, e uso de tração animal na realização dos tratos culturais (roçada, aplicação de defensivos e adubação, entre outros). O monitoramento do estado nutricional das plantas e o manejo das adubações foi feito com base em análise foliar realizada no período de dezembro a abril. Em áreas com declividade acima de 18%, terraços em patamar são instalados (SERAFIM et al., 2011).

Apesar do alerta de Souza et al. (2003) de que mais de 33% das áreas da bacia do Rio São Francisco, no estado de Minas Gerais, só apresentarem aptidão hídrica para o café Arábica se irrigadas. Observações de produtores que usam o sistema em estudo, têm indicado que é possível contornar a falta de aptidão dessas áreas, sem lançar mão do uso da irrigação. Teoricamente, o gesso potencializa o aprofundamento do sistema radicular e a *Brachiaria SP.*, cultivada na entrelinha da lavoura, aumenta a cobertura do solo e incrementa a matéria orgânica. Segundo vários autores (FOLLONI; LIMA; BÜLL, 2006; MARTIN et al., 2012; SALTON et al., 2008; SILVA; MIELNICZUK, 1997; TISDALL; OADES, 1979), isso possibilita maior infiltração da água das chuvas, proporcionada pela melhor agregação do solo, promovida pela maior

densidade de raízes e, pela periódica renovação do sistema radicular que promove a uniforme distribuição dos exsudados no solo, que estimulam a atividade microbiana, cujos subprodutos atuam na formação e estabilização dos agregados.

Com exceção da recomendação das doses elevadas de gesso e do uso da *Brachiaria* sp., que ainda são assuntos muito polêmicos e carecem de mais estudos, o sistema de manejo tem mérito inovador por reunir práticas destacadas na literatura, de forma condizente com as necessidades da cafeicultura.

Assim, estudos que visam à identificação, quantificação e mitigação dos efeitos causados pelo manejo do solo sob cultura cafeeira, particularmente, em Latossolos da região do Cerrado brasileiro, são importantes para adaptar, de forma coerente, o manejo, com vistas ao desenvolvimento de uma cafeicultura sustentável.

2.2 Relação do sistema radicular do cafeeiro com os atributos físicos do solo

O conhecimento do sistema radicular do cafeeiro é de extrema importância para o manejo da lavoura e quando associado aos fatores edafoclimáticos, é fundamental para a otimização das práticas de cultivo. Para uma boa produção do cafeeiro, as raízes devem ser abundantes, profundas e bem ramificadas, isso para uma boa adequação das atividades fisiológicas da cultura (RENA; GUIMARÃES, 2000). As observações que contemplam o estudo de raízes deve se ater à descrição morfológica do sistema radicular como um todo, e às variações que ele sofre sob a influência dos fatores ambientais, assim como a distribuição da rede radicular ao longo do perfil, além da identificação das áreas de absorção.

Para descrição adequada da morfologia das raízes, Nutman (1933) identificou e classificou os componentes da rede radicular. Segundo esse autor,

raízes com diâmetro maior que 3 mm são denominadas de raízes permanentes principais e subdividem-se em: raízes pivotantes, axiais (verticais, em número de 4 a 8), verticais (que, primeiramente, crescem em várias direções e, posteriormente, ocorre o alinhamento vertical), laterais de placa superficial (paralela à superfície) e laterais sem placa superficial (mais profundas, uniformes). As raízes entre 3 e 1 mm são as suportes das absorventes (permanentes secundárias), e as menores que 1 mm são as absorventes (são curtas, delgadas, esbranquiçadas e possuem pelos radiculares).

Posteriormente, verificou-se que as principais características morfofisiológicas do sistema radicular do cafeeiro completam seu desenvolvimento após cinco a seis anos do plantio, e que a maior fração do sistema radicular do cafeeiro é composta pelas raízes permanentes primárias ($\varnothing > 3$ mm), que são as principais estruturas do sistema. Entretanto, a maior concentração de raízes suporte das absorventes, e as próprias absorventes, nas condições estudadas, encontravam-se abaixo de 30 cm de profundidade e diminuía do centro da copa, para a periferia (RENA; GUIMARÃES, 2000).

Modificações associadas ao desenvolvimento do sistema radicular são observadas de acordo com a espécie, com a variedade dentro da espécie e mesmo com a combinação de enxertia. Nutman (1933) verificou que esse é muito moldável e varia em função das interações entre as características genéticas da planta e das condições ambientais nas quais a planta está instalada.

Este autor cita alguns fatores que interagem com o desenvolvimento das raízes como fatores vegetativos: a idade da planta, a carga genética e de frutos, a densidade de plantio, as podas e os sistemas de cultivo; fatores fitossanitários: o clima, as pragas e doenças, e, não menos importante, o fator solo, que é o ambiente físico ao redor das raízes. A estrutura e a textura do solo coordenam a organização do espaço poroso que é o local de crescimento das raízes e

responsável pela difusão de gases, dinâmica da água, temperatura e resistência mecânica.

Ressalta-se que, as propriedades físicas do solo são facilmente modificadas, em grau variável, especialmente pelos processos compressivos ocasionados pelos sistemas de manejo agrícola (IMHOFF et al., 2001). Outras características como a classe de solo, sua fertilidade (como saturação por alumínio e teores de cálcio no perfil do solo) e a declividade do terreno (posição na paisagem), também podem interferir no plano geral de desenvolvimento radicular (FRANCO; INFORZATO, 1946; RENA; GUIMARÃES, 2000).

Aliada ao ambiente físico do solo as condições climáticas, a exemplo dos períodos de veranicos prolongados, podem induzir a planta ao estresse hídrico, fato frequentemente observado na região do Cerrado. Esses períodos associados à maior resistência mecânica do solo, relacionado com a densidade do solo, disponibilidade de água e aumento do atrito e coesão entre as partículas do solo (SILVA; CABEDA, 2005) podem reduzir o desenvolvimento das raízes e até causar a morte, particularmente das raízes absorventes.

Se a raiz encontra-se em profundidades maiores onde as condições físicas do solo e o fornecimento de água são melhores, o crescimento ocorre normalmente e essas não sofrem efeitos negativos decorrente dos veranicos (RENA; GUIMARÃES, 2000).

É muito importante obter cafeeiros com sistema radicular profundo, promovido pelo manejo de solo e adubação adequados. Essa melhoria química pode estar associada à incorporação de gesso agrícola que possibilita o crescimento do sistema radicular ao longo do perfil, o que possibilita a maior absorção de água e nutrientes e torna a lavoura menos susceptível aos efeitos negativos, nesses períodos de seca prolongada (RAIJ, 2008). Esse fator pode ser potencializado pela manutenção de uma gramínea (*Brachiaria* sp.), bem manejada na entrelinha da lavoura, que irá aumentar a proteção do solo,

incrementar o mesmo em matéria orgânica, além de promover uma melhor organização estrutural do solo, possibilitando a maior infiltração da água das chuvas (LIMA et al., 2012; SALTON et al., 2008).

Desta forma, estudos de qualidade estrutural e dos efeitos dos sistemas de manejo do solo, influenciando o sistema radicular vêm sendo realizados, principalmente, pela determinação de três atributos físicos do solo: a densidade do solo, a porosidade e a resistência do solo à penetração (BERGAMIN et al., 2010; COLLARES et al., 2006; FOLLONI; LIMA; BÜLL, 2006; FREDDI et al., 2009; IMHOFF et al., 2001; TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1998).

O nível aceitável de cada um deles dependerá da mineralogia e classe do solo, teor de matéria orgânica, conteúdo de água, entre outros. Apesar disso, alguns valores médios são utilizados como referência para Latossolos de textura argilosa, inseridos na região do Cerrado, valores menores que $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$ para a densidade do solo; $2,5 \text{ MPa}$ para resistência à penetração e valores acima de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para porosidade de aeração, propiciam adequado crescimento à maioria das culturas agrícolas (ARAUJO-JUNIOR et al., 2008; BERGAMIN et al., 2010; CAMARGO; ALLEONI, 1997; IMHOFF et al., 2001).

No entanto, é necessário avaliar essas alterações estruturais em maior resolução, ou seja, quantificar a distribuição do diâmetro dos poros do solo, pois é exatamente neles que ocorrem todos os processos dinâmicos do solo. Além disso, essas mudanças serão refletidas em menor desenvolvimento da parte aérea que é consequência da menor distribuição da rede radicular, explorando o solo em busca de água e nutrientes, bem como a baixa difusão dos gases no solo (SECCO et al., 2004), o que pode comprometer a produtividade. Salienta-se que, muitas vezes, essas alterações dos atributos físico-hídricos estão relacionadas ao processo de compactação do solo (OLIVEIRA et al., 2004).

Com a diminuição do espaço poroso do solo, principalmente de poros estruturais ou interagregados, ocorre não somente a redução da quantidade de

oxigênio, mas também a disponibilidade de água às raízes. Para superar essas adversidades do ambiente, as raízes desenvolvem mecanismos de adaptação, ou seja, modificações morfológicas e anatômicas numa tentativa de buscar os recursos edáficos em outras porções do solo, que as manterão vivas (GUIMARÃES; MOREIRA, 2001).

O cafeeiro é uma planta exigente em condições físicas do solo, requerendo solos profundos, porosos, bem drenados e com boa retenção de água (GUIMARÃES; LOPES, 1986). Dessa forma, considerando-se que a planta necessita retirar do solo uma grande quantidade de água para viabilizar uma boa produção de frutos, como estimado pela UNESCO, para a produção de um 1 kg de grãos verdes há um teor médio de 13.972 litros de água (CHAPAGAIN; HOEKSTRA, 2004), estudos que objetivam o uso racional da água são bem vindos. Ressalta-se ainda que, a necessidade por água será cada vez mais crescente, tanto pela demanda da planta, como pela exportação do produto final de qualidade promovido pela abertura econômica e crescimento do mercado consumidor internacional (RINCÓN, 2006).

Desta forma, o manejo adequado das adubações, calagem e gessagem associados aos tratamentos culturais da lavoura e manejo bem controlado de gramínea *Brachiaria sp.* na entrelinha de cafeeiros, com equipamentos movidos por tração animal, tem sido apontado por alguns produtores da região Alto São Francisco como uma importante tomada de decisão, para a minimização dos efeitos negativos nas épocas de veranico.

Estes produtores vêm utilizando doses de gesso 10 a 15 vezes maiores que as sugeridas nos boletins técnicos, contrariando as recomendações existentes, a exemplo do encontrado em Rajj (2008), Sousa et al. (2005) e Vitti (2008). Por outro lado, nas áreas cafeeiras onde foi adotado o sistema de manejo em estudo, tem sido observada elevada produtividade das lavouras não irrigadas, mesmo em anos muito secos.

2.3 Uso da tomografia computada na avaliação da estrutura do solo

O solo é um meio poroso heterogêneo e contínuo, resultante das interações entre as diferentes fases que o compõem (matriz sólida, solução do solo, ar do solo, matéria orgânica). Essa organização dos componentes do solo resulta em um tipo de estrutura capaz de controlar as características geométricas dos espaços vazios (LUO; LIN; LI, 2010; MARTIN et al., 2012; MUNKHOLM; HECK; DEEN, 2012), onde ocorrem todos os processos abióticos e bióticos, que, por sua vez, tem sido apresentado como o fator chave na capacidade do solo em exercer suas funções básicas, além de modular e controlar a distribuição do fluxo de energia no agroecossistema, bem como nos ecossistemas naturais e, por isso, é considerado importante fator para caracterizar a qualidade de um solo (SANDER; GERKE; ROGASIK, 2008).

Os atributos do solo podem ser visualizados, quantificados e simulados por meio do processamento de imagens tridimensionais (3D) do espaço poroso, com o uso de modelos dinâmicos obtidos da tomografia computada, utilizando diferentes fontes de radiação, e como exemplos de estudos salientam-se aqueles que envolveram a densidade do solo (PEDROTTI et al., 2003; PIRES et al., 2011; SANDER; GERKE; ROGASIK, 2008); a densidade de partículas (MACEDO; CRESTANA, 1999) porosidade (FERRO et al., 2012; GANTZER; ANDERSON, 2002; LUO; LIN; LI, 2010; MUNKHOLM; HECK; DEEN, 2012; NGON et al., 2011; PETH et al., 2008; TAINA et al., 2010); o conteúdo de água (PIRES; BACCHI, 2010; TIPPKÖTTER et al., 2009); condutividade hidráulica (ELLIOT; REYNOLDS; HECK, 2010; HERMANS et al., 2012); colonização fúngica no espaço poroso (MARTIN et al., 2012; NUNAN et al., 2006; SLEUTEL et al., 2012); decomposição da matéria orgânica (SLEUTEL et al., 2008), distribuição do sistema radicular em meio poroso (GARBOUET et al.,

2012; KAESTNER; SCHNEEBELI; GRAF, 2006; MAIRHOFER et al., 2012; PIERRET et al., 1999; TRACY et al., 2010; ZHUO et al., 2012).

Os pioneiros da área de ciência do solo a utilizarem a técnica de tomografia computada foram Petrovic, Siebert e Rieke (1982) nos Estados Unidos, Hainsworth e Aylmore (1983) na Austrália e Crestana, Mascarenhas e Pozzi-Mucelli (1985) no Brasil. Esses autores a utilizaram para quantificar a densidade do solo, a distribuição espacial do conteúdo e movimento da água no solo.

Com os avanços da técnica e aprimoramento do processamento de imagens, com maior resolução, tem sido possível realizar levantamento qualitativo e quantitativo em escala micrométrica e até nanométrica das alterações estruturais promovidas por processos naturais ou atividades agropecuárias, a exemplo dos sistemas de manejo do solo (PIRES et al., 2010; SLEUTEL et al., 2008).

Mais recentemente, a tomografia tem sido confrontada com análises de fácil execução e boa precisão como a análise visual da estrutura do solo que está intimamente relacionada às alterações estruturais promovidas pelo manejo dos solos agrícolas, como descrito por Garbout, Munkholm e Hansen (2013). Esses autores, ao confrontarem os dados (scores) da análise visual da estrutura do solo, feita *in situ* e em macroescala, verificaram que a mesma foi positivamente correlacionada aos dados tomográficos em microescala, confirmando então a boa qualidade estrutural visível a olho nu, pois o solo em questão apresentava uma rede de poros diversificada e contínua, detectada pela tomografia.

O espaço poroso tem sido representado por elementos geométricos simples, como a esfera, que tem sido utilizada para representá-lo, a fim de calcular os esqueletos da rede de poros e, o tamanho ou ainda descrever a retenção de água para discretizar o espaço 3D (MONGA; NGOM; DELERUE, 2007; NGOM et al., 2011). Dessa forma, o espaço poroso tem importância

relativa devido a microestrutura do solo que tem um significativo impacto nos diferentes processos que ocorrem no solo, como a proteção aos microorganismos, sua relação com a indução da heterogeneidade espacial do conteúdo de água, pH, disponibilidade de oxigênio e regulação da difusão nos substratos dos metabólitos originários das células microbiais (SLEUTEL et al., 2012).

De acordo com Mermut et al. (1992), a observação direta do espaço poroso é importante para se compreender como as práticas de manejo afetam a qualidade física do solo. Esse espaço de vazios é formado por vários processos que resultam em poros de diferentes formas e tamanhos. Os poros do tipo empacotamento, os provenientes da atividade biológica (bioporos) e as fissuras, são considerados poros estruturais, por apresentarem definição da unidade estrutural do solo; já os poros do tipo cavidades, canais, câmaras e vesículas não têm relação com as unidades estruturais, podendo ocorrer dentro ou através das mesmas. Os poros estruturais são resultantes do cultivo, tráfego, tempo e da atividade biológica do solo, sendo considerados bons indicadores dos processos de compactação, o que não ocorre com os poros texturais pois esses, supostamente, não são afetados pelo manejo nem por processos compressivos (LIMA et al., 2005).

A presença de determinados tipos de poros revela que fatores externos à organização das partículas do solo têm influenciado a sua formação, como a compactação que favorece o surgimento de poros tipo vesículas e o adensamento (processo pedológico) que favorece o surgimento de poros tipo cavidades e câmaras. Não obstante, os poros tipo cavidade são formados a partir da frequente atividade da fauna no solo. Vários trabalhos caracterizaram micro e, principalmente, macromorfologicamente, os impactos causados pelo manejo em áreas agrícolas, como o de Lima et al. (2005).

Para visualizar a distribuição espacial e a interação da fase mineral com os filmes de água situados dentro dos macroporos ($> 10 \mu\text{m}$), Tippkötter et al. (2009) identificaram nas imagens microtomográficas 2D, muitos macroporos contínuos tubulares atravessando a matriz do solo, o que foi possível pela distinção entre as fases do solo, por meio dos valores de atenuação ou densidade. No entanto, distinguir a fase líquida da matéria orgânica presente nos solos, foi dificultado, já que essas apresentaram densidade similar.

A compreensão da geometria do espaço poroso facilita o entendimento das funções do solo (PETH et al., 2008), o que é importante pois os sistemas de manejo do solo promovem significativas alterações na organização estrutural, pela transformação dos agregados com efeitos pronunciados na geometria dos poros. Assim, sistemas de manejo que promovem a formação de agregados mais estáveis, elevam a difusão dos gases e o transporte de água, além de favorecer as funções microbianas no solo e o potencial em estocar carbono orgânico, refletindo na conectividade da rede de poros detectáveis em imagens 3D.

É destaque que o sistema radicular das plantas tendem, em algumas situações, a uniformizar a formação dos agregados e, conseqüentemente, a estrutura, além de ativarem os microorganismos, pela liberação de compostos orgânicos, a exemplo dos fungos micorrízicos, que agem distintamente no incremento da porosidade, produzindo uma rede de poros complexa ou, apenas promovem a formação de poros maiores ou interagregados (MARTIN et al., 2012), agindo também como estabilizante dos agregados, favorecido pela matéria orgânica (COSTA JÚNIOR et al., 2012).

A técnica de escaneamento tomográfico permitiu descrever a variabilidade interna dos componentes estruturais de um Cambissolo, cultivado em longo prazo com arroz, por meio dos valores de densidade que foram maiores e mais uniformes com o passar do tempo de cultivo principalmente nas camadas compactadas (SANDER; GERKE; ROGASIK, 2008). Neste estudo,

também foi possível estudar a conectividade da rede de poros, que foi influenciada pela morfologia dos canais verticais, originados de raízes em decomposição, com reflexo positivo na condutividade hidráulica favorecida pelos caminhos preferenciais formada para o movimento de água e solutos.

Portanto, o conhecimento do espaço poroso do solo com geometria distinta e sua distribuição permitem o entendimento de uma ampla gama de funções essenciais ao mesmo (LUO; LIN; LI, 2010; MUNKHOLM; HECK; DEEN, 2012), assim como a compreensão de como os sistemas agrícolas alteram a distribuição desses poros em condições de cultivo, especialmente dos poros estruturais ou interagregados (CARDUCCI et al., 2011; DEXTER, 2004; LIMA et al., 2005).

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O monitoramento da qualidade estrutural dos solos é importante para a manutenção e avaliação da sustentabilidade dos agroecossistemas, por proporcionar melhor qualidade aos produtos agrícolas, além de alertar para a necessidade de adoção de sistemas de preparo do solo mais racionais, visando o melhor uso dos recursos naturais disponíveis ao homem e, como forma de reduzir a degradação ambiental.

Assim, estudos que se utilizam de técnicas com alta resolução no processamento de imagens, visando melhor identificação, quantificação, prevenção e mitigação dos efeitos causados pelo manejo da cultura cafeeira, em diferentes solos, são fundamentais por possibilitar a ampliação do conhecimento sobre a formação e desenvolvimento da estrutura e, conseqüentemente, da rede de poros do solo, tornando-se importantes ferramentas para adaptar de forma condizente, o manejo do solo, em busca do desenvolvimento de uma cafeicultura mais sustentável.

REFERÊNCIAS

ALBIERO, D. **Sustentabilidade, agroecossistemas e energia**. Disponível em: <<http://www.diadecampo.com.br/zpublisher/materias/Materia.asp?id=27790&secao=Colunas%20e%20Artigos>>. Acesso em: 6 fev. 2013.

ARAÚJO JUNIOR, C. F. et al. Capacidade de suporte de carga e umidade crítica de um latossolo induzida por diferentes manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 35, n. 1, p. 115-131, jan./fev. 2011.

_____. Resistência á compactação de um Latossolo cultivado com cafeeiro, sob diferentes sistemas de plantas invasoras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 1, p. 25-32, jan./fev. 2008.

BERGAMIN, A. C. et al. Compactação em um latossolo vermelho distroférico e suas relações com o crescimento radicular do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 34, n. 3, p. 681-691, maio/jun. 2010.

BORGES, J. A. R.; PIRES, L. F. Representative elementary area (REA) in soil bulk density measurements through gamma ray computed tomography. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 123, n. 1, p. 43-49, July 2012.

CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e o desenvolvimento de plantas**. Piracicaba: ESALQ, 1997. 132 p.

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, mar./abr. 2013.

_____. Modelagem da curva de retenção de água de Latossolos utilizando a equação duplo van Genuchten. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 35, n. 1, p. 77-86, jan./fev. 2011.

CHAPAGAIN, A. K.; HOEKSTRA, A. Y. **Water footprints of nations**. Wageningen: UNESCO-IHE, 2004. v. 1. (Main Report. Value of Water, Research Report Series, 16). Disponível em: <<http://www.waterfootprint.org/Reports/Report16.pdf>>. Acesso em: 12 fev. 2013.

COLLARES, G. L. et al. Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 11, p. 1663-1674, nov. 2006.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira: café safra/2012, 4º estimativa**. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/12_12_20_16_01_51_boletimcafe_dezembro_2012.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2012.

COSTA JUNIOR, 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, MG, v. 36, n. 4, p. 1311-1321, ago. 2012.

CRESTANA, S.; MASCARENHAS, S.; POZZI-MUCELLI, R. S. Static and dynamic three-dimensional studies of water in soil using computed tomographic scanning. **Soil Science**, Baltimore, v. 140, n. 5, p. 326-332, Nov. 1985.

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. 1, p. 201-214, Dec. 2004.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J. W. et al. (Ed.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: American Society of Agronomy; Soil Science Society of America, 1994. p. 3-21.

ELLIOT, T. R.; REYNOLDS, W. D.; HECK, R. J. Use of existing pore models and X-ray computed tomography to predict saturated soil hydraulic conductivity. **Geoderma**, Amsterdam, v. 156, n. 3/4, p. 133-142, May 2010.

FERRO, N. et al. Coupling X-ray microtomography and mercury intrusion porosimetry to quantify aggregate structures of a cambisol under different fertilisation treatments. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 119, n. 1, p. 13-21, Mar. 2012.

FOLONI, J. S. S.; LIMA, S. L.; BÜLL, L. T. Crescimento aéreo e radicular da soja e de plantas de cobertura em camadas compactadas de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 30, n. 1, p. 49-57, jan./fev. 2006.

FRANCO, C. M.; INFORZATO, R. O sistema radicular do cafeeiro nos principais tipos de solo do estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 6, n. 9, p. 443-478, set. 1946.

FREDDI, O. S. et al. Compactação do solo e produção de cultivares de milho em Latossolo Vermelho: I., características de planta, solo e índice S. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 33, n. 4, p. 793-803, jul./ago. 2009.

GANTZER, C. J.; ANDERSON, S. H. Computed tomographic measurement of macroporosity in chisel-disk and no-tillage seedbeds. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 64, n. 3/4, p. 101-111, Mar. 2002.

GARBOUT, A. et al. The use of PET/CTscanning technique for 3D visualization and quantification of real-time soil/plant interactions. **Plant and Soil**, The Hague, v. 352, n. 1/2, p. 113-127, Mar. 2012.

GARBOUT, A.; MUNKHOLM, L. J.; HANSEN, S. B. Tillage effects on topsoil structural quality assessed using X-ray CT, soil cores and visual soil evaluation. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 128, n. 1/2, p. 104-109, Apr. 2013.

GUIMARÃES, C. M.; MOREIRA, J. A. A. Compactação do solo na cultura do arroz de terras altas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 4, p. 703-707, abr. 2001.

GUIMARÃES, P. T. G.; LOPES, A. S. Solos para cafeeiros: características propriedades e manejo. In: RENA, A. B. et al. (Ed.). **Cultura do cafeeiro: fatores que afetam a produtividade**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1986. p. 115-156.

HAINSWORTH, J. M.; AYLMOORE, L. A. G. The use of computerassisted tomography to determine spatial distribution of soil water content. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 21, n. 4, p. 435-443, Oct./Dec. 1983.

HERMANS, T. et al. Imaging artificial salt water infiltration using electrical resistivity tomography constrained by geostatistical data. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 438/439, n. 1/4, p. 168-180, May 2012.

IMHOFF, S. et al. Quantificação de pressões críticas para o crescimento das plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 25, n. 1, p. 11-18, jan./mar. 2001.

KAESTNER, A.; SCHNEEBELI, M.; GRAF, F. Visualizing three-dimensional root networks using computed tomography. **Geoderma**, Amsterdam, v. 136, n. 3/4, p. 459-469, Dec. 2006.

LIMA, H. V. et al. Tráfego de máquinas agrícolas e alterações de bioporos em área sob pomar de laranja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 29, n. 5, p. 677-684, set./out. 2005.

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, MG, v. 36, n. 1, p. 71-78, jan./fev. 2012.

LUO, L.; LIN, H.; LI, S. Quantification of 3-D soil macropore networks in different soil types and land uses using computed tomography. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 393, n. 1/2, p. 53-64, Oct. 2010.

MACEDO, A.; CRESTANA, S. Avaliação da macroporosidade e da densidade de partículas do solo através da microtomografia de raios-x. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 23, n. 3, p. 763-771, maio/jun. 1999.

MAIRHOFER, S. et al. RooTrak: automated recovery of three-dimensional plant root architecture in soil from X-ray microcomputed tomography images using visual tracking. **Plant Physiology**, Madison, v. 158, n. 2, p. 561-569, Feb. 2012.

MARTIN, S. L. et al. The effects of simultaneous root colonisation by three *Glomus* species on soil pore characteristics. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 49, n. 6, p. 167-173, June 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.

MERMUT, A. R. **Introduction to soil micromorphology**. Saskatoon: University of Saskatchewan, 1992. 115 p.

MONGA, O.; NGOM, F. N.; DELERUE, J. F. Representing geometric structures in 3D tomography soil images: application to pore-space modeling. **Computers and Geosciences**, New York, v. 33, n. 9, p. 1140-1161, Sept. 2007.

MUNKHOLM, L. J.; HECK, R. J.; DEEN, B. Soil pore characteristics assessed from X-ray micro-CT derived images and correlations to soil friability. **Geoderma**, Amsterdam, v. 181/182, n. 1, p. 22-29, July 2012.

