



KARINA MARIE KAMIMURA

**VARIABILIDADE ESPACIAL DE
PROPRIEDADES FÍSICAS DE UM LATOSSOLO
VERMELHO AMARELO EM LAVOURA
CAFEIEIRA**

**LAVRAS – MG
2011**

KARINA MARIE KAMIMURA

**VARIABILIDADE ESPACIAL DE PROPRIEDADES FÍSICAS DE UM
LATOSSOLO VERMELHO AMARELO EM LAVOURA CAFEIEIRA**

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. Moacir de Souza Dias Júnior

Coorientador

Dr. Marcelo Silva de Oliveira

**LAVRAS – MG
2011**

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca da UFLA**

Kamimura, Karina Marie.

Variabilidade espacial de propriedades físicas de um Latossolo
Vermelho Amarelo em lavoura cafeeira / Karina Marie Kamimura. –
Lavras : UFLA, 2011.

129 p. : il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 2011.

Orientador: Moacir de Souza Dias Júnior.

Bibliografia.

1. Pressão de preconsolidação. 2. Geoestatística. 3. Umidade do
solo. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 631.47

KARINA MARIE KAMIMURA

**VARIABILIDADE ESPACIAL DE PROPRIEDADES FÍSICAS DE UM
LATOSSOLO VERMELHO AMARELO EM LAVOURA CAFEIEIRA**

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 30 de maio de 2011.

Dr. Elifás Nunes Alcântara	EPAMIG
Dr. Gérson Rodrigues dos Santos	UFV
Dr. Marcelo Silva de Oliveira	UFLA
Dr. Mozart Martins Ferreira	UFLA

Dr. Moacir de Souza Dias Júnior
Orientador

**LAVRAS – MG
2011**

A Deus, pelo dom da vida e pelo privilégio de suas provações,

OFEREÇO

A minha mãe Lourdes, ao meu pai Tadaomi e as minhas irmãs, Melina e Sandra pelo Amor incondicional, que me fortalece a cada dia.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Departamento de Ciência do Solo pela oportunidade concedida para a realização do Doutorado.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudo.

A minha família, pelos valores transmitidos de forma tão nobre, pela compreensão dos meus momentos de ausência, por incentivar meus estudos e pelo amor acima de qualquer coisa.

Ao Professor Moacir de Souza Dias Júnior, pela amizade, pelos ensinamentos, incentivo, paciência, humildade e por ser um verdadeiro exemplo de profissional pela sua disponibilidade e por prestar toda orientação necessária para o meu desempenho durante o curso.

Ao Consórcio Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento do Café – CBP&D/ Café e ao Programa Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento do café – PNP&D/Café, pelo auxílio financeiro para a realização deste trabalho.

Ao professor Marcelo Silva de Oliveira (DEX-UFLA), pela coorientação e contribuição na construção deste trabalho.

Ao professor Gérson Rodrigues dos Santos (UFV) pela amizade, orientação e sua valiosa contribuição na construção do trabalho.

Aos pesquisadores Paulo Tácito Gontijo Guimarães e Elifas Nunes Alcântara (EPAMIG) pela amizade e auxílio na concretização deste trabalho.

Ao Professor Mozart Martins Ferreira (DCS-UFLA) pela disponibilidade em ajudar a qualquer momento e pelos valiosos conhecimentos transmitidos.

Ao Professor Geraldo César de Oliveira (DCS-UFLA) pelos valiosos conhecimentos transmitidos.

A todos os professores do Departamento de Ciência do Solo da UFLA, pelo conhecimento transmitido, auxílio e contribuição ao trabalho.

Aos funcionários do laboratório de Física do Solo, Dulce Claret Monteiro Moraes e Doroteo de Abreu.

Aos funcionários do Departamento de Ciência do Solo da UFLA: Dirce Cássia Corrêa Macedo, Maria Alice R. Assis, Emerson dos Santos, Cleusa Aparecida C. Abreu e Marlene Aparecida de Sousa.

A todos os funcionários da Fazenda da EPAMIG de Patrocínio, especialmente ao Sr. Zé, Alexandrino Lopes de Oliveira, Sara e Jaime.

Aos colegas de curso, pelos bons momentos de convívio. Especialmente: Adriana Cristina Dias, Bruno Montoani Silva, Bruno Silva Pires, César Francisco Araújo Júnior, Gislene Aparecida dos Santos, Guilherme Amaral de Souza, João Marcos Louzada (DEX), Jussara Moraes Frazão, Karine Dias Batista, Letúzia Maria Oliveira, Maria Luiza de Carvalho Andrade, Paula Cristina Caruana Martins, Paula Sant`Ana Moreira Pais, Paulo Ademar Avelar Ferreira, Piero Iori, Thiago Henrique Pereira Reis e Viviane A. T. Coelho.

Ao Ivoney Gontijo pelos ensinamentos, amizade e conselhos.

Aos alunos de Iniciação Científica: Henrique Martins de Oliveira, Wharley Pereira dos Santos e Rafael Malfitano Braga.

Ao Alessandro Dultti da Silva pelo amor, carinho, amizade, companheirismo e apoio na longa jornada em Lavras.

À Cláudia, Jáirson, Euci, Expedito pela amizade sincera.

À minha tia Laurinda Morinaga pelo carinho, ensinamentos, conselhos e apoio nos momentos mais difíceis.

À Alcione Aparecida Barba pela colaboração na correção gramatical.

A todos aqueles que contribuíram para a construção deste trabalho.

Muito obrigada!

RESUMO

A compactação do solo é um problema antigo e intensificou-se com a modernização da agricultura, principalmente pelo uso de máquinas cada vez maiores e mais pesadas. Neste contexto, este estudo foi realizado com os objetivos de: i) analisar o comportamento compressivo do solo cultivado com cafeeiros na linha de tráfego do trator (LTT) e linha de tráfego da colhedora (LTC); ii) analisar a variabilidade espacial dos atributos físicos do solo, com o uso das técnicas de variografia e krigagem; iii) analisar a variabilidade espacial da pressão de preconsolidação (σ_p) e umidade volumétrica (θ), gerar mapas obtidos com a interpolação, utilizando-se a técnica de krigagem ordinária. O estudo foi conduzido na Fazenda Experimental da EPAMIG, no município de Patrocínio, MG num Latossolo Vermelho Amarelo. No primeiro estudo foram coletadas amostras indeformadas nas profundidades de 0-3, 10-13 e 25-28 cm em 5 trincheiras. Para a obtenção dos modelos da capacidade de suporte do solo, σ_p x potencial matricial (ψ_m) do solo, foram realizados ensaios de compressão uniaxiais com as amostras indeformadas em diferentes ψ_m . Os atributos físicos e os modelos de capacidade de suporte de carga (CSC) indicaram que as operações realizadas com o trator Massey Ferguson modelo 275 promoveram maior degradação da estrutura do solo do que a operação realizada com a colhedora Jacto KTR Advance. O ψ_m crítico para a LTT foi de 51 kPa, enquanto que para a LTC o ψ_m crítico foi de 291 kPa. No segundo e terceiro estudos a amostragem foi realizada após a demarcação de uma malha retangular (40 m x 150 m), onde foram coletadas amostras indeformadas com auxílio do amostrador tipo Uhland em 28 trincheiras. Todos os atributos físicos do solo apresentaram estrutura de dependência espacial, exceto a porosidade total em todas as profundidades. A técnica de krigagem ordinária demonstrou ser uma alternativa viável para a estimativa de dados em pontos não amostrados na área experimental. A profundidade 0-3 cm apresentou maior impedimento físico do solo, pois apresentou maior densidade do solo e menores valores de macroporosidade do solo. A σ_p e θ do solo apresentaram estrutura de dependência espacial. A profundidade de 0-3 cm apresentou maior CSC do solo indicando que esta profundidade está mais compactada em relação às demais profundidades. Com base nos mapas da σ_p , o trator e a colhedora não devem trafegar na área para a umidade igual a $0,45 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, pois o solo possui CSC de 200 kPa nesta condição. Se essa condição for desrespeitada, a compactação adicional poderá ocorrer. Para o tráfego do trator, deve-se esperar por um período, para que a θ atinja um valor menor que $0,36 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, enquanto que para o tráfego da colhedora deve-se esperar a θ atingir valor menor que $0,30 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

Palavras-Chave: Pressão de preconsolidação. Geoestatística. Umidade do solo.

ABSTRACT

Soil compaction is an old problem and it has intensified with the modernization of agriculture, especially by the use of machines bigger and heavier. In this context, the objectives of this study were: i) to analyze the compressive behavior of the soil cultivated with coffee plantation in the tractor traffic line (TTL) and in the combine traffic line (CTL); ii) to analyze the spatial variability of the soil physical attributes, using techniques of kriging and variography; iii) to analyze the spatial variability of the preconsolidation pressure (σ_p) and volumetric water content (θ), generate maps obtained by interpolation, using the technique of ordinary kriging. This study was carried out at the Experimental Farm of EPAMIG, in Patrocínio, MG in a Red-Yellow Latosol (Oxisol). In the first study undisturbed soil samples were collected at 0-3, 10-13 and 25-28 cm depths in five trenches. To obtain the soil bearing capacity models (σ_p as a function of the soil matric potentials), uniaxial compression test were performed using undisturbed soil samples, at different soils matric potentials. The physical attributes and the bearing capacity models indicated that the operations carried out with the Massey Ferguson Tractor model 275 promoted further soil structure degradation (soil compaction) than the KTR Advance Combine. In order to avoid additional soil compaction the critical matric potential for the tractor traffic line was 51 kPa while for the combine traffic line the critical matric potential was 291 kPa. In the second and third studies the undisturbed soil sampling was performed after the demarcation of a rectangular grid (40 m x 150 m) using Uhland sampler in the 28 trenches. All the physical attributes showed spatial dependence structure, except the total porosity at all depths. The ordinary kriging technique proved to be a viable alternative for the estimation of data points not sampled in the experimental area. The 0-3cm depth showed greater soil physical impairment because the soil had the highest bulk density and lowest soil macroporosity. The σ_p and θ showed spatial structure dependence. The depth of 0-3 cm showed higher load-bearing capacity indicating that this depth is more compacted compared to other depths. Based on the σ_p maps, the Massey Ferguson tractor model 275 and the KTR Advance Combine should not to traffic in the area for water content of $0,45 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ because the soil has load-bearing capacity of 200 kPa. If this condition is not respected, the additional compaction will occur. For the tractor traffic line, one should wait for a period so that the water content reaches values less than $0,36 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, while for the combine traffic line one should wait the water content to reaches values less than $0,30 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

Keywords: Preconsolidation pressure. Geostatistics. Soil moisture.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 Uso da Geoestatística no estudo da variabilidade espacial de propriedades físicas de um Latossolo Vermelho Amarelo em lavoura cafeeira		11
1	INTRODUÇÃO GERAL	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1	A cultura do cafeeiro	14
2.2	Compactação do solo	16
2.3	Geoestatística	19
2.4	Semivariograma	20
2.5	Modelos teóricos de semivariogramas	24
2.6	Krigagem	27
3	CONSIDERAÇÕES GERAIS	29
	REFERÊNCIAS	30
CAPÍTULO 2 Capacidade de suporte de carga de um Latossolo Vermelho Amarelo em uma lavoura cafeeira		39
1	INTRODUÇÃO	42
2	MATERIAL E MÉTODOS	44
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4	CONCLUSÃO	58
	REFERÊNCIAS	59
CAPÍTULO 3 Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho Amarelo em lavoura cafeeira		64
1	INTRODUÇÃO	67
2	MATERIAL E MÉTODOS	69
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	75
4	CONCLUSÃO	93
	REFERÊNCIAS	94
CAPÍTULO 4 Variabilidade espacial da pressão de preconsolidação e umidade volumétrica de um Latossolo Vermelho Amarelo		101
1	INTRODUÇÃO	104
2	MATERIAL E MÉTODOS	107
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	113
4	CONCLUSÃO	123
	REFERÊNCIAS	124

CAPÍTULO 1

USO DA GEOESTATÍSTICA NO ESTUDO DA VARIABILIDADE ESPACIAL DE PROPRIEDADES FÍSICAS DE UM LATOSSOLO VERMELHO AMARELO EM LAVOURA CAFEIEIRA

1 INTRODUÇÃO GERAL

A compactação do solo é um problema antigo e intensificou-se com a modernização da agricultura, principalmente pelo uso de máquinas cada vez maiores e mais pesadas. Segundo estimativas da German Advisory Council on Global Change (1995), a compactação é a responsável por cerca de 4% da área de solos degradados no mundo. Embora seja pequeno este valor, corresponde a 83 milhões de hectares. A agricultura é responsável por 66 milhões, a pecuária por 14 milhões, o desmatamento por 1 milhão e demais explorações por 2 milhões de hectares de solos degradados.

A degradação física é possivelmente, uma das causas iniciais de outros tipos de degradação, como a erosão hídrica. A compactação do solo, ocasionada pelo tráfego de máquinas em solos úmidos, é o principal fator que leva à degradação física (DEBIASI, 2008).

O aumento no grau de compactação do solo é acompanhado por incrementos na sua densidade e resistência mecânica, bem como por reduções na porosidade total em função da diminuição no volume de macroporos, na capacidade de infiltração de água, na aeração e na condutividade hidráulica. Estas modificações podem refletir diminuição da produtividade das culturas, aumento dos custos de produção e das emissões de gases causadores do efeito estufa, assim como poluição e alteração do regime dos recursos hídricos (DEBIASI, 2008).

A pressão de preconsolidação (σ_p) recentemente vem se destacando como uma propriedade capaz de identificar e prevenir a compactação do solo, sendo esta definida como a maior pressão que o solo já suportou no passado (DIAS JÚNIOR; PIERCE, 1996) e é uma medida da capacidade de suporte de carga do solo.

A σ_p é obtida a partir da curva de compressão do solo, que relaciona a densidade do solo com o logaritmo da pressão aplicada. A aplicação no solo de pressões menores do que a σ_p causa deformações elásticas, portanto recuperáveis, enquanto que a aplicação de pressões maiores causa deformações plásticas, não recuperáveis. Essa propriedade tem sido utilizada por diversos autores como indicadora de sustentabilidade da estrutura do solo em uma dada umidade e/ou potencial matricial (ARAÚJO JÚNIOR et al., 2011; DIAS JÚNIOR et al., 2005; KONDO; DIAS JÚNIOR, 1999).

A degradação da estrutura do solo torna-se crítica em condições de umidade elevada, sendo necessário determinar a umidade do solo antes que seja trafegado por máquinas agrícolas, e se for o caso quantificar os danos causados a sua estrutura, caso as pressões aplicadas excedam a capacidade de suporte de carga do solo (KONDO; DIAS JÚNIOR, 1999).

A Geoestatística surgiu na década de 60 ligada à escola francesa, sendo que a primeira obra de referência foi de Matheron (1963), somente há pouco tempo, vem despertando o interesse dos pesquisadores da Ciência do Solo e se destacando como uma ferramenta para a avaliação da variabilidade espacial do solo, a qual possibilita a identificação da estrutura da variância, ou seja, conhecer não apenas a magnitude de variação de um atributo, mas também como esta variação está ocorrendo espacialmente no campo.

O estudo da variabilidade espacial dos atributos físicos e da pressão de preconsolidação, permite monitorar aspectos ligados à preservação da estrutura do solo, gerando mapas de distribuição espacial, conhecidos como mapas de trafegabilidade, possibilitando a otimização do manejo do tráfego do maquinário agrícola. O uso da Geoestatística no estudo da variabilidade da pressão de preconsolidação é recente sendo que os primeiros trabalhos para analisar a σ_p foram realizados por Gontijo et al. (2008) e Kondo (2003).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A cultura do cafeeiro no Brasil

A cultura do café no Brasil destaca-se por sua grande área de cultivo e também por se tratar de um produto de exportação. Minas Gerais é o Estado brasileiro que detém a maior área plantada com cafeeiros, com aproximadamente 1.000.751 ha, ou seja, 47,8% do total cultivado no Brasil, sendo grande parte em solos originalmente sob vegetação de cerrados. A produção nacional corresponde a 39,6% da produção mundial, podendo atingir na safra de 2010/11 uma produção de 39 milhões de sacas de 60 kg dependendo do efeito da bienalidade (ANUÁRIO DA AGRICULTURA BRASILEIRA - AGRIANUAL, 2011).

O bioma Cerrado ocupa uma área aproximada de 2.036.448 km², ou seja, 23,92% do território brasileiro e apresenta relevo pouco acidentado, possibilitando o uso intensivo de mecanização e o emprego de tecnologias (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2011).

No Cerrado Mineiro deverá ocorrer na safra agrícola de 2010/11 um decréscimo na produção de 24,6% comparativamente à safra anterior. Tal redução se deve basicamente à bienalidade da cultura, considerando a elevada produtividade alcançada na safra anterior, particularmente na região de Patrocínio e Serra do Salitre, onde predominam lavouras de sequeiro. A área de café em produção sofreu uma redução de 1,3% devido a podas, principalmente esqueletamentos. Para a produtividade, a redução esperada é de 23,6%, passando de 34,84 sacas/ha em 2010, para 26,63 sacas/ha em 2011 (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2011).

Segundo a Conab (2011), a produção do café arábica representa 74,6% (30,96 a 33,17 milhões de sacas) da produção do país e tem como maior produtor o Estado de Minas Gerais, com 66,6% (20,98 a 22,45 milhões de sacas) de café beneficiado. O café robusta participa da produção nacional com 25,4 % de café beneficiado. O Estado do Espírito Santo se destaca como o maior produtor dessa variedade, com 67,8% (7,40 a 7,86 milhões de sacas) de café beneficiado.

Devido à topografia, os Latossolos situados na região do Cerrado tornam-se potencialmente aptos para o desenvolvimento de uma agricultura altamente mecanizada, sendo observado intenso tráfego de máquinas e implementos agrícolas em várias etapas do processo produtivo. Esse fato faz do Cerrado a região mais avançada do país, em função do elevado rendimento operacional, sendo lugar de destaque pelas excelentes condições de topografia e clima favoráveis principalmente para cafeicultura (SILVA et al., 2006). Entretanto, o tráfego indiscriminado pode causar degradação da estrutura deste solo, o que irá interferir na capacidade produtiva dos mesmos.

Diversas operações mecanizadas são realizadas em lavouras cafeeiras visando obter alto rendimento operacional a menores custos de produção; em média, são observadas de doze a dezessete operações anuais com maquinários que chegam a aplicar pressões de 450 kPa sobre o solo. As diferentes práticas de manejo realizadas nos solos cultivados com cafeeiros promovem alterações estruturais, modificando diversos atributos físicos, dentre os quais se destacam: a densidade do solo, a estabilidade de agregados em água e o teor de carbono orgânico (ALCÂNTARA; FERREIRA, 2000), além do sistema poroso e a retenção de água (OLIVEIRA et al., 2004), que podem influenciar na compressibilidade dos solos aumentando o risco de compactação quando trafegados por maquinários agrícolas (ARAÚJO JÚNIOR, 2010).

2.2 Compactação do solo

O tráfego intensivo de máquinas agrícolas sobre solos cultivados com cafeeiros nas regiões do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba têm comprometido os atributos físicos do solo. Os efeitos negativos do tráfego dos rodados de máquinas sobre os atributos físicos do solo são bem documentados pela bibliografia disponível (ARAÚJO JÚNIOR et al., 2008; GONTIJO et al., 2008; SANTOS et al., 2010).

Quando as pressões aplicadas pelo tráfego de máquinas agrícolas ultrapassam a capacidade de suporte de carga do solo, observa-se uma grande redução do volume de macroporos (KULLI; GYSI; FLÜHLER, 2003; SCHÄFFER; ATTINGER; SCHULIN, 2007; SERVADIO et al., 2005; SILVA et al., 2003; TARAWALLY et al., 2004; TORMENA; ROLOFF; SÁ, 1998), enquanto que o de microporos permanece praticamente inalterado (TORMENA ROLOFF; SÁ, 1998) ou até mesmo aumenta (SCHÄFFER; ATTINGER; SCHULIN, 2007; TARAWALLY et al., 2004), mas quando o tráfego não é muito intenso e/ou realizado sob condições de solo seco, os macroporos podem ser reduzidos a mesoporos (TARAWALLY et al., 2004), alterando assim a geometria do espaço poroso (SERVADIO et al., 2005). A compactação pelo tráfego de máquinas agrícolas modifica ainda a densidade do solo, retenção de água (AJAYI et al., 2009; ARAÚJO JÚNIOR et al., 2008; GONTIJO et al., 2008), e a pressão de preconsoidação (ARAÚJO JÚNIOR et al., 2011; SANTOS et al., 2010; SEVERIANO, 2010).

A compactação causada pelo tráfego de máquinas pode alterar a distribuição de poros por tamanho e, por conseguinte, alterar a retenção e a distribuição de água no solo (DIAS JÚNIOR, 2000). Devido à constante alteração no sistema poroso do solo proporcionado pelo manejo de lavouras cafeeiras, a curva de retenção de água no solo pode ser um indicativo dos efeitos do manejo na distribuição de poros por tamanho, das propriedades hidráulicas,

bem como do armazenamento de água no solo, já que essa curva é sensivelmente alterada pela estrutura do solo (HILLEL, 1970).

Em função das alterações anteriormente descritas, o tráfego resulta no aumento da resistência mecânica do solo à penetração (BOTTA et al., 2006; BOTTA et al., 2007; JORAJURIA; DRAGHI, 1997; SERVADIO et al., 2005; TARAWALLY et al., 2004; VEIGA et al., 2007), na diminuição da capacidade de infiltração de água (LI; TULLBERG; FREEBAIRN, 2007) e da condutividade hidráulica saturada (SERVADIO et al., 2005; SILVA et al., 2003).

O processo de compactação é influenciado por fatores externos (LEBERT; HORN, 1991) destacando-se o tipo, a intensidade e frequência de carga aplicada pelas máquinas agrícolas, como carga por eixo, área de contato do rodado com o solo, pressão de inflação dos pneus (CASTRO NETO, 2001) e por fatores internos destacando-se a história de tensão (DIAS JÚNIOR, 1994; DIAS JÚNIOR; PIERCE, 1996; (REINERT, 1990), umidade do solo (DIAS JÚNIOR, 1994), textura, estrutura e densidade inicial do solo (DIAS JÚNIOR, 1994; GUPTA; ALLMARAS, 1987; LARSON; GUPTA; USECHE, 1980) e teor de carbono do solo (ASSOULINE; TAVARES FILHO; TESSIER, 1997; ETANA; COMIA; HAKANSON, 1997; SOANE, 1990).

A compactação do solo compromete a sustentabilidade do sistema agrícola, afetando o desenvolvimento das plantas, diminuindo a aeração do solo, comprometendo a infiltração, tornando o solo propenso à erosão (OLIVEIRA et al., 2003). Muitos fatores relacionados ao solo, tais como: resistência mecânica do solo à penetração (TORMENA; ROLOFF, 1996), densidade do solo e porosidade total, têm sido utilizados como forma de identificar o problema da compactação. A pressão de preconsolidação recentemente vem se destacando como uma forma eficaz de identificar e prevenir a compactação do solo (DIAS JÚNIOR; PIERCE, 1996).

A capacidade de suporte de carga é definida como a capacidade da estrutura do solo em resistir a pressões induzidas pelo tráfego de máquinas ou pisoteio animal, sem mudanças no arranjo tridimensional das partículas constituintes do solo (ALAKUKKU et al., 2003), em uma determinada umidade ou potencial matricial.

A preservação da estrutura do solo está relacionada com a sua capacidade de suporte de carga e suas alterações podem ser visualizadas através da curva de compressão do solo na Figura 1 (DIAS JÚNIOR; PIERCE, 1996; LARSON; GUPTA; USECHE, 1980). Esta curva representa graficamente a relação entre o logaritmo da pressão aplicada e alguma propriedade relacionada com o arranjo das partículas do solo, sendo a propriedade mais usada a densidade do solo (CASAGRANDE, 1936; DIAS JÚNIOR; PIERCE, 1996; HOLTZ; KOVACS, 1981; KONDO, 1998).

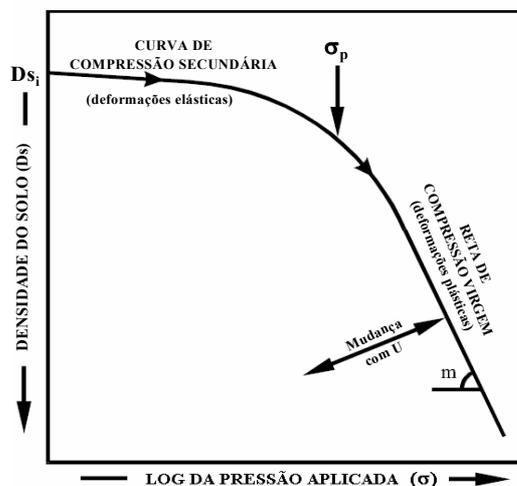


Figura 1 Curva de compressão do solo
Fonte: Adaptado de Dias Júnior (1994)

A pressão de pré-consolidação obtida a partir da curva de compressão do solo é um indicador da capacidade de suporte de carga e da história de tensões às

quais o solo foi submetido (DIAS JÚNIOR; PIERCE, 1996; IMHOFF, 2002; KELLER et al., 2004; SILVA, 1999). De acordo com os mesmos autores, ela é definida como sendo a máxima pressão que o solo sofreu no passado. Quando se aplica pressões inferiores à pressão de preconsolidação, o solo sofre deformações pequenas, elásticas e reversíveis, ou seja, cessada a pressão, o solo não apresentará compactação adicional. Por outro lado, pressões superiores à pressão de preconsolidação resultam em deformações plásticas, as quais são irreversíveis; neste caso, terminada a aplicação da pressão, o solo sofrerá compactação adicional.

Para que o solo não apresente compactação adicional e conseqüentemente, não tenha a sua qualidade estrutural degradada, a pressão exercida pelos dispositivos de tração das máquinas e implementos agrícolas, assim como pelas patas dos animais, não deve ultrapassar a pressão de preconsolidação (DIAS JÚNIOR; PIERCE, 1996; KELLER et al., 2004). Portanto, verifica-se que a pressão de preconsolidação se constitui em uma propriedade de grande utilidade no manejo de maquinários agrícolas, que visem à manutenção da qualidade física do solo.

2.3 Geoestatística

A Geoestatística também chamada de Teoria das Variáveis Regionalizadas (VR) foi idealizada por Matheron (1963) e entende-se, como tal, a um conjunto de ferramentas utilizadas para analisar e descrever a variabilidade espacial de variáveis, cujas amostras são dependentes espacialmente. São duas características que diferenciam a Geoestatística de outras técnicas de Estatística espacial: a localização espacial da variável não é tratada necessariamente como aleatória e é distribuída de forma contínua no espaço.

Matheron (1963) define V.R. como uma função espacial numérica, que varia de um local para outro, com uma continuidade aparente e cuja variação não pode ser representada por uma função matemática simples. Essa continuidade ou dependência espacial pode ser estimada pelo semivariograma.

Deste modo a Geoestatística possui dois objetivos principais: o primeiro, ser capaz de extrair da aparente desordem dos dados disponíveis, uma imagem da variabilidade dos mesmos e uma medida da correlação existente entre os valores tomados em dois pontos do espaço, separados por certo vetor h em que $|h| = h$, as quais são objetos da análise estrutural, que é feita por meio do semivariograma e o segundo ser capaz de medir a precisão de toda predição ou estimação através de dados fragmentados, ou seja, há necessidade de uma teoria de estimação, que é obtida através da krigagem (MATHERON, 1971).

O uso da Geoestatística no estudo da variabilidade espacial dos atributos físicos e mecânicos do solo permite a identificação da dependência espacial dos dados, possibilitando o desenvolvimento de mapas de distribuição destes atributos no campo, através da técnica de krigagem, que faz uso da interpolação com estimador não tendencioso e de variância mínima (JOURNEL; HUIJBREGTS, 1978; TRANGMAR; YOST; UEHARA, 1985).

2.4 Semivariograma

O semivariograma é um conceito fundamental para a Geoestatística e é também uma ferramenta de grande importância nas aplicações em Ciência do Solo. Segundo Vieira (2000), todos os cálculos de Geoestatística dependem do modelo estimado (ajustado) do semivariograma. Por isso, se o modelo ajustado não possuir boa qualidade de estimação então a krigagem (os mapas) estarão também com qualidade comprometida.

O semivariograma analisa o grau de dependência espacial entre amostras dentro de um campo experimental, além de definir parâmetros necessários para a estimativa de valores para locais não amostrados, através da técnica de krigagem (SALVIANO, 1996).

O variograma é a ferramenta que permite descrever quantitativamente a variação no espaço de um fenômeno regionalizado (HUIJBREGTS, 1975). A natureza estrutural de um conjunto de dados (assumido pela variável regionalizada) é definida a partir da comparação de valores tomados simultaneamente em dois pontos, segundo uma determinada direção. A função de semivariância $\gamma(h)$ é definida como sendo a metade da esperança matemática do quadrado da diferença entre os valores de pontos no espaço, separados por uma distância h , conforme a seguinte equação:

$$\gamma(h) = (1/2) E \{ [Z(X_i) - Z(X_i + h)]^2 \}$$

E pode ser estimado por:

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

em que $N(h)$ é o número de pares de valores medidos $Z(X_i)$, $Z(X_i + h)$, separados por um vetor h (JOURNEL; HUIJBREGTS, 1978). O gráfico de $\hat{\gamma}(h)$ em função dos valores correspondentes de h , chamado semivariograma, é uma função do vetor h , portanto, dependem de ambos, magnitude e direção de h .

O gráfico $\hat{\gamma}(h)$ versus h representa o semivariograma (Figura 2), que permite obter a estimativa do valor de semivariância para as diferentes combinações de pares de pontos e assim analisar o grau de dependência espacial da variável estudada e definir os parâmetros necessários para a estimativa de suas características em locais não amostrados (SOUZA, 1999).

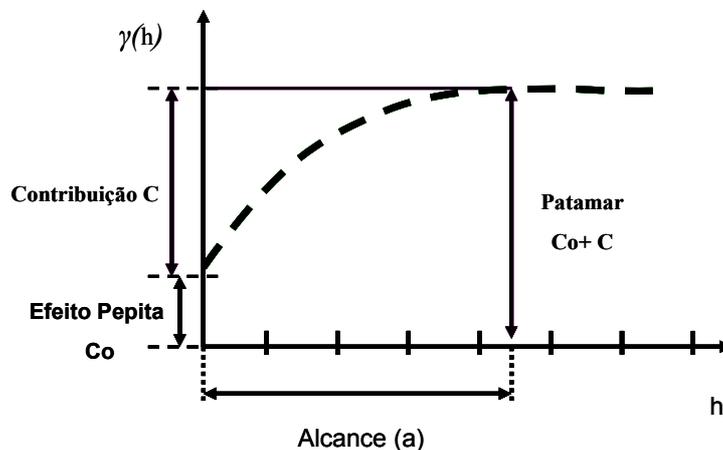


Figura 2 Semivariograma com os parâmetros

Efeito Pepita (Co)

Na prática, à medida que h tende para 0 (zero), $\gamma(h)$ se aproxima de um valor positivo chamado efeito pepita e recebe o símbolo de Co (VIEIRA, 2000).

Para valores pequenos de h , próximos a origem do semivariograma, pode-se ter uma idéia do tipo de continuidade da variável em estudo: diferenciável ou descontínua (DIGGLE; RIBEIRO JÚNIOR, 2006). Quando o semivariograma é descontínuo na origem, tem-se o efeito pepita, mostrando que para pequenas distâncias o valor da variável muda abruptamente. Essa mudança abrupta reflete uma variabilidade não explicada, que pode ser devido a uma pequena variação não detectada para pequenas distâncias.

Segundo Delhomme (1976), o valor de Co revela a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que a menor distância entre amostras. Parte dessa descontinuidade pode estar também relacionada a erros de medição, mas é difícil quantificar qual contribui mais, se erros de medição ou a variabilidade em uma escala menor do que aquela amostrada.

Patamar (Co+C)

À medida que a distância h aumenta, a semivariância aumenta até um valor máximo no qual se estabiliza, chamada patamar e recebe o símbolo (Co+C) e é uma estimativa sem tendências da variância dos dados (VIEIRA, 2000).

Alcance (a)

O alcance é um parâmetro importante no estudo do semivariograma, o qual representa a distância a partir da qual uma variável não está mais autocorrelacionada espacialmente, ou seja, os pontos localizados numa área de raio igual ao alcance e por serem mais correlacionados são mais homogêneos entre si do que com aqueles localizados fora dessa área, e que segundo Vieira e Lombardi Neto (1995), esses pontos podem ser usados para estimar valores para qualquer ponto entre eles.

Segundo Vieira (2000), o alcance (a) é considerado o limite de dependência espacial. Medições localizadas a distâncias maiores que (a) possuem distribuição espacial aleatória e por isto são independentes entre si. Para essas amostras separadas por distâncias maiores que o alcance, a Estatística Clássica pode ser aplicada sem restrições. Por outro lado, amostras separadas por distâncias menores que (a) são correlacionadas umas às outras, o que permite que se façam interpolações para espaçamentos menores do que os amostrados. Dessa maneira, o alcance (a) é a linha divisória para a aplicação da Geoestatística ou Estatística Clássica, e por isso o cálculo do semivariograma deveria ser feito rotineiramente para dados de campo e desta forma garantir as hipóteses estatísticas sob as quais serão analisados.

O alcance é um parâmetro do semivariograma de extrema importância para o planejamento experimental e deve ser levado em consideração em termos de proposta de manejo da área, assim como na determinação do número de pontos que devem ser amostrados para obter uma melhor representatividade, (OLIVEIRA et al., 1999).

Efeito pepita puro

Quando o alcance é menor que o espaçamento mínimo entre as amostras, tem-se o efeito pepita puro e a semivariância é igual para qualquer valor de h , isto porque a variável aleatória passa a ter distribuição não correlacionada.

Segundo Silva, Libardi e Vieira (1989), se o semivariograma, ao invés de ser crescente e dependente de h , for constante e igual ao patamar para qualquer valor de h , então se tem um efeito pepita puro ou ausência total de dependência espacial. Isto significa que o alcance, para os dados em questão, é menor do que o menor espaçamento entre amostras. Para esses dados, tem-se uma distribuição espacial completamente aleatória e pode-se aplicar a Estatística Clássica.

2.5 Modelos teóricos de semivariogramas

Segundo Vieira (2000), todos os cálculos de Geoestatística dependem do valor do modelo do semivariograma para cada distância especificada. Por isso, se o modelo ajustado estiver errado, todos os cálculos seguintes também estarão. Existem softwares que fazem o ajuste pelo método dos quadrados mínimos ponderados, considerando o número de pares como pesos nas ponderações. Como regra, quanto mais simples, melhor será o modelo ajustado. E não se deve dar importância excessiva a pequenas flutuações que podem ser artifícios

referentes a um pequeno número de dados. É importante que o modelo ajustado represente a tendência de $\gamma(h)$ em relação à h .

Matematicamente e estatisticamente, é obrigatório que o modelo ajustado tenha positividade definida condicional (JOURNEL; HUIJBREGTS 1978). De modo geral, o modelo que satisfaça a condição acima garantirá que $\gamma(h) > 0$ e $\gamma(-h) = \gamma(h)$, qualquer que seja h . Dependendo do comportamento de $\gamma(h)$ para os altos valores de h , os modelos podem ser classificados em: modelos com patamar e modelos sem patamar.

Modelos com patamar

São ajustes que representam à hipótese de estacionariedade de segunda ordem, onde a semivariância aumenta com o aumento da distância entre amostras, até atingir o patamar, onde se estabiliza (MACHADO, 1994). Este patamar deve ser teoricamente igual à variância da população.

Segundo Vieira (2000), os modelos apresentam os seguintes parâmetros: (C_0) como efeito pepita; (C) é a contribuição, (C_0+C) é o patamar e (a) é o alcance do semivariograma.

Modelos linear com patamar

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + \frac{C}{a}h & ; \quad 0 < h < a \\ C_0 + C & ; \quad h \geq a \end{cases}$$

Sendo $\frac{C}{a}$ o coeficiente angular para $0 < h < a$.

Modelo Esférico

$$\gamma(h) = \begin{cases} Co + C \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] & ; \quad 0 < h < a \\ Co + C & ; \quad h \geq a \end{cases}$$

O modelo esférico é obtido selecionando-se os valores do efeito pepita Co e do patamar $(Co+C)$, depois passando-se uma reta que intercepte o eixo y em Co e seja tangente aos primeiros pontos próximos de $h=0$. Essa reta cruzará o patamar à distância, $a'=(2/3)a$. Assim o alcance a será $a=3a'/2$. O modelo esférico é linear até aproximadamente $(1/3)a$.

Modelo Exponencial:

$$\gamma(h) = Co + C [1 - \exp(-3(h/a))] \quad ; \quad 0 < h < d$$

em que d é a máxima distância na qual o semivariograma é definido. Uma diferença fundamental entre o modelo exponencial e o esférico é que o exponencial atinge o patamar apenas assintoticamente, enquanto o modelo esférico o atinge no valor do alcance. Os parâmetros Co e C para os modelos exponencial e gaussiano são determinados da mesma maneira que para o esférico.

Modelo Gaussiano:

$$\gamma(h) = Co + C [1 - \exp(-3(h/a)^2)] \quad ; \quad 0 < h < d$$

Modelos Sem Patamar

Segundo Vieira (2000), esses modelos correspondem aos fenômenos que têm uma capacidade infinita de dispersão por isso, não tem variância finita e a covariância não pode ser definida, atendendo assim somente a hipótese intrínseca. Os semivariogramas podem ser definidos, mas não se estabilizam em nenhum patamar.

$$\gamma(h) = C_0 + Ah^B \quad ; \quad 0 < B < 2$$

O parâmetro A e B são constantes que definem o modelo, sendo que B tem que ser estritamente maior que zero e menor que dois para garantir a condição de positividade definida condicional.

2.6 Krigagem

A krigagem é uma técnica de interpolação linear (uma média ponderada), com o uso de estimadores de mínima variância e não tendencioso de variáveis regionalizadas em locais não amostrados, utilizando para tanto as propriedades estruturais do semivariograma e do conjunto inicial de dados amostrais (TRANGMAR; YOST; UEHARA, 1985). Uma das principais vantagens da krigagem é que a variância da estimativa (erro) é calculada para cada valor estimado, fornecendo uma medida de confiança da interpolação.

De acordo com Camargo (1997) e Ribeiro Júnior (1995), a krigagem se diferencia dos outros métodos de interpolação pela forma de atribuição dos pesos, já que, neste método não se utiliza a distância euclidiana entre os pontos, mas uma “distância estatística” que expressa tanto a distância quanto a estrutura de variabilidade (semivariância ou covariância). Não apenas a distância dos vizinhos ao ponto a ser estimado é considerada, mas também as distâncias entre

os mesmos influenciam a distribuição dos pesos. Assim, os vizinhos agrupados têm importância individual relativamente menor do que aqueles isolados.

Segundo Gonçalves (1997), esse interpolador pondera os vizinhos do ponto a ser estimado, obedecendo aos critérios de não tendenciosidade e mínima variância. De acordo com Fietz (1998), a condição de não tendência significa que, em média, a diferença entre valores estimados e medidos para o mesmo ponto deve ser nula. A condição de variância mínima significa que, embora possam existir diferenças ponto por ponto entre o valor medido e o estimado, essas diferenças devem ser mínimas dentre todos os interpoladores lineares.

Nesse sentido, a krigagem é um interpolador ótimo (VIEIRA, 2000). A estimativa pontual é obtida pela seguinte expressão:

$$\hat{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(x_i)$$

em que N é o número de valores medidos $Z(x_i)$, envolvidos na estimativa e λ_i são os pesos associados a cada valor medido $Z(x_i)$.

3 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os estudos que visam identificar, quantificar, prevenir e mitigar os efeitos causados pelo manejo de máquinas da cultura cafeeira sobre o Latossolo Vermelho Amarelo na região de Patrocínio-MG são importantes ferramentas para o manejo de máquinas da cultura do café, por meio do uso de modelos matemáticos, objetivando ampliar o conhecimento sobre a retenção de água e da capacidade de suporte de carga, baseados na história do manejo das máquinas agrícolas.

A distribuição espacial dos atributos físico-mecânico do solo pode ser usada para o desenvolvimento de estratégias de manejo que minimizem os riscos da compactação adicional do solo e os impactos causados pelas operações mecanizadas. Outro fator importante é a geração de mapas de trafegabilidade, visando minimizar os prejuízos causados pelo tráfego excessivo em condições inapropriadas de umidade do solo, essa metodologia possibilita indicar e/ou monitorar o talhão, sem que a compactação do solo ocorra.

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.

ALAKUKKU, L. et al. Prevention strategies for field traffic induced subsoil compaction: a review: part I – machine/soil interactions. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, n. 1/2, p. 145-160, Oct. 2003.

ALCÂNTARA, E. N.; FERREIRA, M. M. Efeito de diferentes métodos de controle de plantas daninhas sobre a produção de cafeeiros instalados em Latossolo Roxo Distrófico. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 24, n. 1, p. 54-61, jan. 2000.

ANUÁRIO da Agricultura Brasileira. **Mercados e perspectivas do café**. São Paulo: FNP, 2011. p. 192-210.

ARAÚJO JÚNIOR, C. F. **Capacidade de suporte de carga de um Latossolo após três décadas de diferentes manejos de plantas invasoras em uma lavoura cafeeira**. 2010. 158 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

ARAÚJO JÚNIOR, 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, p. 115-131, mar. 2011.

ARAÚJO JÚNIOR, C. F. et al. Resistência a 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.

ASSOULINE, S.; TAVARES FILHO, J.; TESSIER, D. Effect of compaction on soil physical and hydraulic properties: experimental results and modeling. **Soil Society of America Journal**, Madison, v. 61, n. 62, p. 390-398, Mar./Apr.1997.

BOTTA, G. F. et al. Light tractor traffic frequency on soil compaction in the Rolling Pampa region of Argentina. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 86, n. 1, p. 9-14, Mar. 2006.

BOTTA, G. F. et al. Traffic alternatives for harvesting soybean (*Glycine max* L.): Effect on yields and soil under a direct sowing system. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 96, n. 1/2, p. 145- 154, Oct. 2007.

CAMARGO, E. C. G. **Desenvolvimento, implementação e teste de procedimentos geostatísticos (krigeagem) no sistema de processamento de informações georreferenciadas (Spring)**. 1997. 123 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1997.

CASAGRANDE, A. Determination of the preconsolidation load its practical significance. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 3., 1936, Cambridge. **Proceeding...** Cambridge: Harvard University, 1936. p. 60-64.

CASTRO NETO, P. **Desenvolvimento e avaliação de equipamentos e metodologia para determinação de parâmetros físicos do solo relacionados a dias trabalháveis com máquinas agrícolas**. 2001. 155 p. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira café safra 2011**: primeira estimativa, janeiro/2011. Brasília, 2011.

DEBIASI, H. **Recuperação física de um argissolo compactado e suas implicações sobre o sistema de solo-máquina-planta**. 2008. 263 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

DELHOMME, J. P. **Kriging in hydrosiences**. Fontainebleau: Centre D'Informatique Geologique, 1976. 94 p.

DIAS JÚNIOR, M. S. Compactação do solo. In: Novais, R. F.; ALVAREZ, V., H. V. & SCHAEFER, C. E. G. R. **Tópicos em Ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de ciência do solo, 2000, v. 1, p. 55-94.

DIAS JÚNIOR, M. S. **Compression of three soils under long-term tillage and Wheel traffic**. 1994. 114 p. Thesis (Ph. D. in Crop and Soil Science) – Michigan State University, East Lansing, 1994.

DIAS JÚNIOR, M. S. et al. Traffic effects on the soil preconsolidation pressure due to *Eucalyptus* harvest operations. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 62, n. 3, p. 248-255, May/June 2005.