NGOM, N. F. et al. Extraction of three-dimensional soil pore space from microtomography images using a geometrical approach. **Geoderma**, Amsterdam, v. 163, n. 3/4, p. 127-134, July 2011.

NUNAN, N. et al. Investigating microbial micro-habitat structure using X-ray computed tomography. **Geoderma**, Amsterdam, v. 133, n. 3/4, p. 398-407, Aug. 2006.

NUTMAN, F. J. The root system of *Coffea arabica* L.: I., root system in typical soils conditions British East África. **Journal of Experimental Agriculture**, Cambridge, v. 2, p. 271-284, 1933.

OLIVEIRA, G. C. et al. Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, n. 2, p. 327-336, mar./abr. 2004.

PEDROTTI, A. et al. Planosol soil sample size for computerized tomography measurement of physical parameters. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 60, n. 4, p. 735-740, out./dez. 2003.

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, MG, v. 34, n. 4, p. 1283-1295, ago. 2010.

PETEK, M. R.; PATRÍCIO, F. R. A. Cultivares resistentes ou tolerantes a fatores bióticos e abióticos desfavoráveis: ponto-chave para a cafeicultura sustentável. **O Agrônomo**, Campinas, v. 59, n. 1, p. 39- 40, jul. 2007.

PETH, S. et al. Three-dimensional quantification of intra-aggregate pore-space features using synchrotron-radiation-based microtomography. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 72, n. 4, p. 897-907, Apr. 2008.

PETROVIC, A. M.; SIEBERT, J. E.; RIEKE, P. E. Soil bulk density analysis in three dimensions by computed tomographic scanning. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 46, n. 2, p. 445-450, Feb. 1982.

PIERRET, A. et al. X-ray computed tomography to quantify tree rooting spatial distributions. **Geoderma**, Amsterdam, v. 90, n. 3/4, p. 307-326, July 1999.

PIRES, L. F.; BACCHI, O. O. S. Mudanças na estrutura do solo avaliada com uso de tomografia computadorizada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 4, p. 391-400, abr. 2010.

PIRES, L. F. et al. Characterization of changes in soil porous system by gamma-ray tomography. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A**, Amsterdam, v. 644, n. 1, p. 68-71, July 2011.

RAIJ, B. van. **Gesso na agricultura**. Campinas: Instituto Agronômico, 2008. 233 p.

RAMOS, B. Z. **Especiação química da solução e mobilidade de bases e sulfato em Latossolo sob altas doses de gesso**. 2012. 100 f. Tese (Doutorado em Ciencia do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.

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, MG, v. 37, n. 4, p. 1018-1026, jul./ago. 2013.

RENA, A. B.; GUIMARÃES, P. T. G. **Sistema radicular do cafeeiro: estrutura, distribuição, atividade e fatores que o influenciam**. Belo Horizonte: EPAMIG, 2000. 80 p. (Documentos, 37).

RESCK, D. V. S.; PEREIRA, J.; SILVA, J. E. **Dinâmica da matéria orgânica na região dos Cerrados**. Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 1991. 22 p. (Documentos, 36).

RINCÓN, M. A. P. Comercio exterior y flujos hídricos en la agricultura colombiana: análisis para el periodo 1961-2004. **Revista Iberoamericana de Economía Ecológica**, Morelia, v. 4, n. 1, p. 3-16, ene. 2006.

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, MG, v. 32, n. 1, p. 11-21, jan./fev. 2008.

SANDER, T.; GERKE, H. H.; ROGASIK, H. Assessment of chinese paddy-soil structure using X-ray computed tomography. **Geoderma**, Amsterdam, v. 145, n. 1/2, p. 303-314, May 2008.

SARCINELLI, O.; RODRIGUEZ, E. O. Analise do desempenho econômico e ambiental de diferentes modelos de cafeicultura em São Paulo, Brasil: estudo de caso na região cafeeira da Média Mogiana do Estado de São Paulo. **Revista Iberoamericana de Economía Ecológica**, Morelia, v. 5, n. 1, p. 13-26, ene. 2006.

SECCO, D. et al. Produtividade e soja e propriedades físicas de um Latossolo submetido a sistemas de manejo e compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, n. 5, p. 797-804, out. 2004.

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

SERAFIM, M. E. et al. Disponibilidade hídrica e distinção de ambientes para cultivo de cafeeiros. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 4, p. 362-370, abr. 2013.

_____. 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, A. J. N.; CABEDA, M. S. V. Influência de diferentes sistemas de uso e manejo na coesão, resistência ao cisalhamento e óxidos de Fe, Si, Al em solo do tabuleiro costeiro de Alagoas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 29, n. 3, p. 447-457, maio/jun. 2005.

SILVA, B. M. **Dinâmica espaço-temporal da água no solo cultivado com cafeeiro nas condições climáticas da região do Alto São Francisco, MG**. 2012. 78 f. Dissertação (Mestrado Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.

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: Amazonian Journal**, Belém, v. 56, n. 1, p. 25-32, jan./mar. 2013.

SILVA, I. F.; MIELNICZUK, J. Avaliação do estado de agregação do solo afetado pelo uso agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 21, n. 2, p. 313-319, 1997.

SLEUTEL, S. et al. Comparison of different nano- and micro-focus X-ray computed tomography set-ups for the visualization of the soil microstructure and soil organic matter. **Computers and Geosciences**, New York, v. 34, n. 8, p. 931-938, Aug. 2008.

_____. Manipulation of the soil pore and microbial community structure in soil mesocosm incubation studies. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 45, n. 2, p. 40-48, Feb. 2012.

SOUSA, D. M. G. et al. **Uso de gesso agrícola nos solos do Cerrado**. Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 2005. Disponível em: <http://bbeletronica.cpac.embrapa.br/2005/cirtec/cirtec_32.pdf>. Acesso em: 1 set. 2009.

SOUZA, E. A. et al. Distribuição da umidade num Latossolo irrigado por gotejamento superficial e subsuperficial e enterrado, com uso de TDR. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 13., 2003, Juazeiro. **Anais...** Viçosa, MG: Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem, 2003. 1 CD-ROM.

TAINA, I. A. et al. Micromorphological and X-ray μ CT study of Orthic Humic Gleysols under different management conditions. **Geoderma**, Amsterdam, v. 158, n. 3/4, p. 110-119, Sept. 2010.

TIPPKÖTTER, R. et al. Detection of soil water in macropores of undisturbed soil using microfocuss X-ray tube computerized tomography (μ CT). **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 105, n. 1, p. 12-20, Sept. 2009.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Stabilization of soil aggregates by the root systems of ryegrass. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 17, n. 3, p. 429-441, Apr./June 1979.

TOLLEFSON, J. The global farm. **Nature**, London, v. 466, p. 554-556, 2010.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um latossolo roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 22, n. 3, p. 573-581, 1998.

TRACY, S. R. et al. The X-factor: visualizing undisturbed root architecture in soils using X-ray computed tomography. **Journal of Experimental Botany**, Lancaster, v. 61, n. 2, p. 311-313, Jan. 2010.

VITTI, G. C. et al. **Uso do gesso em sistemas de produção agrícola**. Piracicaba: GAPE, 2008. 104 p.

ZHOU, H. et al. Effects of vegetation restoration on soil aggregate microstructure quantified with synchrotron-based micro-computed tomography. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 124, n. 8, p. 17-23, Aug. 2012.

SEGUNDA PARTE - ARTIGOS

**ARTIGO 1 Scaling of pores in 3D images of latosols (Oxisols) with
 contrasting mineralogy under conservationist management
 system**

Scaling of pores in 3D images of Latosols (Oxisols) with contrasting mineralogy under conservationist management system

Abridged title: **Three-dimensional quantification in Latosols pores**

Carla Eloize Carducci^{a*}; Geraldo César de Oliveira^a; Nilton Curi^a;
Richard John Heck^b; Diogo Francisco Rossoni^c

^a Soil Science Department of Federal University of Lavras (UFLA), Lavras, MG 37200-000 Brazil.

^b Environmental Science Department of University of Guelph (U of G), Guelph, ON N1G 2W1, Canada.

^c Statistical Department of State University of Maringá (UEM), Maringá, PR 87020-900, Brazil.

*Corresponding author: locarducci@hotmail.com

Running head for the paper: pore 3D in Latosols under tillage system

Abstract. The aim of this study was to evaluate the spatial and morphological configuration of the pore space in 3D images of Latosols with different mineralogy under conservationist tillage system in a coffee crop area. The visualization and quantification of pore size distribution and spatial variability was investigated in 3D images generated by X-ray computed tomography at different depths of a kaolinitic Red-Yellow Latosol (RYL) and a gibbsitic Red Latosol (RL). The greater spatial variability occurred in the horizontal direction of the 3D image, constituting a novelty in this research line. The pores detected were different between the Latosols studied, mainly at the 20-34 cm depth, especially in RL occurred the largest number and volume of different pores diameter. It was evident that the soil class and the management system have impacts on the 3D pore characteristics and both need to be simultaneously considered in order to better characterize the causes of pore variability. The sphericity was similar for both soils, but with greater emphasis on pore classes with a diameter less than 0.4 mm, mainly at the 20-34cm depth. The highest

percentage of spheroid pores occurs in the RL while the platy pores were more abundant in the RYL.

Additional keywords: CT scanning, Soil structure, Coffee system, Geostatistics.

Introduction

Soils present a heterogeneous structure made up of the arrangement of solid and organic particles with a formation of porous space (Libardi and Klein, 2002) distributed according to a complex hierarchical organization (Taina et al. 2010). The soil structure assessment can be made based on the study of the pore diameter distribution that is primarily influenced by the clay fraction mineralogy, which expresses specific attributes with marked variability in the porous space (Ferreira et al. 1999).

In turn, the pore distribution, particularly the structural pores, is closely related to dynamic processes of water and solutes in the soil (Ngon et al. 2011; Luo et al. 2010), the diffusion of gases (Munkholm et al. 2011) and microbiological processes and decomposition of organic matter (Martin et al. 2012), which are attributes fundamental to natural and agricultural ecosystems, besides promoting root growth (Tracy et al. 2010).

Knowledge of the porous space with distinct geometry enables the understanding of a wide variety of its key functions (Munkholm et al. 2012; Luo et al. 2010), as well as understanding how agricultural systems alter the spatial distribution of these pores, especially of the structural or inter-aggregate pores (Dexter, 2004; Lima et al. 2005; Carducci et al. 2011).

Accordingly, a soil management system for coffee cultivation in study that primarily aims to improve and/or preserve soil quality has been employed in the Minas Gerais State, Cerrado, particularly in the Alto São Francisco River Valley, Brazil. This system is based on the use of practices that seek to improve

the soil physical and chemistry quality at greater depth (0.60 m) along the row, thus seeking a deeper root system (Serafim et al. 2011) and its consequent benefits.

The visualization and quantification of soil pores at a high level of detail, nondestructively obtained through the use of X-ray computed tomography (CT) scanning technology, by means of a generation of high-resolution images, which allows a detailed analysis of the internal three-dimensional structures, have been currently used to access the components of the soil (colloids, water and air) (Tippkötter et al. 2009) as well as the identification of modifications promoted by external agents (Pires et al. 2011; Luo et al. 2010).

Thus, the objective of this research was to evaluate the spatial and morphological configuration of the pore space in three-dimensional images of Latosols with different mineralogies under soil conservationist management system in a coffee crop area.

Material and methods

Description and characterization of the study area

The study was conducted in coffee areas under a soil conservationist management system, located in the municipality of São Roque de Minas, physiographic region of the Alto São Francisco River, in Minas Gerais State, Brazil. The cultivated area includes 52 ha and has the coordinates 20° 15' 43" S and 46° 22' 17" W, altitude of 876 m at the top of the hill, and 20° 11' 35" S and 46° 22' 07" W, altitude of 841 m in the middle third of the hill. The climate is classified as humid temperate with dry winters and rainy summers according to Köppen (Cwa).

The macromorphological description of the soil structure was performed according to Santos et al. (2005) and is presented in Table 1, as well as some factors that limit the soil use and management. The soils were classified according to Brazilian Soil Taxonomy (Embrapa, 2013): Red-Yellow Latosol (RYL) and Red Latosol (RL). Most Latosols in Brazil correspond to Oxisols in the US Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2006) and to Ferralsols in the World Reference Base (IUSS Working Group WRB, 2006).

Insert Table 1.

According to the premises of the management system of coffee crop in study, the coffee field (*Coffea arabica* L.) of cultivar yellow Catucaí, was implanted in narrow row spacing of 250 x 65 cm. the soil preparation included one plowing and two harrowings with application of correctives throughout the total area (4 Mg ha⁻¹ limestone + 1.92 Mg ha⁻¹ gypsum). We used a subsoiler followed by a spade fertilizer for the opening of the 60 cm deep, 50 cm wide furrow, applying the formula 08-44-00, enriched with 1.5% Zn and 0.5% B as base fertilizer; the coffee seedlings were planted between the second half of October and the first half of November 2005.

After planting, 7 kg m⁻¹ gypsum was applied along the row, this material being covered with soil material mixed with the inter-row plant material (mixture piled-up at the base of the tree stem). Together with the installation of the crop, *Brachiaria ducumbens* (Syn. Urochloa) was implanted between the lines, which were periodically cut with a brush cutter, which minimizes competition with the main crop and allows the plant residue produced to be distributed along the row as well as between rows. This practice aims to improve soil structure and serves as protection against erosive agents (Lima et al. 2012). The crop operations were carried out by means of animal traction equipment;

only the harvest was done mechanically. The nutritional monitoring and fertilization management of the coffee was conducted based on leaf analysis (Serafim et al. 2011).

Soil sampling and physical, chemical and mineralogical

For the sampling and characterization of soils samples, three random trenches with 30 meter spacing each other were dug lengthwise along the row, with dimensions of 70 cm x 150 cm x 150 cm and then samples were collected for laboratory analysis. It is noteworthy that at the sampling time (September/2011) the crop had approximately six years of cultivation.

Firstly, intact cores were sampled by hand, using plexiglass tubes (6.5 cm diameter x 14 cm length) equipped with a specially designed aluminum sampling ring at depths of 20-34, 80-94 and 150-164 cm in the plant row specifically between plants (65 cm) and slightly below the layer that had traces of gypsum, in three replications in each soil class, totaling 18 soil cores.

In the laboratory, the samples were air-dried and passed through a two-millimeter mesh sieve.

Particle size analyzes were conducted via slow shaking using NaOH (1 mol L⁻¹) as chemical dispersant in contact with the sample for 16 hours (Embrapa, 2011). Sand was determined (2.00-0.05 mm) by sieving, the clay content (<0.002 mm) by the pipette method and silt (0.05-0.002 mm) was quantified by difference (Table 2).

Insert Table 2.

The SiO₂, Al₂O₃ and Fe₂O₃ contents were determined by sulfuric acid digestion and used in calculations of the Ki (SiO₂/Al₂O₃) and Kr [SiO₂/(Al₂O₃ +

Fe₂O₃)] molecular ratios (Embrapa, 2006). The kaolinite, gibbsite, hematite and goethite contents were derived from XRD measurements and stoichiometric ratios derived from their ideal chemical formulas, according to Resende et al. (1987) (Table 3).

Insert Table 3.

CT scanning

The tomographic analysis allows observing the structural components of the soil in their natural forms, allowing better overall visualization of the soil structure and porous space.

First, the soil cores in plexiglass tubes were dehydrated in an oven at 40°C until constant weight, to minimize possible interference of water films on the X-rays attenuation, and were then scanned at 120 kV and 170 mA with an exposure time of 3500 ms, generating an 2D axial projection of X-ray attenuation imagery, in microCT scanner (EVS/GE MS8x-130), third-generation preclinical, cone-beam, equipped with tungsten X-ray tube. An excitation energy of 100 kV and 130 mA was employed for all samples, in the Soils Image Laboratory at the University of Guelph, Canada.

In order to obtain higher accuracy in the analysis and elimination of possible structural alterations generated during the sampling, a 3.5 cm portion located in the exact center of the sample was selected. As the X-ray source emits polychromatic X-ray (Clausnitzer and Hopmans, 2000) were pre-filtered with a high pass copper filter in order to reduce beam-hardening artifacts and maximization of the contrast between the different phases of the soil core (solid and air).

The 2D axial projections were corrected and reconstructed with 20 μm spatial resolution and was saved in 16-bit radiometric resolution. Then 3D subvolumes of interest were selected in the exact center of each original image, the reconstruction was done using proprietary filtered back-projection software called ‘‘eXplore Reconstruction Utility’’ (GE Healthcare, 2006); the final isometric voxel size was reconstructed at 60 μm spatial resolution (666 voxels x 666 voxels x 550 slices). Subsequently, we used a Gaussian smoothing filter to reduce image noise and artifacts with the aid of MicroView (GE Healthcare, 2006).

For the purpose of comparing the attenuation values in Hounsfield scale (are defined relative to air [-1000 HU] and water [0 HU]) we used a calibration procedure through the use of two capillary tubes (one filled with water and other with air inserted between the inner wall of the plexiglass tube and the sample at the time of scanning). Subsequently, the coefficients of water and air were calculated by means of the MicroView software (GE Healthcare, 2006) and used for image reconstruction.

Digital image processing and analyses

The 3D image processing followed the protocol of the Soil Image Laboratory, University of Guelph, Canada. This is the first step in 3D image processing, which involves the conversion of each grayscale voxel value of the grayscale image (proportionally expressing the locations of the X-ray attenuation coefficients) into a binary image, distinguishing the air and solid phase. This transformation by the process of *thresholding* of the images is a fundamental step for the quantitative analysis of image data as well as for all other operations that use these transformed data sets.

With the public domain image analysis software ImageJ (Ver. 1.47, National Institute of Health; Rasband, 2002), the 3D images were analyzed on a slice-by-slice basis, which allowed differentiation of data categories according to the desired micromorphological size and shape classes.

To obtain the spatial data the "Semivariance 3D" plugin of the ImageJ was used, with the X-ray attenuation value of the grayscale image. We obtained $\hat{\gamma}(h)$ semivariances for the 3D image, i.e., the horizontal orthogonal directions (X e Y) and vertical orthogonal direction (Z), where the semivariance is standardized [0-1]. The construction of the experimental semivariogram identified the spatial dependence amplitude of the variable under study and also defined the spatial variability structure (Goovaerts et al. 1999).

The "Analyze Particle" function of ImageJ was used to calculate the pore dimensions (volume and area). This function detects and measures the objects in the binary image to obtain data relative to pores present in each slice of the volume under study (n = 550). From this result the equivalent diameter to a sphere (3D images, spatial geometry simulation) and as the shape factor, the sphericity of the pore (0 = less rounded, angular, 1 = more rounded and smooth) were calculated by Equation 1:

$$\Psi = \pi^{1/3} (6V)^{2/3} / A \quad (1)$$

where: $\pi \approx 3,141592\dots8$, V = volume (mm³) and A = area (mm²).

The classification of three-dimensional shapes of the pores was performed according proposals put forward by Zingg (1935) with modifications from Brewer (1964), illustrated in Bullock et al. (1985). The results were obtained via the plugin "Analyze Particle", selecting the 'ellipsoids' option on the binary images, to calculate the major (a), intermediate (b) and lower (c) axes and

the b/a and c/b ratio to morphologically classify pores as acicular-planar, acicular, planar, platy, channels, disc and spheroid.

Statistical analyses

Spatial analysis consisted of constructing experimental semivariograms and fitting a theoretical semivariogram to explain the structure of the data variance. The semi-variance $\hat{\gamma}(h)$ is a function of the distance h , which is estimated in a discrete set of lag distances expressed by a scatterplot that allows the variographic analysis of the spatial dependence amplitude of the variables studied (Faraco et al. 2008), in this case the X and Y orthogonal directions (horizontal direction) and Z (vertical direction), defining then the parameters required for the estimation of characteristics resulting from the spatial variability structure (ÁVILA; MELLO; SILVA, 2010).

The standardized semivariograms were estimated by the classical method, through the estimator:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(i_i) - Z(i_i + h)]^2 \quad (2)$$

in which: $\hat{\gamma}(h)$ is the semivariance estimator, $N(h)$ is the number of pairs of measured values, $Z(i_i)$ and $Z(i_i + h)$, separated by a vector distance h , are realizations of the random variable $Z(i_i)$ (Journel and Huijbregts, 1978; Isaaks and Srivastava, 1989). We then proceeded to estimate the experimental semivariance for each repetition and with the average semivariance it was fitted to the exponential model (Equation 3) and determination of model parameters:

nugget effect (C_0), sill ($C_0 + C_1$) and theoretical and practical range (a), in R language (R Development Core Team, 2012), more specifically with the ‘geoR’ package (Junior Ribeiro and Diggle, 2001), both free access and in accordance with the GPL (General Public Licence).

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & , |h| = 0 \\ C_0 + C_1 \left[1 - \exp\left(-\frac{|h|}{a}\right) \right] & , |h| \neq 0 \end{cases} \quad (3)$$

Subsequently prediction intervals (PI) were constructed for the set of replications, in order to compare the spatial variability, as with the PI, it can be stated that 95% of the samples were predicted.

The detectable pores were classified based on data mining by ‘randomForest’ package (Liaw and Weiner, 2012), and in functions developed in R language (R Development Core Team, 2012), where it was possible to generate various pore diameter classes and to detect the most contrasting ones.

Results and discussion

Spatial variability of soil structure

The empirical semivariograms indicated a second-order stationarity for the variables evaluated, reflected by clear and well-defined sill, where it was asymptotically reached by the exponential fit of the theoretical model (Fig. 1-6). This theoretical model represents an average continuity of spatial variability, i.e., this fit can be explained by the high ease of alteration of the soil structure related attributes promoted by human action (Bottega et al. 2013).

Insert Fig. 1.

Insert Fig. 2.

Insert Fig. 3.

Through empirical and theoretical semivariograms as well as the prediction interval (PI), the spatial dependence in all combinations (two soils x 3 depths x 3 orthogonal directions) was detected in the 3D grayscale images (Fig. 1-6), since it was not sufficient to verify the anisotropy of soil structure by the image analysis only by visual observation of orthogonal directions of the semivariograms.

Through theoretical semivariograms of the X and Y (horizontal) and Z (vertical) orthogonal directions it was possible to verify the variability of the spatial dependence of the structural components (mineral portion and pore space) of Latosols on a micrometric scale.

Insert Fig. 4

Insert Fig. 5.

Insert Fig. 6.

Estimates of adjusted semivariograms that best describe the behavior of the soil structure spatial variability are presented in Table 4.

The higher ranges of spatial dependence for the orthogonal directions occurred in RL, which indicates its lower variability and higher spatial

continuity (Bottega et al. 2013), i.e., the range indicates the distance limit in which the sample points are correlated among themselves (Vieira, 2000).

The high weathering-leaching undergone by RL was reflected in the clay fraction mineralogy with marked presence of iron (Hm and Gt) and aluminum (Gb) oxides (Table 3). Camargo et al. (2008a) attributed higher ranges of spatial dependence to these minerals, since crystallographically, they are more homogeneous.

The Al and Fe oxides, particularly in RL contribute to the formation of the granular type structure, where the distribution of minerals in relation to plasma follows an agglutinated pattern (Ferreira et al. 1999), in more spherical micro-aggregates (diameter <0.84 mm) (Ghidin et al. 2006), conferring a high predominance of inter-aggregate or compound packed pores, which are in turn arranged in interconnected cavities (Ferreira et al. 1999; Vidal-Torrado et al. 1999). This can be seen in pore diameter distribution, where there was a predominance of greater number and volume of pores mainly in the 0.2 to 0.6 mm diameter range, detected in 3D images of the three depths (Fig.7).

Insert Table 4.

For the 80-94 cm depth in RL the lower ranges are due to the transition zone between the soil layers that underwent the action provided by the system in study and the soil layer which preserves the intrinsic attributes of the soil. At this depth a narrowing of the PI was observed that refers to the lower variability of the sampling.

The RYL dominated by kaolinite in the clay fraction (Table 3), showed lower ranges of spatial dependence than RL, confirming the results obtained by Carmargo et al. (2008b) who attributed it to kaolinite, due to it presenting a positive correlation with the formation of aggregates larger than 2 mm.

According to these authors, it favors the predominance of cavity type pores, that is, the mineral particles are enveloped in a dense plasma, with little tendency towards the development of microstructure (Ferreira et al. 1999), reducing the structural organization (Pereira et al. 2010), which limits the formation of pores of larger diameter along the studied profile (Ghidin et al. 2006) (Fig. 7).

Regarding the PI, the highest amplitudes were observed at a depth of 80-94 cm for RYL orthogonal directions which coincided with the transition between the BC and C horizons where there is the presence of some more easily weatherable primary minerals. The RL at the 20-34 cm depth showed the joint effects of revolving occurred during planting row preparation, altering the soil structure (Oliveira et al. 2004). The contribution of organic matter from the high input of organic residue from coffee and *Brachiaria* sp., being its scattered residues on the coffee line and inter-row, probably acting on the formation and stabilization of aggregates (Costa Junior et al. 2012).

In general, the greatest spatial dependence ranges (highest value) occurred in the Z direction (vertical) in both soils (granular and block structure) preferentially at depths of 20-34 and 150-194 cm (Table 4) and in the Y direction (horizontal) at 80-94 cm.

These directions are more correlated, and therefore have more homogeneous structural organization, with greater pore continuity and presence of higher diameter pores (Schaffrath et al. 2008). Unlike the soils of temperate regions with platy structure and under freeze-thaw processes, where the highest spatial variability is concentrated in the vertical direction (Z) with low values of spatial range (Taina et al. 2013).

These same authors detected high value of spatial range in all directions, which reflects the structure type, however in the Latosols the range value observed was much lower, what indicated the complex organization of microgranular structure.

In all situations, the nugget effect (C_0) was null, i.e., errors due to measurement and, or, the natural variability of the phenomenon itself, showed low values (Ávila et al. 2010), proving that the sampling distance (30 m) was adequate enough to detect the structure of the spatial continuity of the phenomenon under study. Thus, the strong spatial dependence of the orthogonal directions for the soils evaluated was evident (Schaffrath et al. 2008). The sills for all combinations have very similar values, however with lower values for RL.

Pore diameter distribution

Through the analysis of the generated 3D images a large number of pores at the boundaries between macro- and mesopores for both soils could be detected. Subsequently, the distribution of these pores by diameter was performed by means of regression analysis generated by the orientation of a “randomForest” data tree (Liaw and Weiner, 2012), which allowed to reproduce a larger number of classes in order to maximize the difference between level combinations.

The results of the diameter distribution of detectable pore and sphericity are shown in Fig. 7.