DIAS JÚNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. Revisão de Literatura: o processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, n. 2, p. 175-182, maio/ago. 1996.

DIGGLE, P. J.; RIBEIRO JÚNIOR, P. J. **Model-based geostatistics**. New York: Springer, 2006. 230 p.

ETANA, A.; COMIA, R. A.; HAKANSON, I. Effects of uniaxial stress on the physical properties of four Swedish Soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam v. 44 ,n. 1, p. 13-21, Dec. 1997.

FIETZ, C. R. **Variabilidade especial do armazenamento de água no solo visando o manejo da irrigação por aspersão**. 1998. 97 p. Tese (Doutorado em Agronomia)- Escola Superior de Agricultura “Luis de Queiroz”, Piracicaba, 1998.

GERMAN ADVISORY COUNCIL ON GLOBAL CHANGE. **World in transition: the threat to soils**. Bonn: Economica Verlag GmbH, 1995. 268 p. (Annual Report/German Advisory Council on Global Change, 1994).

GONÇALVES, A. C. A. **Variabilidade espacial de atributos físicos do solo e resposta espectral da cultura de feijão irrigado, em imagens aéreas digitais.** 1997.118p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 1997.

GONTIJO, I. et al. Atributos físico-hídricos de um latossolo de cerrado em diferentes posições de amostragem na lavoura cafeeira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 6, p. 2227-2234, nov./dez. 2008.

GUPTA, S. C, ALLMARAS, R. R. Models to Access the susceptibility of soil to excessive compaction. **Advances in Soil Science**, New York, v. 6, n. 1, p. 65-100, Jan. 1987.

HILLEL, D. **Solo e água: fenômenos e princípios físicos.** Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1970. 231p.

HOLTZ, R. D.; KOVACS, W. D. **An introduction to geotechnical engineering.** New Jersey: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1981. 733 p.

HUIJBREGTS, C. J. Regionalized variables and quantitative analysis of spatial data. In: DAVIS, J.C.; MCCULLAGH, M. J. (Ed.). **Display and analysis of spatial data.** New York: J. Wiley, 1975. p. 38-53.

IMHOFF, S. **Indicadores de qualidade estrutural e trafegabilidade de latossolos e argissolos vermelhos.** 2002. 94 f. Tese (Doutorado em Agronomia – Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2002.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 28 mar. 2011.

JORAJURIA, D.; DRAGHI, L. The distribution of soil compaction with depth and the response of a perennial forage crop. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Silsoe, v. 66, n. 4, p. 261-265, Apr. 1997.

JOURNEL, A. G.; HUIJBREGTS, C. H. J. **Mining geostatistics**. London: Academic, 1978. 600 p.

KELLER, T. et al. Soil precompression stress - II: a comparison of different compaction tests and stress–displacement behaviour of the soil during wheeling. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 77, n. 1, p. 97–108, May 2004.

KONDO, M. K. **Compressibilidade de três latossolos sob diferentes usos**. 1998. 95 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1998.

KONDO, M. K.; DIAS JÚNIOR, M. S. Compressibilidade de três latossolos em função da umidade e uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 23, n. 2, p. 211-218, 1999.

KONDO, M. K. **Variabilidade espacial do comportamento compressivo do solo e mapas de trafegabilidade na cultura do cafeeiro irrigado**. 2003. 166 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2003.

KULLI, B.; GYSI, M.; FLÜHLER, H. Visualizing soil compaction based on flow pattern analysis. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 70, n. 1, p. 29-40, Mar. 2003.

LARSON, W. E.; GUPTA, S. C.; USECHE, R. A. Compression of agricultural soil from eight soil orders. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 6, p. 1127- 1132, Nov. 1980.

LEBERT, M.; HORN, R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam v. 19, n. 2/3, p. 275-286, Feb. 1991.

LI, Y. X.; TULLBERG, J. N.; FREEBAIRN, D. M. Wheel traffic and tillage effects on runoff and crop yield. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 97, n. 2, p. 282-292, Dec. 2007.

MACHADO, R. V. **Variabilidade espacial de atributos físicos-hídricos em uma hidroseqüência de solos bem a muito mal drenados**. 1994. 88 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura de Lavras, Lavras, 1994.

MATHERON, G. **The theory of regionalized variables and its application**. Paris: Les Cahiers du centre de Morphologie Mathématique, Fas. 5, C.G. Fontainebleau, 1971. 211p.

MATHERON, G. Principles of geostatistics. **Economic Geology**, El Paso, v. 58, p. 11246-66, 1963.

OLIVEIRA, G. C. et al. Caracterização química e física-hídrico 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.

OLIVEIRA, G. C. et al. Compressibilidade de um latossolo vermelho argiloso de acordo com a tensão de água no solo, uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 27, n. 5, p. 773-781, maio 2003.

OLIVEIRA, J. J. et al. Variabilidade espacial de propriedades químicas em um solo salino-sódico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 23, n. 4, p.783-789, maio 1999.

REINERT, D. J. **Soil structural form and stability induced by tillage in a typic hapludalf**. 1990. 129 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Michigan State University, East Lansing, 1990.

RIBEIRO JÚNIOR, P. J. **Métodos geoestatísticos no estudo da variabilidade espacial de parâmetros do solo**. 1995. 91 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1995.

SALVIANO, A. A. C. **Variabilidade de atributos de solo e de *Crotalaria juncea* em solo degradado do município de Piracicaba-SP**. 1996. 91p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 1996.

SANTOS, G. A. et al. Suscetibilidade a compactação de um latossolo vermelho-amarelo submetido a diferentes métodos de controle de plantas invasoras, na cultura cafeeira. **Coffe Science**, Lavras, v. 5, n. 2, p. 123-136, maio/ago. 2010.

SCHÄFFER, B.; ATTINGER, W.; SCHULIN, R. Compaction of restored soil by heavy agricultural machinery: soil physical and mechanical aspects. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 93, n. 1, p. 28-43, Mar. 2007.

SERVADIO, P. et al. Effects on some soil qualities in central Italy following the passage of four wheel drive tractor fitted with single and dual tires. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 84, n. 1, p. 87-100, Nov. 2005.

SEVERIANO, E. C. **Alterações estruturais de latossolos representativos da região do cerrado e potencial de uso de solos cultivados com cana-de-açúcar**. 2010. 148 p. Tese (Doutorado em Ciência do solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial da resistência à penetração de um latossolo vermelho-escuro ao longo de uma transeção. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, MG, v.13, n. 1, p. 1-5, 1989.

SILVA, A. R. et al. Modelagem da capacidade de suporte de carga e quantificação dos efeitos das operações mecanizadas em um Latossolo Amarelo cultivado com cafeeiros. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, MG, v. 30, n. 2, p. 207-216, mar./abr. 2006.

SILVA, R. B. et al. O tráfego de máquinas agrícolas e as propriedades físicas, hídricas e mecânicas de um latossolo dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 27, n. 6, p. 973-983, out. 2003.

SILVA, V. R. **Compressibilidade de um podzólico e um latossolo em função do estado inicial de compactação e saturação em água**. 1999. 116 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Biodinâmica de Solos) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1999.

SOANE, B. D. The role of organic matter in soil compactibility: a review of some practical aspects. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 16, n. 1/2, p. 179-201, Apr. 1990.

SOUZA, L. C. **Variabilidade espacial da salinidade de um solo aluvial no semi-árido paraibano**. 1999. 77 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1999.

TARAWALLY, M. A. et al. Field compaction at different soil-water status: effects on pore size distribution and soil water characteristics of a Rhodic Ferralsol in Western Cuba. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 76, n. 2, p. 95-103, Apr. 2004.

TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 38, p. 45-94, 1985.

TORMENA, C. A.; ROLOFF, G.; SÁ, J. C. M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. **Revista**

Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, MG, v. 22, n. 2, p. 301-309, abr./jun 1998.

TORMENA, C. A.; ROLOFF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, n. 2, p. 333-39, 1996.

VEIGA, M. et al. Soil compressibility and penetrability of an oxisol from southern Brazil, as affected by long-term tillage systems. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 92, n. 1/2, p. 104-113, Jan. 2007.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudo de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H. V.; SCHAEFER, C. E. G. R. **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 1, p. 1-55, 2000.

VIEIRA, S.R.; LOMBARDI NETO, F. Variabilidade espacial do potencial de erosão das chuvas do estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 2, n. 54, p. 405-412, 1995.

CAPÍTULO 2

CAPACIDADE DE SUPORTE DE CARGA DE UM LATOSSOLO VERMELHO AMARELO EM UMA LAVOURA CAFEEIRA

Normas da Revista Brasileira de Ciência do Solo (versão preliminar)

RESUMO

O tráfego intensivo de máquinas agrícolas sobre solos cultivados com cafeeiros pode causar compactação excessiva, principalmente quando realizado sob condição inadequada de umidade, promovendo redução da produtividade das áreas sob intensa passagem de máquinas. Os objetivos deste trabalho foram: a) avaliar o impacto na linha de tráfego do trator (LTT) e na linha de tráfego da colhedora (LTC), através dos atributos físicos do solo e da capacidade de suporte de carga do solo em função do potencial matricial do solo em três profundidades; b) calcular os potenciais matriciais críticos, para evitar a compactação adicional do solo a partir da pressão máxima aplicada ao solo pelo rodado do trator marca Massey Ferguson, modelo 275 e colhedora Jacto KTR Advance num Latossolo Vermelho Amarelo, textura muito argilosa. O estudo foi realizado na Fazenda da EPAMIG, no município de Patrocínio-MG. Coletaram-se amostras indeformadas nas profundidades de 0-3, 10-13 e 25-28 cm em cinco trincheiras. Para a obtenção dos modelos da capacidade de suporte do solo (σ_p versus potencial matricial do solo), foram realizados ensaios de compressão uniaxiais com as amostras indeformadas, em diferentes potenciais matriciais. Os atributos físicos e os modelos de capacidade de suporte de carga indicam que as operações realizadas com o trator Massey Ferguson modelo 275 promoveram maior degradação da estrutura do solo do que a operação realizada com a colhedora Jacto KTR Advance. O potencial matricial crítico para a LTT foi de 51 kPa (corresponde a umidade volumétrica de $0,36 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). Enquanto que para a LTC o potencial matricial crítico foi de 291 kPa (corresponde a umidade volumétrica de $0,30 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$).

Termos de indexação: compactação, pressão de preconsolidação, potencial matricial crítico.

**SUMMARY: LOAD BEARING CAPACITY OF A RED-YELLOW
LATOSOL IN A COFFEE PLANTATION**

The intensive agricultural machinery traffic on the soils cultivated with coffee crops may cause soil compaction, mainly when accomplished under inadequate soil moisture conditions, promoting a decrease in the productivity of the areas under intense machinery traffic. The objectives of this study were: a) to assess the soil structure degradation in the tractor traffic line (TTL) and in the combine traffic line (CTL), through the soil physical attributes and the soil bearing capacity as a function of the soil matric potential at three depths, b) to calculate the critical matric potential to prevent additional soil compaction due to the applied pressure to the soil by the wheeled Massey Ferguson Tractor model 275 and the KTR Advance Combine in the Red Latosol (Oxisol). This study was carried out at the EPAMIG Research Farm in Patrocinio, Minas Gerais State, Brazil. Undisturbed soil samples were collected at 0-3, 10-13 and 25-28 cm depths in five trenches. To obtain the soil bearing capacity models (σ_p as a function of the soil matric potentials), uniaxial compression test were performed using undisturbed soil samples, at different soils matric potentials. The physical attributes and the bearing capacity models indicated that the operations carried out with the Massey Ferguson Tractor model 275 promoted further soil structure degradation (soil compaction) than the KTR Advance Combine. In order to avoid additional soil compaction the critical matric potential for the tractor traffic line was 51 kPa (corresponding to volumetric soil moisture content of 0,36 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) and for the combine traffic line the critical matric potential was 291 kPa (corresponding to volumetric soil moisture content of 0,30 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$).

Index terms: soil compaction, preconsolidation pressure, matric potentials

1 INTRODUÇÃO

A cultura do café no Brasil destaca-se por sua grande área de cultivo e também por se tratar de um produto de exportação. Minas Gerais é o Estado brasileiro que detém a maior área plantada com cafeeiros, com aproximadamente 1.000.751 ha, ou seja, 47,8% do total cultivado no Brasil, sendo grande parte em solos originalmente sob vegetação de cerrados. A produção nacional corresponde a 39,6% da produção mundial, podendo atingir produção de 39 milhões de sacas de 60 kg dependendo do efeito da bienalidade (Anuário da Agricultura Brasileira - Agrianual, 2011).

O tráfego intensivo de máquinas agrícolas sobre solos cultivados com cafeeiros nas regiões do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, resultante principalmente do controle de plantas invasoras (Araújo Júnior et al., 2011) tem comprometido seus atributos físicos, tais como: porosidade total, macroporosidade, densidade do solo, retenção de água (Gontijo et al., 2008; Araújo Júnior et al., 2008; Ajayi et al., 2009), a condutividade hidráulica do solo e as taxas de infiltração de água (Timm et al., 2006) e pressão de preconsolidação (Araújo Júnior et al., 2011; Santos et al., 2010).

Quando estas operações são realizadas em condição de maior conteúdo de água no solo, aumenta a probabilidade de dano à estrutura do solo (Dias Júnior et al., 2007) devido a sua baixa capacidade de suporte de carga. Assim, o uso de máquinas agrícolas nas várias etapas do processo de produção, em condições inadequadas de umidade tem sido o principal responsável por acarretar a degradação da estrutura do solo, diminuindo seu potencial produtivo (Dias Júnior, 2000, Araújo Júnior et al., 2011; Severiano et al., 2010). Portanto, os diferentes manejos realizados nas lavouras cafeeiras têm promovido alterações na estrutura do solo, principalmente nas entrelinhas da cultura, resultantes das freqüentes operações de controle de plantas invasoras, sendo que

estas alterações podem causar compactação do solo com conseqüente redução na produtividade dos cafeeiros (Araújo Júnior, 2010).

A compactação do solo compromete a sustentabilidade do sistema agrícola, afetando o desenvolvimento das plantas, diminuindo a aeração do solo, comprometendo a infiltração, tornando o solo propenso à erosão (Oliveira et al., 2003). Muitos fatores relacionados ao solo, tais como: resistência do solo à penetração (Tormena & Roloff, 1996), densidade do solo e porosidade total têm sido utilizados como forma de identificar o problema da compactação.

A pressão de preconsolidação recentemente vem se destacando como uma forma eficaz de identificar e prevenir a compactação do solo (Dias Júnior & Pierce, 1996), pois é uma medida da capacidade de suporte de carga do solo, que é definida como a capacidade da estrutura do solo em resistir a pressões induzidas pelo tráfego de máquinas ou pisoteio animal, sem mudanças irreversíveis no arranjo tridimensional das partículas constituintes do solo (Alakukku et al., 2003), em uma determinada umidade ou potencial matricial.

A pressão de preconsolidação é obtida a partir da curva de compressão do solo, (Dias Júnior & Pierce, 1996; Silva, 1999; Imhoff, 2002; Keller et al., 2004). De acordo com estes autores, ela é definida como sendo a máxima pressão que o solo sofreu no passado. Quando se aplica pressões inferiores à pressão de preconsolidação, o solo sofre deformações pequenas, elásticas e reversíveis, ou seja, quando cessada a aplicação da pressão, o solo não apresentará compactação adicional. Por outro lado, quando são aplicadas pressões superiores à pressão de preconsolidação o solo sofre deformações plásticas, as quais são irreversíveis; neste caso, quando cessada a aplicação da pressão, o solo sofrerá compactação adicional.

Para que o solo não apresente compactação adicional e, conseqüentemente, não tenha a sua estrutura degradada, a pressão exercida pelos dispositivos de tração das máquinas e implementos agrícolas, assim como pelas

patas dos animais, não deve ultrapassar a pressão de preconsolidação (Dias Júnior & Pierce, 1996; Keller, 2004). Portanto, verifica-se que a pressão de preconsolidação se constitui em um parâmetro de grande utilidade na definição de práticas de manejo que visem à manutenção da qualidade física do solo.

O entendimento dos fatores que influenciam a capacidade de suporte de carga e o conhecimento dos níveis de pressões aplicados ao solo pelos equipamentos, torna-se essencial para a adequação do manejo do tráfego de máquinas em lavouras cafeeiras, para manter a qualidade física do solo e a longevidade da lavoura cafeeira.

Diante dessas considerações, este estudo foi realizado com os objetivos: a) avaliar o impacto na linha de tráfego do trator (LTT) e na linha de tráfego da colhedora (LTC), através dos atributos físicos do solo e da capacidade de suporte de carga do solo em função do potencial matricial do solo em três profundidades; b) calcular os potenciais matriciais críticos, para evitar a compactação adicional do solo a partir da pressão máxima aplicada ao solo pelo rodado do trator marca Massey Ferguson, modelo 275 e colhedora Jacto KTR Advance num Latossolo Vermelho Amarelo, textura muito argilosa.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em uma lavoura de café (*Coffea arabica L.*), implantada em fevereiro de 1999, na Fazenda da EPAMIG, no município de Patrocínio-MG, MG. Antes da implantação da lavoura cafeeira a área foi utilizada com pastagem. A área total do experimento é de 6000 m², com cafeeiros implantados no espaçamento de 3,80 x 0,70 m. A área encontra-se a 18° 59' 31" S de latitude sul e a 46° 59' 31" W de longitude, a oeste de Greenwich e a uma altitude de 934 m.

O município de Patrocínio está inserido em uma área geologicamente complexa, conhecida como Arco da Canastra, que separa as bacias sedimentares do São Francisco e do Paraná. O clima da região, segundo a classificação de Koppen, é do tipo Aw, com duas estações bem definidas, inverno seco e verão chuvoso, com precipitação média anual de 1620,1 mm (Silva & Malvino, 2005).

A vegetação predominante da região é do tipo cerrado. O relevo é plano a suave ondulado, com declividade média de 3%, sendo o solo classificado como um Latossolo Vermelho Amarelo (Embrapa, 2006) de textura muito argilosa (Quadro 1). Realizou-se as análises granulométricas via agitação lenta por um período de 16 horas utilizado como dispersante físico e o NaOH 1N como dispersante químico (Embrapa, 1997). Determinou-se a areia (2,00-0,05 mm) por tamisagem, o conteúdo de argila (<0,002 mm) pelo método da pipeta e de silte (0,05-0,002 mm) determinada pela diferença entre o conteúdo total da amostra de solo e os conteúdos de areia e argila.

Quadro 1. Caracterização física do Latossolo Vermelho Amarelo

Profundidade	MO ¹	Dp ¹	Argila ¹	Silte ¹	Areia ¹
cm	dag kg ⁻¹	Mg m ⁻³	-----g kg ⁻¹ -----		
0-3	3,7	2,68	720	160	120
10-13	2,6	2,70	640	230	130
25-28	2,5	2,71	650	260	90

¹Médias de 4 repetições. MO- matéria orgânica do solo, Dp- densidade de partículas

O controle de plantas invasoras foi realizado com a aplicação de herbicida de pré-emergência com o ingrediente ativo oxyfluorfen. O controle fitossanitário é realizado uma vez ao mês, utilizando pulverizador ARBUS 2000[®] com aproximadamente 2600 kg, quando completamente carregado. A adubação de cobertura foi aplicada de 40 em 40 dias no período chuvoso,

utilizando-se uma adubadora modelo Fertinox; quando completamente carregada, tem capacidade para 600 kg. Em todas as operações agrícolas foi utilizado um trator marca Massey Ferguson, modelo 275 (potência de 45 kW no motor (61 cv), possui bitola de 1,015 m, pneus traseiros R1 18,4-30 com pressão de inflação de 96,5 kPa e dianteiros R1 7,50-16 com pressão de inflação de 240 kPa, massa 3.900 kg. A colheita é realizada com uma colhedora Jacto KTR Advance com massa de 6700 kg quando vazia, possui um graneleiro com capacidade de 150 litros, pneus - G2 10x24" 10 lonas, com pressão de 276 kPa e possui bitola de 3,2 m.

Foram realizadas amostragens no Latossolo Vermelho Amarelo no mês de outubro de 2010, nas profundidades 0-3, 10-13 e 25-28 cm em duas regiões, na LTT e LTC sob a cultura cafeeira. Cabe ressaltar que as linhas de tráfegos do trator e da colhedora não se coincidem, pois os comprimentos das bitolas são diferentes. As amostras indeformadas foram coletadas em cinco trincheiras, utilizando-se anéis metálicos de 2,54 cm de altura por 6,30 cm de diâmetro, com auxílio do amostrador tipo Uhland. As amostras foram revestidas por filme plástico e parafina com a finalidade de preservar a estrutura do solo até a realização das análises físico-hídricas. Essas amostras foram utilizadas para obter o modelo de capacidade de suporte de carga (CSC) do solo nos potenciais matriciais de água de 2, 4, 6, 10, 33 100, 500 e 1500 kPa. Os potenciais matriciais de 2, 4, 6 kPa foram obtidas utilizando unidade de sucção (Grohmann, 1960) e para a obtenção dos demais potenciais, utilizou-se uma câmara de Richards (Klute, 1986).

Para os atributos físicos do solo, foram realizadas amostragens nas profundidades 0-3, 10-13 e 25-28 cm na linha de tráfego do rodado do trator e da colhedora. As 36 amostras indeformadas foram coletadas, utilizando-se anéis metálicos de 2,54 cm de altura por 6,30 cm de diâmetro, com auxílio do amostrador tipo Uhland. As amostras foram revestidas por filme plástico e

parafina com a finalidade de preservar a estrutura do solo até a realização das análises físico-hídricas. Os atributos físicos do solo usados foram: a densidade do solo (D_s), obtida pela relação entre a massa de solo seco e o volume do anel (Blake & Hartge, 1986a); a densidade de partículas (D_p), determinada pelo método do picnômetro de acordo com Blake & Hartge (1986b); a porosidade total (PT), determinada a partir da relação entre a densidade do solo e densidade de partículas, pela seguinte expressão: $PT=[1-(D_s/D_p)]$ (Embrapa, 1997); a macroporosidade do solo, obtida pela diferença entre PT e microporosidade sendo esta considerada o conteúdo de água retido a potencial matricial de 6 kPa (Embrapa, 1997).

As curvas de retenção de água (CRA) foram determinadas de acordo com van Genuchten (1980). Os conteúdos volumétricos de água (θ) foram ajustados de acordo com o potencial matricial (ψ_m), conforme a equação 1:

$$\theta = \theta_r + \{ \theta_s - \theta_r / [1 + (\alpha \psi_m)^n]^m \} \quad (1)$$

Em que θ_s e θ_r são o conteúdo de água na saturação e residual, respectivamente; α , n e m representam parâmetros empíricos de ajuste do modelo. Foi calculada também a água disponível, que foi obtida por diferença entre o teor de água do solo na capacidade de campo (θ_{CC}) e no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), conforme a equação: $[AD = \theta_{CC} (6\text{kPa}) - \theta_{PMP} (1500 \text{ kPa})]$ (Reichardt, 1988; Oliveira et al., 2003).

Ensaio de compressão uniaxial

Sete amostras indeformadas foram coletadas na LTT e LTC nas profundidades (0-3, 10-13 e 25-28 cm) e inicialmente foram saturadas por capilaridade, sendo equilibradas em cada um dos seguintes potenciais matriciais

(ψ_m): 2, 6, 10, 33, 100, 1500 kPa, sendo 5 repetições de cada potencial, totalizando 210 amostras. Estas amostras foram então submetidas ao ensaio de compressão uniaxial, usando consolidômetro pneumático Terraload S-450 (Durham Geo Enterprises, USA), conforme descrito por Dias Júnior (1994).

As amostras indeformadas foram mantidas dentro da célula de compressão e submetidas a pressões de 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1600 kPa. Cada pressão foi aplicada até obter 90% da deformação máxima (Taylor, 1948), sendo então aplicadas sucessivamente às pressões crescentes, sem efetuar o descarregamento das pressões previamente aplicadas. A variação da densidade do solo foi monitorada através de um extensômetro.

Determinação da pressão de preconsolidação

A curva de compressão do solo foi obtida ajustando-se graficamente, para cada amostra, o logaritmo da pressão aplicada (base 10) no eixo das abcissas e a densidade do solo no eixo das ordenadas. Os valores de pressão de preconsolidação (σ_p) foram determinados de acordo com Dias Júnior & Pierce (1995) e então ajustados em função do potencial matricial (ψ_m), obtendo-se assim os modelos de capacidade de suporte de carga do solo.

A equação 2 permite calcular a σ_p em função do ψ_m :

$$\sigma_p = a + b \ln \psi_m \quad (2)$$

onde: σ_p = pressão de preconsolidação, a = coeficiente linear, b = coeficiente angular, ψ_m = potencial matricial do solo.

Comparação dos modelos de capacidade de suporte de carga

As análises de regressão dos modelos de capacidade de suporte de carga foram realizadas através do software Sigma Plot 8.0 (Jandel Scientific). As

comparações dos modelos da capacidade de suporte de carga foram realizadas de acordo com procedimento descrito por Snedecor & Cochran (1989), o qual testa a homogeneidade dos dados teste (F) e a significância dos coeficientes angular (b) e linear (a) das equações linearizadas (equação 2).

Equações de regressão linear ($\sigma_p = a + b \ln \psi_m$) homogêneas entre si e coeficientes das regressões não significativos são agrupadas, sendo então, ajustado um novo modelo considerando todos os valores de σ_p e ψ_m .

Os valores referentes à porosidade total, macroporosidade, microporosidade e densidade do solo foram submetidos a análises exploratórias, para obtenção da distribuição de freqüência e normalidade dos dados pelo teste SW (Shapiro-Wilk, 1965). Nas situações em que ocorreu normalidade dos dados, procedeu-se a análise de variância e a comparação das médias, utilizando o teste de Scott-knott a 5% de probabilidade pelo programa estatístico Sisvar (Ferreira, 2000).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na LTT a porosidade total (PT) foi maior na profundidade de 25-28 cm quando comparada com as profundidades de 0-3 e 10-13 cm que não diferiram estatisticamente entre si, indicando que o tráfego alterou a PT do solo até a profundidade de 10-13 cm (Quadro 2). O mesmo ocorreu para a LTC. A LTT apresentou menores valores de PT para todas as profundidades analisada quando comparada com a LTC.

De acordo com Kiehl (1979), um solo em condições ideais deve apresentar um terço da porosidade total formada por macroporos e os dois terços restantes por microporos, estabelecendo uma relação macroporos/microporos igual a 0,5. Neste trabalho verificou-se uma relação macroporos/microporos

igual a 0,5 para a LTC, enquanto que para a LTT essa relação foi de 0,30 sendo está condição inadequada conforme o autor citado acima.

A macroporosidade na LTT nas profundidades de 0-3 e 10-13 cm não diferiram estatisticamente entre si, apresentando menores valores de macroporosidade quando comparada a profundidade de 25-28 cm. Na LTC verificou-se que a profundidade de 25-28 cm apresentou maior valor de macroporosidade, quando comparada as profundidades 0-3 e 10-13 cm que não diferiram estatisticamente entre si (Quadro 2).

Houve uma redução de 36,4% de macroporos na LTT quando comparada a LTC. Segundo Gupta & Allmaras (1987) e Kiehl (1979), a maioria das plantas cresce satisfatoriamente seu sistema radicular quando a percentagem de macroporos está acima de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Essa condição ideal foi verificada apenas na LTC, já na LTT nas profundidades 0-3 e 10-13 cm verificaram-se o valor de $0,12 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de macroporos, sendo este considerado baixo. A redução dos macroporos deve-se a destruição da estrutura do solo, reduzindo o volume dos poros de maior tamanho devido à carga excessiva aplicada ao solo pelas operações mecanizadas, principalmente na linha de tráfego (Gontijo et al., 2008).

Na LTT a profundidade de 10-13 cm apresentou maior valor de microporos, quando comparada as profundidades de 0-3 e 25-28 cm que não diferiram estatisticamente entre si. Na LTC as profundidades de 0-3 e 10-13 cm não diferiram estatisticamente entre si, apresentando maiores valores de microporosidade quando comparado à profundidade 25-28 cm. Para a microporosidade verificou-se um aumento de 8,7% de microporos na LTT, quando comparada a LTC (Quadro 2).

A densidade do solo foi maior para as profundidades de 0-3 e 10-13 cm na LTT, que diferiu estatisticamente da profundidade de 25-28 cm. O mesmo ocorreu na LTC. A redução na PT condicionou maiores valores de densidade do

solo na LTT, onde se verificou um aumento de 11% na densidade do solo quando comparada a LTC (Quadro 2). Analisando os resultados da PT macroporosidade e densidade do solo, observa-se que a operação crítica em relação à compactação é a realizada com o trator que apesar de pesar menos (trator + pulverizador =6500 kg ou trator + adubadora =4500 kg) do que a colhedora (6850 kg) promove maior compactação do solo devido à frequência de operações e a época do ano (estação chuvosa) induzindo maior compactação no solo do que a colhedora, que realiza a colheita na estação seca.

Quadro 2. Densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade, obtidos na linha de tráfego do trator e colhedora em três profundidades num Latossolo Vermelho Amarelo

Linha de tráfego	Profundidade (cm)		
	0-3	10-13	25-28
Porosidade total ¹ (m ³ m ⁻³)			
Trator	0,58aA	0,59aA	0,62bA
Colhedora	0,63aB	0,63aB	0,65bB
Macroporosidade do solo ¹ (m ³ m ⁻³)			
Trator	0,12aA	0,12aA	0,18bA
Colhedora	0,20aB	0,20aB	0,26bB
Microporosidade do solo ¹ (m ³ m ⁻³)			
Trator	0,45aA	0,48bA	0,44aA
Colhedora	0,43aB	0,43aB	0,39bB
Densidade do Solo ¹ (Mg m ⁻³)			
Trator	1,13aA	1,1aA	1,03bA
Colhedora	0,98aB	1,01aB	0,95bB

¹ Média de seis repetições. Médias seguidas da mesma letra minúsculas nas linhas e maiúscula nas colunas, dentro de cada atributo, não diferem entre si a 5% pelo teste de Scott-knott

As curvas de retenção de água no solo foram influenciadas pelo processo de compactação (Figura 1). Na LTT verificou-se que a água disponível nas profundidades de 0-3, 10-13 e 25-28 cm foi de 0,12; 0,13; 0,14 m³ m⁻³ respectivamente. Enquanto que na LTC a água disponível nas profundidades de

0-3, 10-13 e 25-28 cm foi de 0,14; 0,15; 0,14 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ respectivamente. Na profundidade de 0-3 cm na LTC verificou-se que a água disponível foi 17% maior em relação à LTT. Na profundidade de 10-13 cm a água disponível na LTC foi 15% maior em relação à LTT, na profundidade de 25-28 cm o valor de água disponível foi igual para a LTT e LTC.

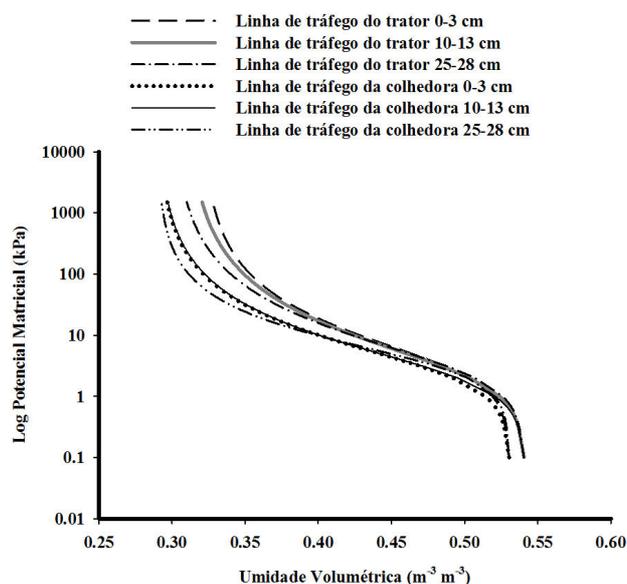


Figura 1. Curva de retenção de água do solo na LTT e LTC em três profundidades num Latossolo Vermelho Amarelo.

Quadro 3. Comparação entre as regressões lineares dos modelos de capacidade de suporte de carga. ($\sigma_p = a + b \ln \psi_m$), de acordo com Snedecor & Cochran (1989)

Linha de tráfego e profundidade	F	Coefficiente Linear, a	Coefficiente angular, b
Trator 0-3 cm X Trator 10-13 cm	H	ns	ns
Trator 0-3 e 10-13cm X Trator 25-28 cm	NH	*	*
Colhedora 0-3 cm X Colhedora 10-13 cm	H	ns	ns
Colhedora 0-3 e 10-13 cm X Colhedora 25-28 cm	H	*	*
Trator 0-3 e 10-13 cm X Colhedora 0-3 e 10-13 cm	H	ns	*
Trator 25-28 cm X Colhedora 25-28 cm	H	*	*

NH: Não homogêneo; H: Homogêneo; ns: não-significativo; *: significativo a 5 %

Os modelos de CSC na LTT nas profundidades de 0-3 e 10-13 cm não se diferenciaram estatisticamente sendo, portanto, uma nova equação ajustada a todos os valores de σ_p e ψ_m , obtendo-se assim, um novo modelo de CSC para estas profundidades. Esta equação foi diferente estatisticamente da equação da profundidade 25-28 cm (Quadro 4). Esta profundidade foi a mais suscetível à compactação. O mesmo ocorreu para a LTC (Quadro 4 e Figura 2).

Quando se comparou os modelos de CSC na LTT e LTC, verificou-se diferença estatística para todas as profundidades, indicando diferentes CSC para o solo em estudo, portanto os modelos não foram agrupados (Quadro 4). A LTT em todos os potenciais matriciais apresentou maiores CSC do que a LTC para todas as profundidades, indicando que o trator degrada mais a estrutura do solo, o que é evidenciado pelas maiores CSC do solo (Figura 2).

A maior CSC na LTT (Figura 2) proporcionou maiores valores de microporosidade e densidade do solo e menores valores de PT e macroporosidade. Solos com maior capacidade de suporte de carga podem ser benéficos a trafegabilidade de máquinas para o manejo da lavoura cafeeira, entretanto isto está ligado a maior compactação do solo (Araújo Júnior et al. 2008), o que pode afetar o crescimento do sistema radicular, transporte de água e de assimilados das raízes para a parte aérea (Rena & Guimarães, 2000).

Na LTT onde ocorre um intenso tráfego do trator, foram verificados maiores valores médios da σ_p , o que está relacionado com a elevada frequência de tráfego durante o ano. Segundo Silva et al. (2006), no manejo de lavouras cafeeiras, em média são realizadas entre doze e dezessete operações mecanizadas anuais. A colhedora apresentou menores valores de σ_p , isto pode estar relacionado a menor frequência desta operação e ao fato de que a colheita é realizada na época seca, quando o solo apresenta maior CSC o que minimiza a possibilidade de ocorrer compactação do solo.

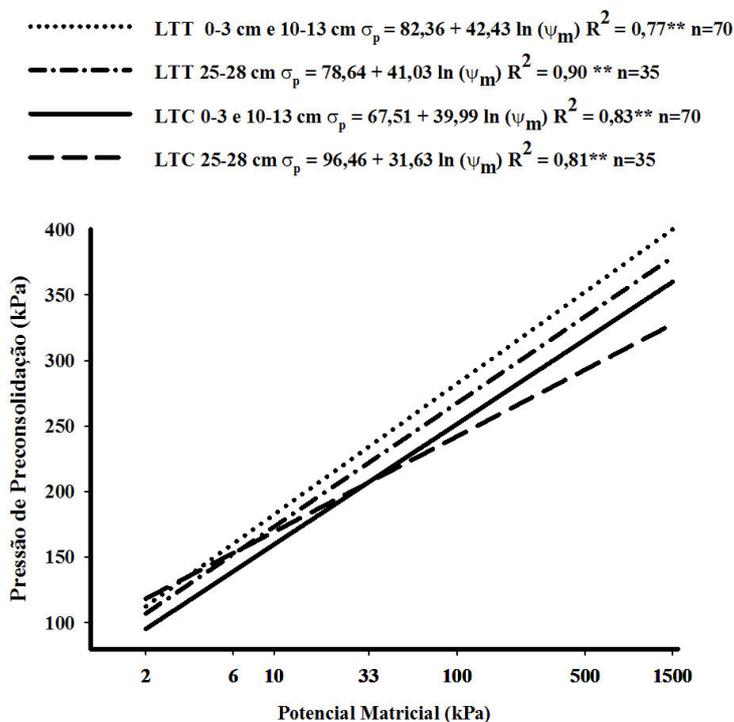


Figura 2. Modelo de capacidade de suporte de carga em função do potencial matricial para o Latossolo Vermelho Amarelo para a LTT e LTC em três profundidades de estudo sob a cultura do café

Apesar de Horn et al. (2007), sugerirem que os valores das pressões dinâmicas sejam até 5 vezes maiores, do que a pressão estática, a seguir é apresentado uma proposta dos valores dos potenciais matriciais e umidade volumétrica na qual o trator e a colhedora podem trafegar sem promover compactação adicional considerando a pressão estática, devido a falta de informações sobre as pressões dinâmicas aplicadas pelos equipamentos usados nas lavouras cafeeiras.

De acordo com o manual do fabricante os rodados do trator aplicam uma pressão estática máxima de 240 kPa e devido a esse fato o tráfego deve ser realizado na profundidade de 0-3 e 10-13 cm em potencial matricial maiores do

que de 41 kPa, que corresponde a umidade volumétrica de $0,38 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Figura 3a). Na profundidade de 25-28 cm, o tráfego deve ser realizado em potenciais matriciais maiores do que 51 kPa, que corresponde a umidade volumétrica de $0,36 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Figura 3b).

De acordo com o manual do fabricante os rodados da colhedora aplicam uma pressão estática máxima de 276 kPa e devido a esse fato, o tráfego deve ser realizado nas profundidades de 0-3 e 10-13 cm nos potenciais matriciais maiores do que 183,54 kPa, que corresponde a umidade volumétrica de $0,31 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Figura 3c). Na profundidade de 25-28 cm, o tráfego deve ser realizado no potencial matricial maiores que 291 kPa que corresponde a umidade volumétrica de $0,30 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Figura 3d). No entanto por questão de segurança, devem-se considerar as profundidades menos resistentes a compactação para que o tráfego de máquinas seja realizado, sem promover compactação do solo. Estabelecendo como limite os valores de 51 kPa ($0,36 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e 291 kPa ($0,30 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) para a LTT e LTC respectivamente.

Os estudos que visam identificar, quantificar, prevenir e mitigar os efeitos causados pelo manejo de máquinas da cultura cafeeira sobre o Latossolo Vermelho Amarelo na região de Patrocínio-MG são importantes ferramentas para o manejo de máquinas da cultura do café, por meio do uso de modelos matemáticos, objetivando ampliar o conhecimento sobre a retenção de água e da capacidade de suporte de carga, baseados na história do manejo das máquinas agrícolas.

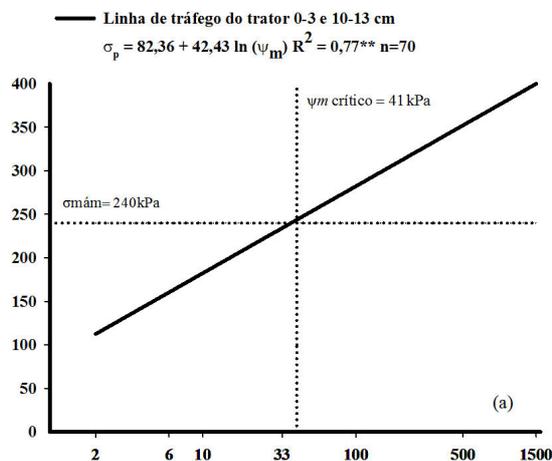


Figura 3a. Modelo de capacidade de suporte de carga em função do potencial matricial para o Latossolo Vermelho Amarelo para a LTT e LTC em três profundidades de estudo sob a cultura do café. A linha pontilhada horizontal representa a pressão máxima aplicada pelo rodado do trator e colhedora e a linha pontilhada vertical representa o potencial matricial crítico

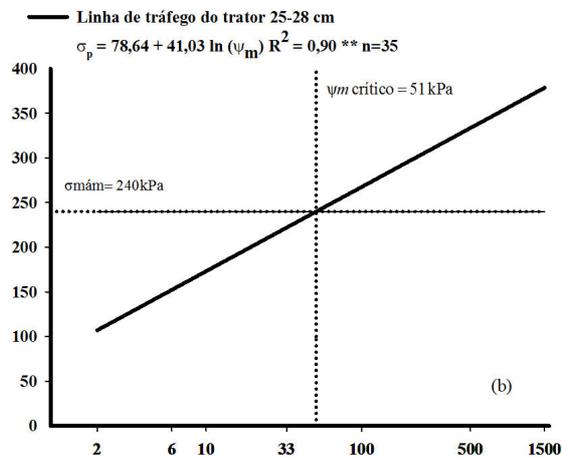


Figura 3b. Modelo de capacidade de suporte de carga em função do potencial matricial para o Latossolo Vermelho Amarelo para a LTT e LTC em três profundidades de estudo sob a cultura do café. A linha pontilhada horizontal representa a pressão máxima aplicada pelo rodado do trator e colhedora e a linha pontilhada vertical representa o potencial matricial crítico

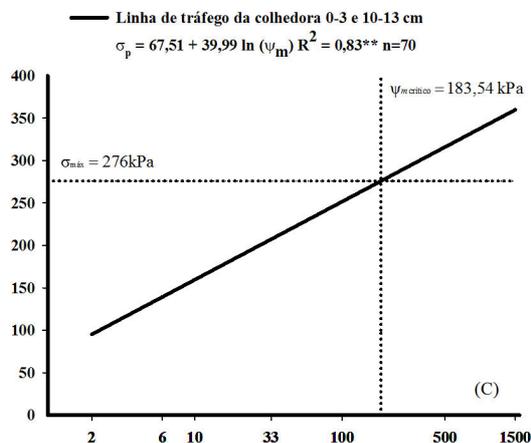


Figura 3c. Modelo de capacidade de suporte de carga em função do potencial matricial para o Latossolo Vermelho Amarelo para a LTT e LTC em três profundidades de estudo sob a cultura do café. A linha pontilhada horizontal representa a pressão máxima aplicada pelo rodado do trator e colhedora e a linha pontilhada vertical representa o potencial matricial crítico

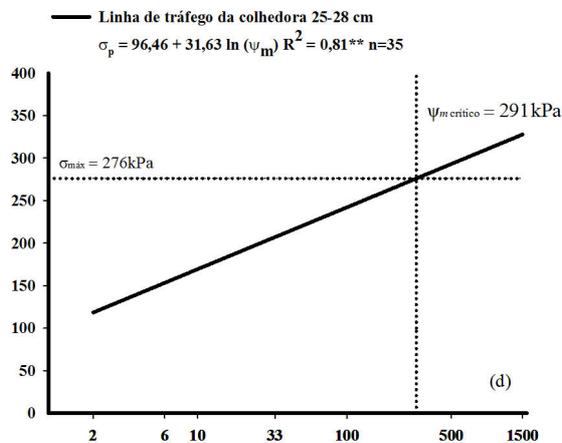


Figura 3d. Modelo de capacidade de suporte de carga em função do potencial matricial para o Latossolo Vermelho Amarelo para a LTT e LTC em três profundidades de estudo sob a cultura do café. A linha pontilhada horizontal representa a pressão máxima aplicada pelo rodado do trator e colhedora e a linha pontilhada vertical representa o potencial matricial crítico

4 CONCLUSÃO

1. As operações realizadas com o trator Massey Ferguson modelo 275 degradaram mais a estrutura do solo do que as operações realizadas com a colhedora Jacto KTR Advance.