With the generation of 30 pore diameter classes it was possible to detect the contrasts between the soils within an interval of 0.2 to 1 mm, which corresponds to the boundary between the thin macropores and large mesopores (Bullock et al. 1985). The distinction between soils was evident in the intervals from 0.2 to 0.4 mm and 0.4 to 0.6 mm, where the highest number and volume of visible pores occurred, i.e., those which occupy the major part of the soil matrix.

Both number and volume of the pores followed similar trends within each soil, being more evident in RL throughout the studied depths. The

microgranular structure (Vidal-Torrado et al. 1999) by favoring the formation of a larger quantity of voids, especially the inter-aggregate ones (Carducci et al. 2011; Vollant-Tuduri et al. 2005; Ferreira et al. 1999), helps to explain this trend.

Insert Fig. 7.

With respect to the shape factor which indicates the roundness and surface roughness of the evaluated pore, the sphericity was used (0 = less rounded and angular, 1 = more rounded and smooth) by simulation of the spatial geometry of the pore. The sphericity increased with decreasing pore diameter (Fig. 7), as observed by Tippkötter et al. (2009).

The predominance of pores more spherical in smaller diameter classes at 20 cm depth, especially in RL, was evident. This result is attributed to its structure type favored by the presence of a higher gibbsite concentration than RYL (Table 3), which acts in the formation of very small micro-aggregates and more rounded micropeds (Vidal-Torrado et al. 1999; Ferreira et al. 1999).

This higher sphericity can also be related to the effect of the management system adopted, which turns over the soil and promotes the formation of smaller, more rounded aggregates, corroborating observations by Cremom et al. (2009). The higher diameter pores (> 0.8 mm) showed to be more angular and rougher. At greater depths, a mild similarity between the soils was observed.

The study of pore diameter distribution is traditionally based on the construction of the water retention curve, which relates the diameter of the capillary pore to the tension applied to the samples, in order to have a diameter value for each point of the curve. Based on this curve and using mathematical model, Carducci et al. (2013) detected the bimodal characteristic of RL, marked

by the presence of structural and textural pores, evidenced by the two inflection points of the curves along the soil profile, as well as the influence of the gibbsitic mineralogy, resulting greater water retention strength.

This bimodal scaling of RL pores was confirmed by the high number of high-volume pores detected in the CT images (Fig. 7), which seems to indicate the existence of an extensive network of well-connected pores (Vollant-tuduri et al. 2005; Luo et al. 2010), typical of the Cerrado biome Latosols (Ker, 1996).

The Latosols have high water infiltration and percolation into the structural pores (Ferreira et al. 1999), and retain large amounts of water with very high energy, especially in the textural pores (matric potential < -1500 kPa), quickly releasing the water present in the structural pores, which was observed by the abrupt slope of the curve (Carducci et al. 2011; Carducci et al. 2013), which represents the structural pore distribution (Dexter, 2004).

On the other side, the RYL presented the lowest number and pore volume at the measured depths and the pore scaling had a more homogeneous distribution among the generated diameter classes, especially at the 20-34 cm depth (Fig. 7), which can contribute to the gradual release of water to the coffee roots, thus prolonging the available water supply time for the plants. It is important to note that the coffee plant needs to absorb large amounts of water to maintain high fructification (Rena and Guimarães, 2000).

Pore morphology

According to Gantzer and Anderson (2002), to be more accurate in assessing the spatial heterogeneity of the different soil structure components, it is interesting to use tools that quantify the morphology of the pores and their connections. Measures of number, area, perimeter, and roundness are useful tools. However, they have a limited capacity to describe the systematic behavior

of a large volume of reconstructed images. These analyzes are beneficial in describing the interactions among the soil physical, biological and chemical processes, thus discriminating the effects of tillage systems on soil attributes.

From the classification of the three-dimensional shapes of the pores we found that high percentages of pores in the acicular (needle-like cylindrical), channels and spheroid occur along the profile for both Latosols (Fig. 8).

Pores of a more spherical shape were detected in gibbsitic Latosol, confirming the results obtained with the shape factor variable (Fig. 7), as well as most of the pores of the platy, planar and acicular classes that may be similar to the fissural pores (Castro et al. 2003) that occurred in kaolinitic Latosol.

Insert Fig. 8.

The presence of certain types of pores reveals the role of factors external to the organization of soil particles that can influence their formation or transformation. Therefore monitoring the pore class distribution in agricultural areas is very relevant, since these minimum substantive changes can modify the dynamic processes occurring in the soil, which can reflect in the crop yield (Lima et al. 2005).

The channels pores detected in 3D images usually more closely resemble cylinders and are indicative of biological activity (biopores), i.e., are formed by the action of roots and soil organisms (Lima et al. 2005; Castro et al. 2003; Lima et al. 2012; Genro Junior et al. 2004). There was a significant percentage of this morphological class ($\approx 30\%$) in the three studied depths. When opening the trenches for pedological description and soil sampling, the full development of the coffee plant roots with an extensive root branching network and consequent soil exploration was visible.

Based on the above, it is noteworthy that the management system adopted here in the first years of implementation probably abruptly altered the soil structure, however after 6 years of cultivation, the reorganization of the structure as well as the voids in the Latosols could have occurred.

With observed by Lima et al. (2012) in a study of structural recovery of a Red-Yellow Latosol, promoted by Coastcross grass (*Cynodon* sp.) which was confirmed by morphological similarities between depths of 20-34 and 150-164 cm that represent the direct effect of the management system in study and intrinsic attributes of the soil, respectively.

The pore morphology was probably influenced by the joint action of the soil management practices adopted, which aim to improve the physical quality. The greater amount of organic residue on the soil surface from *Brachiaria* spp. maintained between rows, as well as the renewal and growth of roots along the soil profile (Luo et al. 2010; Lima et al. 2012) may contribute to the elevation of the organic matter contents and with its decomposition, would release soil microbiota activating substances and thereby act to stabilize the aggregates (Salton et al. 2008; Costa Júnior et al. 2012; Martin et al. 2012).

Conclusion

The greater spatial variability occurred in the horizontal orthogonal direction (X and Y) of the three-dimensional image. The pores detected were different between the Latosols studied, mainly at the 20-34 cm depth, especially in gibbsitic Latosol occurred the largest number and volume in the different pores diameter. It was evident that the soil classes differed on the 3D pore characteristics and need to be considered in order to better characterize the causes of pore variability.

The sphericity shape factor was similar for both soils, but with greater emphasis on pore classes with a diameter less than 0.4 mm, mainly at the 20-34cm depth. The highest percentage of spheroid pores occurred in the gibbsitic Latosol while the platy pores were more abundant in the kaolinitic Latosol.

Acknowledgments

To CNPq for the granting of scholarships. To FAPEMIG for financial support, to the Consórcio de Pesquisas Cafeeiras Embrapa-café for providing vehicles and the Empresa Agropecuária Piumhi (AP) in the person of Agronomy Engineer Alessandro Oliveira for logistical support and use authorization of the experimental area. To UFLA/DCS for institutional support to accomplish this work.

References

Ávila L F, Mello CR, Silva AM (2010) Continuidade e distribuição espacial da umidade do solo em bacia hidrográfica da Serra da Mantiqueira. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* **14**, 1257-1266 (in Portuguese, with English abstract). doi: [10.1590/S1415-43662010001200002](https://doi.org/10.1590/S1415-43662010001200002)

Bottega EL, Queiroz DM, Pinto FAC, Souza CMA (2013) Variabilidade espacial de atributos do solo em sistema de semeadura direta com rotação de culturas no cerrado brasileiro. *Revista Ciência Agronômica* **44**, 1-9 (in Portuguese, with English abstract).

Bullock P, Fedoroff N, Jongerius A, Stoops G, Tursina T (1985) Handbook for Soil Thin Section Description. Waine Research Publications, England. pp.152.

Carducci CE; Oliveira GC, Severiano EC, Zeviani WM (2011) Modelagem da curva de retenção de água de Latossolos utilizando a equação duplo van Genuchten. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* **35**,77-86 (in Portuguese, with English abstract). doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832011000100007>

Carducci CE, Oliveira GC, Zeviani WM, Lima VMP, Serafim ME (2013) Bimodal pore distribution on soils under conservationist management system for

coffee crop. *Engenharia Agrícola* **33**, 291-302. doi:

<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162013000200008>

Camargo LA, Marques Júnior J, Pereira GT, Horvat RA (2008a) Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de um Latossolo sob diferentes formas do relevo. I - mineralogia da fração argila. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* **32**, 2269-2277 (in Portuguese, with English abstract). doi:

<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000600006>

Camargo LA, Marques Júnior J, Pereira GT, Horvat RA (2008b) Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de um Latossolo sob diferentes formas do relevo. II- correlação espacial entre mineralogia e agregados. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* **32**, 2279-2288 (in Portuguese, with English abstract). doi:

<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000600007>

Castro SS, Cooper M, Santos MC, Vidal-Torrado P (2003) Micromorfologia do solo: bases e aplicações. In 'Tópicos em ciência do solo' (RF Novais, VVH Alvarez, CE Schaefer) pp.107-164 (SBCS: Viçosa).

Clausnitzer V, Hopmans JW (2000) Pore-scale measurements of solute breakthrough using microfocus X-ray computed tomography. *Water Resource Research* **36**, 2067–2079. doi: [10.1029/2000WR900076](https://doi.org/10.1029/2000WR900076)

Costa Junior C, Pícolo MC, Siqueira Neto M, Camargo PB, Cerri CC, Bernoux M (2012) Carbono em agregados do solo sob vegetação nativa, pastagem e sistemas agrícolas no Bioma Cerrado. *Revista Brasileira de Ciências Solo* **36**, 1311-1321 (in Portuguese, with English abstract). doi:

<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832012000400025>

Cremom C, Rosa Júnior EJ, Serafim ME, Ono FB (2009) Análise micromorfológica de agregados de um Latossolo Vermelho Distroférrico em diferentes sistemas de manejo. *Acta Scientiarum* **31**, 139-146 (in Portuguese, with English abstract). doi: [10.4025/actasciagron.v31i1.6640](https://doi.org/10.4025/actasciagron.v31i1.6640)

Dexter AR (2004) Soil physical quality part I: theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma* **120**, 201-214. doi: [10.1016/j.geodermaa.2003.09.005](https://doi.org/10.1016/j.geodermaa.2003.09.005)

Embrapa Solos (2013) 'Sistema brasileiro de classificação de solos' 3th edn. (Centro Nacional de Pesquisa de Solos: Rio de Janeiro).

Embrapa Solos (2011) 'Manual de métodos de análise de solos' 2nd edn (Centro Nacional de Pesquisa de Solos: Rio de Janeiro)

Faraco MA, Uribe-Opazo MA, Silva EAA, Johann JÁ, Borssoi JA (2008) Seleção de modelos de variabilidade espacial para elaboração de mapas temáticos de atributos físicos do solo e produtividade da soja. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* **32**, 463-476 (in Portuguese, with English abstract). doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000200001>

Ferreira MM, Fernandes B, Curi N (1999) Mineralogia da fração argila e estrutura de Latossolos da região sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* **23**, 507-514 (in Portuguese, with English abstract).

Gantzer CJ, Anderson SH (2002) Computed tomographic measurement of macroporosity in chisel-disk and no-tillage seedbeds. *Soil and Tillage Research* **64**, 101–111. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987\(01\)00248-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987(01)00248-3)

GE Healthcare (2006) Microview Analysis 2.2. Technical Publication. Direction 2407688. Revision 1. [Online]. URL: <http://www.oucom.ohiou.edu/ou-microct>. Accessed: 12 December 2011.

Genro Junior SA, Reinert DJ, Reichert JM (2004) Variabilidade temporal da resistência à penetração de um Latossolo argiloso sob semeadura direta com rotação de culturas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* **28**, 477-484 (in Portuguese, with English abstract) doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832004000300009>

Ghidin AA, Melo VF, Lima VC, Lima JMJC (2006) Toposseqüências de Latossolos originados de rochas basálticas no Paraná. II – relação entre mineralogia da fração argila e propriedades físicas dos solos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* **30**, 307-319 (in Portuguese, with English abstract). doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-068320060002000>

Goovaerts P (1999) Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives. *Geoderma* **89**, 1–45. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0016-7061\(98\)00078-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0016-7061(98)00078-0)

Isaaks EH, Srivastava RM (1989) An introduction to applied geostatistics. New York: Oxford University, pp. 561.

IUSS Working Group WRB (2006) World reference base for soil resources 2006. World Soil Resources Reports N° 103. FAO, Rome. pp. 128.

Journel A, Huijbregts CJ (1978) Mining geostatistics. San diego: Academic, pp. 600.

Ker JC (1997) Latossolos do Brasil: uma revisão. *Geonomos* **5**, 17-40.

Klein VA, Libardi PL (2002) Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* **26**, 857-867 (in Portuguese, with English abstract).

Liaw A, Wiener, M (2012) Package ‘randomForest’: Breiman and Cutler’s random forests for classification and regression - Version 4.6-7. URL: <http://stat-www.berkeley.edu/users/breiman/RandomForests> Accessed: 12 september 2012.

Lima HV, Lima CLR, Leão TP, Cooper M, Silva AP, Romero RE (2005) Tráfego de máquinas agrícolas e alterações de bioporos em área sob pomar de laranja. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* **29**, 677-684 (in Portuguese, with English abstract) doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832005000500003>

Lima VMP, Oliveira GC, Serafim ME, Curi N, Evangelista AR (2012) Intervalo hídrico ótimo como indicador de melhoria da qualidade estrutural de Latossolo degradado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* **36**, 71-78 (in Portuguese, with English abstract) doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-07072005000400015>

Luo L, Lin H, Li S (2010) Quantification of 3-D soil macropore networks in different soil types and land uses using computed tomography. *Journal of Hydrology* **393**, 53–64 doi: [10.1016/j.jhydrol.2010.03.031](http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.03.031)

Martin SL, Mooney SJ, Dickinson MJ, West HM (2012) The effects of simultaneous root colonization by three *Glomus* species on soil pore characteristics. *Soil Biology and Biochemistry* **49**, 167-173 doi: [10.1016/j.soilbio.2012.02.036](http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.02.036)

Munkholm LJ, Heck RJ, Deen B (2012) Soil pore characteristics assessed from X-ray micro-CT derived images and correlations to soil friability. *Geoderma* **181–182**, 22–29 doi: [10.1016/j.geoderma.2012.02.024](http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.02.024)

Ngom NF, Garnier P, Monga O, Peth S (2011) Extraction of three-dimensional soil pore space from microtomography images using a geometrical approach. *Geoderma* **163**, 127–134 doi: [10.1016/j.geoderma.2011.04.013](http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.04.013)

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. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* **28**, 327-336 (in Portuguese, with English abstract) doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832004000200011>

Pereira TTC, Ker JC, Schaefer CEGR, Barros NF, Neves JCL, Almeida CC (2010) Gênese de Latossolos e Cambissolos desenvolvidos de rochas pelíticas do grupo Bambuí – Minas Gerais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* **34**, 1283-1295 (in Portuguese, with English abstract) doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832010000400026>

Pires LF, Cássaro FAM, Saab SC, Brinatti AM (2011) Characterization of changes in soil porous system by gamma-ray tomography. *Nuclear Instruments and Methods Physics Research A* **644**, 68–71 doi: [10.1016/j.nima.2011.04.025](https://doi.org/10.1016/j.nima.2011.04.025)

Rasband W (2002) ImageJ: Image processing and analysis in Java (Online). Available at Research Services Branch, National Institute of Health. Bethesda, MD, USA. <<http://rsb.info.nih.gov/ij/index.html>>. Accessed: 10 november 2011.

R Development Core Team (2012) R: a language and environment for statistical computing. Available at Institute for Statistics and Mathematics. Vienna, Gemany. URL: <http://www.R-project.org>>. Accessed: 2 february 2012

Rena AB, Guimarães PTG (2000) Sistema radicular do cafeeiro: estrutura, distribuição, atividade e fatores que o influenciam. Belo Horizonte: EPAMIG, pp. 80 (Documentos, 37).

Resende M, Bahia Filho AFC, Braga JM (1987) Mineralogia da argila de Latossolos estimada por alocação a partir do teor total de óxidos do ataque sulfúrico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* **11**, 17-23 (in Portuguese, with English abstract).

Ribeiro Jr PJ, Diggle PJ (2001) geoR: a package for geostatistical analysis. R-News, London, 1, pp.15-18.

Santos RD, Lemos RC, Santos HG, Ker JC, Anjos LHC (2005) Manual de descrição e coleta de solo no campo. 5th. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, MG, pp.92.

Schaffrath VR, Tormena CA, Fidalski J, Andrade ACG (2008) Variabilidade e correlação espacial de propriedades físicas de solo sob plantio direto e preparo convencional. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* **32**, 1369-1377 (in Portuguese, with English abstract). doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000400001>

Serafim, M. E.; Oliveira, G. C.; Oliveira, A. S.; Lima, J. M.; Guimarães, P. T. G.; Costa, J. C., 2011. 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* **27**, 964-977 (in Portuguese, with English abstract).

Soil Survey Staff (2006) Keys to Soil Taxonomy. 8 ed. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, Washington. 326 pp.

Taina IA, Heck R J, Elliot TR, Scaiff N (2010) Micromorphological and X-ray μ CT study of Orthic Humic Gleysols under different management conditions. *Geoderma* **158**, 110–119 doi: [10.1016/j.geoderma.2010.02.009](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.02.009)

Taina IA, Heck RJ, Deen W, Ma EYT (2013) Quantification of freeze_thaw related structure in cultivated topsoils using X-ray computer tomography *Canadian Journal of Soil Science* **93**, 1-21, doi: [doi:10.4141/CJSS2012-044](https://doi.org/10.4141/CJSS2012-044)

Tippkötter R, Eickhorst T, Taubner H, Gredner B, Rademaker G (2009) Detection of soil water in macropores of undisturbed soil using microfocus X-ray tube computerized tomography (μ CT). *Soil and Tillage Research* **105**, 12–20 doi: [10.1016/j.still.2009.05.001](https://doi.org/10.1016/j.still.2009.05.001)

Tracy SR, Roberts JA, Black CR, Mcneill A, Davidson R, Mooney SJ (2010) The X-factor: visualizing undisturbed root architecture in soils using X-ray computed tomography. *Journal of Experimental Botany* **61**, 311–313 doi: [10.1093/jxb/erp386](https://doi.org/10.1093/jxb/erp386)

Vidal-Torrado P Lepsch IF, Castro SS, Cooper M (1999) Pedogênese em uma seqüência Latossolo podzólico na borda de um platô na depressão periférica paulista. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* **23**, 909-921 (in Portuguese, with English abstract).

Vieira SR (2000) Geoestatística em estudo de variabilidade espacial do solo. In 'Tópicos em ciência do Solo' (Eds. RF Novais, VHV Alvarez, CEGR Schaefer) v.1, pp.1-55 (SBCS: Viçosa).

Vollant-Tuduri N, Bruand A, Brossard M, Balbino LC, Oliveira MIL, Martins ÉS (2005) Mass proportion of microaggregates and bulk density in a Brazilian clayey Oxisol. *Soil Science Society of American Journal* **69**, 1559-1564. doi: [10.2136/sssaj2003.0344](https://doi.org/10.2136/sssaj2003.0344)

Table 1 – Soil structure and factors limiting the use and management of the B horizon of a Red -Yellow Latosol (RYL) and Red Latosol (RL).

¹e.d.: effective depth; ²t: texture class where c: very clayey; ³TS: terrain slope; ⁴S: specific, in which d: dystrophic. Adapted from Serafim (2011).

| Soil Class | Structure | | | Limiting Factor | | | | | |
|------------|-------------------|------------|--------|--------------------------|-----------------|--------------|------------------------|--------------|----------------|
| | Type | Class | Degree | e.d. ¹ (m) | t. ² | Drainage | TS ³ (%) | Erosion | S ⁴ |
| RYL | Subangular blocks | Small | Weak | >2.1 | c | Well Drained | 4 to 8 | Not apparent | d |
| RL | Granular | Very Small | Strong | >2.2 | c | Well Drained | 9 to 14 | Not apparent | d |

Table 2. Particle size distribution of the B horizon of a Red-Yellow Latosol (RYL) and Red Latosol (RL).

| Depth (cm) | RYL | | | RL | | |
|---------------|------|------|------|------|------|------|
| | Clay | Silt | Sand | Clay | Silt | Sand |
| 20-34 | 716 | 210 | 74 | 869 | 66 | 65 |
| 80-94 | 724 | 213 | 63 | 895 | 46 | 59 |
| 150-164 | 700 | 238 | 62 | 904 | 39 | 57 |

Table 3 - Chemical and mineralogical characterization of the B horizon of a Red-Yellow Latosol (RYL) and Red Latosol (RL).

¹Ki: molecular ratio SiO₂:Al₂O₃; ²Kr: molecular ratio SiO₂: (Al₂O₃ + Fe₂O₃),

³Kt: kaolinite, ⁴Gb: gibbsite, ⁵Hm: hematite, ⁶Gt: goethite.

| Soils | Sulfuric acid digestion | | | Ki ¹ | Kr ² | Kt ³ | Gb ⁴ | Hm ⁵ | Gt ⁶ |
|-------|-------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | | | | | | |
| | g kg ⁻¹ | | | % | | | | | |
| RY | 243.3 | 285.3 | 122.1 | 1.4 | 114 | 52.30 | 40.46 | 0.69 | 6.55 |
| RL | 127.2 | 364.1 | 158.2 | 0.5 | 0.4 | 27.34 | 54.02 | 11.92 | 6.72 |

Table 4 - Theoretical exponential model parameters adjusted for the orthogonal directions (X, Y, Z) of a Red-Yellow Latosol (RYL) and Red Latosol (RL).

| Soils | Depth (cm) | Orthogonal direction | C ₀ | (C ₀ +C ₁) | Theoretical range | Practical range |
|-------|------------|----------------------|----------------|-----------------------------------|-------------------|-----------------|
| | | | | | (mm) | (mm) |
| RYL | 20-34 | X | 0 | 0.9646 | 0.9608 | 2.8824 |
| RYL | 20-34 | Y | 0 | 0.9527 | 0.9044 | 2.7131 |
| RYL | 20-34 | Z | 0 | 0.9357 | 0.9738 | 2.9215 |
| RYL | 80-94 | X | 0 | 0.8678 | 0.8579 | 2.5737 |
| RYL | 80-94 | Y | 0 | 0.9265 | 1.0023 | 3.0068 |
| RYL | 80-94 | Z | 0 | 0.8734 | 0.9429 | 2.8288 |
| RYL | 150-164 | X | 0 | 0.9471 | 0.9677 | 2.9032 |
| RYL | 150-164 | Y | 0 | 0.9627 | 0.8540 | 2.5619 |
| RYL | 150-164 | Z | 0 | 0.9293 | 0.9983 | 2.9948 |
| RL | 20-34 | X | 0 | 0.8594 | 0.9917 | 2.9751 |
| RL | 20-34 | Y | 0 | 0.8686 | 1.0081 | 3.0242 |
| RL | 20-34 | Z | 0 | 0.8659 | 1.1720 | 3.5160 |
| RL | 80-94 | X | 0 | 0.9320 | 0.8683 | 2.6049 |
| RL | 80-94 | Y | 0 | 0.9429 | 0.8795 | 2.6386 |
| RL | 80-94 | Z | 0 | 0.9126 | 0.8775 | 2.6324 |
| RL | 150-164 | X | 0 | 0.9516 | 1.0154 | 3.0463 |
| RL | 150-164 | Y | 0 | 0.9164 | 1.0134 | 3.0401 |
| RL | 150-164 | Z | 0 | 0.9781 | 1.1082 | 3.3245 |

C₀ = Nugget effect; C₀+C₁= Sill

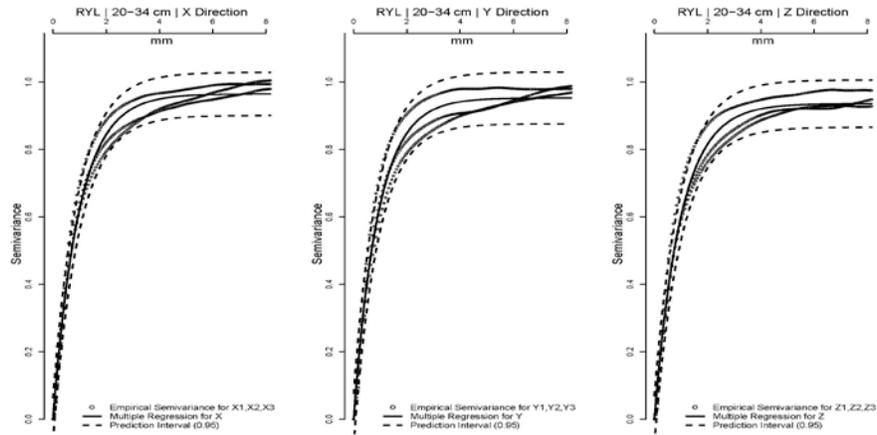


Fig. 1. Standard empirical semivariograms and theoretical exponential model fitted to orthogonal directions X, Y and Z at depths of 20-34cm of Red-Yellow Latosol (RYL).

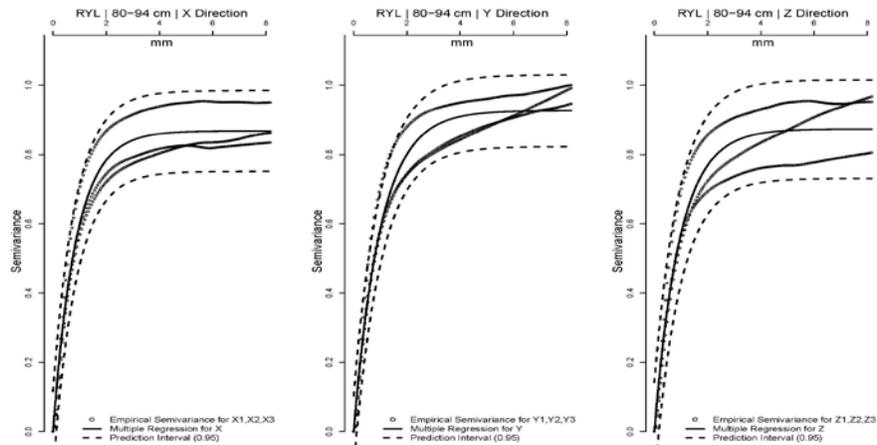


Fig. 2. Standard empirical semivariograms and theoretical exponential model fitted to orthogonal directions X, Y and Z at depths of 80-94cm of Red-Yellow Latosol (RYL).