2. O potencial matricial crítico para a LTT foi de 51 kPa ($0,36 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). Para a LTC o potencial matricial crítico foi de 291 kPa ($0,30 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$).

3. É importante ressaltar que os estudos baseados no conhecimento da capacidade de suporte de carga do solo em função do potencial matricial de água, podem subsidiar condições ideais de tráfego em cafezais da região de Patrocínio-MG, o que minimizaria o processo de compactação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Consórcio Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento do Café CBP&D/ Café o apoio financeiro para o desenvolvimento do presente estudo. Aos funcionários da Fazenda Experimental da EPAMIG em Patrocínio – MG. O primeiro autor agradece à CAPES a concessão da bolsa de doutorado.

5 REFERÊNCIAS

ANUÁRIO da Agricultura Brasileira. **Mercados e perspectivas do café**. São Paulo: FNP, 2011. p. 192-210.

AJAYI, A. E.; DIAS JÚNIOR, M. S.; CURI, N.; ARAÚJO JÚNIOR, C. F.; SOUZA, T. T. T.; INDA JÚNIOR, A. V. Strength attributes and compaction susceptibility of Brazilian Latosols. *Soil Till. Res.*, 105:122-127, 2009.

ALAKUKKU, L.; WEISSKOPF, P.; CHAMEN, W. C. T.; TIJINK, F. G. J.; LINDEN, J. P. van der; PIRES, S.; SOMMER, C.; SPOOR, G. Prevention strategies for field traffic induced subsoil compaction: a review: part I – machine/soil interactions. *Soil Till. Res.*, 73:145-160, 2003.

ARAÚJO JÚNIOR, C. F. Capacidade de suporte de carga de um Latossolo após três décadas de diferentes manejos de plantas invasoras em uma lavoura cafeeira. 2010. 158p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

ARAÚJO JÚNIOR, C. F.; DIAS JÚNIOR, M. S.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALCÂNTARA, E. N. Capacidade de suporte de carga e umidade crítica de um Latossolo induzida por diferentes manejos. *R. Bras. Ci. Solo*, 35: 115-131, 2011.

ARAÚJO JÚNIOR, C. F.; DIAS JÚNIOR, M. S.; GUIMARÃES, P. T. G.; PIRES, B. S. Resistência a compactação de um Latossolo cultivado com cafeeiro, sob diferentes sistemas de plantas invasoras. *R. Bras. Ci. Solo*, 32: 25-32, 2008.

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.). *Methods of soil analysis*. 2. ed. Madison: ASA/SSSA, 1986a. p. 363-375. (Agronomy monograph, 9).

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Particle density. In: KLUTE, A. (Ed.). Methods of soil analysis. 2. ed. Madison: ASA/SSSA, 1986b. p.377-382. (Agronomy monograph, 9).

DIAS JÚNIOR, M. S. Compactação do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V., H. V. & SCHAEFER, C. E. G. R. Tópicos em Ciência do solo. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de ciência do solo, 2000, v. 1. p. 55-94.

DIAS JÚNIOR, M. S. Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic. East Lansing, Michigan State University 1994. 114 p. (Tese de doutorado).

DIAS JÚNIOR, M. S.; FONSECA, S. ARAÚJO JÚNIOR, C. F.; SILVA, A. R. Soil compaction due to Forest harvest operations. Pesq. Agropec. Bras., 42: 257-264, 2007.

DIAS JÚNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. Soil Technol., 8: 139-151, 1995.

DIAS JÚNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. R. Bras. Ci. Solo, 20:175-182, 1996.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUARIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. Manual de métodos de análises de solo. 2. Ed. Brasília, Produção de informação, 1997. 212 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.

FERREIRA, D.F. Análises estatísticas por meio do SISVAR para Windows 4. 0. In: REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE INTERNACIONAL DE BIOMETRIA, 45., 2000, São Carlos. Anais. São Carlos, Universidade Federal de São Carlos, 2000. p. 255-258.

GENUCHTEN, M. T. van. A closed-form equation for predicting hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44:892-898, 1980.

GONTIJO, I.; DIAS JÚNIOR, M. S.; GUIMARÃES, P. T. G.; ARAÚJO JÚNIOR, C. F. Atributos físico-hídricos de um Latossolo de cerrado em diferentes posições de amostragem na lavoura cafeeira. *R. Bras. Ci. Solo* 32: 2227-2234, 2008.

GROHMANN, F. Distribuição e tamanho de poros em três tipos de solos do estado de São Paulo. *Bragantia* 21:319-328, 1960.

GUPTA, S. C. & ALLMARAS, R. R. Models to asses the susceptibility of soils to excessive compaction. *Adv. Soil Sci.*, 6: 5-10, 1987.

HORN, R. et al. Impact of forest model vehicles on soil physical properties. *Forest Ecology and Management*, 248:56-63, 2007.

IMHOFF, S. Indicadores de qualidade estrutural e trafegabilidade de Latossolos e Argissolos Vermelhos. 2002. 94 f. Tese (Doutorado em Agronomia – Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

KELLER, T.; ARVIDSSON, J.; DAWIDOWSKI, J. B.; KOOLEN, A. J. Soil precompression stress - II. A comparison of different compaction tests and stress–displacement behaviour of the soil during wheeling. *Soil Till. Res.*, 77: 97-108, 2004.

KIEHL, E. L. *Manual de Edafologia*. São Paulo, Ceres, 1979. 262p.

KLUTE, A. Laboratory measurement of hydraulic conductivity of saturated soils. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p. 253-261. (Monograph, 9).

OLIVEIRA, G. C.; DIAS JÚNIOR, M. S.; CURI, N.; RESCK, D. V. S. Compressibilidade de um Latossolo Vermelho argiloso de acordo com a tensão de água no solo, uso e manejo. R. Bras. Ci. Solo, 27: 773-781, 2003.

REICHARDT, K. Capacidade de campo. R. Bras. Ci. Solo, 12: 211-216, 1988.
RENA, A. B.; GUIMARÃES, P. T. G. Sistema radicular do cafeeiro: estrutura, distribuição, atividade e fatores que o influenciam. Belo Horizonte: EPAMIG, 2000. 80p. (Documentos 37).

SANTOS, G. A. dos; DIAS JÚNIOR, M. S.; GUIMARÃES, P. T. G.; PAIS, P. S. M. Suscetibilidade a compactação de um Latossolo Vermelho-Amarelo submetido a diferentes métodos de controle de plantas invasoras, na cultura cafeeira. Coffee Science 5:123-136, 2010.

SEVERIANO, E. C. Alterações estruturais de Latossolos representativos da região do cerrado e potencial de uso de solos cultivados com cana-de-açúcar: 2010. 148p. Tese (Doutorado em Ciência do solo) – Universidade Federal de Lavras, 2010.

SHAPIRO, S. S. & WILK, M. B. An analysis of variance test for normality: complete samples. Biometrika, 52: 591-611, 1965.

SIGMA PLOT. Scientific Graphing Software. Versão 8.0. Software. San Rafael, Jandel Corporation, 2002.

SILVA, A. R.; DIAS JÚNIOR, M. de S.; GUIMARÃES, P. T. G.; ARAÚJO JÚNIOR, C. F. Modelagem da capacidade de suporte de carga e quantificação dos efeitos das operações mecanizadas em um Latossolo Amarelo cultivado com cafeeiros. R. Bras. Ci. Solo, 30: 207-216, 2006.

SILVA, E. M.; MALVINO, S. S. A. B. Análise climática do município de Patrocínio (MG). Caminhos da Geografia, v. 10, p. 93-108, 2005.

SILVA, V. R. Compressibilidade de um Podzólico e um Latossolo em função do estado inicial de compactação e saturação em água. 1999. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração Biodinâmica de Solos, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1999.

SNEDECOR, G. W.; COCHRAN, W. G. Statistical methods. 8. Ed. Ames: Iowa State University Press, 1989.

TAYLOR, D. W. Fundamentals of soil mechanics. New York: John Wiley, 1948. 770 p.

TIMM, L. C.; PIRES, L. F.; ROVERATTI, R.; ARTHUR, R. C. J.; REICHARDT, K.; OLIVEIRA, J. C. M.; BACCHI, O. O. S. Field spatial and temporal patterns of soil water content and bulk density changes. *Sci. Agric.*, 63: 55-64, 2006.

TORMENA, C. A.; ROLOFF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 20:333-339, 1996.

CAPÍTULO 3

VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM LATOSSOLO VERMELHO AMARELO EM LAVOURA CAFEIEIRA

Normas da Revista Brasileira de Ciência do Solo (versão preliminar)

RESUMO

O conhecimento da variabilidade dos atributos físicos do solo é de fundamental importância para o monitoramento da qualidade do solo, pois eles estão diretamente relacionados com a sustentabilidade agrícola. Este estudo teve como objetivos: a) avaliar e identificar as estruturas de dependência espacial através da construção de semivariogramas num Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) em lavoura cafeeira; b) caracterizar as distribuições espaciais dos atributos físicos através da krigagem ordinária; c) identificar a profundidade com maior impedimento físico. O experimento foi conduzido num LVA textura muito argilosa na Fazenda da EPAMIG (Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais), em Patrocínio-MG. A amostragem foi realizada após a demarcação de uma malha retangular (40 m x 150 m), onde foram coletadas amostras indeformadas em anéis metálicos de 2,54 cm de altura por 6,30 cm de diâmetro com auxílio do amostrador tipo Uhland em 28 trincheiras. Cada trincheira possui três degraus que correspondem as profundidades de 0-3, 10-13 e 25-28 cm e as dimensões dos degraus foram de 2,0 x 1,5 m, onde coletaram-se sete amostras indeformadas (disposta em forma matricial) para cada degrau, totalizando 588 amostras. Todos os atributos físicos do solo apresentaram estrutura de dependência espacial, exceto a porosidade total em todas as profundidades. A técnica de krigagem ordinária demonstrou ser uma alternativa viável para a estimativa de dados em pontos não amostrados na área experimental. A profundidade 0-3 cm apresentou maior impedimento físico do solo, pois apresentou maior densidade do solo e menor valor de macroporosidade do solo.

Termos de indexação: compactação, geoestatística, mapas.

SUMMARY: SPATIAL VARIABILITY OF THE PHYSICAL ATTRIBUTES OF A RED-YELLOW LATOSOL IN A COFFEE PLANTATION

The knowledge of the soil physical properties variability is of fundamental importance for the monitoring of soil quality because they are directly related to agricultural sustainability. This study had as an objective: a) to assess and identify the structure of spatial dependence through the semivariograms of a Red-Yellow Latosol (Oxisol), cultivated with coffee plantation; b) to characterize the spatial distributions of physical attributes using ordinary kriging, c) to identify the depth with greater soil physical impairment. The experiment was carried out in a Red- Yellow Latosol (Oxisol), very clayey, at the EPAMIG Research Farm in Patrocínio, State of Minas Gerais, Brazil. The undisturbed soil sampling was performed after the demarcation of a rectangular grid (40 m x 150 m) where soil samples were collected in aluminum rings with 6,5 cm diameter and 2,5 cm height using Uhland sampler in the 28 trenches. Each trench has three steps that correspond to depths of 0-3, 10-13 and 25-28 cm and the dimensions of the steps were 2,0 x 1,5 m, where seven undisturbed soil samples were collected (in a matrix form) for each step, a totalizing of 588 samples. All the physical attributes showed spatial dependence structure, except the total porosity at all depths. The ordinary kriging technique proved to be a viable alternative for the estimation of data points not sampled in the experimental area. The 0-3cm depth showed greater soil physical impairment because the soil had the higher bulk density and lower soil macroporosity.

Index terms: compactation, geostatistics, maps.

1 INTRODUÇÃO

Segundo estimativas da German Advisory Council on Global Change (1995), a degradação física do solo é a responsável por cerca de 4% da área de solos degradados no mundo, embora pequeno, este valor corresponde a 83 milhões de hectares no mundo. A agricultura é responsável por 66 milhões, a pecuária por 14 milhões, o desmatamento por 1 milhão e demais explorações por 2 milhões de hectares de solos degradados.

Os efeitos negativos do tráfego das máquinas sobre a estrutura dos solos são bem relatados pela bibliografia através do monitoramento dos atributos físicos do solo. Quando as pressões aplicadas pelo tráfego ultrapassam a capacidade de suporte de carga do solo, há uma grande redução do volume de macroporos (Tarawally et al., 2004; Servadio et al., 2005; Schäffer et al., 2007), enquanto que o de microporos permanece praticamente inalterados (Tormena et al., 1998) ou até mesmo aumenta (Tarawally et al., 2004, Schäffer et al., 2007).

Quando o tráfego não é muito intenso e/ou realizado sob condições de solo seco, os macroporos podem ser reduzidos a mesoporos (Tarawally et al., 2004). Alterando assim a geometria do espaço poroso (Servadio et al., 2005). O tráfego de máquinas aumenta a densidade do solo e diminui a porosidade total (Kulli et al., 2003; Servadio et al., 2005; Botta et al., 2006), indicando que estes atributos podem ser usados como indicadores da compactação ocasionada pelo tráfego de máquinas (Dias Júnior, 2000) e pisoteio animal (Lima, 2004).

Em função das alterações anteriormente descritas, o tráfego de máquinas promove aumento da resistência mecânica do solo (Jorajuria & Draghi, 1997; Tarawally et al., 2004; Servadio et al., 2005; Botta et al., 2006; Botta et al., 2007), diminuição da capacidade de infiltração de água (Li et al., 2007) e da condutividade hidráulica saturada (Silva et al., 2003; Servadio et al., 2005), alterando a retenção de água no solo (Ajayi et al., 2009).

A resistência do solo à penetração é um atributo utilizado na maioria das pesquisas para avaliar a compactação do solo e por estar diretamente relacionado ao crescimento das plantas (Letey, 1985), sendo de fácil e rápida determinação (Stolf, 1991), apesar de estar relacionada com a umidade, densidade do solo e textura. A resistência do solo à penetração apresenta relação direta com o conteúdo de argila e a densidade do solo e inversa com a umidade (Rosolem et al., 1999). Segundo Henderson, (1989); Arshad et al. (1996), a umidade na capacidade de campo é ideal para se determinar a resistência do solo à penetração, pois nesta condição é obtida boa correlação com o crescimento radicular das plantas. O valor de resistência do solo à penetração de 2 MPa, promove significativa restrição ao crescimento radicular de culturas quando determinada na capacidade de campo (Arshad et al., 1996).

O uso da Geoestatística no estudo da variabilidade espacial dos atributos físicos e mecânicos do solo permite a identificação da dependência espacial dos dados, possibilitando o desenvolvimento de mapas de distribuição destes atributos no campo, através da técnica de krigagem, que faz uso da interpolação com estimador não tendencioso e variância mínima (Journel & Huijbregts, 1991).

O semivariograma é o principal componente para a validação geoestatística e também a ferramenta mais importante nas aplicações em Ciência dos Solos. Segundo Vieira (2000), todos os cálculos de Geoestatística dependem do modelo estimado (ajustado) do semivariograma. Por isso, se o modelo ajustado não possuir boa qualidade de estimação então a krigagem (os mapas) estarão também com qualidade comprometida. É importante que o modelo ajustado represente a tendência da variabilidade em função da distância. Matematicamente e estatisticamente é obrigatório que o modelo ajustado tenha positividade definida condicional (Journel & Huijbregts 1991).

Para a interpolação dos dados em locais não amostrados no campo, utiliza-se a krigagem, que é uma ferramenta geoestatística baseada em uma técnica de interpolação com o uso de estimadores não tendenciosos de variáveis regionalizadas em locais não amostrados, utilizando, para tanto, as propriedades estruturais do semivariograma e do conjunto inicial de dados amostrais (Trangmar et al., 1985).

A elaboração de mapas de atributos do solo tem sido uma prática constante nos últimos anos, tendo-se, por exemplo, os mapas de: densidade do solo (Ribeiro Júnior, 1995; Filho et al. 2007), textura (Kitamura et al., 2007), resistência do solo à penetração (Lima et al., 2008), densidade do solo, porosidade total (Filho et. al., 2007), umidade volumétrica (Grego et al., 2006), macroporosidade e microporosidade do solo (Siqueira et al., 2009).

O conhecimento da variabilidade espacial dos atributos físicos do solo contribui para o manejo adequado, pois permite identificar zonas que necessitem de manejo diferenciado. Sendo assim este estudo teve como objetivos: a) avaliar e identificar as estruturas de dependência espacial através da construção de semivariogramas num Latossolo Vermelho Amarelo em lavoura cafeeira; b) caracterizar as distribuições espaciais dos atributos físicos através da krigagem ordinária; c) identificar a profundidade com maior impedimento físico.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em uma área da Fazenda da EPAMIG (Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais) sob o cultivo de café (*Coffea arabica L.*), implantada em fevereiro de 1999, localizada no município de Patrocínio, MG. Antes da implantação da lavoura cafeeira a área foi utilizada com pastagem. A área total do experimento é de 6000 m², com cafeeiros implantados no espaçamento de 3,80 x 0,70 m. A área encontra-se a 18° 59' 31"

S de latitude sul e a 46° 59' 31" W de longitude, a oeste de Greenwich e a uma altitude de 934 m.

O município de Patrocínio está inserido em uma área geologicamente complexa, conhecida como Arco da Canastra, que separa as bacias sedimentares do São Francisco e do Paraná. O clima da região, segundo a classificação de Koppen, é do tipo Aw, com duas estações bem definidas, inverno seco e verão chuvoso, com precipitação média anual de 1620,1 mm (Silva & Malvino, 2005).

A vegetação predominante da região é do tipo cerrado. O relevo é plano a suave ondulado, com declividade média de 3%, sendo o solo classificado como um Latossolo Vermelho Amarelo (Embrapa, 2006) de textura muito argilosa.

O controle de plantas daninhas foi realizado com a aplicação de herbicida de pré-emergência com ingrediente ativo oxyfluorfen. O controle fitossanitário foi realizado uma vez ao mês, utilizando pulverizador ARBUS 2000[®] com aproximadamente 2600 kg, quando completamente carregado. A adubação de cobertura, aplicada de 40 em 40 dias no período chuvoso, foi realizada utilizando-se uma adubadora modelo Fertinox; quando completamente carregada, tem capacidade para 600 kg. Em todas as operações agrícolas foi utilizado um trator marca Massey Ferguson, modelo 275 potência de 45 kW no motor (61 cv), pneus traseiros R1 18.4-30 com pressão de inflação de 96,5 kPa e dianteiros R1 7.50-16 com pressão de inflação de 240 kPa, massa 3900 kg. A colheita é realizada com uma colhedora Jacto KTR Advance com massa de 6850 kg, pneus - G2 10x24", 10 lonas com pressão de 276 kPa.

Amostragem

A amostragem foi realizada após a demarcação de uma malha retangular (40 m x 150 m), onde foram coletadas amostras indeformadas em anéis metálicos de 2,54 cm de altura por 6,30 cm de diâmetro com auxílio do amostrador tipo Uhland em 28 trincheiras (Figura 1). Cada trincheira possui três degraus que correspondem as profundidades de 0-3, 10-13 e 25-28 cm (Figura 2), as dimensões dos degraus foram de 2,0 x 1,5 m, coletaram-se sete amostras indeformadas (disposta em forma matricial) para cada degrau, totalizando 588 amostras (Figura 2). As amostras foram revestidas por filme plástico e parafina com a finalidade de preservar a estrutura do solo até a realização das análises físico-hídricas. Foram determinadas: a porosidade total, macroporosidade, microporosidade, densidade do solo, resistência do solo à penetração e umidade volumétrica do solo.

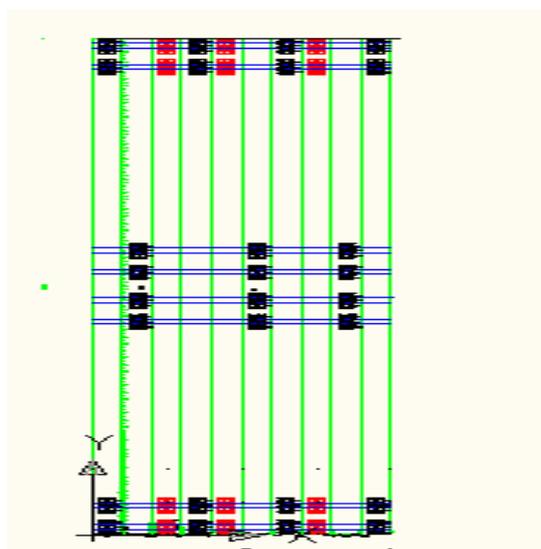


Figura 1. Distribuição das trincheiras na lavoura cafeeira, em que a cor preta indica sub-regiões amostradas, a cor verde indica as linhas do cafeeiro e a cor vermelha indica sub-regiões de futuras amostragens

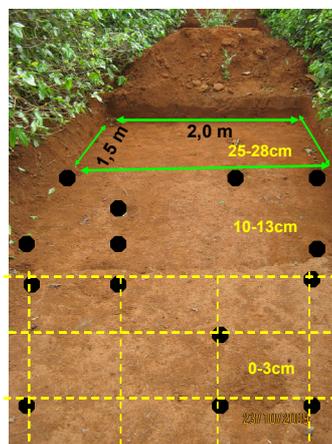


Figura 2. Trincheira com os três degraus que correspondem as profundidades 0-3, 10-13 e 25-28 cm

Análises de laboratório

A densidade do solo (D_s) foi obtida pela relação entre a massa de solo seco e o volume do anel (Blake & Hartge, 1986a). A densidade de partículas (D_p) foi determinada pelo método do picnômetro de acordo com Blake & Hartge (1986b). A porosidade total (PT) foi determinada a partir da relação entre a densidade do solo e densidade de partículas, pela seguinte expressão: $PT = [1 - (D_s/D_p)]$, (Embrapa, 1997). A macroporosidade (Macro) do solo foi obtida pela diferença entre PT e microporosidade (Micro), sendo esta considerada o conteúdo de água retido a potencial matricial de 6 kPa (Embrapa, 1997). As amostras indeformadas foram equilibradas no potencial matricial de 6 kPa e foi realizada a pesagem dessas amostras para a obtenção da umidade gravimétrica do solo (U). A umidade volumétrica (θ) do solo foi determinada pela seguinte expressão $\theta = (U \times D_s)$. Em seguida foram determinadas as resistências do solo à penetração (RP) conforme Tormena et al. (1998), utilizando-se um

penetrômetro digital de bancada MARCONI, modelo MA 933, com velocidade constante de 100 mm min⁻¹.

Análise estatística descritiva e análise geoestatística

Para a análise estatística descritiva, realizou-se um estudo exploratório de dados, com o programa estatístico Sisvar (Ferreira, 2000), calculando medidas de localização (média, mediana, moda, mínimo, máximo), medidas de dispersão (amplitude, desvio padrão, variância, coeficiente de variação) e medida de distribuição (assimetria e curtose) e o teste de normalidade Shapiro-Wilk.

Para a análise do CV, usou-se a classificação de Warrick & Nielsen (1980), com variabilidade baixa para valores menores de 12%, média para valores entre 12 e 60% e alta para valores maiores de 60%.

Para a análise da assimetria usou-se a classificação apresentada por Ferreira (2009): a distribuição assimétrica à direita ocorre quando $a_3 > 0$, enquanto que a assimetria à esquerda ocorre quando $a_3 < 0$ e a distribuição é simétrica quando $a_3 = 0$.

Para a análise da curtose a qual é representada na literatura vigente por a_4 ou b_2 , usou-se a classificação apresentada por Ferreira (2000), sendo o valor de $a_4 = 3$ é denominada de mesocúrtica, quando os valores de $a_4 > 3$ representam as distribuições leptocúrticas e valores de $a_4 < 3$ representam as distribuições platicúrticas.

Para a realização da análise geoestatística, foi utilizado o programa R, por meio do pacote geoR, desenvolvido por Ribeiro Júnior & Diggle (2001). Para uma adequada análise espacial dos dados, considera-se que cada ponto amostrado possui uma variável aleatória distinta, gerando assim um processo estocástico ou aleatório (Cressie, 1991). A condição de estacionariedade

intrínseca foi assumida para análise, a qual requer apenas a existência e estacionariedade do semivariograma, sem nenhuma restrição quanto à existência de variância finita (Vieira, 2000).

A partir desta hipótese, construíram-se os semivariogramas experimentais para os dados coletados nos 588 pontos amostrais. Os valores de semivariância foram obtidos pela equação 1:

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

em que $N(h)$ é o número de pares de valores medidos $Z(X_i)$, $Z(X_i + h)$, separados por um vetor h (Journel & Huijbregts, 1978). O gráfico de $\hat{\gamma}(h)$ em função dos valores correspondentes de h , chamado semivariograma, é uma função do vetor h , portanto, dependem de ambos, magnitude e direção de h .

Após os cálculos das semivariâncias, foram ajustados os modelos teóricos do tipo esférico e exponencial pelo método de quadrados mínimos ponderados. Após a escolha do modelo do semivariograma, foram realizadas interpolações usando o método da krigagem ordinária, para prever e mapear os valores dos atributos em estudo.

O modelo esférico evidencia uma estrutura de correlação espacial crescente com a distância, até certo ponto (alcance), a partir do qual a semivariância torna-se constante, restringindo a área de influência amostral. Conforme Journel & Huijbregts (1991), o modelo exponencial atinge o patamar assintoticamente, tendo o alcance prático determinado por 3 vezes o alcance teórico.

Para a análise da relação $Co/(Co+C)$ que mede o grau de dependência espacial das variáveis do solo, usou-se a classificação de Cambardella et al. (1994), se a relação for $\leq 25\%$, a variável é considerada como fortemente

dependente; entre 25 e 75%, a variável é considerada moderadamente dependente; e se a relação for $> 75\%$, a variável é considerada fracamente dependente.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Estatística descritiva

A análise com as estatísticas descritivas clássicas apresentadas nos Quadros 1 e 2 e a sua discussão abaixo, se prestam apenas para permitir comparação, se desejado, com as características de outras massas de dados, não constituindo objeto de subsídios às inferências estatísticas que levam em consideração a dependência espacial. A análise fornecida pelos semivariogramas é mais adequada para subsidiar inferências sobre a estrutura de dependência espacial, capacidade essa que não possuem as estatísticas descritivas clássicas.

Neste estudo verificou-se que houve um baixo coeficiente de variação para a Ds, Micro, PT, θ e um coeficiente de variação médio para Macro e RP de acordo com critério de Warrick & Nielsen (1980). Segundo Cambardella et al. (1994), a variabilidade dos atributos físicos do solo pode ser de origem intrínseca ou extrínseca. A variabilidade intrínseca possui forte dependência espacial, sendo causada por alterações naturais no solo, notadamente aquelas de origem pedogenética, como: material de origem, intemperismo de minerais, acúmulo de matéria orgânica e outros. A variabilidade extrínseca possui menor dependência espacial, sendo causada por alterações no uso do solo, tais como: práticas culturais, espécie vegetal explorada, erosão, compactação, etc.

Em todas as profundidades, verificou-se que a RP, Ds, θ apresentaram distribuição assimétrica à direita, também foi verificado para a Macro na profundidade de 25-28 cm e Micro na profundidade de 10-13 cm (Quadro 1).

Verificou-se uma distribuição assimétrica à esquerda para a Macro nas profundidades de 0-3 e 10-13 cm, para Micro nas profundidades de 0-3 e 25-28 cm e em todas as profundidades para a RP.

Neste estudo verificou-se que a θ , Macro, Micro na profundidade de 10-13 cm de acordo com Ferreira (2000) apresentaram distribuição platicúrticas, enquanto que a PT, RP e Ds em todas as profundidades; a θ , Macro e Micro nas profundidades de 0-3 e 10-13 cm apresentaram distribuição leptocúrticas. A macroporosidade em todas as profundidades apresentou o valor de probabilidade de Shapiro-Wilk significativo a 5%, enquanto que as variáveis Micro e θ na profundidade 10-13 cm apresentaram valor de probabilidade significativo a 1%, apresentando uma distribuição normal dos dados. O valor da estatística de Shapiro-Wilk (S.W.) para testar a normalidade, apresentada serve apenas para permitir comparação, se desejado, com as características de outras massas de dados e não constitui objeto de subsídios às inferências estatísticas.

De acordo com Cressie (1991), a normalidade dos dados não é uma exigência da Geoestatística, mas é conveniente apenas que, no gráfico de distribuição normal, o atributo não apresente extremidades da distribuição muito alongadas, o que poderia indicar a presença de dados discrepantes (outliers) e que poderia comprometer as análises.

O desvio padrão, o CV, a amplitude, o mínimo e o máximo fornecem a idéia da magnitude de variabilidade dos atributos físicos dos solos, porém, nada informa sobre a estrutura de dependência espacial destes atributos, o que só é possível por meio da Geoestatística, em especial o semivariograma (Souza, 1999).

Quadro 1. Estatística descritiva da macroporosidade (Macro), microporosidade (Micro) e porosidade total (PT) do solo

Parâmetro	Macro (m ³ m ⁻³)			Micro (m ³ m ⁻³)			PT (m ³ m ⁻³)		
	Profundidade (cm)			Profundidade (cm)			Profundidade (cm)		
	0-3	10-13	25-18	0-3	10-13	25-18	0-3	10-13	25-28
n	195	194	196	195	194	196	195	194	196
Média	0,19	0,18	0,20	0,44	0,44	0,43	0,62	0,62	0,63
Mediana	0,19	0,18	0,20	0,44	0,44	0,43	0,63	0,63	0,63
Moda	0,18	0,17	0,20	0,44	0,44	0,41	0,63	0,64	0,64
Variância	0,003	0,002	0,002	0,001	0,001	0,0013	0,001	0,0005	0,0005
Desv.	0,053	0,044	0,051	0,035	0,031	0,036	0,032	0,022	0,022
CV	28,21	24,25	25,51	7,96	7,07	8,41	5,1	3,53	3,49
Assimetria	-0,04	-0,14	0,28	-0,16	0,17	-0,40	-2,13	-1,37	-0,48
Curtose	3,13	2,90	3,37	5,44	2,78	3,54	16,41	9,05	3,19
Mínimo	0,010	0,04	0,08	0,28	0,37	0,29	0,39	0,49	0,56
Máximo	0,34	0,28	0,38	0,58	0,52	0,51	0,69	0,67	0,68
Amplitude	0,33	0,24	0,30	0,30	0,15	0,22	0,30	0,18	0,12
S.W.	0,44*	0,25*	0,076*	0,00016	0,032**	0,003	5x10 ⁻¹²	2x10 ⁻⁹	0,0038

* significativo a 5%, ** significativo a 1%, n: tamanho da amostra, Desv.: desvio padrão, CV: coeficiente de variação, S.W: valor de probabilidade de Shapiro- Wilk

Quadro 2. Estatística descritiva da resistência do solo à penetração (RP), umidade volumétrica (θ) e densidade do solo (Ds)

Parâmetro	RP (MPa)			θ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)			Ds (Mg m^{-3})		
	Profundidade (cm)			Profundidade (cm)			Profundidade (cm)		
Estatístico	0-3	10-13	25-18	0-3	10-13	25-28	0-3	10-13	25-18
n	195	194	196	195	194	196	195	194	196
Média	0,44	0,39	0,39	0,44	0,44	0,43	1,01	1,01	1,01
Mediana	0,40	0,35	0,35	0,44	0,44	0,43	1,00	1,01	1,00
Moda	0,35	0,30	0,30	0,46	0,44	0,43	1,00	1,003	0,989
Variância	0,048	0,031	0,032	0,0011	0,001	0,0014	0,007	0,003	0,005
Desv.	0,225	0,177	0,181	0,033	0,0317	0,038	0,085	0,059	0,074
CV	49,29	45,01	46,45	7,65	7,15	8,82	8,42	5,78	7,32
Assimetria	1,57	1,22	1,16	0,29	0,155	0,64	2,27	1,40	3,44
Curtose	7,20	4,69	5,26	3,97	2,73	6,58	17,82	9,54	29,32
Mínimo	0,12	0,12	0,07	0,35	0,37	0,31	0,83	0,90	0,88
Máximo	1,55	1,02	1,23	0,58	0,52	0,64	1,65	1,38	1,64
Amplitude	1,43	0,90	1,16	0,23	0,15	0,33	0,82	0,48	0,76
S.W.	1×10^{-10}	$1,7 \times 10^{-9}$	6×10^{-8}	0,0038	0,028**	$4,6 \times 10^{-6}$	4×10^{-12}	1×10^{-8}	0

** significativo a 1%, n: tamanho da amostra, Desv.: desvio padrão, CV: coeficiente de variação, S.W.: valor de probabilidade de Shapiro- Wilk

Variabilidade espacial

A construção do semivariograma experimental permite a identificação da dependência espacial entre os dados coletados em toda a área experimental.

A porosidade total do solo em todas as profundidades, não apresentou estrutura de dependência espacial, sendo considerado como efeito pepita puro (Quadro 3). Segundo Cruz et al., (2010) os dados com estas características tem distribuição completamente aleatória na zona de estudo e independência espacial.

Os demais atributos do solo ajustaram-se aos modelos esférico e exponencial, dessa forma, além da estacionariedade intrínseca, pode-se considerar também atendida a estacionariedade de segunda ordem, na presença de patamar nos modelos ajustados aos semivariogramas (Figuras 3, 4, 5, 6 e 7).

O modelo esférico evidencia uma estrutura de correlação espacial crescente com a distância, até certo ponto (alcance), a partir do qual a semivariância torna-se constante, restringindo a área de influência amostral. Tal condição foi identificada para a D_s na profundidade de 0-3 cm e RP na profundidade de 25-28 cm. Para os demais atributos do solo em todas as profundidades estudadas o modelo ajustado foi o exponencial, que é similar ao esférico, porém, difere deste por convergir gradualmente para o patamar, sem alcançá-lo efetivamente (comportamento assintótico).

O efeito pepita (C_0) foi nulo para a Macro na profundidade de 25-28 cm, para a Micro do solo nas profundidades de 0-3 e 25-28 cm e para a umidade volumétrica do solo nas profundidades de 10-13 e 25-28 cm (Quadro 3). Os demais atributos físicos do solo em todas as profundidades apresentaram um baixo valor de efeito pepita. Segundo Cambardella et al. (1994) o efeito pepita representa a variabilidade experimental completamente aleatória, não estruturada espacialmente. Frequentemente tal efeito é causado pela não-detecção da

estrutura de variabilidade espacial em distâncias menores do que a menor distância de amostragem utilizada.

O alcance prático variou de 3,40 a 23,97 m entre os atributos em estudo (Quadro 3). A RP apresentou baixo valor de alcance prático para a profundidade de 25-28 cm, evidenciando a baixa continuidade estrutural do solo sob cafeeiro. Conforme Journel & Huijbregts (1991), o modelo exponencial atinge o patamar assintoticamente, tendo o alcance prático determinado por 3 vezes o alcance teórico. Valores semelhantes a estes, para a classe dos Latossolos são relatados por Anjos et al., (1994) e Kondo (2003).

A Macro e a θ do solo apresentaram maiores valores de alcance prático para todas as profundidades em estudo, enquanto que a Micro nas profundidades de 10-13 e 25-28 cm apresentaram maiores valores de alcance prático (Quadro 3). O alcance é de fundamental importância para a interpretação dos variogramas, pois indica a distância até onde os pontos amostrais estão correlacionados entre si (Vieira et al., 1983; Vieira, 1997), ou seja, os pontos localizados em uma área cujo raio seja o alcance, são mais semelhantes entre si, do que os separados por distâncias maiores.

Com base nos valores do grau de dependência espacial sugeridos por Cambardella et al. (1994), verificou-se que há forte dependência espacial apenas para a microporosidade na profundidade de 10-13 cm (Quadro 3). Os demais atributos apresentaram moderada dependência espacial. A relação $Co/(Co+C)$ não foi aplicada para a Macro na profundidade de 25-28 cm, para a Micro na profundidade de 0-3 e 25-28 cm e para θ porque o efeito pepita (Co), pois nesses casos são nulos.

Quadro 3. Parâmetros do modelo teórico ajustado para a densidade do solo (Ds), resistência do solo à penetração (RP), umidade volumétrica (θ), porosidade total (PT), macroporosidade (Macro) e microporosidade (Micro) do solo.

Atributo	Prof. (cm)	Modelo	Co	C	Alcance teórico (m)	Alcance prático (m)	(Co+C)	GD (%)
PT	0-3	EPP	-	-	-	-	-	-
	10-13	EPP	-	-	-	-	-	-
	25-28	EPP	-	-	-	-	-	-
Macro	0-3	Exponencial	0.0015	0.0014	4.99	14.98	0.0028	54
	10-13	Exponencial	9×10^{-4}	0.0011	7.00	20.97	0.0019	47
	25-28	Exponencial	0	0.0027	3.99	11.98	0.0026	-
Micro	0-3	Exponencial	0	0.0012	2.08	6.23	0.0012	-
	10-13	Exponencial	$1,5 \times 10^{-4}$	$9,2 \times 10^{-4}$	7.99	23.97	$9,8 \times 10^{-4}$	15
	25-28	Exponencial	0	0.0015	6.39	19.14	0.0013	-
Ds	0-3	Esférico	0.004	0.003	5.16	5.16	0.0073	57
	10-13	Exponencial	0.002	0.0013	2.52	7.50	0.0034	59
	25-28	Exponencial	0.004	0.002	4.99	14.98	0.0054	74
RP	0-3	Exponencial	0.03	0.019	2.55	7.65	0.0478	63
	10-13	Exponencial	0.01	0.0215	2.55	7.64	0.0312	32
	25-28	Esférico	0.02	0.0119	3.40	3.40	0.0328	61
θ	0-3	Exponencial	0.0005	0.0006	4.00	11.98	0.0011	45
	10-13	Exponencial	0	0.001	5.00	14.98	0.00099	-
	25-28	Exponencial	0	0.0016	5.50	16.48	0.0015	-

Prof.= profundidade, Co= efeito pepita, C= contribuição, Co+C= patamar (variância dos dados), GD= grau de dependência espacial, (-) = ausência de valores, EPP= efeito pepita puro

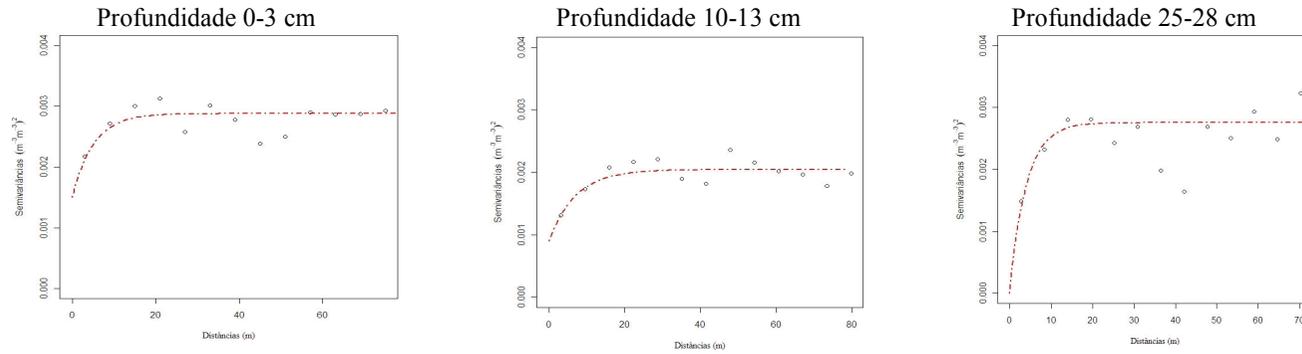


Figura 3. Semivariogramas para a macroporosidade do solo (m³ m⁻³)

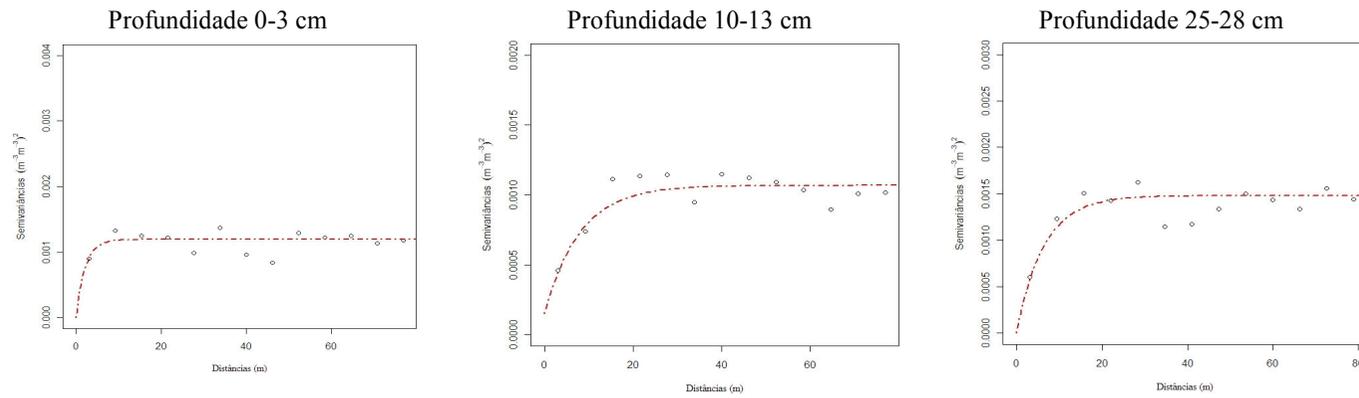


Figura 4. Semivariogramas para a microporosidade do solo (m³ m⁻³)

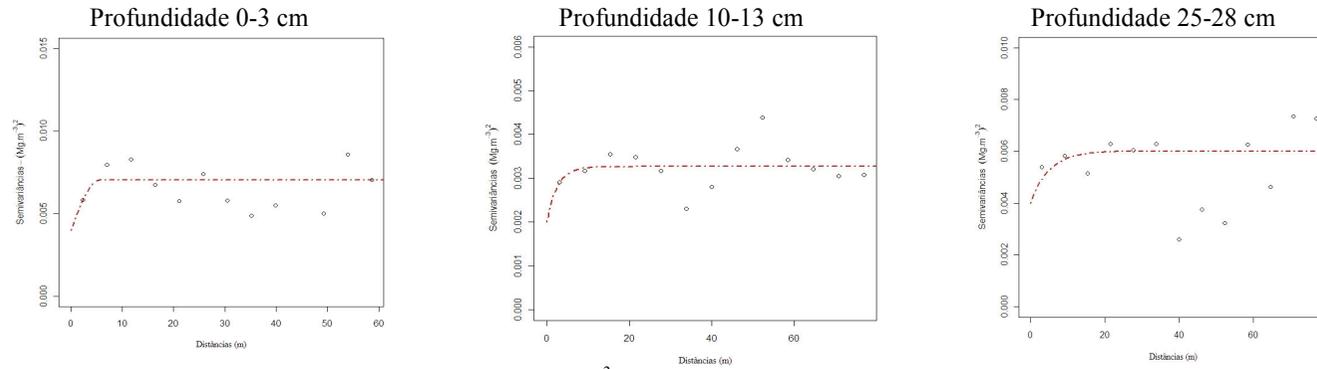


Figura 5. Semivariogramas para a densidade do solo (Mg m^{-3})

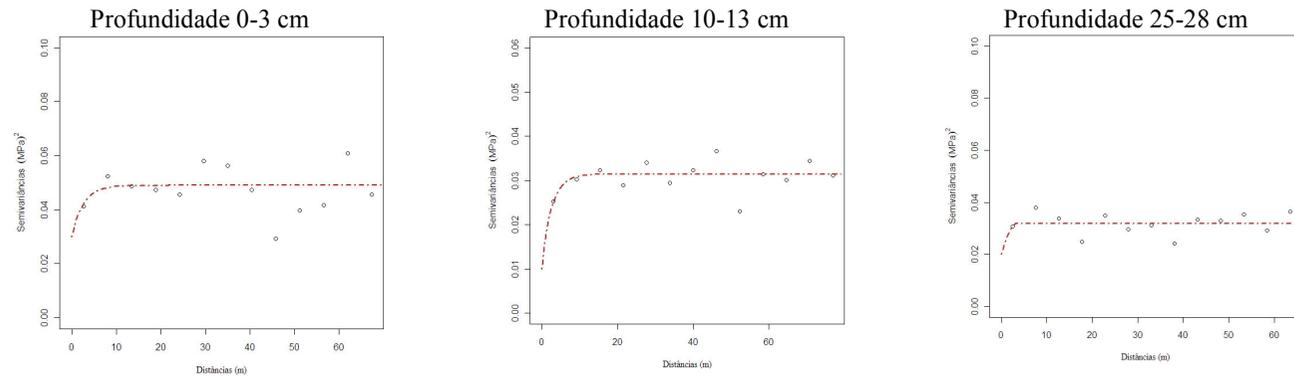


Figura 6. Semivariogramas para a resistência do solo à penetração (MPa)

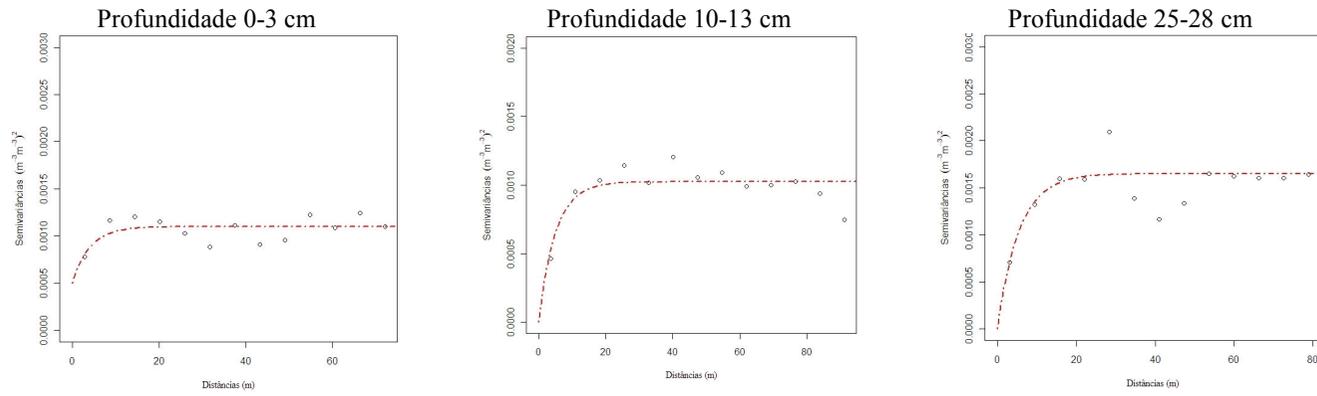


Figura 7. Semivariogramas para a umidade volumétrica do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)

Krigagem

Uma vez conhecido o semivariograma da variável e conhecendo-se sua estrutura de dependência espacial, pode-se realizar a interpolação de valores em qualquer ponto no campo de estudo, sem tendência e com variância mínima, através da krigagem.