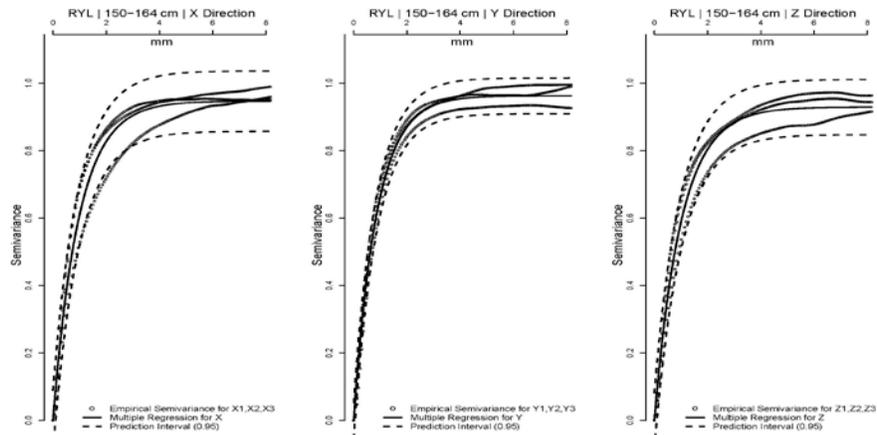


Fig. 3. Standard empirical semivariograms and theoretical exponential model fitted to orthogonal directions X, Y and Z at depths of 150-164cm of Red-Yellow Latosol (RYL).

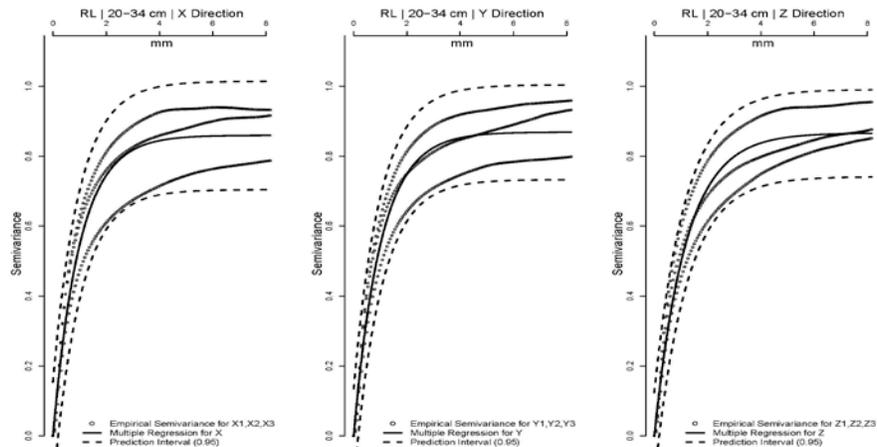


Fig. 4. Standard empirical semivariograms and theoretical exponential model fitted to orthogonal directions X, Y and Z at depths of 20-34 cm, of Red Latosol (RL).

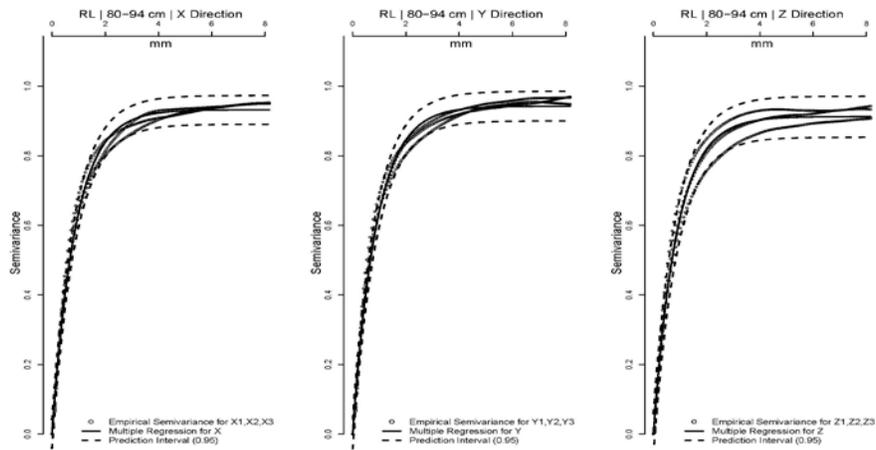


Fig. 5. Standard empirical semivariograms and theoretical exponential model fitted to orthogonal directions X, Y and Z at depths of 80-94 cm, of Red Latosol (RL).

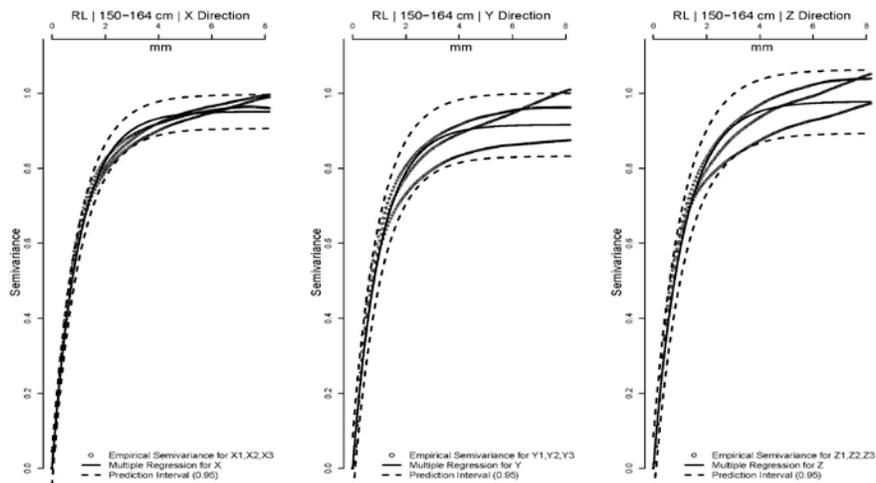


Fig. 6. Standard empirical semivariograms and theoretical exponential model fitted to orthogonal directions X, Y and Z at depths of 150-164 cm, of Red Latosol (RL).

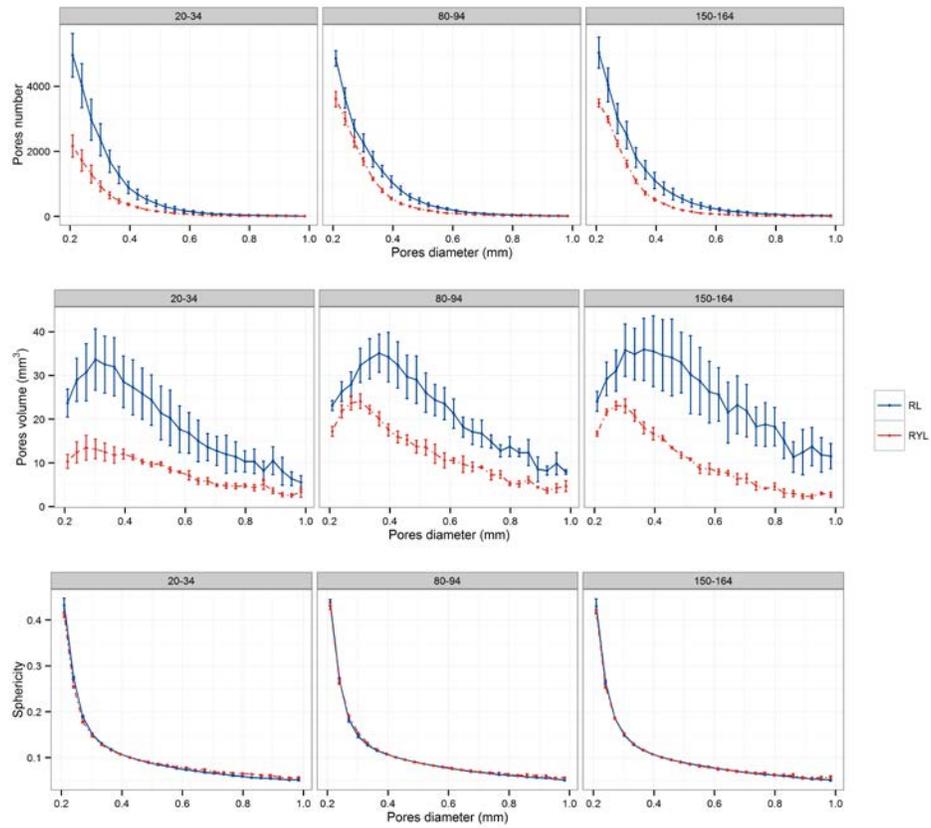


Fig. 7. Pore diameter distribution in number, volume and sphericity, respectively, of Red Latosol (RL) and Red Yellow Latosol (RYL). The bars correspond to the standard error of the mean.

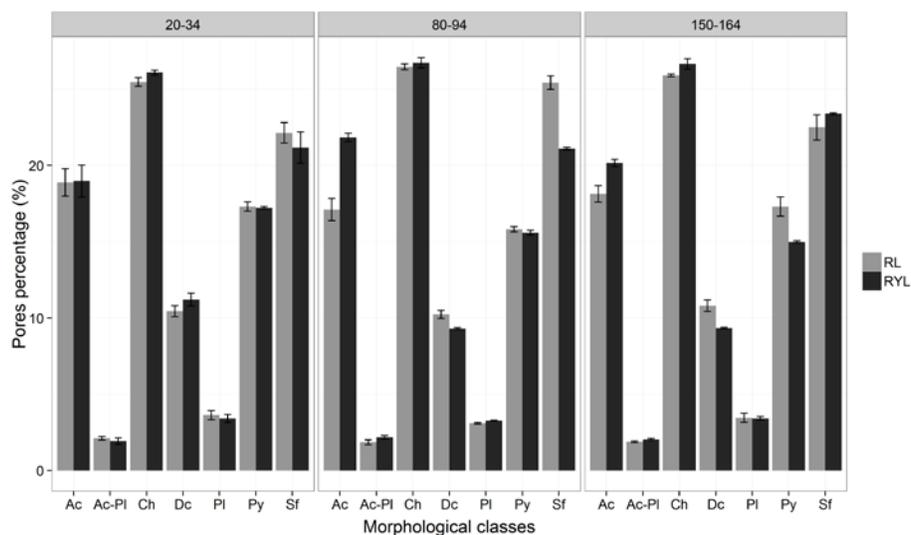


Fig. 8. Morphological classification of the pores of the Red-Yellow Latosol (RYL) and Red Latosol (RL). Ac-Pl: acicular-planar; Ac: acicular; Pl: planar; Py: platy; Ch: channel; Dc: disc; Sf: spheroid. The bars correspond to the standard error of the mean.

(VERSÃO PRELIMINAR DO ARTIGO)

ARTIGO 2 Variabilidade espacial de poros 3D de um Latossolo gibbsítico sob um sistema de manejo com diferentes doses de gesso

Carla Eloize Carducci *

Prof. Dr. Geraldo César de Oliveira (orientador) **

Artigo normalizado segundo a NBR 6022 (ABNT, 2003).

* Eng. Agrônoma, doutoranda Ciência do Solo, Departamento de Ciência do Solo – UFLA. E-mail: elocarducci@hotmail.com

** Eng. Agrícola, Dr. Ciência do Solo -UFLA, Prof. Adjunto IV, Departamento de Ciência do solo – UFLA, E- mail: geraldooliveira@dcs.ufla.br

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi visualizar e quantificar, por meio da tomografia computada de raios-X, a variabilidade da distribuição do diâmetro de poros em Latossolo gibbsítico submetido a um sistema de manejo que utiliza diferentes doses de gesso. Foram abertas três trincheiras aleatórias e longitudinais à linha de plantio em um Latossolo Vermelho distrófico gibbsítico muito argiloso, submetido às seguintes doses de gesso: G0: ausência de gesso; G7: 7 Mg ha⁻¹ e G28: 28 Mg ha⁻¹ de gesso adicional, aplicados na superfície do solo na linha de plantio. Amostras com estrutura preservada foram coletadas em cilindros de acrílico nas profundidades de 20-34, 80-94 e 150-164 cm para quantificação dos poros 3D obtidos por tomografia computada de raios-X. A variabilidade espacial da estrutura do solo foi avaliada por meio de semivariogramas gerados a partir das imagens 3D. Foi feita a classificação do diâmetro dos poros detectáveis. Para as inferências estatísticas foram utilizados o pacote 'geoR' e 'randomForest' em linguagem R. A maior continuidade espacial dos poros ocorreu no G7 nas três profundidades. Os efeitos combinados do sistema de manejo promoveram a maior variabilidade espacial da estrutura do solo no G28. Com base na análise geoestatística pode-se inferir que o sistema de manejo promoveu modificações favoráveis no arranjo poroso geralmente nas direções horizontais (X e Y).

Palavras – chave: Tomografia de raios-X. Continuidade espacial. Distribuição de poros. Cafeicultura.

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas agrícolas de manejo alteram os atributos físicos do solo e, conseqüentemente, a organização espacial dos poros, o que justifica os estudos que visam à avaliação da qualidade estrutural dos solos. A estrutura do solo é formada por agregados e uma ampla rede de poros, especialmente os interagregados, que asseguram um bom funcionamento dos processos hídricos, físico-químicos, biológicos e o desempenho da planta (LUO; LIN; LI, 2010; MARTIN et al., 2012).

Particularmente nos Latossolos oxídicos, a gibbsita, os óxidos de ferro e a matéria orgânica, nesta ordem, atuam como agentes desorganizadores da estrutura em blocos predispondo-os à formação de grânulos menores e mais arredondados (PEDROTTI et al., 2003; FERREIRA; FERNANDES; CURI, 1999; VIDAL-TORRADO et al., 1999), o que resulta em elevada porosidade, sobretudo dos poros interagregados (COOPER; VIDAL-TORRADO, 2005), que são facilmente alterados pelo manejo (DEXTER, 2004; OLIVEIRA et al., 2004; CARDUCCI et al., 2011; SEVERIANO et al., 2013).

Nesses Latossolos, quando submetidos a sistemas de manejo agrícola, os poros interagregados são afetados logo nas primeiras passagens do maquinário (SECCO et al., 2004), dada sua elevada suscetibilidade à compactação (AJAYI et al., 2009; SEVERIANO et al., 2013). Dessa forma, qualquer alteração promovida por fatores antrópicos deve ser avaliada, entre outras finalidades, a fim de detalhar as possíveis causas da variabilidade espacial na distribuição dos poros (MUNKHOLM; HECK; DEEN, 2012; LUO; LIN; LI, 2010).

Neste contexto, o emprego de um sistema de manejo que emprega práticas conservacionistas no cultivo do cafeeiro na região do Cerrado mineiro vem ganhando notoriedade por aliar melhorias químicas e físico-hídricas do solo aliadas à elevação da produtividade e à busca da sustentabilidade ambiental.

Dentro dos princípios da agricultura de conservação (RAIJ, 2008), este sistema propicia condições que potencializam o desempenho radicular do cafeeiro, fazendo com que haja melhorias no aproveitamento da água disponível em profundidade e uso eficiente dos nutrientes distribuídos no perfil do solo (SERAFIM et al., 2011).

Para a avaliação das alterações na porosidade do solo promovidas pelo manejo, a tomografia computada de raios-X é eficiente por possibilitar o mapeamento tridimensional dos componentes estruturais do solo, o que permite uma avaliação tanto qualitativa como quantitativa (BORGES; PIRES, 2012; SANDER; GERKE; ROGASIK, 2008).

O objetivo deste trabalho foi visualizar e quantificar, por meio da tomografia computada de raios-X, a variabilidade da distribuição do diâmetro de poros em Latossolo oxídico submetido a um sistema de manejo que utiliza diferentes doses de gesso.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

O estudo foi conduzido em lavoura cafeeira localizada no município de São Roque de Minas, região fisiográfica do Alto São

Francisco, MG, que tem por coordenadas 20°15'45" S e 46°18'17" W com altitude de 850m. 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).

A lavoura cafeeira é composta pela cultivar Catucaí Amarelo Multilínea (*Coffea arabica* L.) cultivado em plantio semiadensado com 0,65 x 2,50 m (entre plantas e entrelinhas, respectivamente). No preparo do solo foi empregada uma aração e duas gradagens com aplicação de corretivos em área total (calcário dolomítico 4 Mg ha⁻¹ + gesso agrícola 1,92 Mg ha⁻¹).

Para abertura do sulco de plantio a 0,60 m de profundidade e 0,50 m de largura, foi utilizada uma cavadeira adubadora que subsola naquela profundidade e mistura o solo até a profundidade de 0,40 m permitindo a incorporação de insumos (Ticianel, 2013), a exemplo da adubação de base (formulado 08-44-00, enriquecido com 1,5% Zn e 0,5% B) e a correção em maior profundidade com calcário dolomítico 8 Mg ha⁻¹ (2 kg m⁻¹) em todos os tratamentos. As mudas de cafeeiro foram plantadas entre a segunda quinzena de outubro e a primeira quinzena de novembro/2008.

Após o plantio, nos tratamentos que receberam gesso adicional, este foi distribuído na superfície do solo ao longo da linha de cultivo, sendo este material recoberto com material de solo misturado com material vegetal proveniente da entrelinha ("chegada de terra" junto ao tronco do cafeeiro).

Conjuntamente à instalação da lavoura foi implantada a *Brachiaria ducumbens* (Syn. *Urochloa*) como cultura de cobertura nas entrelinhas, sendo esta cortada periodicamente por meio de roçadora, o que faz com que o resíduo vegetal produzido fosse distribuído ao longo da linha da cultura principal. Estas práticas são as do sistema conservacionista de manejo do solo descrito por Serafim et al. (2011).

Os tratos culturais da lavoura foram realizados predominantemente com equipamentos movidos a tração animal e as colheitas são realizadas com colhedora automotriz. O monitoramento nutricional do cafeeiro e o gerenciamento da adubação foram realizados com base em análise foliar.

A área experimental é formada por um total de 30 parcelas, com 10 tratamentos de doses de gesso aplicados na superfície e ao longo da linha do cafeeiro (0; 3,5; 7; 14; 28 e 56 Mg ha⁻¹) e tratamentos sob manejo convencional para comparação (Figura 1).

As parcelas contêm 10 linhas com 36 plantas cada, totalizando 360 plantas por parcela com área de 585 m². A bordadura corresponde a 3 plantas no início da parcela e duas linhas nas laterais, totalizando área de 360 m².

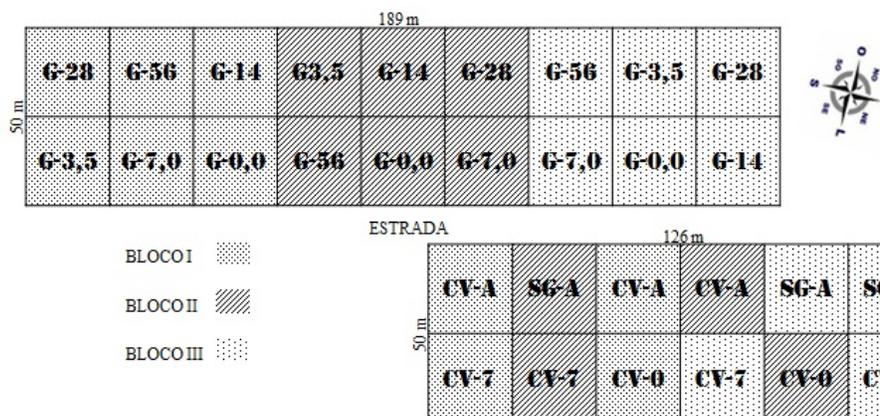


Figura 1 Croqui da área experimental (1,5 ha). Com os seguintes tratamentos: G-0: gesso no preparo e sem na linha (0 kg m^{-1}); G-3,5: gesso no preparo e $3,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ na linha ($0,875 \text{ kg m}^{-1}$); G-7: gesso no preparo e $7,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ na linha ($1,75 \text{ kg m}^{-1}$); G-14: gesso no preparo e 14 Mg ha^{-1} na linha ($3,5 \text{ kg m}^{-1}$); G-28: gesso no preparo e 28 Mg ha^{-1} na linha ($7,0 \text{ kg m}^{-1}$); G-56: gesso no preparo e 56 Mg ha^{-1} na linha ($14,0 \text{ kg m}^{-1}$); SG-A: sem gesso no preparo e na linha; CV-A: convencional, sem gesso no preparo e na linha; CV-0: convencional, com gesso no preparo e sem na linha; CV-7: convencional, com gesso no preparo e $7,0 \text{ ton}$ na linha ($1,75 \text{ kg m}^{-1}$). Todas as linhas de plantio dos tratamentos foram preparadas a 60 cm de profundidade

Para este estudo foram selecionados os tratamentos que apresentam as práticas citadas acima, variando a dose de gesso: G0: ausência de gesso adicional, porém com aplicação de gesso em área total ($1,92 \text{ Mg ha}^{-1}$); G7: 7 Mg ha^{-1} e G28: 28 Mg ha^{-1} de gesso adicional, ambos aplicados na superfície do solo na linha de plantio. A seleção desses tratamentos baseou-se na hipótese de possíveis alterações estruturais promovidas pela

ação do gesso; para isso avaliou-se a dose máxima recomendada e encontrada na literatura (G7) (MOREIRA et al., 2001); a dose referência do próprio sistema (G28) e o tratamento sem gesso adicional (G0).

2.2 Caracterização física e química do solo

Para a caracterização do solo e coleta de amostras, foi aberta uma trincheira em cada parcela, longitudinais à linha dos cafeeiros, com dimensões de 70 x 150 x 150 cm. Na época da amostragem (setembro/2011) a lavoura apresentava três anos de implantação.

Amostras com estrutura preservada em cilindros de acrílico (6,5 cm de diâmetro e 14 cm de altura) foram coletadas para análise tomográfica e em anéis volumétricos (6,5 cm diâmetro e 2,5 cm altura) para as demais análises, na linha de plantio e próximo à planta de estudo, logo abaixo da camada de gesso, nas profundidades de 20-34, 80-94 e 150-164 cm, com três repetições (trincheira) em cada tratamento (G0, G7 e G28), totalizando 27 amostras (Figura 2).

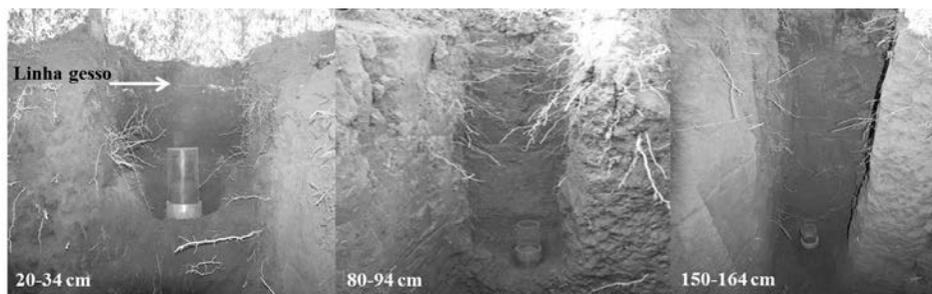


Figura 2 Esquema de amostragem do solo para análise de tomografia computada de raios-X nas profundidades de 20-34; 80-94 e 150-164 cm.

No laboratório as amostras com estrutura preservada foram preparadas e o material de solo excedente proveniente da parte superior e inferior do cilindro foi seco ao ar e passado por peneiras de 2 mm, obtendo-se assim amostras deformadas para serem utilizadas em diferentes análises químicas e físicas do solo.

A análise granulométrica foi realizada pelo emprego de agitação lenta da suspensão do solo, usando NaOH 1mol L⁻¹ durante 16 horas (EMBRAPA, 2011). Valores médios revelaram em g kg⁻¹: 819, 157 e 24 na profundidade de 20-34 cm; 848, 127 e 25 na profundidade de 80-94cm e 886, 89 e 25 na profundidade de 150-164 cm, respectivamente para argila, silte e areia.

Foram determinados os conteúdos de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ do ataque sulfúrico e utilizados nos cálculos das relações moleculares Ki (SiO₂/Al₂O₃) e Kr [SiO₂/(Al₂O₃ + Fe₂O₃)] (EMBRAPA, 2013). Procedeu-se também cálculos para alocação dos teores de caulinita (Al₂Si₂O₅(OH)₄ = 2.1496 SiO₂) e gibbsita (Al(OH)₃ = 1.5291Al₂O₃ - 0.6047Al₂Si₂O₅(OH)₄) por meio de suas relações estequiométricas derivadas de suas fórmulas químicas ideais, de acordo com Resende; Bahia filho e Braga (1987).

Em função da caracterização química e física e da descrição morfológicos (SANTOS et al., 2005), o solo foi classificado segundo Embrapa (2013), como Latossolo Vermelho distrófico típico (LVd) muito argiloso. Os valores de Ki e de Kr inferiores a 0.75 caracterizam este solo como muito intemperizado, o que evidencia sua mineralogia gibbsítica sesquioxídica (Tabela 1).

Tabela 1 Teores de óxidos totais extraídos pelo ataque sulfúrico do horizonte Bw do Latossolo Vermelho distrófico (LVd)

| LVd | Ataque sulfúrico | | | Ki ⁽¹⁾ | Kr ⁽²⁾ | Ct ⁽³⁾ | Gb ⁽⁴⁾ |
|-----|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | | | | |
| |g kg ⁻¹ | | | | |%..... | |
| Bw | 104.9 | 391.7 | 169.0 | 0.46 | 0.36 | 22.55 | 58.53 |

⁽¹⁾Ki: relação molecular SiO₂:Al₂O₃; ⁽²⁾Kr: relação molecular SiO₂: (Al₂O₃ + Fe₂O₃), ⁽³⁾Ct: porcentagem de caulinita, ⁽⁴⁾Gb: porcentagem de gibbsita. Calculados por alocação (Resende et al., 1987)

Para realização das análises químicas, as amostras referentes aos tratamentos G0, G7 e G28 foram secas ao ar e tamisadas em peneiras com malha de 2 mm de diâmetro, para a obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA). Posteriormente, alíquotas destas amostras foram encaminhadas para a determinação dos teores dos cátions presentes no solo (Embrapa, 2011) (Tabela 2).

Tabela 2 Valores médios dos cátions trocáveis na profundidade de 15-25 cm nos tratamentos G0: ausência de gesso adicional, G7: 7Mg ha⁻¹ e G28: 28 Mg ha⁻¹ de gesso adicional aplicado na superfície da linha de plantio

| Trat | 15-25 cm | | | | | | | | | | | MO | |
|------|--------------------|---------------------|---|----|----|----|-------|----|----|----|-------|--------------------|------|
| | pH | P | K | Ca | Mg | Al | H+Al | SB | t | T | V | | m |
| | (H ₂ O) | mg dm ⁻³ |mmol _c dm ⁻³ | | | | | | | | ..%.. | g kg ⁻¹ | |
| G0 | 5,3 | 3,2 | 109,2 | 27 | 9 | 0 | 43,6 | 39 | 39 | 83 | 47,1 | 0 | 0,35 |
| G7 | 5,4 | 3,4 | 74,8 | 53 | 4 | 0 | 39,3 | 60 | 60 | 98 | 59,2 | 0 | 0,37 |
| G28 | 5,2 | 5,1 | 94,1 | 48 | 8 | 0 | 38,2 | 59 | 59 | 98 | 59,8 | 0 | 0,38 |

Trat.: tratamentos com diferentes doses de gesso, pH: potencial hidrogênico, P: fósforo, K: potássio, Ca: cálcio, Mg: magnésio, Al: Alumínio, H+Al: acidez potencial, SB: soma de bases, t: capacidade de troca catiônica efetiva, T: capacidade de troca catiônica a pH 7, V: volume de bases, m: saturação por alumínio, MO: matéria orgânica. Adaptado de Silva et al. (2013).