Os parâmetros dos modelos ajustados para as variáveis: Macro, Micro, Ds, RP e θ do solo permitiram que fossem obtidos os mapas da distribuição dos atributos físicos do solo por krigagem para o solo cultivado com cafeeiro (Figuras 8, 9, 10, 11 e 12).

A distribuição espacial observada na (Figura 10) indica a predominância de variabilidade extrínseca para a Ds na profundidade de 0-3 cm, causada provavelmente pelo tráfego excessivo de máquinas sob condições de umidade inadequada nos pontos amostrais, reduzindo a macroporosidade e elevando a Ds.

Na Figura 8, a profundidade de 0-3 cm apresentou predomínio de valores de Macro do solo maiores que $0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (região de tonalidade amarelada), em algumas regiões específicas observam-se valores de Macro iguais ou menores que $0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (tonalidade esverdeada). A profundidade de 10-13 cm apresentou predomínio de valores para a Macro do solo de $0,20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (tonalidade laranja), enquanto que na profundidade de 25-28 cm predomina valores de Macro do solo de $0,20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (tonalidade amarela), em algumas regiões específicas apresentam valores de Macro menores que $0,20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (tonalidade esverdeada). Segundo Arshad et al. (1996), valores de macroporosidade menores que 15% restringem o movimento de água no perfil do solo e segundo Kiehl (1979), os solos agrícolas não devem apresentar valores menores que $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de macroporosidade, pois isto acarretaria uma diminuição do desenvolvimento do sistema radicular das culturas.

Na profundidade 0-3 cm (Figura 9), observa-se a predominância de valores para a microporosidade na faixa de $0,45 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ou superior em quase a totalidade da área (tonalidade rosa), a profundidade 10-13 cm apresentou valores de Macro do solo de $0,45 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (tonalidade amarela) e valores menores que $0,40 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (tonalidade verde) delimitadas por regiões específicas no mapa, enquanto que a profundidade de 25-28 cm apresentou predomínio de regiões com valores de Micro do solo de $0,45 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (tonalidade rosa).

Os valores de Ds na profundidade de 0-3 cm (Figura 10), predomina o valor de 1 Mg m^{-3} (tonalidade amarela). Em algumas regiões significativas do mapa nota-se valores acima de 1 Mg m^{-3} (tonalidade laranja e rosa). Segundo Kulli et al. (2003), esse aumento de Ds ocorre devido ao tráfego intenso de máquinas agrícolas. Na profundidade de 10-13 cm verifica-se pequenas áreas com Ds superior a 1 Mg m^{-3} (tonalidade amarela). Na profundidade de 25-28 cm predomina regiões com Ds igual a 1 Mg m^{-3} (tonalidade verde escuro) e algumas regiões significativas com densidade do solo superior a 1 Mg m^{-3} (tonalidade verde claro e amarelo).

Na Figura 11, observa-se que nas três profundidades que a RP predominante compreende valores entre 0,2 a 0,4 MPa (tonalidade verde). Na profundidade de 0-3 cm observa-se pequenas regiões com valores de RP variando de 1,2 a 1,4 MPa (tonalidade rosa), enquanto que nas demais profundidades observa-se pequenas regiões com valores entre 0,4 a 0,8 MPa (tonalidade amarelo e rosa) não sendo, portanto, valores restritivos para o crescimento radicular da cultura cafeeira segundo Arshad et al. (1996).

Pode-se inferir que a alta umidade volumétrica tenha influenciado na capacidade de detecção da RP no presente estudo. De acordo com Assis et al. (2009), não é recomendável a determinação da RP quando o solo se encontra na capacidade de campo, contrariando as recomendações de trabalhos (Henderson, 1989; Arshad et al., 1996). Guerra et al. (2000), em estudo com penetrômetro

hidráulico-eletrônico, constataram que a presença da água inibiu a diferenciação da compactação pelo efeito lubrificante que provoca no solo, deixando-o muito plástico e facilitando à penetração da haste, indicando que, para melhor sensibilidade dos efeitos da carga, devem-se tomar os dados de RP com o solo com baixo teor de água.

Os valores de umidade volumétrica do solo nas três profundidades (Figura 12) predominam o valor de $0,45 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, sendo que nas profundidades 0-3 e 10-13 cm (tonalidade alaranjada) e profundidade 25-28 cm (tonalidade amarela). Na profundidade de 0-3 cm, observam-se algumas regiões com valores de umidade volumétrica superiores a $0,45 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (tonalidade rosa). Nas profundidades de 10-13 e 25-28 cm, observa-se que as regiões com valores de umidade igual e inferiores a $0,40 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (tonalidade verde) indicando que o solo possui menor conteúdo de água no solo.

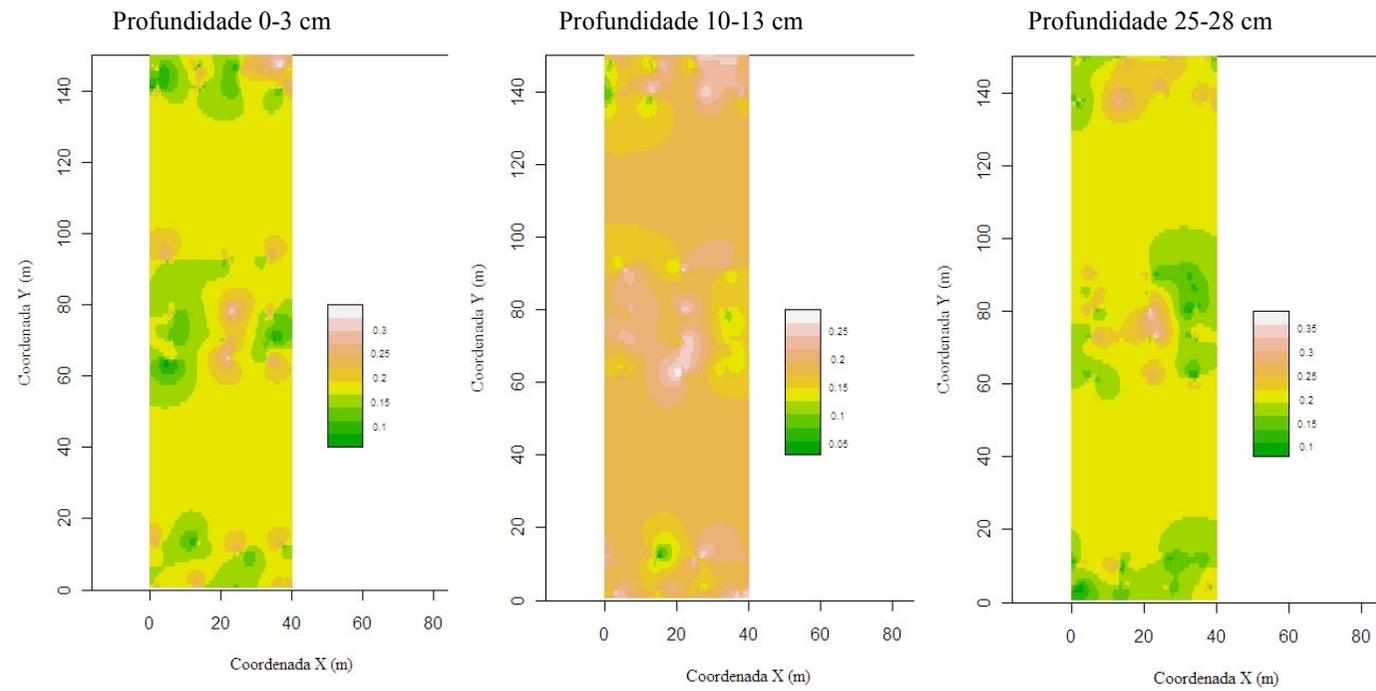


Figura 8. Mapas da macroporosidade do solo ($m^3 m^{-3}$)

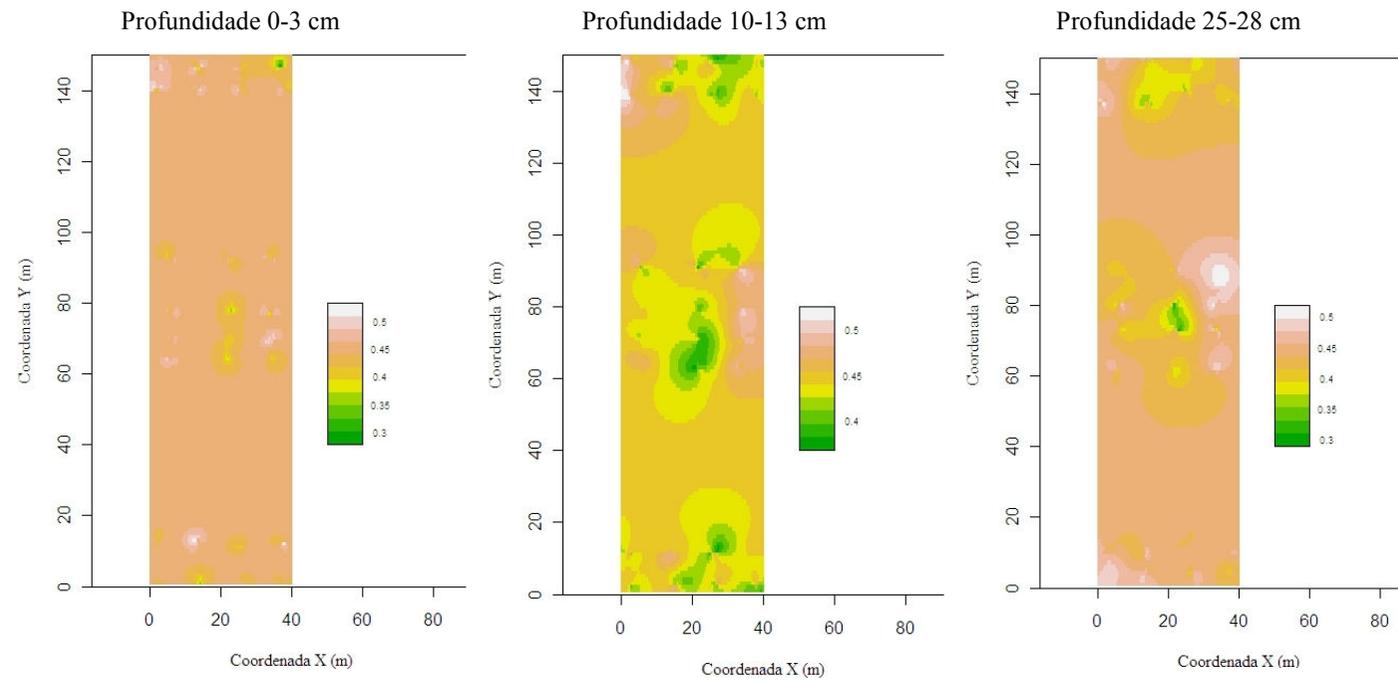


Figura 9. Mapas da microporosidade do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)

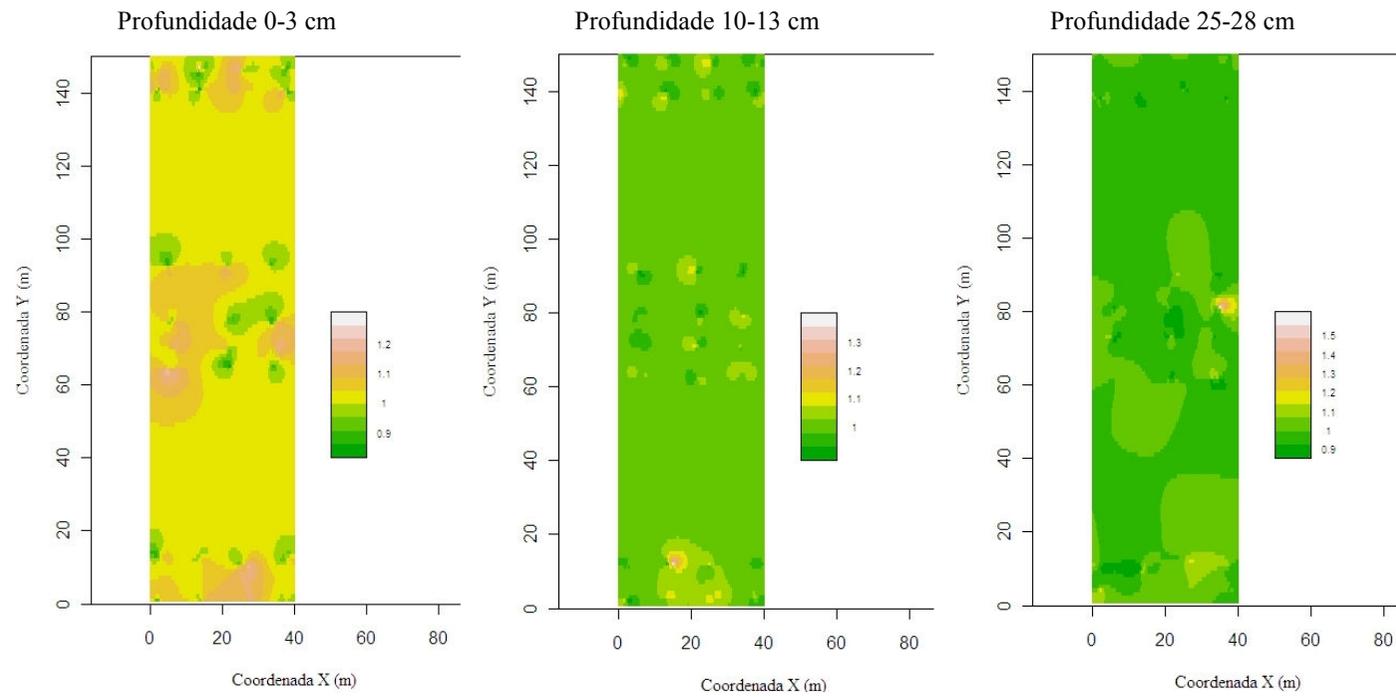


Figura 10. Mapas da densidade do solo (Mg m⁻³)

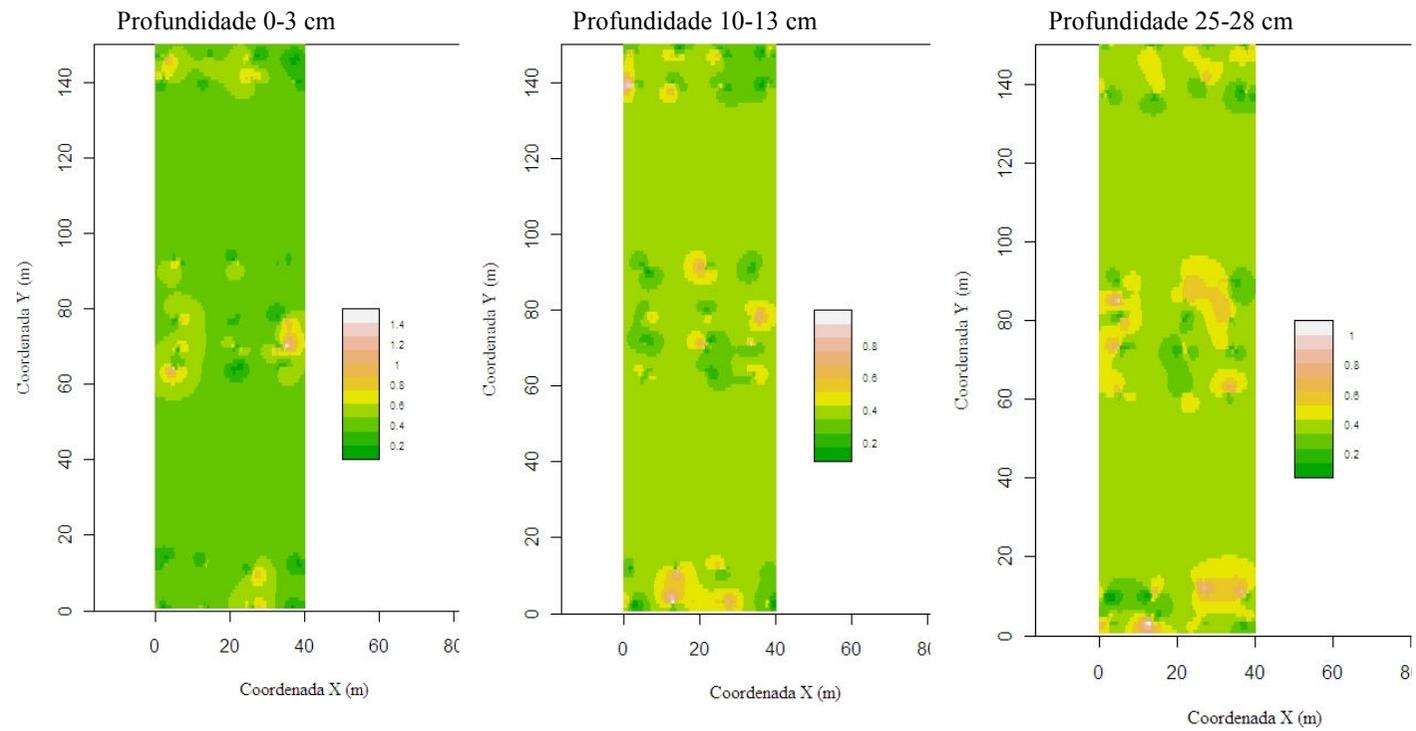


Figura 11. Mapas da resistência do solo à penetração (MPa)

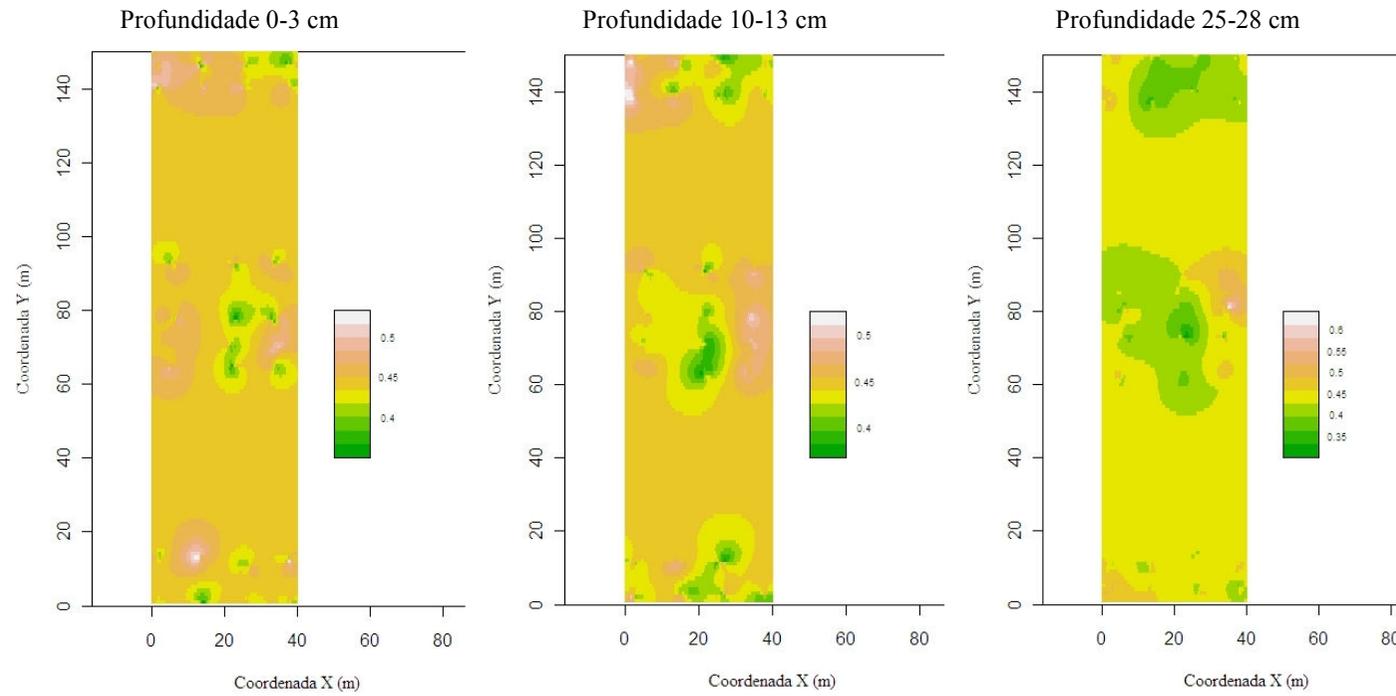


Figura 12. Mapas da umidade volumétrica do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)

4 CONCLUSÃO

1. Todos os atributos físicos do solo apresentaram estrutura de dependência espacial, havendo grande influência de fatores extrínsecos do solo na composição da variabilidade espacial, exceto a porosidade total em todas as profundidades.