2.3 Aquisição, reconstrução e binarização (*Threshold*) das imagens 3D

Para a análise tomográfica as amostras em cilindro de acrílico foram secas a 40°C em estufa de circulação forçada, para minimizar possíveis interferências dos filmes de água na atenuação dos raios-X. Para a geração das imagens foi scaneado 3,5 cm exatamente no centro da amostra em um tomógrafo EVS/ GE MS8X-130 (tubo de raios-X de tungstênio, 130 kV e 200 mA) de terceira geração pré-clínico, com feixe em cone mantido no Laboratório de Imagem de Solo da Universidade de Guelph, Canadá. A energia de excitação de 120 kV e 170 mA foi empregada gerando uma sequência axial de imagens com 16-bit de resolução radiométrica e com tempo de exposição de 3500 ms. Para redução dos artefatos provenientes dos feixes de raios-X policromáticos (CLAUSNITZER; HOPMANS, 2000) e maximização do contraste entre as diferentes fases das amostras de solo (sólido e gasoso) foi utilizado filtro de cobre de alta passagem.

A partir das projeções resultantes do escaneamento foram selecionados subvolumes de interesse exatamente no centro da imagem e reconstruídos a 60 µm de resolução espacial (666 voxel x 666 voxel x 550 fatias) (Figura 3). Os procedimentos de correção, reconstrução e limiarização seguiram o protocolo do Laboratório de Micropedologia e Imagem do Solo da Universidade de Guelph, Canadá.

A binarização ou limiarização das imagens 3D é o primeiro passo do processamento das imagens tridimensionais e envolve a conversão de cada valor do voxel em escala de cinza (proporcionalmente expressando os locais dos coeficientes de atenuação de raios-X) em uma imagem

binária, distinguindo-se o ar da fase sólida. Esta transformação pelo processo *threshold* da imagem é um passo fundamental para a análise quantitativa dos dados da imagem assim como todas as demais operações que usam esses conjuntos de dados transformados.

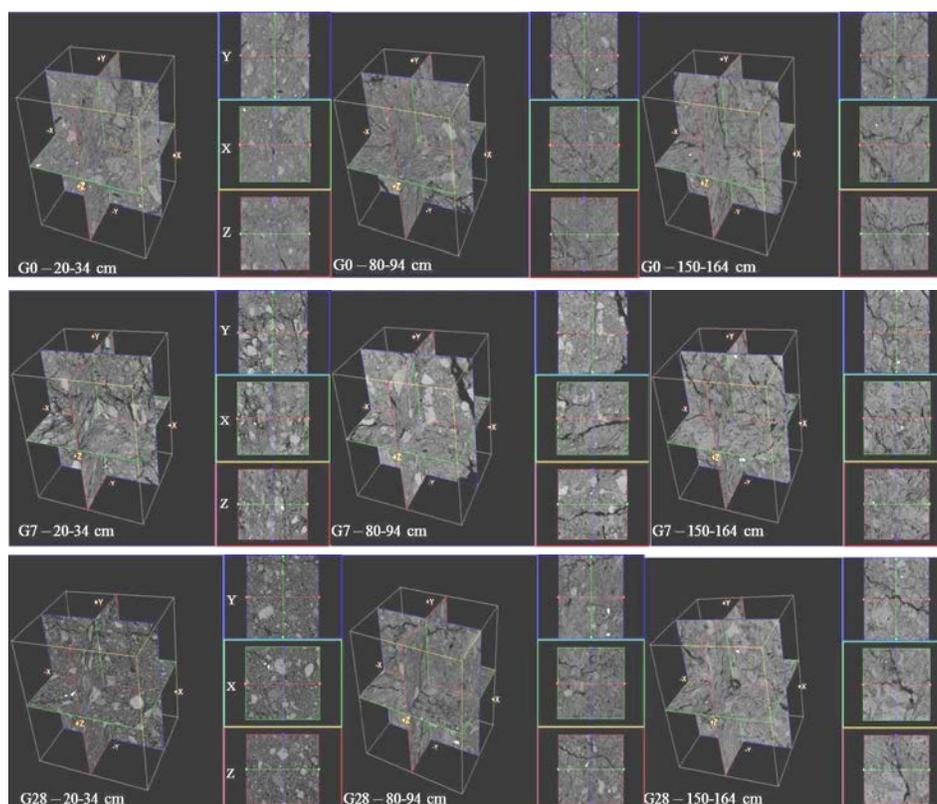


Figura 3 Imagens tomográficas de raios-X em amostras de solo (3,5 x 4 x 4 cm) demonstrando a microestrutura típica do Latossolo Vermelho distrófico sob diferentes tratamentos G0: ausência de gesso adicional, G7: 7 Mg ha⁻¹ e G28: 28 Mg ha⁻¹ de gesso adicional, ambos aplicados na superfície do solo na linha de plantio. As imagens à direita indicam as direções ortogonais horizontais Y (azul) e X (verde) e vertical Z (vermelha), e suas combinações indicam os planos horizontais XY (topo) e os planos verticais XZ (centro) e YZ (base)

2.4 Processamento digital das imagens 3D

Com o software de análise de imagens NIH ImageJ (RASBAND, 2002), de domínio público, as imagens tomográficas foram analisadas fatia a fatia, o que permitiu diferenciar as categorias de dados de acordo com as classes de tamanho e forma pretendidos.

Para obtenção dos dados espaciais foi executado o plugin 'Semivariance 3D'. Obtiveram-se as semivariância $\hat{\gamma}(h)$ para as três dimensões da imagem tomográfica, ou seja, as direções ortogonais horizontais (X e Y) e vertical (Z), onde a semivariância foi padronizada [0-1]. A construção do semivariograma experimental permite identificar a amplitude da dependência espacial da variável em estudo e também define a estrutura da variabilidade espacial (GOOVAERTS et al., 1999).

A função "Analyze Particle" foi utilizada para calcular as dimensões dos poros (volume e área em mm). Esta função detecta e mede os objetos presentes na imagem binária para se obter os dados relativos aos poros presentes em cada fatia do volume estudado (n=550). A partir deste resultado foi calculado o diâmetro equivalente a uma esfera (simulação da geometria espacial) e a esfericidade do poro (0= menos arredondado e angular; 1= mais arredondado e liso) como fator de forma, por meio da equação 1:

$$\Psi = \pi^{1/3}(6V)^{2/3}/A \quad (1)$$

onde: $\pi \approx 3,141592\dots8$, V = volume do poro (mm³) e A= área do poro (mm²).

2.5 Análises Estatísticas

A análise espacial constou da construção do semivariograma experimental a partir das imagens 3D em escala de cinzas.

A semivariância $\hat{\gamma}(h)$ é uma função da distância h , que é estimada em um conjunto discreto de distâncias (lags) expresso um gráfico de dispersão que permite uma análise variográfica do comportamento da variável analisada (Faraco et al., 2008). Isso permitiu obter a estimativa do valor de semivariância para as diferentes combinações de pares de pontos e assim analisar a amplitude da dependência espacial das variáveis estudadas, neste caso as direções ortogonais X e Y (horizontal) e Z (vertical), definindo então os parâmetros necessários para a estimativa de suas características resultantes da estrutura da variabilidade espacial (ÁVILA; MELLO; SILVA, 2010). Vale ressaltar que embora estejamos trabalhando com 3 direções-eixos(X,Y,Z), o cálculo das semivariâncias se dá em R^2 , visto que estamos trabalhando com o plano X, o plano Y e o plano Z. Logo, os semivariogramas padronizados foram estimados pelo método clássico, através do estimador:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(S_i) - Z(S_i + h)]^2 \quad (2)$$

em que: $\hat{\gamma}(h)$ é o estimador da semivariância; $N(h)$ é o número de pares de valores medidos, $Z(S_i)$ e $Z(S_i + h)$, separados por um vetor distância h , são realizações da variável aleatória $Z(S)$ (JOURNEL; HUIJBREGTS, 1978).

As estimativas padronizadas foram obtidas pelo plugin ‘Semivariance 3D’ do software ImageJ. O mesmo ocorreu para o cálculo das semivariâncias em cada uma das repetições (em suas respectivas direções).

Após obter o vetor de semivariâncias das três repetições procedeu-se com um ajuste não linear da matriz - composta por esses três vetores - em função do modelo exponencial. O ajuste foi feito através do método de mínimos quadrados, permitindo a determinação dos parâmetros do modelo: efeito pepita (C_0), patamar ($C_0 + C_1$) e alcance (a) teórico e prático, em linguagem R (R Development Core Team, 2012); software de livre acesso e de acordo com a licença GPL (General Public Licence).

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & , |h|=0 \\ C_0 + C_1 \left[1 - \exp\left(-\frac{|h|}{a}\right) \right] & , |h| \neq 0 \end{cases} \quad (3)$$

Para a melhor representação amostral foram construídos a partir do semivariograma médio ajustado os intervalos de predição (IP), para o conjunto de repetições, com o intuito de comparar a variabilidade espacial. Com os IP pode se afirmar que 95% das semivariâncias estão dentro do intervalo.

Os poros detectados pela tomografia computada de raios-X foram classificados com base na mineração de dados realizada pelo pacote ‘randomForest’ (LIAW; WEINER, 2012), o que permitiu definir padrões e reproduzir um maior número de classes ($n=26$) visando a maximização

da diferença entre as combinações de nível, além de outras funções necessárias desenvolvidas na linguagem R (R Development Core Team, 2012).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os semivariogramas teóricos exponenciais indicaram estacionariedade de segunda ordem, refletida pelo patamar claro e bem definido (assíntota), o que permitiu identificar a amplitude da dependência espacial das direções ortogonais (X, Y e Z) nas imagens 3D. Assim, foi definida a estrutura da variabilidade espacial (GOOVAERTS et al., 1999; FARACO et al., 2008), bem como as estimativa do modelo ajustado (GOMES et al., 2007) (Figuras 4-12).

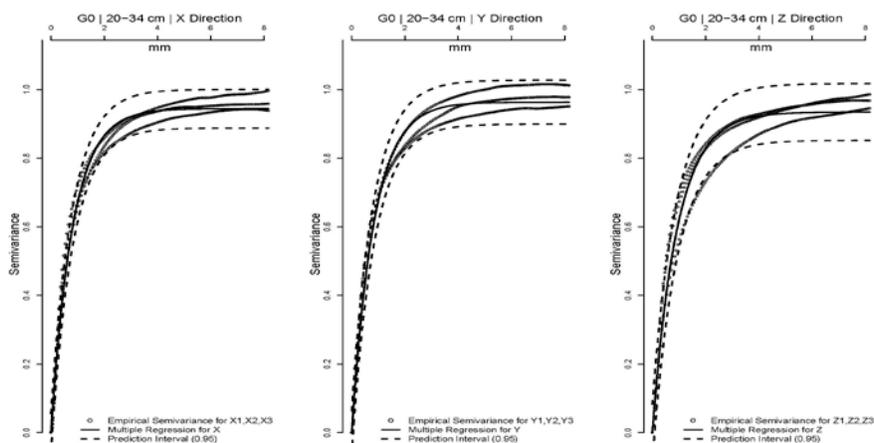


Figura 4 Semivariogramas empíricos padronizados e modelo teórico exponencial ajustado às direções ortogonais (X, Y, Z) na profundidade de 20-34 cm, do G0 (ausência de gesso adicional)

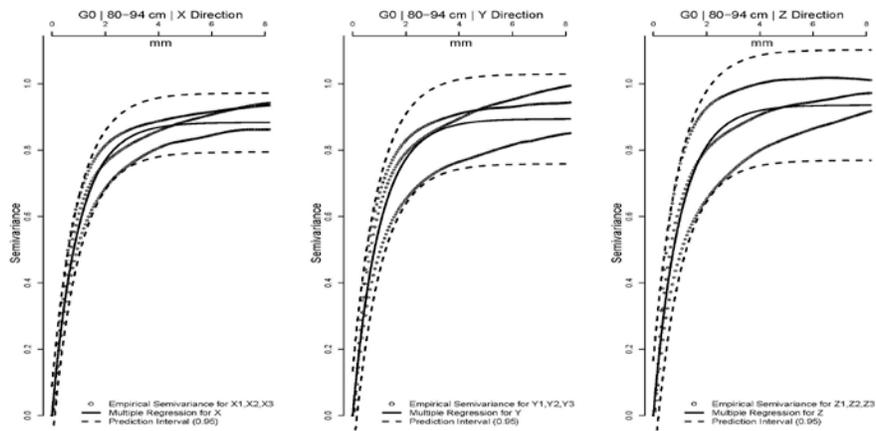


Figura 5 Semivariogramas empíricos padronizados e modelo teórico exponencial ajustado às direções ortogonais (X, Y, Z) na profundidade de 80-94 cm, do G0 (ausência de gesso adicional)

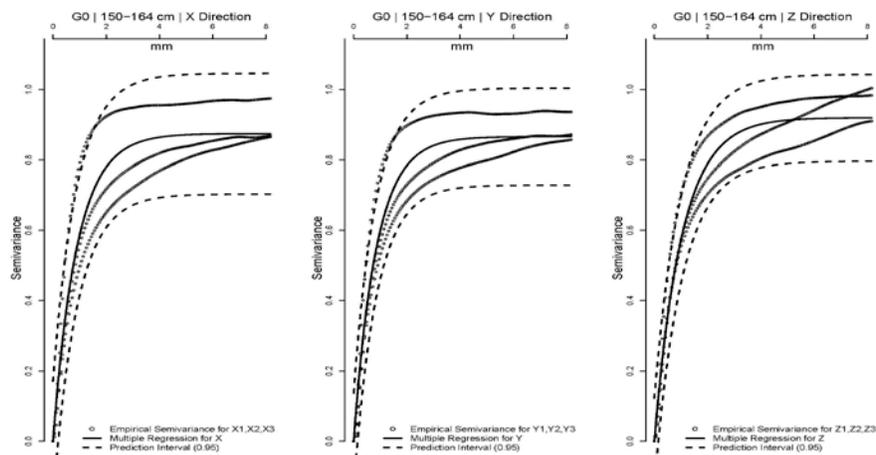


Figura 6 Semivariogramas empíricos padronizados e modelo teórico exponencial ajustado às direções ortogonais (X, Y, Z) na profundidade de 150-164 cm, do G0 (ausência de gesso adicional)

Essa avaliação foi necessária para verificar a dependência espacial dos componentes estruturais (porção mineral e espaço poroso) em cada combinação de nível (3 tratamentos x 3 profundidades x 3 direções) obtida pelas direções ortogonais das imagens 3D. Isto possibilitou a identificação das alterações no arranjo estrutural do solo promovidas pelos tratamentos avaliados.

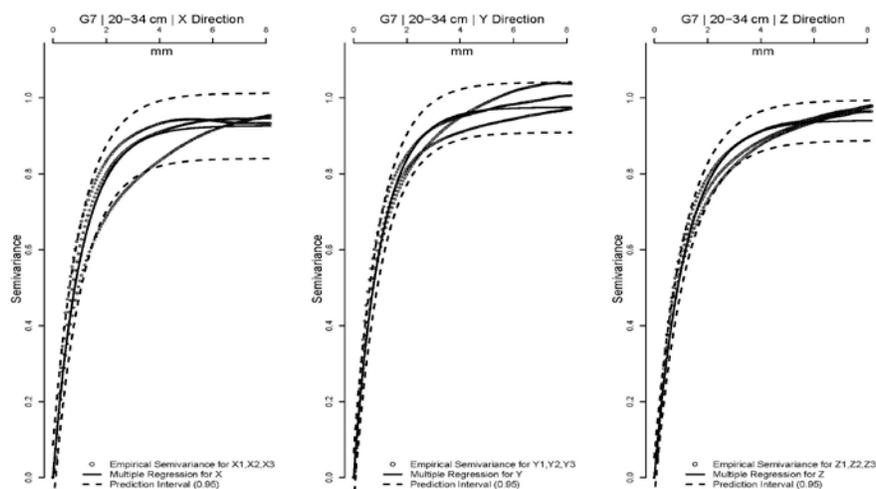


Figura 7 Semivariogramas empíricos padronizados e modelo teórico exponencial ajustado às direções ortogonais (X, Y, Z) na profundidade de 20-34 cm, do G7 (7 Mg ha⁻¹ de gesso adicional aplicados na superfície do solo na linha de plantio)

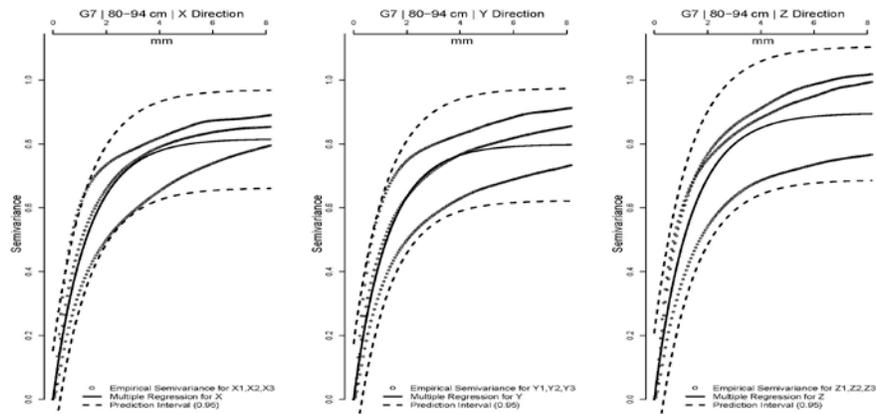


Figura 8 Semivariogramas empíricos padronizados e modelo teórico exponencial ajustado às direções ortogonais (X, Y, Z) na profundidade de 80-94 cm, do G7 (7 Mg ha⁻¹ de gesso adicional aplicados na superfície do solo na linhade plantio)

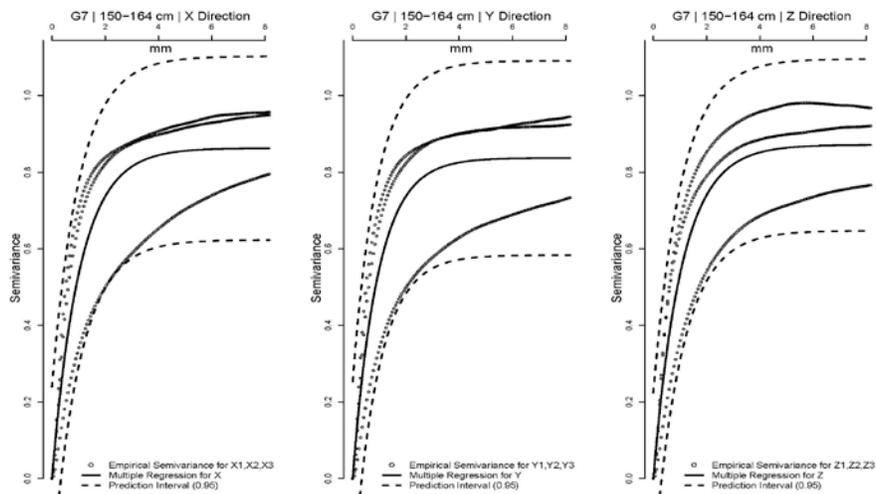


Figura 9 Semivariogramas empíricos padronizados e modelo teórico exponencial ajustado às direções ortogonais (X, Y, Z) na profundidade de 150-164 cm, do G7 (7 Mg ha⁻¹ de gesso adicional aplicados na superfície do solo na linhade plantio)

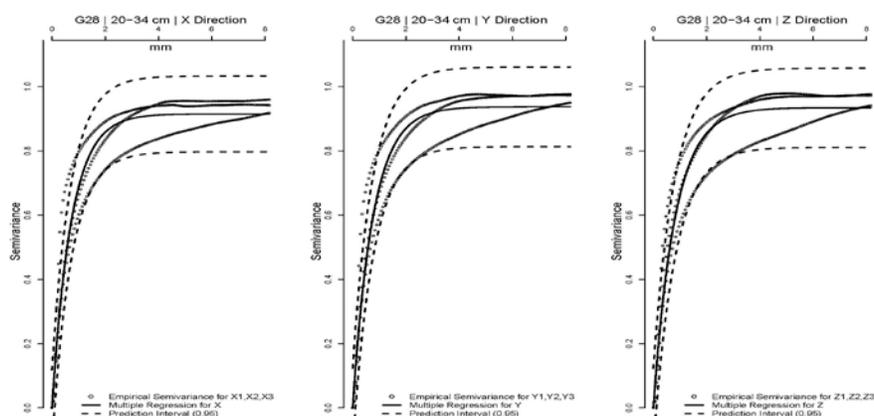


Figura 10 Semivariogramas empíricos padronizados e modelo teórico exponencial ajustado às direções ortogonais (X, Y, Z) na profundidade de 20-34, do G28 (28 Mg ha⁻¹ de gesso adicional aplicados na superfície do solo na linha de plantio)

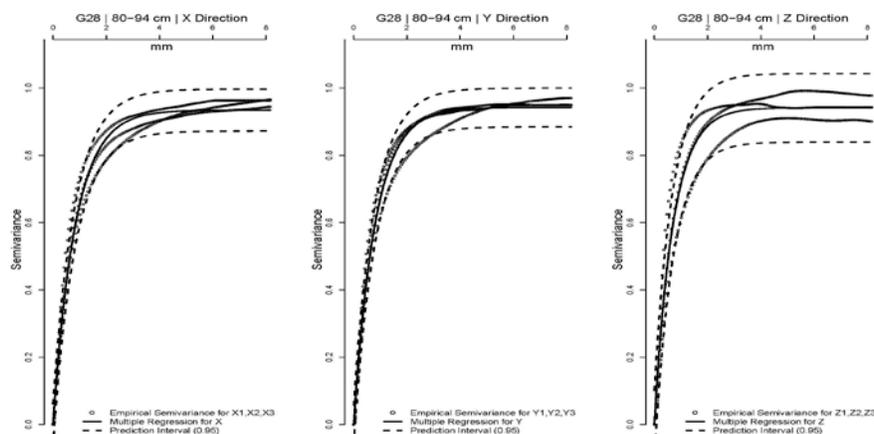


Figura 11 Semivariogramas empíricos padronizados e modelo teórico exponencial ajustado às direções ortogonais (X, Y, Z) na profundidade de 80-94 cm, do G28 (28 Mg ha⁻¹ de gesso adicional aplicados na superfície do solo na linha de plantio)

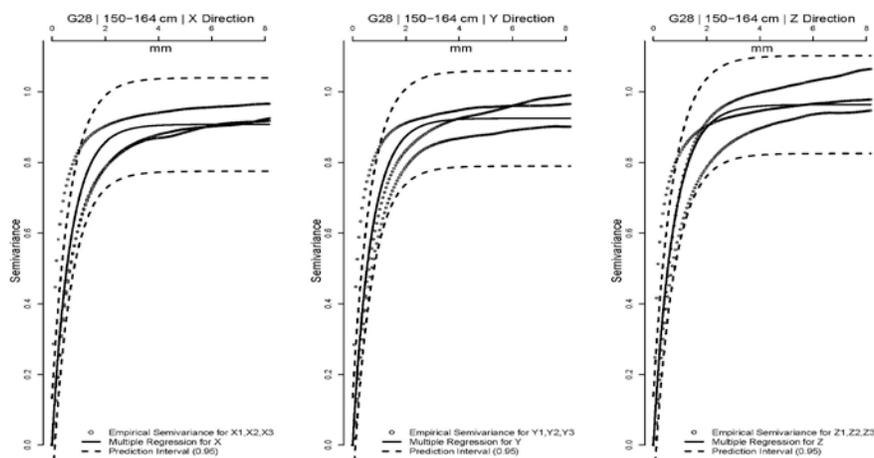


Figura 12 Semivariogramas empíricos padronizados e modelo teórico exponencial ajustado às direções ortogonais (X, Y, Z) na profundidade de 150-164 cm, do G28 (28 Mg ha⁻¹ de gesso adicional aplicados na superfície do solo na linha de plantio)

Os parâmetros dos variogramas ajustados que melhor descrevem o comportamento da variabilidade espacial da estrutura do solo estão apresentados na Tabela 3.

A partir do modelo ajustado foi obtido o alcance prático (a) da dependência espacial para as direções X, Y e Z das imagens, onde os maiores a foram encontrados em G7 em todas as profundidades especialmente na direção vertical (Z), seguido por G0 e G28, respectivamente, na faixa de 20-34 e 150-164 cm e nas direções horizontais (X e Y) na faixa de 80-94 cm.

O a indica a magnitude da dependência espacial, de modo que o maior alcance em G7 em relação aos demais sugere a maior continuidade

espacial da estrutura do solo nas direções X, Y e Z (ÁVILA; MELLO; SILVA, 2010; BOTTEGA et al., 2013).

Tabela 3 Parâmetros do modelo exponencial ajustado para as direções ortogonais (X, Y e Z) dos tratamentos G0: ausência de gesso adicional, G7: 7 Mg ha⁻¹ e G28: 28 Mg ha⁻¹ de gesso adicional, aplicados na superfície do solo na linha de plantio

| Tratamentos | Prof. (cm) | Direção Ortogonal | (C ₀ +C ₁) | <i>a</i> teórico(mm) | <i>a</i> prático(mm) |
|-------------|------------|-------------------|-----------------------------------|----------------------|----------------------|
| G0 | 20-34 | X | 0.9442 | 0.8067 | 2.4201 |
| G0 | 20-34 | Y | 0.9632 | 0.8268 | 2.4803 |
| G0 | 20-34 | Z | 0.9345 | 0.9212 | 2.7637 |
| G0 | 80-94 | X | 0.8832 | 0.9777 | 2.9332 |
| G0 | 80-94 | Y | 0.8938 | 0.9974 | 2.9921 |
| G0 | 80-94 | Z | 0.9356 | 0.9906 | 2.9718 |
| G0 | 150-164 | X | 0.8744 | 0.9013 | 2.7040 |
| G0 | 150-164 | Y | 0.8659 | 0,8485 | 2.5455 |
| G0 | 150-164 | Z | 0.9196 | 1.0255 | 3.0764 |
| G7 | 20-34 | X | 0.9267 | 1.0543 | 3.1630 |
| G7 | 20-34 | Y | 0.9754 | 1.0198 | 3.0595 |
| G7 | 20-34 | Z | 0.9411 | 1.1560 | 3.4679 |
| G7 | 80-94 | X | 0.8159 | 1.3018 | 3.9054 |
| G7 | 80-94 | Y | 0.7987 | 1.2642 | 3.7927 |
| G7 | 80-94 | Z | 0.8964 | 1.3499 | 4.0497 |
| G7 | 150-164 | X | 0.8626 | 1.0394 | 3.1182 |
| G7 | 150-164 | Y | 0.8371 | 0.9412 | 2.8237 |
| G7 | 150-164 | Z | 0.8713 | 1.0571 | 3.1713 |
| G28 | 20-34 | X | 0.9150 | 0.7202 | 2.1606 |
| G28 | 20-34 | Y | 0.9371 | 0.7589 | 2.2768 |
| G28 | 20-34 | Z | 0.9342 | 0.8111 | 2.4339 |
| G28 | 80-94 | X | 0.9342 | 0.8340 | 2.5021 |
| G28 | 80-94 | Y | 0.9422 | 0.8031 | 2.4092 |
| G28 | 80-94 | Z | 0.9412 | 0.7005 | 2.1014 |
| G28 | 150-164 | X | 0.9074 | 0.6939 | 2.0818 |
| G28 | 150-164 | Y | 0.9246 | 0.6897 | 2.0690 |
| G28 | 150-164 | Z | 0.9637 | 0.7412 | 2.2236 |

Prof.=profundidade; C₀+C₁= Patamar; *a* = alcance.

Este fato se deve provavelmente à distribuição mais homogênea do diâmetro dos poros (Figura 13), com possível decréscimo na macroporosidade, o que de acordo com Schaffrath et al. (2008), é possível que essa homogeneização dos poros possa estar relacionada a uma distribuição mais uniforme dos mesoagregados (COSTA JUNIOR et al., 2012), o que também foi observado por Silva et al. (2013) na profundidade de 0.15 m no G7, em trabalho na mesma área experimental desta pesquisa.

A formação e estabilidade dos macro e microagregados, que influenciam a distribuição dos espaços vazios, está fortemente relacionada primeiramente com a mineralogia oxídica e textura argilosa, a exemplo do que ocorre com os Latossolos das chapadas no Cerrado, devido às interações eletrostáticas entre os óxidos (principalmente de Al e Fe), e os agentes externos, como aqueles relacionados com o manejo, sendo que os agentes biológicos possuem importância secundária (COSTA JÚNIOR et al., 2012; VOLLANT-TUDURI et al., 2005). No entanto, pela análise espacial foi identificado a ação dos agentes externos, no caso, a interação entre as práticas e a dose de gesso utilizada pelo sistema de manejo em estudo (Tabela 3).

Em todas as unidades experimentais (27 situações), o efeito pepita foi nulo, devido a maior resolução das imagens (60 μm) que gerou um maior nível de detalhamento da organização estrutural do solo, ou seja, dentro dos limites do *a* e do patamar, a maior parte da variabilidade pode ser explicada pela componente espacial (VIEIRA; MELLO; LIMA, 2007). Os patamares para todas as combinações tiveram valores muito próximos, com menor variabilidade da estrutura do solo no G7.

Somente pela observação visual dos semivariogramas não foi possível se verificar uma estrutura anisotrópica distinta, então por meio dos intervalos de predição (IP), referentes à confiabilidade da amostragem, revelaram-se as distinções entre os eventos, onde a 20-34 cm, o G0 e o G7 apresentaram a menor amplitude (Figuras 4 e 7), diferentemente de G28 onde ocorreu o estreitamento mais acentuado na profundidade de 80-94 cm (Figura 11).

Na profundidade de 150-164 cm os tratamentos apresentaram similaridades, com maior amplitude dos IP e conseqüentemente maior variabilidade da amostragem (Figuras 6, 9 e 12). Ressalta-se que nesta profundidade o que prevalece são os atributos inerentes ao solo, provenientes da frequência e organização dos componentes mineralógicos (CAMARGO et al., 2008).

Tanto a maior amplitude dos IP como os menores valores de a na profundidade de 20-34 cm ocorreram no G28 (Figura 10 e Tabela 3) pode ser explicada pela presença de um maior volume de poros interagregados com diâmetro variando de 0.3 a 0.6 mm (Figura 13). Já a 150-64 cm de profundidade (Figura 12 e Tabela 3) os menores a se devem a frequência e distribuição da composição mineral do solo (CAMARGO et al., 2008).

A maior ocorrência desses diâmetros de poros provavelmente se deveu aos efeitos conjuntos das práticas de manejo, num primeiro momento ocorreu pelo revolvimento ocorrido no preparo da linha de plantio que tende a homogeneizar os agregados pela destruição de agregados maiores (SCHAFFRATH et al., 2008; CREMOM et al., 2009; COSTA JÚNIOR et al., 2012).

Esses novos agregados estão em processo de estabilização devido a possível ação biológica (SILVA et al., 2013; MARTIN et al., 2012), permitida pelo fornecimento constante de material orgânico ao longo do perfil, proveniente da roçada da *Brachiaria* sp. na entrelinha e da renovação das raízes do cafeeiro, que ativam a biota do solo (fungos micorrízicos, preferencialmente). Estes quando associados atuam na reorganização da estrutura diversificando os agregados em diferentes tamanhos (COSTA JUNIOR et al., 2012, MARTIN et al., 2012; CREMON et al., 2009; SALTON et al., 2008) o que pode promover uma heterogeneidade no diâmetro dos poros encontrados.

Dessa forma, os sistemas de manejo do solo são considerados uma das principais fontes de variabilidade espacial dos atributos físicos do solo (SCHAFFRATH et al., 2008). Excepcionalmente na profundidade de 20-34 cm, todo o efeito das práticas desse sistema de manejo foram expressos na distribuição do diâmetro dos poros.

Foram geradas 26 classes contrastantes de diâmetro de poros pela análise das imagens 3D, distribuídos no intervalo entre 0.2 a 1 mm de diâmetro, que corresponde ao limite entre macroporos finos e mesoporos grandes (BULLOCK et al., 1985) (Figura 13).

A distinção entre os tratamentos ficou evidente ao longo do intervalo gerado especialmente nas classes de 0.3 a 0.6 mm de diâmetro onde ocorreu o maior número e volume de poros visíveis, ou seja, os mesmos ocuparam grande parte da matriz do solo na seguinte ordem: G28 > G0 > G7, especialmente a 20-34 cm de profundidade.

O incremento no volume de poros com diâmetro menor que 0.5 mm (Figura 13) especialmente na profundidade de 20-34 cm para G28 e

G0 primeiramente, pode estar relacionado ao desenvolvimento de fungos micorrízicos arbusculares específicos que favorecem a formação de grande número de poros menores, originados do agrupamento de partículas sólidas conforme o crescimento das hifas com diâmetro inferior ao dos poros, formando assim um emaranhado destes com as raízes finas das plantas e então, o surgimento de agregados menores (MARTIN et al., 2012).

Por outro lado, à dose de gesso adicional aplicado provavelmente apresenta efeitos secundários na formação dos agregados devido às semelhanças na distribuição dos poros do G28 e G0 a 20-34 cm de profundidade.

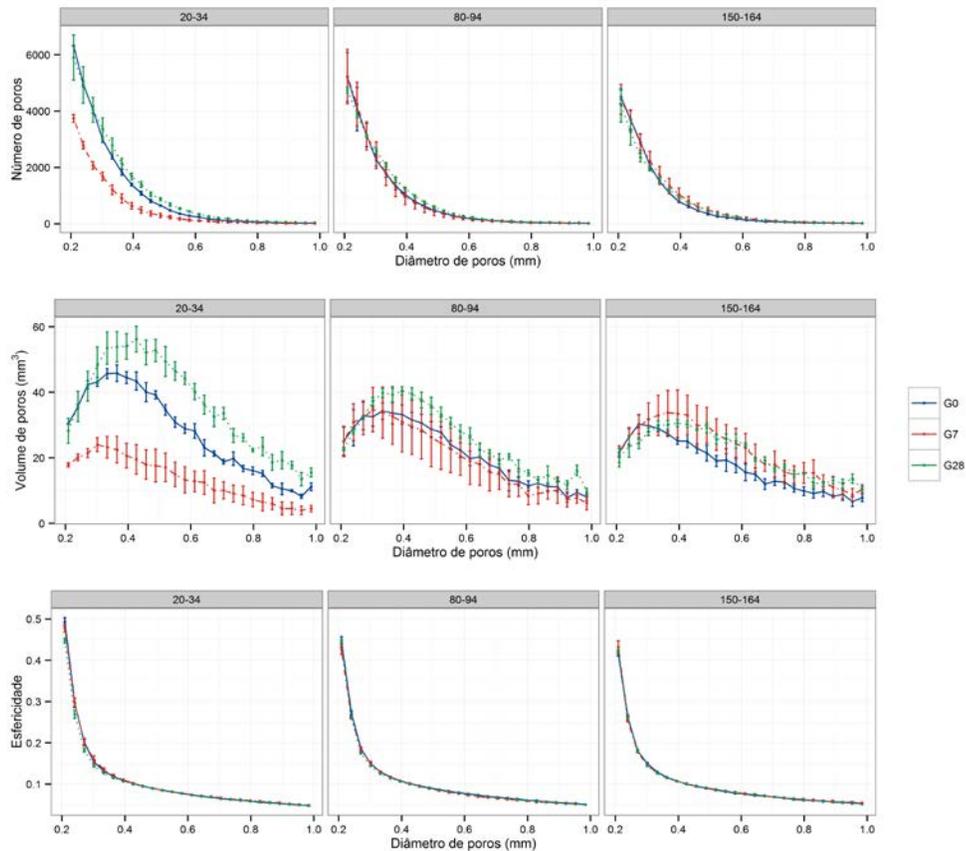


Figura 13 Distribuição do diâmetro dos poros em número, volume e esfericidade, respectivamente do Latossolo Vermelho distrófico sob diferentes tratamentos G0: ausência de gesso adicional, G7: 7 Mg ha⁻¹ e G28: 28 Mg ha⁻¹ de gesso adicional, aplicados na superfície do solo na linha de plantio. As barras correspondem ao erro padrão da média

Destaca-se que o gesso provavelmente é solubilizado de forma gradual, pois além de ser aplicado na superfície, sobre o mesmo é feita uma “amontoa” com espessa camada de solo (≈ 50 cm) juntamente com um acúmulo de biomassa oriunda da gramínea na entrelinha e, com o tempo, ocorre acomodação das partículas sobre o mesmo, portanto, gera

um reservatório de gesso, visto ainda que na região a distribuição das chuvas é irregular e isso permite a liberação gradativa dos componentes químicos do gesso (SERAFIM, 2011).

Não obstante, o desempenho adverso do G7 nesta mesma camada no que se refere ao número e volume de poros no intervalo de diâmetro detectável, o assunto merece estudos posteriores.

Foi verificado na área experimental que o cálcio trocável (Ca^{+2}) é a espécie iônica predominante na solução do solo com valores de 1,6 e 13 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ do G0 para o G7, na profundidade de 15 a 25 cm após 16 meses de implantação. Após 2,5 anos de implantação foi de 27 e 50 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ no G0 e no G7 respectivamente, e o G28 com 48 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ (SILVA et al., 2013; RAMOS, 2012).

Quanto ao G7 as quantidades são insuficientes para agir como dispersante dos agregados (SPERA et al., 2008; SORATTO; CRUSCIOL, 2008; CREMON et al., 2009). Ainda é bom salientar que a maior continuidade espacial dos poros encontrada no intervalo avaliado pode ser positiva se estiver ocorrendo um incremento proporcional em número de poros menores responsáveis pela maior retenção da água disponível as plantas.

A distribuição espacial dos poros de maior diâmetro, interagregados, ao longo do perfil do solo influencia o equilíbrio dos processos físico-hídricos do solo. O conhecimento da geometria espacial dos poros que rege o incremento em número e área dos poros bem a descrição da tortuosidade, contribui para o entendimento das mudanças que podem ocorrer na dinâmica dos processos que ocorrem no solo influenciado pelas práticas agrícolas (LUO; LIN; LI, 2010).

No que diz respeito à esfericidade que indica a rugosidade da superfície dos poros (0 = rugosidade, 1= arredondado), esta aumentou com o decréscimo do diâmetro dos poros, como observado por Tippkötter et al. (2009) (Figura 13). A esfericidade foi similar ao longo do perfil do solo, o que se atribui a estrutura do tipo microgranular favorecida principalmente pelo alto teor de gibbsita (Tabela 1) que atua na formação dos microagregados muito pequenos e micropeds mais arredondados (VIDAL-TORRADO et al., 1999; FERREIRA; FERNANDES; CURI, 1999, PEDROTTI et al., 2003).

Entretanto, na profundidade de 20-34 cm esta característica pode também se relacionar aos efeitos do preparo do solo na linha de plantio que tende a formar agregados menores e mais arredondados, pela quebra dos maiores, como observado macromorfologicamente por Cremon et al. (2009).

4 CONCLUSÃO

- a) A maior continuidade espacial dos poros foi detectada em G7 nas profundidades avaliadas.
- b) A distribuição mais homogênea do volume dos poros visíveis em cada classe ocorreu no G7 especialmente a 20-34 cm de profundidade.
- c) O maior número e volume de poros foram detectados no G28 na profundidade de 20-34 cm, assim como a maior variabilidade espacial da estrutura do solo, promovidos pelo efeito combinado das práticas do sistema de manejo.
- d) Com base na análise geoestatística pode-se inferir que a adoção do sistema em estudo promoveu modificações no arranjo poroso em todas as direções avaliadas, porém com melhor continuidade dos poros na direção vertical (Z).

AGRADECIMENTOS

À FAPEMIG pelo financiamento da pesquisa; ao Consorcio Embrapa Café pelo empréstimo de veículos; ao CNPq pela concessão da bolsa de estudos; à UFLA pelo apoio institucional; à Empresa AP pelo apoio técnico e logístico e ao Dr. Richard J. Heck (University of Guelph – Canadá) pela permissão de uso dos laboratórios e auxílio na análise tomográfica. Aos doutorandos do DCS-UFLA, Alisson Luércio da Costa e Teotônio Soares pelo apoio com a linguagem R.

Spatial variability in 3D pores in gibbsitic Latosol under management with different gypsum doses

ABSTRACT

The aim of this study has been to visualize and quantify, through CT X-ray scan, the variability of the distribution of pore diameter in gibbsitic Latosol under a management system which uses different levels of gypsum. Three trenches were dug at random and longitudinal line planting in an gibbsitic Latosol very clayey, under three doses of gypsum: G0: no gypsum; G7: 7 Mg ha⁻¹ e G28: 28 Mg ha⁻¹ additional gypsum, applied to the planting row surface. Disturbed soil samples were collected in plexiglass cylinders at depths 20-34, 80-94 and 150-164 cm for pore quantification obtained by 3D CT X-ray scan. The spatial variability of soil structure was evaluated by Semivariograms obtained of the 3D images. Pore diameter classification was made. To the inferences statistics were used package 'geoR' and 'randomForest' language R. The greater spatial continuity of the pores occurred in the G7 in three depths. The combined effects of the management system promoted greatest spatial variability of soil structure in G28. Based on geostatistical analysis can be inferred that the management system promoted favorable changes in porous arrangement usually in horizontal directions (X and Y).

Keywords: CT X-ray scan. Spatial continuity. Pore distribution. Crop coffee.

REFERÊNCIAS

AJAYI, A. E. et al. Strength attributes and compaction susceptibility of Brazilian Latosols. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 105, n.1, p. 122-127, Sept. 2009.

ÁVILA, L. F.; MELLO, C.R.; SILVA, A. M. Continuidade e distribuição espacial da umidade do solo em bacia hidrográfica da Serra da Mantiqueira. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n.12, p: 1257-1266, dez. 2010.

BORGES, J. A. R.; PIRES, L. F. Representative elementary area (REA) in soil bulk density measurements through gamma ray computed tomography. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 123, n.1, p: 43–49, July 2012.

BOTTEGA, E. L. et al. Variabilidade espacial de atributos do solo em sistema de semeadura direta com rotação de culturas no cerrado brasileiro. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 44, n.1, p: 1-9, Março 2013.

BULLOCK, P. et al. **Handbook for Soil Thin Section Description**. Waine Research Publications, England. p.152, 1985.

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, MG, v.35, n.1, p:77-86, jan./fev. 2011.

CAMARGO, L. A. et al. Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de um Latossolo sob diferentes formas do relevo. I -

mineralogia da fração argila. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, MG, v. 32, n.6, p: 2269-2277, Dez. 2008.

CLAUSNITZER, V.; HOPMANS, J. W. Pore-scale measurements of solute breakthrough using microfocus X-ray computed tomography. **Water Resources Research**, v. 36, n. 8, p: 2067–2079, Aug. 2000.

COOPER, M.; VIDAL-TORRADO, P. Caracterização morfológica, micromorfológica e físico-hídrica de solos com horizonte b nítico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 29, n.4, p:581-595, Jul. 2005.

COSTA JUNIOR, 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, MG, v.36, n.4, p: 1311-1321, Ago. 2012.

CREMON, C. et al. Análise micromorfométrica de agregados de um Latossolo Vermelho Distroférico em diferentes sistemas de manejo. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 31, n. 1, p. 139-146, Jan. 2009.

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.1, p:201-214, Sept. 2004.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. revista. Rio de Janeiro, 2011. 225p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Rio de Janeiro, 2013. 353 p.

FARACO, M. A. et al. Seleção de modelos de variabilidade espacial para elaboração de mapas temáticos de atributos físicos do solo e produtividade da soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n.2, p: 463-476, Abr. 2008.

FERREIRA, M. M.; FERNADES, B.; CURI, N. Mineralogia da fração argila e estrutura de latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.23, n.1, p:507-514, jan./fev.1999.

GOMES, N. M. et al. Métodos de ajuste e modelos de semivariograma aplicados ao estudo da variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, n.3, p:435-443, Jun. 2007.

GOOVAERTS, P. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives. **Geoderma**, Amsterdam, v. 89, n.1/2, p: 1-45, Apr. 1999.

JOURNEL, A. HUIJBREGTS, C.J. **Mining geoestatistics**. San diego: Academic, 1978. 600p.

LIAW, A.; WIENER, M. **Package ‘randomForest’: Breiman and Cutler’s random forests for classification and regression** .Version 4.6-7. Disponível em: <http://stat-www.berkeley.edu/users/breiman/RandomForests>. Acesso em: 1-nov-2012.

LUO, L.; LIN, H.; LI, S. 2010. Quantification of 3-D soil macropore networks in different soil types and land uses using computed tomography. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.393, n.1/2, p:53–64, Oct. 2010.

MARTIN, S.L.et al. The effects of simultaneous root colonisation by three *Glomus* species on soil pore characteristics. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford , v.49, n.6, p:167-173, June 2012.

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**, v.16, n.1, São Paulo, p:1-19, Jan.2002.

MOREIRA, M.A.et al. Efeitos de calcário e gesso nas características químicas do solo e na produção do cafeeiro (*Coffea arabica* L.), 2001. **In:** II Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil, Vitória da Conquista, BA, 2001.

MUNKHOLM, L. J.; HECK, R.J.; DEEN, B. Soil pore characteristics assessed from X-ray micro-CT derived images and correlations to soil friability. **Geoderma**, Amsterdam, v.181–182, n.1, p: 22–29, July 2012.

OLIVEIRA, G. C.et al. Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após vinte anos de Manejo e cultivo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, n. 2, p. 327-336, mar./abr. 2004.

PEDROTTI, A. et al. Relação entre atributos físicos, mineralogiada fração argila e formas de alumínio no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 27, n.1, p:1-9, Fev. 2003.

RAIJ, B. van. **Gesso na agricultura**. Campinas: Instituto Agronômico, 2008. 233 p.

RAMOS, B. Z. **Especiação química da solução e mobilidade de bases e sulfato em Latossolo sob altas doses de gesso**. 100f. Tese (Doutorado Ciencia do Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras –MG. 2012.

RASBAND, W. **ImageJ: Image processing and analysis in Java (Online)** 2012. Available at Research Services Branch, National Institute of Health. Bethesda, MD, USA.
URL:<<http://rsb.info.nih.gov/ij/index.html>>. Accessed: 10 november 2011.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2012. Disponível em: <<http://www.R-project.org>>. Acesso em: 2 fev. 2012.

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*, Viçosa, MG, v.11, n.1, p: 17-23, Jan. 1987.

RIBEIRO JR P. J.; DIGGLE, P. J. **geoR: a package for geostatistical analysis**. R-News, London, v.1, n.2, p.15-18, jun 2001.

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, MG, v. 32, n.1, p:11-21, jan./fev. 2008.

SANDER, T.; GERKE, H. H.; ROGASIK, H. Assessment of Chinese paddy-soil structure using X-ray computed tomography. **Geoderma**, Amsterdam, v. 145, n. 1/2, p. 303-314, May 2008.

SANTOS, R. D. et al. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. ed. 5. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, MG, 2005, 92p.

SCHAFFRATH, V. R. et al. Variabilidade e correlação espacial de propriedades físicas de solo sob plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.32, n.4, p: 1369-1377, Ago. 2008.

SECCO, D. et al. Produtividade de soja e propriedades físicas de um latossolo submetido a sistemas de manejo e compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.28, n.5, p:797-804, Out. 2004.

SERAFIM, M. E. **Sistema conservacionista e de manejo intensivo na melhoria de atributos do solo para a cultura do cafeeiro**. 120f. 2011. (Tese em Ciência do Solo). Universidade Federal de Lavras – Lavras, MG. 2011.

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./dec. 2011.

SEVERIANO, E. C. et al. Preconsolidation pressure, soil water retention characteristics, and texture of Latosols in the Brazilian Cerrado. **Soil Research**, Melbourne, v. 51, n.3, p: 193-202, Jun. 2013.

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

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*, Viçosa, MG, v. 32, n. 2, p: 675-688, mar./abr. 2008.

SPERA, S. T. et al. Dispersão de argila em microagregados de solo incubado com calcário. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, MG, v. 32, n. spe, p:2613-2620, out./dez. 2008.

TICIANEL, T. **Sistema Mafes (Penta)**. Empresa Mafes. Disponível em: <
http://www.lpv.esalq.usp.br/lpv584/SISTEMA_MAFES%20por%20Tulio%20Ticianel.pdf>. Acesso em: 09 de setembro de 2013.

TIPPKÖTTER, R. et al. Detection of soil water in macropores of undisturbed soil using microfocuss X-ray tube computerized tomography (μ CT). *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v.105, n.1, p: 12–20, Sept. 2009.

VIDAL-TORRADO, P. et al. Pedogênese em uma seqüência Latossolo podzólico na borda de um platô na depressão periférica paulista. *Revista Brasileira de ciência do Solo*, Viçosa, MG, v. 23, n. 4, p. 909-921, jul./ago. 1999.

VIEIRA, V. A. S.; MELLO, C. R.; LIMA, J.M. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em uma microbacia hidrográfica. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v. 31, n. 5, p. 1477-1485, set./out., 2007.

VOLLANT-TUDURI, N. et al. Mass proportion of microaggregates and bulk density in a Brazilian clayey Oxisol. **Soil Science Society American Journal**, Amsterdam, v. 69, n. 5, p. 1559-1564, Sept. 2005.

(VERSÃO PRELIMINAR DO ARTIGO)

ARTIGO 3 Distribuição do sistema radicular do cafeeiro e dos poros de latossolo sob manejo com diferentes doses de gesso

Carla Eloize Carducci *

Prof. Dr. Geraldo César de Oliveira (orientador) **

Artigo normalizado de acordo com a NBR 6022(ABNT, 2003)

* Eng. Agrônoma, doutoranda Ciência do Solo, Departamento de Ciência do Solo – UFLA. E-mail: elocarducci@hotmail.com

** Eng. Agrícola, Dr. Ciência do Solo, Prof. Adjnto IV , Departamento de Ciência do solo – UFLA, E- mail: geraldooliveira@dcs.ufla.br

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar usando as técnicas de tomografia computada de raios-X e perfil cultural as modificações na distribuição dos poros do solo e do sistema radicular do cafeeiro em função do manejo. Foram abertas três trincheiras aleatórias e longitudinais à linha de plantio em um Latossolo Vermelho distrófico gibbsítico muito argiloso, submetido às seguintes doses de gesso: G0: ausência de gesso; G7: 7 Mg ha⁻¹ e G28: 28 Mg ha⁻¹ de gesso adicional, aplicados na superfície do solo na linha de plantio. Para a avaliação da distribuição do sistema radicular pelo método do perfil cultural nas trincheiras com dimensão de 70 cm largura x 150 cm de profundidade longitudinal à linha de plantio. Posteriormente foram confeccionados mapas temáticos das variáveis radiculares analisadas. Para a quantificação dos poros do solo em imagens 3D, originadas pela tomografia computada de raios-X, foram coletadas amostras com estrutura preservada. Raízes e poros foram classificados em: 1, > 1 e ≤ 3, > 3 mm de diâmetro. As inferências estatísticas foram realizadas em linguagem R. As doses crescentes de gesso favoreceram o desenvolvimento de raízes finas em profundidade, com destaque para o G28. A distribuição espacial do sistema radicular do G28 foi homogênea na direção vertical do perfil do solo. O maior número e volume dos poros estruturais ocorreu na camada de 20-34 cm, especialmente os poros com diâmetro menor que 2 mm.

Palavras-chave: Krigagem. Perfil cultural. Gesso agrícola. Cafeicultura.

1 INTRODUÇÃO

Com uma safra recorde de 50,48 milhões de sacas de café beneficiadas (safra 2011/2012), o Brasil se mantém na liderança do *ranking* dos produtores e exportadores de café. A produção no estado de Minas Gerais representa mais da metade de todo o café produzido no país. Isto se deve principalmente à grande área plantada (\approx 1,20 milhão de hectares) na região do Cerrado (CONAB, 2012), e em sua maioria com a espécie arábica (*Coffea Arabica*).

Entretanto, para elevar a produtividade e se manterem competitivos com o mercado externo os produtores precisam ser mais rigorosos no manejo e conservação do solo, com o objetivo de melhorar a qualidade físico-hídrica e química do solo, com vistas à sustentabilidade do agroecossistema (ALBIERO, 2012; ARAUJO JUNIOR et al., 2008).

Dessa forma, o conhecimento detalhado do sistema radicular do cafeeiro é de grande valia, por ser indicativo da adequação do manejo. Quando associado aos fatores edáficos e biológicos, influencia a organização estrutural do solo, por seu papel na formação de agregados mais complexos e estáveis (SALTON et al., 2008) inclusive melhoram a distribuição geométrica dos poros (MARTIN et al., 2012; SLEUTEL et al., 2012). No solo bem estruturado o seu uso é otimizado pelas raízes das plantas, por permitir melhor profundidade de exploração e aquisição eficiente dos nutrientes e da água (PARTELLI et al., 2006).

Assim, devem ser adotados sistemas de manejo capazes de promover a melhoria do ambiente para a planta por meio de práticas que

ampliem a distribuição das raízes, principalmente na direção vertical do perfil do solo (RAIJ, 2008; CREMON et al., 2009).

Com este intuito, vem sendo desenvolvido um sistema de manejo com práticas conservacionistas de solo para cultivo cafeeiro na região do Alto São Francisco, MG. Este sistema engloba o preparo profundo e fertilização do sulco de plantio (0,60 m), associado ao cultivo de gramíneas (*Brachiaria* sp.) na entrelinha com o objetivo de aumentar a proteção do solo contra erosão e o conteúdo de matéria orgânica. O sistema ainda prevê o uso de doses substanciais de gesso agrícola para neutralizar o alumínio tóxico e elevar os níveis de cálcio trocável e enxofre disponível em profundidade (SERAFIM et al., 2011).

São complexos os fatores que influenciam o desenvolvimento radicular do cafeeiro. Entretanto, o estudo da morfologia e distribuição das raízes é essencial para avaliar o desempenho das plantas cultivadas. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar conjuntamente a distribuição do sistema radicular e dos poros do solo e suas relações com o desenvolvimento do cafeeiro.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

O estudo foi conduzido em uma lavoura cafeeira experimental, localizada no município de São Roque de Minas, região fisiográfica do Alto São Francisco, MG, que tem por coordenadas geográficas 20° 15'45" S e 46° 18'7" W altitude de 850 m. 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).

O sistema em estudo vem sendo conduzida de acordo com as premissas de um sistema de manejo do solo que emprega práticas conservacionistas do solo e da água (SERAFIM et al., 2011) e, que vem sendo utilizado na região há aproximadamente 12 anos.

A lavoura é composta pela cultivar Catucaí Amarelo Multilínea (*Coffea arabica* L.) cultivada em plantio semiadensado (0,65 x 2,50 m). No preparo do solo foi empregada em área total uma aração e duas gradagens seguido da aplicação de calcário dolomítico (4 Mg ha⁻¹) e gesso agrícola (1,92 Mg ha⁻¹) incorporados até 20 cm de profundidade.

Após correção do solo em área total foram abertos os sulcos de plantio a 60 cm de profundidade e 50 cm de largura, com uso de equipamento que permite, além da abertura em maior profundidade o revolvimento do solo e a aplicação de corretivos e fertilizantes de forma homogênea até a profundidade de 40 cm (TICIANEL, 2013). No sulco foram aplicados 8 Mg ha⁻¹ (2 kg m⁻¹) de calcário dolomítico e a adubação de base (formulado 08-44-00, enriquecido com 1,5% Zn e 0,5% B). As mudas do cafeeiro foram plantadas entre a segunda quinzena de outubro e a primeira quinzena de novembro/2008.

Cerca de três meses após o plantio, nos tratamentos com gesso foi distribuído na superfície do solo e ao longo da linha de cultivo, sendo este material recoberto com material de solo misturado com material vegetal proveniente da entre linha (“chegada de terra” junto ao tronco do cafeeiro).

Conjuntamente à instalação da lavoura foi implantada como cultura de cobertura a *Brachiaria decumbens* (Syn. Urochloa) nas entrelinhas, sendo esta cortada periodicamente por meio de roçadora que faz com que o resíduo vegetal produzido seja direcionado para a linha de cultivo. A baixa declividade do terreno permitiu que a maioria dos tratamentos culturais da lavoura e colheita fosse mecanizada, embora algumas operações tenham sido realizadas com equipamento de tração animal (SERAFIM et al., 2011).

A área experimental é formada por um total de 30 parcelas, com 10 tratamentos de doses de gesso aplicados na superfície do solo (0; 3,5; 7; 14; 28 e 56 Mg ha⁻¹) e tratamentos sob manejo convencional para comparação. As parcelas experimentais contêm 10 linhas com 36 plantas cada, totalizando 360 plantas por parcela com área de 585 m². A bordadura corresponde a três plantas no início da parcela e duas linhas nas laterais.

Para este estudo foram selecionados os tratamentos sob o sistema em estudo com três doses de gesso, sendo: G0: ausência de gesso adicional há a presença somente do gesso utilizado na correção em área total (1,92 Mg ha⁻¹); G7: 7 Mg ha⁻¹ e G28: 28 Mg ha⁻¹ de gesso adicional, ambos aplicados na superfície do solo na linha de plantio. A seleção desses tratamentos baseou-se na hipótese de possíveis alterações estruturais do solo influenciadas pela aplicação de gesso e, para isso avaliou-se a dose recomendada no sistema estudado (G28) e a dose máxima normalmente encontrada na literatura (G7) (MOREIRA et al., 2001), ambos comparados ao tratamento sem gesso adicional (G0).

2.2 Avaliação do sistema radicular

Para a avaliação do sistema radicular foi utilizado o método da trincheira pelo estudo do perfil cultural (JORGE 1996; BRASIL; ZONTA; OLIVEIRA, 2007). Foi aberta uma trincheira em cada parcela do experimento, referente aos tratamentos em estudo, longitudinais à linha de cultivo do cafeeiro com dimensões de 70 x 150 x 150 cm. A parede vertical da trincheira ficou sob a projeção da copa do cafeeiro com distância de 10 cm do tronco da planta, onde o solo da parede foi escarificado com remoção de uma fina camada (3 a 5 cm) para a exposição das raízes. Na época do estudo (setembro/2011) os cafeeiros eram jovens (três anos), e se encontravam no início do período reprodutivo-florescimento.

Após a exposição das raízes no perfil vertical do solo, e para elevar o contraste de cores (solo = vermelho; raízes = marrom-amareladas) as raízes receberam uma fina camada de tinta branca. Posteriormente um gride de metal com as mesmas dimensões da trincheira foi colocado em contato com a parede da trincheira, sobre as raízes. O gride era constituído por quadrículas com dimensão de 5 x 5 cm, totalizando 420 pontos de amostragem.

A aquisição das imagens digitais foi efetuada com máquina digital semiprofissional com resolução espacial de sete megapixels. Após a aquisição, as imagens foram corrigidas e alinhadas com o uso do software Adobe Photoshop CS5 12.0.4 e, em seguida foram submetidas à quantificação das seguintes variáveis radiculares: área superficial (mm²),

comprimento (mm) e volume (mm³) em diferentes diâmetros de raiz, identificados pelo software Safira (JORGE; SILVA, 2010).

Para melhor interpretação dos dados, as variáveis radiculares e a distribuição dos poros do solo foram delimitadas com base nas profundidades de coleta das amostras utilizadas na tomografia computada de raios-X.

2.3 Caracterização física, química e tomográfica do solo

O solo foi morfologicamente descrito de acordo com Santos et al. (2005) e classificado segundo Embrapa (2013), como Latossolo Vermelho distrófico típico (LVd) muito argiloso.

Posteriormente à aquisição de imagens do sistema radicular do cafeeiro, foram coletadas amostras de solo com estrutura preservada em tubos de acrílico (6,5 cm diâmetro e 14 cm altura) bem como em anéis volumétricos (6,5 cm diâmetro e 2,5 cm altura), para execução das análises tomográficas e físicas.

Esta amostragem foi realizada na linha de plantio, próximo à planta de estudo e logo abaixo da camada de gesso, nas profundidades de 20-34, 80-94 e 150-164 cm, em três repetições. Estas profundidades foram selecionadas com base em estudos de Carducci et al., (2013) que identificaram diferenças marcantes entre as mesmas. Para este tipo de amostragem realizada com o mínimo de perturbação à estrutura do solo, foi utilizada uma ponteira de aço para encaixe no cilindro de acrílico.

No laboratório, as amostras com estrutura preservada foram preparadas e o material de solo excedente proveniente da parte superior e

inferior do cilindro, foi seco ao ar e passado em peneiras de 2 mm, obtendo-se assim amostras deformadas para serem utilizadas em análises químicas e físicas do solo.

A análise granulométrica foi realizada pelo emprego de agitação lenta da suspensão do solo, contendo NaOH 1 mol L⁻¹ durante 16 horas (EMBRAPA, 2011). Valores médios revelaram em g kg⁻¹: 819, 157 e 24 na profundidade de 20-34 cm; 848, 127 e 25 na profundidade de 80-94cm e, 886, 89 e 25 na profundidade de 150-164 cm, respectivamente para argila, silte e areia.

Os teores de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ foram determinados no extrato do ataque sulfúrico e utilizados nos cálculos das relações moleculares Ki (SiO₂/Al₂O₃) e Kr [SiO₂/(Al₂O₃ + Fe₂O₃)] (EMBRAPA, 2013). Procedeu-se também aos cálculos de alocação dos teores de caulinita (Al₂Si₂O₅(OH)₄ = 2.1496 SiO₂) e gibbsita (Al(OH)₃ = 1.5291Al₂O₃ - 0.6047Al₂Si₂O₅(OH)₄) das amostras por meio de sua relação estequiométrica derivada de suas fórmulas químicas ideais, de acordo com Resende; Bahia Filho e Braga (1987).

Os valores de Ki e de Kr inferiores a 0.75 indicam uma mineralogia gibbsítica sesquioxídica (Tabela 1).

Tabela 1 Teores de óxidos extraídos pelo ataque sulfúrico do horizonte Bw de um Latossolo Vermelho distrófico (LVd)

| LVd | Ataque sulfúrico | | | Ki ⁽¹⁾ | Kr ⁽²⁾ | Ct ⁽³⁾ | Gb ⁽⁴⁾ |
|-----|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | | | | |
| |g kg ⁻¹ | | | | |%..... | |
| Bw | 104.9 | 391.7 | 169.0 | 0.46 | 0.36 | 22.55 | 58.53 |

⁽¹⁾Ki: relação molecular SiO₂:Al₂O₃; ⁽²⁾Kr: relação molecular SiO₂: (Al₂O₃ + Fe₂O₃),
⁽³⁾Ct: porcentagem de caulinita, ⁽⁴⁾Gb: porcentagem de gibbsita.

Para determinação da resistência do solo à penetração (RP) foi utilizado um penetrógrafo eletrônico de bancada, conforme Tormena; Silva e Libardi (1998). As amostras de solo contidas em cilindros volumétricos de alumínio foram equilibradas ao potencial matricial de -6 kPa referente à capacidade de campo (OLIVEIRA et al., 2004; BERGAMIN et al., 2010), e posteriormente foi medida a RP. Após os ensaios experimentais as amostras foram secas em estufa a 105-110 °C por 48 h para determinação do conteúdo de água (θ) e da densidade do solo (Ds), conforme a Embrapa (2011).

2.4 Aquisição, reconstrução e análise das imagens 3D

Para a análise tomográfica as amostras em cilindro de acrílico foram secas a 40°C em estufa de circulação forçada para minimizar possíveis interferências dos filmes de água na atenuação dos raios-X. Para geração das imagens foi scaneado 3.5 cm de cada amostra em um tomógrafo EVS/ GE MS8X-130 (tubo de raios-X de tungstênio, 130 kV e 200 mA) de terceira geração pré-clínico, com feixe em cone mantido no Laboratório de Imagem de Solo da Universidade de Guelph, Canadá. A

energia de excitação de 120 kV e 170 mA foi empregada nas amostras gerando uma sequência axial de imagens com 16-bit de resolução radiométrica e com tempo de exposição de 3500 ms. Para redução dos artefatos proveniente dos feixes de raios-X policromáticos foi utilizado o filtro de cobre.

A partir das projeções resultantes do escaneamento foram selecionados sub volumes de interesse exatamente no centro da amostra e reconstruídos a 60 μm de resolução espacial (666 voxel x 666 voxel x 550 fatias). Os procedimentos de correção, reconstrução e limiarização seguiram o protocolo do Laboratório de Micropedologia e Imagem do Solo da Universidade de Guelph, Canadá.

Com o software de análise de imagens ImageJ de domínio público, as imagens 3D limiarizadas foram analisadas fatia a fatia, o que permitiu diferenciar os dados de acordo com as classes de tamanho pretendidos. Para isto foi utilizada a função "Analyze Particle" que permite calcular os parâmetros dos poros (número e volume). Esta função detecta e mede cada poro presente na imagem binária, obtendo-se dados relativos dos poros em cada fatia do volume estudado ($n=550$). A partir do resultado foi calculado o diâmetro equivalente a uma esfera (simulação da geometria espacial em 3D).

2.5 Análise estatística

As raízes quantificadas por análise de imagem 2D foram classificadas em três classes de diâmetros: 1 - raízes finas ou absorventes (1 mm), 2- raízes médias ou suporte das absorventes (> 1 e ≤ 3 mm) e 3-

raízes grossas ou permanentes (> 3 mm) (RENA; GUIMARÃES, 2000; MOTTA et al., 2006). Concomitantemente, procedeu-se à classificação dos poros detectáveis com diâmetro superior a um milímetro, correspondentes aos macroporos grandes (BULLOCK et al., 1985) distribuídos nas mesmas classes de raízes.

As inferências estatísticas foram feitas em nível de 5% de probabilidade. As análises e os gráficos foram obtidos por meio de funções em linguagem R (R Development Core Team, 2012) assim como o teste de correlação de Pearson entre as variáveis do sistema radicular e a porosidade.

De posse dos resultados obtidos em cada unidade de amostragem do gride (70 cm x 150 cm espaçados em quadrículas de 5 x 5 cm, totalizando 420 pontos) estimou-se valores para os locais não amostrados, em condições de não tendenciosidade e variância mínima. Para a krigagem utilizou-se o centróide de cada unidade amostral do gride, com escala variando de 3 a 7 classes de divisão, gerando então os mapas de superfície com auxílio do pacote 'geoR' (RIBEIRO; DIGGLE, 2001), a fim de buscar melhor representação e visualização da distribuição das variáveis radiculares no perfil do solo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da classificação das raízes por diâmetro (SOARES et al., 2007; RENA; GUIMARÃES, 2000), ficaram evidentes as modificações morfológicas no sistema radicular do cafeeiro promovidas pelos tratamentos (Figura 1).

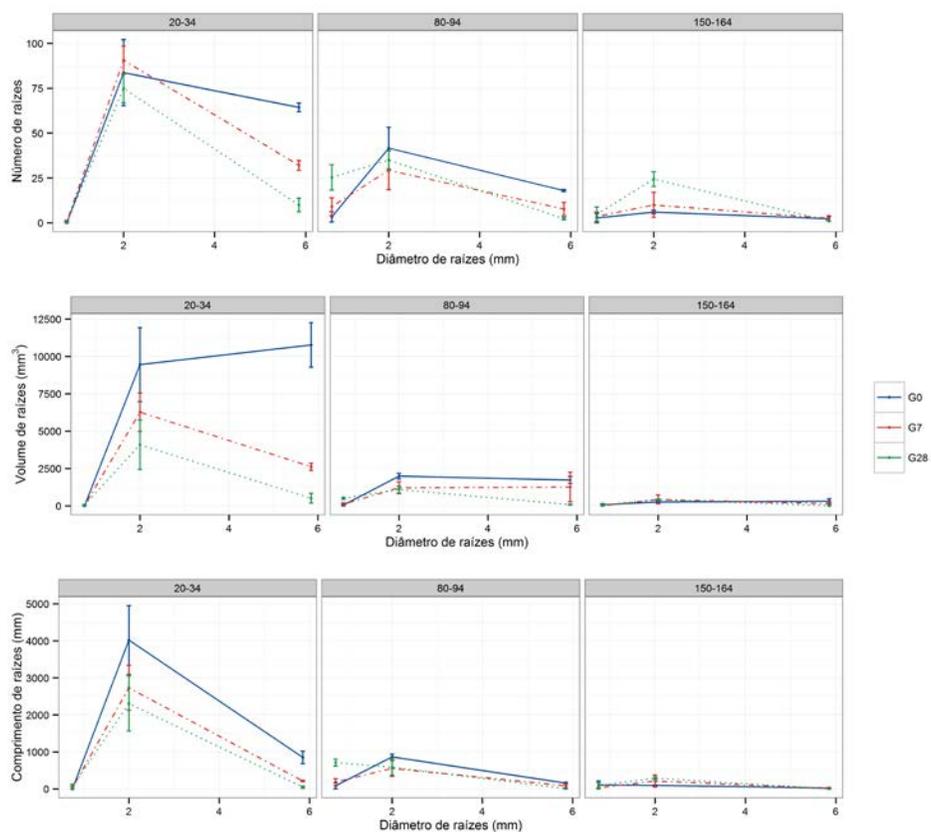


Figura 1 Distribuição do sistema radicular em número, volume (mm^3) e comprimento (mm) separados por valores médios nas classes de diâmetro (1, > 1 e ≤ 3 , > 3 mm) nas profundidades de 20-34, 80-94 e 150-164 cm nos tratamentos: G0 – ausência de gesso adicional; G7-7 Mg ha^{-1} e G28-28 Mg ha^{-1} de gesso adicional, aplicados na superfície do solo na linha de plantio. As barras correspondem ao erro padrão da média

Na ausência do gesso agrícola (G0) as raízes grossas e médias predominaram até a profundidade de 80-94 cm (39,62 e 60,38 %, respectivamente). Salienta-se que estas têm por função a sustentação do cafeeiro e atuam ainda como armazenadoras de reservas orgânicas, a

exemplo, dos carboidratos, enquanto as raízes médias auxiliam as raízes absorventes, porém com menor eficiência na absorção de água. Estes resultados foram semelhantes aos encontrados por Motta et al. (2006) que quantificaram maior concentração de raízes médias e grossas a partir de 20 cm preferencialmente distribuídas na área correspondente ao dossel do cafeeiro.

As raízes finas no G0 presentes no perfil do solo ($\approx 2,27\%$) (Figura 1) corroborando com Inforzato e Reis (1963) que encontraram raízes do cafeeiro 'Arábica', com seis anos de idade, até a profundidade de 3 m, entretanto com maior concentração das raízes finas especialmente nos primeiros 50 cm do solo, diferentemente do descrito por Martinez et al. (2003) que se referem a ocorrência destas em uma estreita camada superficial.

Em maior profundidade (150-164 cm) as variáveis volume e comprimento apresentaram distribuição homogênea e ou linearizada entre os tratamentos nos intervalos de diâmetros avaliados, o que sugere nessa profundidade a ausência das interferências do manejo realizado na superfície (MOTTA et al., 2006) e predomínio dos efeitos fenotípicos da planta (RENA; GUIMARÃES, 2000) e intrínsecos ao solo (FERREIRA; FERNANDES; CURI et al., 1999), embora as raízes finas com volume reduzido, foram detectadas no G28, o que aponta para o efeito da dose de gesso, pois nesta mesma área experimental, em estudo desenvolvido por Ramos (2012) foi observada a presença de cálcio em nível adequado ($\approx 1,4 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) pouco acima desta profundidade.

Com a aplicação do gesso agrícola na superfície do solo, as raízes grossas decresceram do G0 (38,69%) para o G28 (8,24%) e

simultaneamente houve o incremento de raízes finas do G0 (2,27%) para o G28 (14,98%) (Figura 1). De forma geral, os cafeeiros apresentaram bom desenvolvimento radicular favorecido pelas boas condições químicas e físicas favoráveis do solo associado à grande profundidade efetiva do mesmo (INFORZATO; REIS, 1963).

Ressalta-se que na lavoura avaliada os cafeeiros apresentavam idade fisiológica de três anos e embora a espécie *Coffea arabica* atinge o ciclo fisiológico com dois anos (LAVIOLA et al., 2007) as principais características morfofisiológicas do sistema radicular só completam o desenvolvimento após cinco anos de idade (RENA; GUIMARÃES, 2000).

Esses resultados podem subsidiar explicações com base no efeito do gesso, por neutralizar o alumínio trocável (Al^{+3}) e fornecer cálcio trocável (Ca^{+2}) e enxofre (SO_2^{-4}) ao subsolo (RAIJ, 2008). Assim, a melhoria do ambiente radicular, favorecida pela forma com que o gesso foi aplicado na superfície do solo, formando um reservatório promovido pela 'amontoa', está fornecendo cálcio constantemente ao solo, o que pode estar promovendo o surgimento das raízes finas em profundidade (CARVALHO-PUPATTO et al., 2003).

As raízes finas são de grande importância fisiológica por serem mais ativas na absorção de água e aquisição de nutriente devido à sua maior permeabilidade de membrana (JESUS; CARVALHO; SOARES, 2006). Elas foram mais distintas na profundidade de 80-94 cm (Figura 1) provavelmente devido à solubilização do gesso e eficiência em elevar a atividade do cálcio trocável em profundidade no perfil do solo (RAIJ 2008; CAIRES; FELDHAUS; BLUM, 2001), o que está respaldado no

estudo de Ramos (2012) que trabalhou com especiação química na mesma área experimental.

No estudo de Ramos (2012) foram encontrados valores crescentes de cálcio trocável, de acordo com as doses de gesso aplicadas, variando de 2 a 22 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ após 16 meses de implantação da lavoura e, portanto acima do nível adequado (1-1,5 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$) para a cultura cafeeira (MARTINEZ et al., 2003), isto até a profundidade de 40 cm. No entanto, Silva et al., (2013) encontraram a 15 cm de profundidade valores variando de 27 a 48 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ do G0 para o G28 após dois anos e meio de idade da lavoura.

A partir da profundidade de 80 cm, o teor de Ca^{+2} foi igualmente detectado com valores próximos de 2 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ (RAMOS et al., 2013), teor suficiente para normalizar o crescimento das raízes das plantas (RITCHEY et al., 1980), e isto seguramente foi um dos fatores responsáveis pelo enraizamento do cafeeiro em profundidade. Vale ressaltar que o cálcio é o principal componente da parede celular, ou seja, com o crescimento das células há o aumento da superfície de contato entre as mesmas, com necessidade de maior suprimento de Ca^{+2} (pectato de cálcio) para a formação de pectina, o que confere maior elongação da parede celular até atingir seu tamanho final (PRADO; NATALE, 2004), e de acordo com Carvalho-Pupatto et al. (2003) aumenta o crescimento das raízes.

Destaca-se que, além do gesso adicional aplicado na superfície do solo ao longo da linha da cultura no G7 e G28, antes da instalação do experimento, foi realizada calagem e gessagem em área total distribuídos a lanço e incorporados a 20 cm de profundidade (RAMOS, 2012) com o

objetivo de elevar a saturação por bases para 70% (SERAFIM et al., 2011), porém é importante lembrar que além disto, no preparo do sulco de plantio foi aplicado o equivalente a 8 Mg ha^{-1} de calcário dolomítico.

Esta notificação respalda os altos teores de cálcio encontrados por Ramos (2012) e Silva et al., (2013) particularmente no sulco de plantio no G0, como também em camadas mais profundas haja visto a ação do cálcio em profundidade.

No tratamento G0, apesar da não aplicação de gesso adicional em cobertura, salienta-se que além de toda a área receber gessagem e calagem corretiva a 20 cm, o sulco em toda a sua profundidade foi corrigido com calcário e a adubação nitrogenada com nitrato de cálcio (105 kg ha^{-1}), o que manteve os níveis de Ca^{+2} adequados ao crescimento radicular.

O revolvimento do solo na linha de plantio até a profundidade de 60 cm elevou a porosidade (CARDUCCI et al., 2013) e isto está refletido nos baixos valores de densidade do solo e baixíssima resistência do solo à penetração (Figura 2) quando se considera valores acima de 2,5 MPa como limitantes ao desenvolvimento do cafeeiro (LIMA et al., 2009). Isto é importante por promover incrementos na aeração, o que está ligado à absorção de nutrientes, devido ao processo respiratório da planta (FRANCO; INFORZATO, 1946).

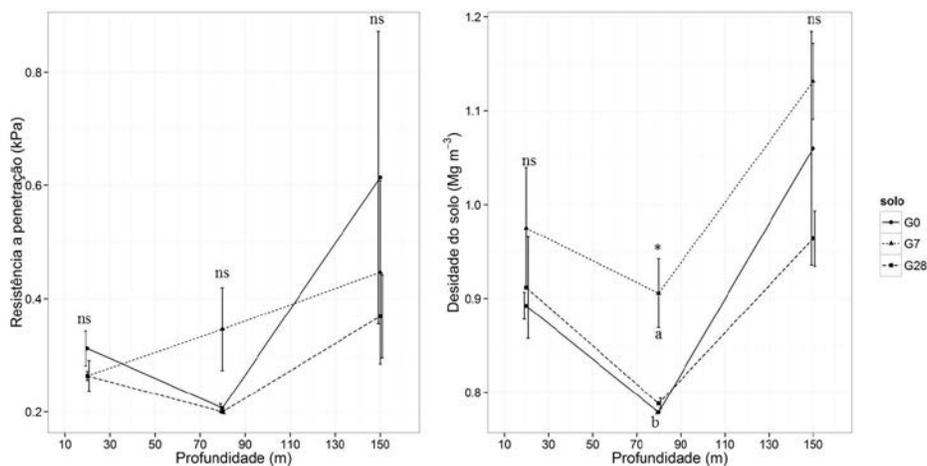


Figura 2 Valor médios de densidade do solo e, resistência do solo a penetração determinado no potencial matricial de -6 kPa referentes às profundidades de 20-34, 80-94 e 150-164 cm, dos tratamentos: G0 - ausência de gesso adicional, G7-7 Mg ha⁻¹ e G28-28Mg ha⁻¹ de gesso adicional, aplicados na superfície do solo na linha de plantio. (ns: não-significativo; *: significativo a 5 % de probabilidade. Letras minúsculas iguais dentro da profundidade não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$). As barras correspondem ao erro padrão da média

Ao mesmo tempo, a melhoria química promovida pelos corretivos e fertilizantes (RAIJ, 2008), associados ao incremento de resíduos orgânicos na superfície do solo (CAIRES; FELDHAUS; BLUM, 2001), provenientes da gramínea cultivada na entrelinha (*Brachiaria* sp.), devem ter atuado conjuntamente para a construção e manutenção da fertilidade do solo, bem como a redução da toxidez de Al³⁺, principal responsável pelo retardamento do crescimento radicular (CARVALHO-PUPATTO et

al., 2003), o que torna os benefícios mais evidentes quando somados ao fator genético da variedade do cafeeiro implantado.

A absorção contínua de Ca^{+2} pelas raízes da planta é essencial para a sua sobrevivência, pois não há translocação do nutriente da parte aérea para as porções novas das raízes em crescimento. O padrão de enraizamento das plantas está sujeito às diferenças existentes entre espécies e variedades, o que ocorre por meio do controle genético e da eficiência das plantas na utilização de Ca^{+2} (CAIRES; FELDHAUS; BLUM, 2001), porém este padrão pode ser modificado pelos fatores químicos e físicos do solo (CARVALHO-PUPATTO et al., 2003), como detectado entre os tratamentos avaliados.

Neste experimento, a lavoura foi formada com a variedade Catucaí Amarelo, resultado do cruzamento natural entre o Icatu e o Catuaí. Esta planta apresenta elevado vigor vegetativo, boa distribuição radicular e alta produtividade, além de provável tolerância ao Al^{+3} , herdada do Catuaí que expressa genes de tolerância (MATIELLO et al., 2008).

Ao longo dos perfis avaliados foi detectado um grande volume de poros estruturais distribuídos entre os diferentes diâmetros (Figura 3), o que ocorreu na seguinte ordem: $G28 > G0 > G7$. Possivelmente esta sequência esteja relacionada ao desempenho genético da planta e ao aporte de Ca^{+2} mantido no solo por diferentes fontes como nitrato de cálcio no G0 (105 kg ha^{-1}) e em 60 cm o calcário (8 Mg ha^{-1}) por ocasião do preparo do solo na linha de plantio em todos os tratamentos.

Os poros estruturais ou interagregados (DEXTER; RICHARD, 2009) são de grande importância ambiental, por influenciar diretamente todos os processos dinâmicos que envolvem a água e os gases, além de

afetar o crescimento radicular, as atividades microbianas e as propriedades mecânicas, que são estreitamente relacionadas à distribuição da geometria espacial desses poros (MUNKHOLM; HECK; DEEN, 2012; LUO; LIN; LI, 2010). Independente do tratamento avaliado, a grande quantidade de poros de elevado diâmetro detectados pela tomografia confirmam a redução de impedimento físico ao crescimento radicular.

Em todos os tratamentos, independente da profundidade analisada foi verificado um predomínio de poros com diâmetro menor que 2 mm. Fato este ligado à mineralogia do solo que favorece a presença marcante destes poros (FERREIRA; FERNANDES; CURI, 1999; COOPER; VIDAL-TORRADO, 2005), bem como as modificações estruturais proporcionadas pelas práticas de manejo, evidentes na profundidade de 20-34 cm (Figura 3).

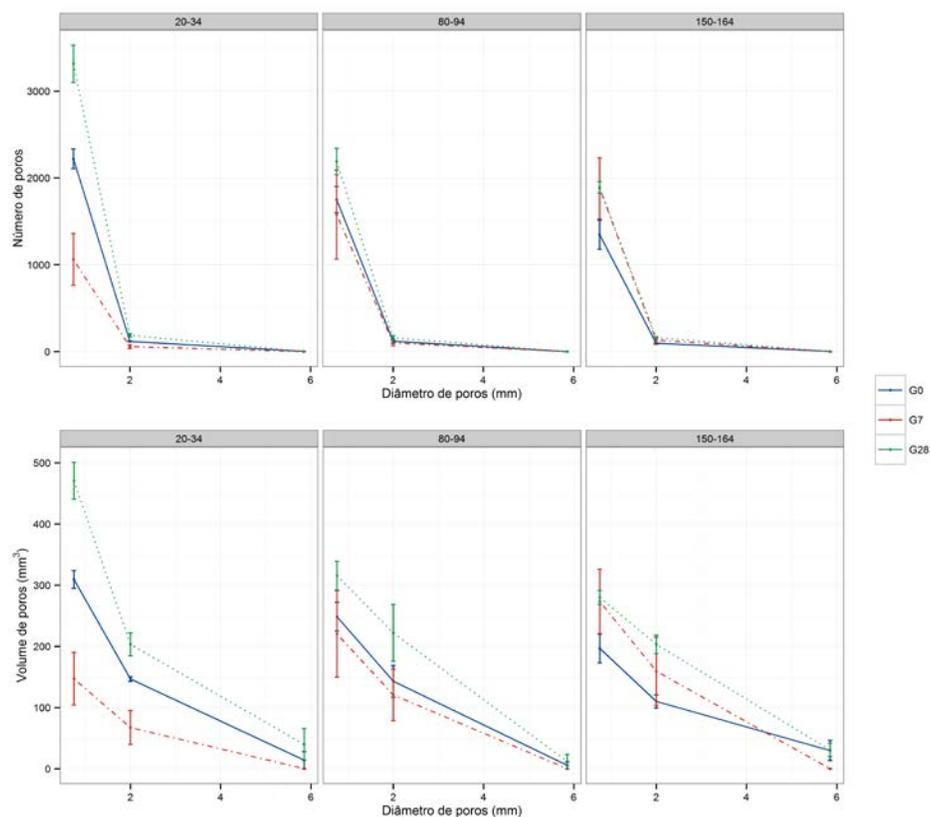


Figura 3 Distribuição do diâmetro de poros em número e volume (mm^3) separados por valores médios nas classes de diâmetro (1; > 1 e ≤ 3 e > 3 mm) nas profundidades de 20-34, 80-94 e 150-164 cm nos tratamentos: G0 - ausência de gesso adicional; G7 - 7 Mg ha^{-1} e G28 - 28 Mg ha^{-1} de gesso adicional, aplicados na superfície do solo na linha de plantio. As barras correspondem ao erro padrão da média

Embora o G28 tenha apresentado o maior volume de poros estruturais em todo o perfil avaliado (Figura 3), a distribuição das raízes finas a 20-34 cm de profundidade foi similar entre os tratamentos (Figura 1). No entanto, a maior concentração de raízes finas ocorreu na profundidade de 80-94 cm na seguinte ordem: $\text{G28} > \text{G7} > \text{G0}$ (14,98;

5,75; 2,27 %, respectivamente), provavelmente favorecida pelo grande volume de poros com este diâmetro (< 2 mm). Mesmo ao longo do perfil o G28 se destacou em número de raízes finas.

Pela correlação de Pearson constatou-se o efeito significativo e positivo entre a quantidade de raízes finas ($r = 0,99^{**}$) e poros de diâmetro superior (> 3 mm), com incremento do espaço para o desenvolvimento radicular. Foi verificado efeito significativo, porém negativo, entre os poros de menor diâmetro (1 mm) e com raízes finas ($r = -0,99^{*}$).

Com relação às raízes médias e as grossas, que se destacaram em G0, pode ser devido ao elevado número e volume de poros compatíveis com estas classes de diâmetros, o que facilitou o desenvolvimento radicular pela ausência de barreira física devido à maior proporção de espaços vazios, associado ao nível adequado de cálcio (MARTINEZ et al., 2003; MATIELLO et al., 2008; RAIJ, 2008; RAMOS, 2012).

Embora com elevado volume de poros, essa tendência não foi observada para o G28, onde ocorreu um decréscimo destas raízes até 80-94 cm, com valores inferiores ao G7 que apresentou maior volume de raízes médias e grossas mesmo com menor volume de poros, especialmente na profundidade de 20-34 cm.

É importante conhecer a distribuição do sistema radicular, pois as raízes desempenham papel fundamental na formação e estabilização dos agregados do solo o que, de certa forma, acaba por contribuir com uma configuração do diâmetro dos poros mais homogênea.

A feição está associada tanto aos processos físicos advindos do crescimento, em que há aproximação das partículas minerais pela pressão

exercida com o seu avanço e extração de água, quanto aos 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), pelo incremento da porosidade de forma distinta, bem como pela produção de uma rede de poros complexa, com presença de poros interagregados (MARTIN et al., 2012; JORGE; SILVA, 2010; COSTA JÚNIOR et al., 2012).

Ressalta-se que a rizosfera é rica em energia, oriunda da interação solo-planta-organismos, e de certa forma esses processos influenciam na distribuição do tamanho dos agregados, pela criação de escalas de homogeneidade da estrutura do solo (MARTIN et al., 2012).

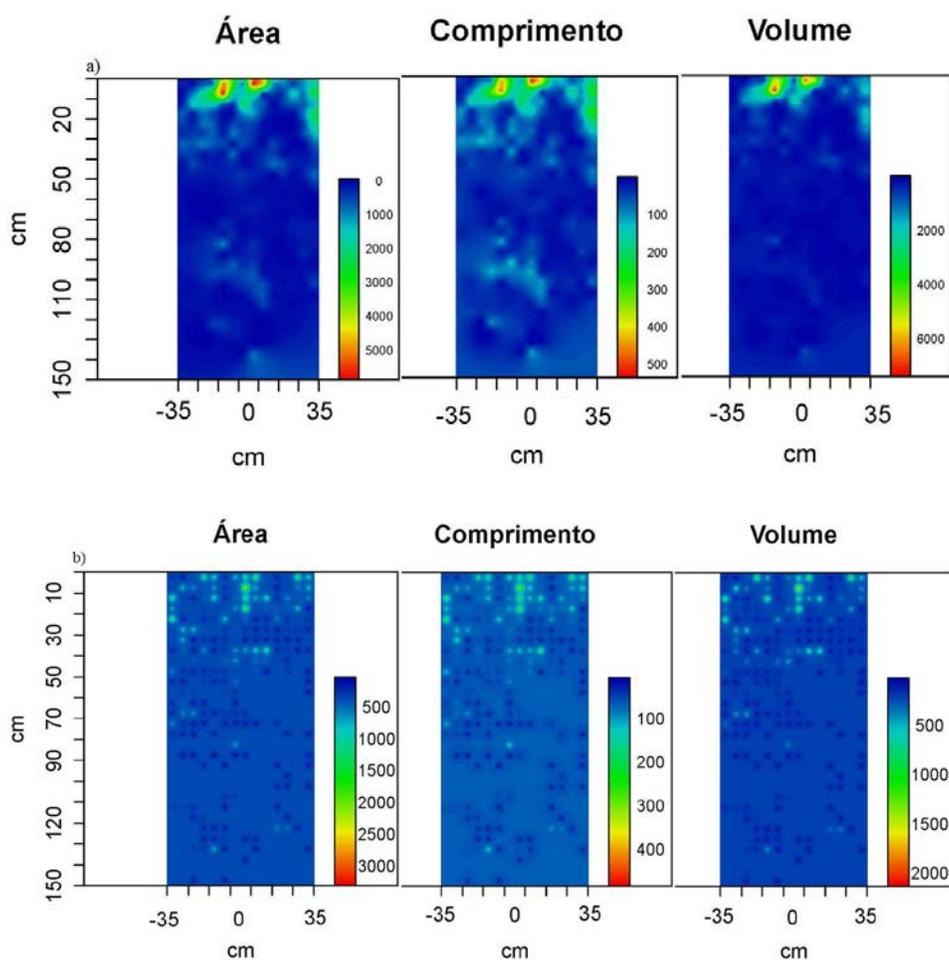
Os mapas de superfície da distribuição espacial do sistema radicular estão apresentados na figura 4. As construções de mapas por meio de krigagem são importantes para a verificação e interpretação da variabilidade espacial (GREGO;VIEIRA, 2005).

Pela escala de cores, nota-se a grande variabilidade das variáveis estudadas (área de superfície, comprimento e volume) ao longo do perfil do solo. Entretanto, os mapas de distribuição espacial apresentam similaridade na localização dos maiores e menores valores destas variáveis, porém, em diferentes proporções com maior presença de raízes até a profundidade de 60 cm nos diferentes tratamentos avaliados, o que deixa claro o efeito do revolvimento profundo do solo na elevação da porosidade (SCHAFFRATH et al., 2008; CARDUCCI et al., 2013).

Com a geoespacialização do comprimento de raízes foi possível detectar o incremento desta com o aumento da dose de gesso, assim como

sua continuidade vertical e lateral no perfil de solo no G28 (azul), o que indica um comprimento mínimo de 50 mm de raízes.

Este fato contribui sobre a importância do Ca^{+2} no crescimento das raízes, pois a presença deste elemento garante a integridade funcional da parede celular à aquisição dos recursos edáficos (RAIJ, 2008). De acordo com Ramos et al. (2013), o Ca^{+2} manteve-se até a profundidade de 80 cm em níveis adequados, devido sua solubilização nas camadas mais superficiais.



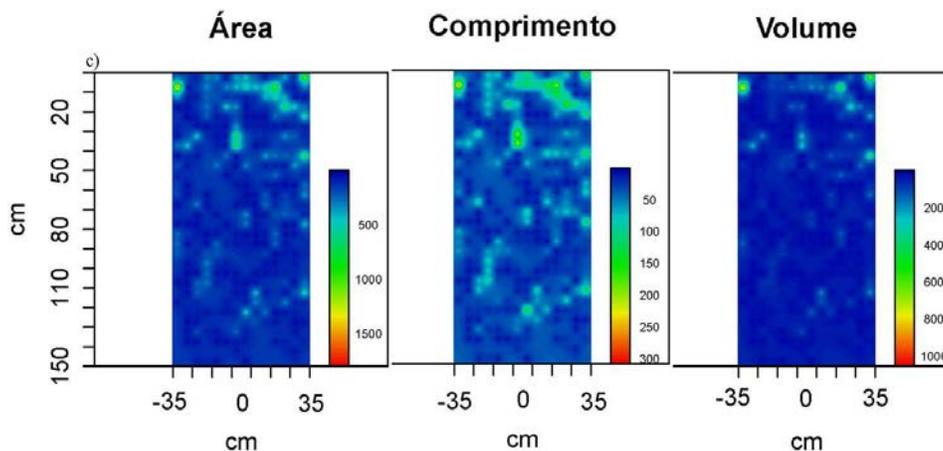


Figura 4 Mapas de distribuição espacial do sistema radicular do cafeeiro (volume, mm^3 , área de superfície, mm^2 e comprimento, mm) sob o sistema em estudo. a) G0 – ausência de gesso; b) G7 - 7 Mg ha^{-1} e c) G28 - 28 Mg ha^{-1} de gesso adicional, aplicados na superfície do solo na linha de plantio

O desempenho do crescimento radicular do cafeeiro pode ser considerado satisfatório, pois atingiu profundidades abaixo de um metro e apresentou conformidade típica da rede radicular desta cultura, com a maior concentração próxima ao tronco, diminuindo gradualmente em profundidade (RENA; GUIMARÃES, 2000). Porém, mesmo nas camadas abaixo de um metro é marcante a quantidade de raízes, o que de acordo com Correa et al. (2008) é essencial por garantir a absorção de água e nutrientes lixiviados da camada superficial.

Modificações morfológicas do sistema radicular têm sido estudadas como um potencial de adaptação das plantas a ambiente com deficiência de nutrientes e impedimento físico. Portanto, sistemas radiculares mais expressivos como aquele do G28 proporcionam maior

contato raiz-solo, ou seja, o incremento do crescimento em extensão e da ramificação do sistema radicular é uma estratégia alternativa para a maior exploração do solo e aquisição dos recursos edáficos (HARPER; JONES; SACKVILLE-HAMILTON, 1991).

4 CONCLUSÃO

- As doses crescentes de gesso favoreceram o desenvolvimento de raízes finas ao longo do perfil do solo.
- A distribuição espacial do sistema radicular na dose mais elevada de gesso agrícola foi mais homogênea na direção vertical do perfil do solo.
- O maior número e volume dos poros estruturais ocorreu na camada de 20-34 cm, especialmente os poros com diâmetro menor que 2 mm.

AGRADECIMENTOS

A FAPEMIG pelo financiamento da pesquisa; ao Consorcio Embrapa Café pelo empréstimo de veículos; ao CNPq pela concessão da bolsa de estudos; à UFLA pelo apoio institucional; à Empresa AP pelo apoio técnico e logístico e ao Dr. Richard J. Heck (University of Guelph – Canadá) pela orientação, permissão de uso dos laboratórios e auxílio na análise tomográfica. Aos doutorandos do DCS-UFLA Teotônio Soares e Alisson Lucrécio da Costa pelo apoio em linguagem computacional R.

Distribution of coffee roots system and Latosol pores under management with different gypsum doses

ABSTRACT

The aim of this study was to evaluate using the CT X-ray scan techniques and soil profile methods, changes in the soil pore distribution and the coffee root system due to management. Three trenches were dug at random and longitudinal planting row in an gibbsitic Latosol very clayey, under to the three levels of gypsum: G0: no gypsum; G7: 7 Mg ha⁻¹ e G28: 28 Mg ha⁻¹ with additional gypsum, applied to the planting row surface. To evaluate the roots distribution in the soil profile method, on the trenches with dimensions of 70 cm width x 150 cm depth longitudinal planting row. Afterward thematic maps were made of root variables analyzed. To quantification of soil pores in 3D images, originated by CT X-ray scan, undisturbed soil samples were collected. Roots and pores were classified as: 1; > 1 and ≤ 3; > 3 mm diameter. The statistical inferences were performed in R language. Increasing doses gypsum favored the development of fine roots in depth, especially the G28. The spatial distribution of root system in G28 was homogeneous in the soil profile vertical direction . The greater number and pore volume occur in the structural layer of 20-34 cm, particularly pores with a diameter less than 2 mm.

Keywords: Kriging. Soil profile methods. Agricultural gypsum. Coffee crop.

REFERÊNCIAS

ALBIERO, D. **Sustentabilidade, agroecossistemas e energia**. Energia na Agricultura- Portal dia de campo. Disponível em: <<http://www.diadecampo.com.br/zpublisher/materias/Materia.asp?id=27790&secao=Colunas%20e%20Artigos>>. Acesso em: 6 de fev. 2013.

ARAÚJO JUNIOR, C. F. et al. Resistência à compactação de um Latossolo cultivado com cafeeiro, sob diferentes sistemas de plantas invasoras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 1, p. 25-32, jan./fev. 2008.

BERGAMIN, A.C. et al. Compactação em um latossolo vermelho distroférico e suas relações com o crescimento radicular do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 34, n. 3, p.681-691, mai./jun. 2010.

BRASIL, F. C.; ZONTA, E.; OLIVEIRA, M. R.G. Métodos de amostragem e quantificação para estudos do sistema radicular em condições de campo – uma revisão crítica. **Revista Universidade Rural, Ciência da Vida**, Seropédica- EDUR, v. 27, n. 2, p. 14-33, jul./dez. 2007.

BULLOCK, P. et al. **Handbook for Soil Thin Section Description**. Waine Research Publications, England. p.152, 1985.

CAIRES, E. F.; FELDHAUS, I. C.; BLUM, J. Crescimento radicular e nutrição da cevada em função da calagem e aplicação de gesso. **Bragantia**, Campinas, v. 60, n.3, 213-223, out./dez. 2001.

CARVALHO-PUPATTO, J. G. et al. Efeito de escória de alto forno no crescimento radicular e na produtividade de arroz. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 11, p. 1323-1328, nov. 2003.

CARDUCCI, C. E. et al. Distribuição bimodal de poros em solos sob sistema inovador de manejo do solo no cultivo cafeeiro. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.33, n.2, p.291-302, mar./abr. 2013.

CONAB. **Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira. Café.Safra/2012**, 4º estimativa. disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/12_12_20_16_01_51_boletimcafe_dezembro_2012.pdf>. Acesso em: 20 de dez. 2012.

CORRÊA, J. C. et al. Aplicação superficial de diferentes fontes de corretivos no crescimento radicular e produtividade da aveia preta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n.4, p:1583-1590, Ago. 2008.

COSTA JUNIOR, 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, MG, v.36, n.4, p: 1311-1321, Ago. 2012.

COOPER, M.; VIDAL-TORRADO, P. Caracterização morfológica, micromorfológica e físico-hídrica de solos com horizonte B Nítico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 29, n. 4, p. 581-595, jul./ago. 2005.

CREMON, C. et al. Análise micromorfométrica de agregados de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico em diferentes sistemas de manejo. *Acta Scientiarum, Agronomy Maringá*, v. 31, n. 1, p. 139-146, Mar. 2009.

DEXTER, A. R.; RICHARD, G. Tillage of soils in relation to their bi-modal pore size distributions. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 103, n. 2, p. 113-118, June 2009.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. revista. Rio de Janeiro, 2011. 225p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Rio de Janeiro, 2013. 353 p.

FERREIRA, M. M.; FERNADES, B.; CURI, N. Mineralogia da fração argila e estrutura de latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 23, n. 1, p. 507-514, jan./fev. 1999.

FRANCO, C. M.; INFORZATO, R. O sistema radicular do cafeeiro nos principais tipos de solo do estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v.6, n.9, p:443-478, Set. 1946.

GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 29, n.2, p:169-177, maio./abr. 2005.

HARPER, J. L.; JONES, M.; SACKVILLE-HAMILTON, N. R. The evolution of roots and the problems of analysing their behaviour. In: ATKINSON, D. (Ed.). **Plant root growth: an ecological perspective**. Oxford: Blackwell, 1991. p. 3-22.

INFORZATO, R.; REIS, A. J. Estudo comparativo do sistema radicular dos cafeeiros Bourbon amarelo e Mundo Novo. **Bragantia**, Campinas, v. 22, n. único, p: 74-750, 1963.

JESUS, A. M. S.; CARVALHO, S. P.; SOARES, Â. M. Comparação entre sistemas radiculares de mudas de *Coffea arabica* L. obtidas por estaquia e por sementes. **Coffee Science**, Lavras, v. 1, n. 1, p. 14-20, abr./jun. 2006.

JORGE, L. A. C. **Recomendações práticas para aquisição de imagens digitais analisadas através do SIARCS**. São Carlos, SP. Circular Técnica-Embrapa/ CPDIA, nº 1, 1996, 57p.

JORGE, L. A. C.; SILVA, D. J. C. B. **SAFIRA: manual de utilização**. São Carlos, SP. Embrapa/ CPDIA, 2010, 29p.

LAVIOLA, B. G. et al. Dinâmica de cálcio e magnésio em folhas e frutos de *Coffea arabica*. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.31, n.6, p: 319-329, dec. 2007.

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, MG, v. 36, n.1, p: 71-78, jan./fev. 2012.

LIMA, V. M. P. et al. Intervalo hídrico ótimo e porosidade de solos cultivados em área de proteção ambiental do sul de minas gerais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 33, n.5, p:1087-1095, out. 2009.

LUO, L.; LIN, H.; LI, S. 2010. Quantification of 3-D soil macropore networks in different soil types and land uses using computed

tomography. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.393, n.1/2, p:53–64, Oct. 2010.

MARTIN, S.L. et al. The effects of simultaneous root colonisation by three *Glomus* species on soil pore characteristics. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v.49, n.6, p:167-173, June 2012.

MARTINEZ, H. E. P. et al. Faixas críticas de concentrações de nutrientes e avaliação do estado nutricional de cafeeiros em quatro regiões de Minas Gerais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 6, p. 703-713, jun. 2003.

MATIELLO, E. M. et al. Produção de matéria seca, crescimento radicular e absorção de cálcio, fósforo e alumínio por *coffea canephora* e *coffea arabica* sob influência da atividade do alumínio em solução. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.32, n.1, p:425-434, jan./fev. 2008. (Nota Científica).

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**, v.16, n.1, São Paulo, p:1-19, Jan.2002.

MOREIRA, M.A. et al. Efeitos de calcário e gesso nas características químicas do solo e na produção do cafeeiro (*Coffea arabica* L.), 2001. **In:** II Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil, Vitória da Conquista, BA, 2001.

MOTTA, A. C. V. et al. Distribuição horizontal e vertical da fertilidade do solo e das raízes de cafeeiro (*Coffea arabica* L.) cultivar Catuaí. **Acta Scientiarum Agronomy**. Maringá, v. 28, n. 4, p. 455-463, out./dez., 2006.

MUNKHOLM, L. J.; HECK, R.J. ; DEEN, B. Soil pore characteristics assessed from X-ray micro-CT derived images and correlations to soil friability. **Geoderma**, Amsterdam, v.181–182, n.1, p: 22–29, July 2012.

OLIVERIA, G. C. et al. Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após vinte anos de Manejo e cultivo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, n. 2, p. 327-336, mar./abr. 2004.

PARTELLI, F. L. et al. Produção e desenvolvimento radicular de plantas de café 'Conilon' propagadas por sementes e por estacas. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v.41, n.6, p.949-954, jun. 2006.

PRADO, R. M.; NATALE, W. Calagem na nutrição de cálcio e no desenvolvimento do sistema radicular da goiabeira. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, n.10, p.1007-1012, out. 2004.

RAIJ, B. van. **Gesso na agricultura**. Campinas: Instituto Agronômico, 2008. 233 p.

RAMOS, B.Z. **Especiação química da solução e mobilidade de bases e sulfato em Latossolo sob altas doses de gesso**. 100f. 2012. Tese (Doutorado Ciência do Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras – MG. 2012.

RAMOS, B. Z.; TOLEDO, J. P. V. F.; LIMA, J. M.; SERAFIM, M. E.; BASTOS, A. 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, n.4, p:1018-1026, jul./ago. 2013.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2012. Disponível em: <<http://www.R-project.org>>. Acesso em: 2 fev. 2012.

RENA, A. B.; GUIMARÃES, P. T. G. **Sistema radicular do cafeeiro: estrutura, distribuição, atividade e fatores que o influenciam**. Belo Horizonte: EPAMIG, 2000. 80 p. (Documentos, 37).

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**, Viçosa, MG, v.11, n.1, p: 17-23, Jan. 1987.

RIBEIRO JR P. J.; DIGGLE, P. J. **geoR: a package for geostatistical analysis**. R-News, London, v.1, n.2, p.15-18, jun 2001.

RITCHEY, K. D. et al. Calcium leaching to increase rooting depth in a Brazilian Savannah Oxisol. **Agronomy Journal**, v.72, n.1, p.40-44, jan./feb. 1980.

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, MG, v. 32, n.1, p:11-21, jan./fev. 2008.

SANTOS, R. D. et al. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. ed. 5. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, MG, 2005, 92p.

SCHAFFRATH, V. R. et al. Variabilidade e correlação espacial de propriedades físicas de solo sob plantio direto e preparo convencional.

Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, MG, v.32, n.4, p: 1369-1377, Ago. 2008.

SERAFIM, M. E. 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./dec. 2011.

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

SOARES, A. R. et al. Produção e distribuição de raízes em cafeeiros irrigados por gotejamento. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG, v.15, n.2, 130-140, abr./jun., 2007.

SLEUTEL, S. et al. Manipulation of the soil pore and microbial community structure in soil mesocosm incubation studies. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford ,v.45, n. 2, p: 40-48, Feb. 2012.

TICIANEL, T. **Sistema Mafes (Penta)**. Empresa Mafes. Disponível em: <
http://www.lpv.esalq.usp.br/lpv584/SISTEMA_MAFES%20por%20Tulio%20Ticianel.pdf>. Acesso em: 09 de setembro de 2013.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um latossolo roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 22, n.3, p: 573-581, 1998.

(VERSÃO PRELIMINAR DO ARTIGO)