2. A técnica de krigagem ordinária demonstrou ser uma alternativa viável para a estimativa de dados em pontos não amostrados na área experimental.

3. A profundidade 0-3 cm apresentou maior impedimento físico do solo, pois apresentou maior densidade do solo e menores valores de macroporosidade do solo.

CONSIDERAÇÃO

Nos trabalhos futuros, pretende-se realizar as amostragens nos locais não amostrados com a finalidade de obter mapas com melhor precisão, pois é de fundamental importância na tomada de decisão da necessidade ou não de intervenção de medidas de controle da compactação em locais específicos, evitando gastos e contribuindo para uma agricultura sustentável.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Consórcio Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento do Café CBP&D/ Café o apoio financeiro para o desenvolvimento do presente estudo. Aos funcionários da Fazenda Experimental da EPAMIG em Patrocínio – MG. O primeiro autor agradece à CAPES a concessão da bolsa de doutorado.

5 REFERÊNCIAS

AJAYI, A. E.; DIAS JÚNIOR, M. S.; CURI, N.; ARAÚJO JÚNIOR, C. F.; SOUZA, T. T. T.; INDA JÚNIOR, A. V. Strength attributes and compaction susceptibility of Brazilian Latosols. *Soil Tillage Res.*, 105:122-127, 2009.

ANJOS, J. T.; UBERTI, A. A. A.; VISSOTO, V. J.; LEITE, G. B.; KRIEGER, M. Propriedades físicas e solos sob diferentes sistemas de uso e manejo. *R. Bras. Ci. Solo*, 18:139-145, 1994.

ARSHAD, M. A. et al. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J. W.; JONES, A. J., ed. *Methods for assessing quality*. Madison, Soil Sci. Soc. Am. J., 1996. p. 123-141.

ASSIS, R. L.; LAZARINI, G. D.; LANÇAS, K. P.; CARGNELUTTI FILHO, A. Avaliação da Resistência do solo à penetração em diferentes solos com a variação do teor de água. *Eng. Agríc.*, 29:558-568, 2009.

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. In: KLUTE, A. ed. *Methods of soil analysis*. 2.ed. Madison, ASA/SSSA. 1986a. p.363-375.

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Particle density. In: KLUTE, A. ed. *Methods of soil analysis*. 2.ed. Madison, ASA/SSSA. 1986b. p.377-382.

BOTTA, G. F.; JORAJURIA, D.; ROSATTO, H.; FERRERO, C. Light tractor traffic frequency on soil compaction in the Rolling Pampa region of Argentina. *Soil Tillage Res.*, 86:9-14, 2006.

BOTTA, G. F.; POZZOLO, O.; BOMBEN, M.; ROSATTO, H.; RIVERO, D.; RESSIA, M.; TOURN, M.; SOZA, E.; VAZQUEZ, J. Traffic alternatives for harvesting soybean (*Glycine max L.*): Effect on yields and soil under a direct sowing system. *Soil Tillage Res.*, 96:145- 154, 2007.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58:1501-1511, 1994.
COSTA NETO, P. L. O. *Estatística*. 10. ed. São Paulo, Edgard Blucher, 1990. 264.

CRESSIE, N. A. C. *Statistics for spatial data*. New York, J. Wiley, 1991. 379 p.

CRUZ, J. S. ASSIS JÚNIOR, R. N. de A., MATIAS, S. S. R.; CAMACHO-TAMAYO, J. H.; TAVARES, R. de C. Análise espacial de atributos físicos e carbono orgânico em Argissolo Vermelho- Amarelo cultivado com cana-de-açúcar. *Ciênc. Agrotec., Lavras*, v. 34, n. 2, p. 271-278, 2010.

DIAS JÚNIOR, M. S. Compactação do solo. In: Novais, R. F.; ALVAREZ, V., H. V. & SCHAEFER, C. E. G. R. *Tópicos em Ciência do solo*. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de ciência do solo, 2000, v. 1. p. 55-94.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUARIA - EMBRAPA
Centro Nacional de Pesquisas de Solos. *Manual de métodos de análises de solo*. 2. ed. Brasília, Produção de Informação, 1997. 212 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUARIA – EMBRAPA.
Centro Nacional de Pesquisas de Solos. *Sistema brasileiro de classificação de Solos*. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 2006. 306 p.

FERREIRA, D. F. *Estatística básica*. 2. ed. Lavras, UFLA, 2009. 664 p.

FERREIRA, D.F. Análises estatísticas por meio do SISVAR para Windows 4. 0. In: REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE INTERNACIONAL DE BIOMETRIA, 45., 2000, São Carlos. *Anais*. São Carlos, Universidade Federal de São Carlos, 2000. p. 255-258.

FILHO, J. A.; NEGREIROS, R. F. D.; ASSIS JÚNIOR, R. N.; MOTA, C. A. Amostragem e variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho em Mossoró, RN. R. Bras. Ci. Solo, 31: 415- 422, 2007.

GERMAN ADVISORY COUNCIL ON GLOBAL CHANGE. World in transition: the threat to soils. Bonn: Economica Verlag GmbH. 1995. 268 p. (Annual Report/ German Advisory Council on Global Change; 1994).

GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R.; ANTONIO, A. M.; ROSA, S. C. D. Análise geoestatística do teor de água do solo sob sistema de cultivo em plantio direto. Sci. Agric., 63:341-350, 2006.

GUERRA, S.P.S.; LANÇAS, K.P.; MAZETTO, F.R. Utilização do GPS e do penetrômetro hidráulico-eletrônico para localização de pontos e avaliação da compactação do solo. In: REUNIÃO CIENTÍFICA EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS DO LAGEADO, 7., Botucatu, 2000. Anais. Botucatu, UNESP, 2000. p.85.

HENDERSON, C.W.L. Using a penetrometer to predict the effects of soil compaction on the growth and yield of wheat on uniform, sandy soils. J. Agric. Res., 40:497-508, 1989.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. Applied Geostatistics. An introduction to. New York: Oxford University Press, 1989. 561 p.

JORAJURÍA, D.; DRAGHI, L. The distribution of soil compaction with depth and the response of a perennial forage crop. J. Agric. Eng. Res., 66:261–265, 1997.

JOURNEL, A. G.; HUIJBREGTS, C. J. Mining Geostatistics. 5.ed. London: Academic Press, 1991. 600p.

KIEHL, E. L. Manual de Edafologia. São Paulo, Ceres, 1979. 262p.

KITAMURA, A. E.; CARVALHO, M. P.; LIMA, C.G. R. Relação entre a variabilidade espacial das frações granulométricas do solo e a produtividade do feijoeiro sob plantio direto. R. Bras. Ci. Solo, 31:361-369, 2007.

KONDO, M. K. Variabilidade espacial do comportamento compressivo do solo e mapas de trafegabilidade na cultura do cafeeiro irrigado. 2003. 166p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2003.

KULLI, B.; GYSI, M.; FLUHLER, H. Visualizing soil compaction based on flow pattern analysis. Soil Till. Res., 70:29-40, 2003.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. Adv. Soil Sci., 1:277- 294, 1985.

LI, Y. X.; TULLBERG, J. N.; FREEBAIRN, D. M. Wheel traffic and tillage effects on runoff and crop yield. Soil Till. Res., 97:282-292, 2007.

LIMA, C. L. R. Compressibilidade de solos versus intensidade de tráfego em um pomar de laranja e pisoteio animal em pastagem irrigada. 2004. 70f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

LIMA, J. S. S.; OLIVEIRA, P. C.; OLIVEIRA, R. B., XAVIER, A. C. Métodos Geoestatísticos no estudo da resistência do solo à penetração em trilha de tráfego de tratores na colheita de madeira. R. Arvore 32:931-938, 2008.

RIBEIRO JÚNIOR, P. J. Métodos Geoestatísticos no estudo da variabilidade espacial de parâmetros do solo. 1995. 91 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1995.

RIBEIRO JÚNIOR, P. P.; DIGGLE, P. P.; GeoR: a package for Geostatistical analysis. R- News, Rochester, 1:15-18, 2001.

ROSOLEM, C.A. FERNANDEZ, E.M.; ANDREOTTI, M.; CRUSCIOL, C.A.C. Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. Pesq. Agropec. Bras., 34:821-828, 1999.

SCHÄFFER, B.; ATTINGER, W.; SCHULIN, R. Compaction of restored soil by heavy agricultural machinery - Soil physical and mechanical aspects. Soil Till. Res., 93: 28-43, 2007.

SERVADIO, P.; MARSILIA, A.; VIGNOZZI, N.; PELLEGRINI, S.; PAGLIAI, M. Effects on some soil qualities in central Italy following the passage of four wheel drive tractor fitted with single and dual tires. Soil Till. Res., 84:87-100, 2005.

SILVA, E.M.; MALVINO, S.S.A.B. Análise climática do município de Patrocínio (MG). Caminhos da Geografia, v. 10, p. 93-108, 2005.

SILVA, R. B.; DIAS JÚNIOR, M.S.; SILVA, F. A. M.; FOLE, S. M. O tráfego de máquinas agrícolas e as propriedades físicas, hídricas e mecânicas de um Latossolo dos Cerrados. R. Bras. Ci. Solo, 27:973-983, 2003.

SIQUEIRA, G.M.; VIEIRA, S.R.; DECHEN, S.C.F. Variabilidade espacial da densidade e porosidade de um Latossolo Vermelho Eutroférico sob semeadura direta por vinte anos. Bragantia, 68:751-759, 2009.

SOUZA, L. C. Variabilidade espacial da salinidade de um solo aluvial no semi-árido paraibano. 1999. 77 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1999.

SOUZA, Z.M.; CAMPOS, M.C.C.; CAVANCANTE, I.H.L.; MARQUES JÚNIOR, J. CESARIN, L. G.; SOUZA, S. R. Dependência espacial da

resistência do solo a penetração e do teor de água do solo sob cultivo de cana-de-açúcar. *Ciência Rural* 36:128-134, 2006.

STOLF, R. Teoria de testes experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 15:229-235, 1991.

TARAWALLY, M.A.; MEDINA, H.; FRÓMETA, M.E.; ITZA, C.A. Field compaction at different soil-water status: effects on pore size distribution and soil water characteristics of a Rhodic Ferralsol in Western Cuba. *Soil Till. Res.*76:95-103, 2004.

TORMENA, C.A.; ROLOFF, G.; SÁ, J.C.M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem preparo inicial e tráfego. *R. Bras. Ci. Solo*, 22:301-309, 1998.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 22:573-581, 1998.

TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; UEHARA, G. Application to Geoestatistic to spatial studies of soil properties. *Adv. Agron.*, 38:45-94, 1985.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudo de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., H.V. & SCHAEFER, C.E.G.R. *Tópicos em Ciência do Solo*. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1, p. 1- 55.

VIEIRA, S. R. Variabilidade especial de argila, silte e atributos químicos em uma parcela experimental de um Latossolo roxo de Campinas (SP). *Bragantia*, 56:181-190, 1997.

VIEIRA, S.R.; HATFIELD, J.L.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. *Hilgardia*, 51:1-75, 1983.

WARRICK, A.W. & NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HilleL, D., ed. *Application of soil physics*. New York, Academic Press, 1980 p.319-344.

CAPÍTULO 4

VARIABILIDADE ESPACIAL DA PRESSÃO DE PRECONSOLIDAÇÃO E UMIDADE VOLUMÉTRICA DE UM LATOSSOLO VERMELHO AMARELO

Normas da Revista Brasileira de Ciência do Solo (versão preliminar)

RESUMO

O tráfego intenso de máquinas agrícolas sobre solos cultivados com café pode causar alterações significativas na estrutura do solo. Este estudo teve como objetivos: a) avaliar a variabilidade espacial da pressão de preconsolidação (σ_p) e umidade volumétrica (θ) de um Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) e identificar as estruturas de dependência espacial através da construção de semivariogramas através da krigagem ordinária; b) verificar no mapa a profundidade com maior capacidade de suporte de carga (CSC) do solo; c) dar suporte a tomada de decisão no manejo do maquinário agrícola da cultura cafeeira e utilizar esses mapas para a logística de manejo de tráfego de máquinas. O experimento foi conduzido num LVA textura muito argilosa na Fazenda da EPAMIG (Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais), em Patrocínio-MG. A amostragem foi realizada após a demarcação de uma malha retangular (40 m x 150 m), onde foram coletadas amostras indeformadas em anéis metálicos de 2,54 cm de altura por 6,30 cm de diâmetro com auxílio do amostrador tipo Uhland em 28 trincheiras. Cada trincheira possui três degraus que correspondem as profundidades de 0-3, 10-13 e 25-28 cm e as dimensões dos degraus foram de 2,0 x 1,5 m, onde coletaram-se sete amostras indeformadas (disposta em forma matricial) para cada degrau, totalizando 588 amostras. A σ_p e θ do solo apresentaram estrutura de dependência espacial. A profundidade de 0-3 cm apresentou maior CSC do solo indicando que esta profundidade está mais compactada em relação às demais profundidades. Com base nos mapas da σ_p , o trator e a colhedora não devem trafegar na área para a umidade igual a $0,45 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, pois o solo possui CSC de 200 kPa nesta condição. Se essa condição for desrespeitada, a compactação adicional poderá ocorrer. Para o tráfego do trator, deve-se esperar por um período, para que a θ atinja um valor menor que $0,36 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, enquanto que para o tráfego da colhedora deve-se esperar a θ atingir valor menor que $0,30 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

Termos de indexação: compactação, capacidade de suporte de carga, umidade do solo.

SUMMARY: SPATIAL VARIABILITY OF THE PRECONSOLIDATION PRESSURE AND SOIL MOISTURE OF A RED-YELLOW LATOSOL

The intensive agricultural machinery traffic of soils under coffee crops may cause significant changes in the soil structure. This study had as an objective: a) to evaluate the spatial variability of the preconsolidation pressure (σ_p) and volumetric water content (θ) of a Red-Yellow Latosol (Oxisol) and to identify the structures of spatial dependence through the construction of semivariograms using ordinary kriging; b) to verify the depth on the map with greater load bearing capacity; c) to support decision making in the management of agricultural machinery of coffee plantation and use these maps for logistics management traffic machine. The experiment was carried out in a Red- Yellow Latosol (Oxisol), very clayey, at the EPAMIG Research Farm in Patrocínio, State of Minas Gerais, Brazil. The undisturbed soil sampling was performed after the demarcation of a rectangular grid (40 m x 150 m), where soil samples were collected in aluminum rings with 6,5 cm diameter and 2,5 cm height using Uhland sampler in the 28 trenches. Each trench has three steps that correspond to depths 0-3, 10-13 and 25-28 cm and the dimensions of the steps were 2,0 x 1,5 m, where seven undisturbed soil samples were collected (in a matrix form) for each step, totalizing of 588 samples. The σ_p and θ showed spatial structure dependence. The depth of 0-3 cm showed higher load-bearing capacity indicating that this depth is more compacted compared to other depths. Based on the σ_p maps, the Massey Ferguson tractor model 275 and the KTR Advance Combine should not to traffic in the area for water content of $0,45 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ because the soil has load-bearing capacity of 200 kPa. If this condition is not respected, the additional compaction will occur. For the tractor traffic line, one should wait for a period so that the water content reaches values less than $0,36 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, while for the combine traffic line one should wait the water content to reaches values less than $0,30 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

Index terms: compactation, load bearing capacity, soil moisture.

1 INTRODUÇÃO

As modernas técnicas de cultivo e colheita mecanizada na cultura cafeeira têm promovido mudanças no comportamento mecânico do solo, conseqüentemente influenciando a produção e o equilíbrio dinâmico dos recursos naturais (Kondo, 2003; Gontijo, 2008).

O uso de máquinas agrícolas cada vez maiores e mais pesadas, sem o controle da pressão aplicada e da umidade do solo são as principais causas da compactação resultando em danos às lavouras com conseqüente redução da produção das culturas, (Dias Júnior & Pierce, 1996; Araújo Júnior et al., 2011).

No Brasil, a variabilidade espacial da pressão de preconsolidação em lavoura cafeeira foi estudada primeiramente por Kondo (2003), o qual propôs neste estudo mapas de trafegabilidade do solo. O autor concluiu que é possível a obtenção de mapas de trafegabilidade e sua utilização na previsão da distribuição da capacidade de suporte de carga em áreas cultivadas com cafeeiro.

O conhecimento da capacidade de suporte de carga é importante na agricultura de precisão, pois os mapas de trafegabilidade, por exemplo, pode dar suporte à tomada de decisão de quando realizar uma determinada operação mecanizada para cada situação específica sem promover compactação do solo.

A pressão de preconsolidação (σ_p) é definida como sendo a maior pressão que o solo já suportou no passado (Dias Júnior & Pierce, 1996) e é uma medida da capacidade de suporte de carga do solo. A σ_p , é obtida a partir da curva de compressão do solo, que é obtida pela representação da densidade do solo no eixo y e do logaritmo da pressão aplicada ao solo no eixo x. A aplicação no solo de pressões menores do que a σ_p causa deformações elásticas, portanto recuperáveis, enquanto que a aplicação de pressões maiores do que σ_p causa deformações plásticas e não recuperáveis (Holtz & Kovacs, 1981). Essa propriedade tem sido utilizada por diversos autores como indicador de

sustentabilidade da estrutura do solo em uma dada umidade e/ou potencial matricial (Kondo & Dias Júnior, 1999; Imhoff et al., 2001; Silva et al., 2003; Oliveira et al., 2003; Dias Júnior et al., 2005).

A suscetibilidade do solo à compactação torna-se crítica todas as vezes que as pressões aplicadas ao solo excederem a sua pressão de preconsolidação, a qual é função da umidade (Dias Júnior & Pierce, 1995; Kondo, 1998). Em geral, solos secos possuem maior capacidade de suporte de carga, tornando o processo de compactação de menor importância. Entretanto quando o solo está úmido, sua capacidade de suporte de carga é menor, tornando-o vulnerável ao processo de compactação (Larson et al., 1980; Kondo & Dias Júnior, 1999).

Dessa forma, o monitoramento da variação da pressão de preconsolidação em função da umidade poderia ser usado como subsídio na tomada de decisão sobre quando executar ou não uma operação mecanizada ou até mesmo de trafegar ou não uma determinada área (Kondo, 2003). O conhecimento da variabilidade espacial da pressão de preconsolidação do solo contribui para o manejo adequado de máquinas agrícolas, propiciando a determinação de zonas que necessitem de manejo diferenciado.

Para o estudo da variabilidade espacial e geração dos mapas de trafegabilidade do solo cultivado com cafeeiro pode-se utilizar a Geoestatística, que é uma aplicação da teoria de processos estocásticos na estimação da estrutura de fenômenos indexados com coordenadas espaciais. Quando um fenômeno exibe certa estrutura espacial diz-se que a mesmo está regionalizado. Se $Z(x)$ indica o valor no ponto de coordenadas espaciais x de uma variável Z qualquer que caracteriza este fenômeno, diz-se que $Z(x)$ é uma variável regionalizada (Matheron, 1971).

Segundo Cambardella et al. (1994) a variabilidade dos atributos físicos do solo pode ser de origem intrínseca ou extrínseca, a variabilidade intrínseca possui forte dependência espacial, sendo causada por alterações naturais no solo,

notadamente aquelas de origem pedogenética, como: material de origem, intemperismo de minerais, acúmulo de matéria orgânica, entre outros. A variabilidade extrínseca possui menor dependência espacial, sendo causada por alterações no uso do solo, tais como: práticas culturais, espécie vegetal explorada, erosão, compactação, etc.

O uso da Geoestatística no estudo da variabilidade espacial dos atributos físicos e mecânicos do solo permite a identificação da dependência espacial dos dados, possibilitando o desenvolvimento de mapas de distribuição destes atributos no campo, através da técnica de krigagem, que faz uso da interpolação com estimador não tendencioso e de variância mínima (Trangmar et al., 1985, Journel & Huijbregts, 1991).

O semivariograma é um conceito fundamental para a Geoestatística e é também uma ferramenta de grande importância nas aplicações em Ciência dos Solos. Segundo Vieira (2000), todos os cálculos de Geoestatística dependem do modelo estimado (ajustado) do semivariograma. Por isso, se o modelo ajustado não possuir boa qualidade de estimação então a krigagem (os mapas) estarão também com qualidade comprometida. O alcance é de fundamental importância para a interpretação dos variogramas, pois indica a distância até onde os pontos amostrais estão correlacionados entre si (Vieira et al., 1983; Vieira, 1997), ou seja, os pontos localizados em uma área cujo raio seja o alcance, são mais semelhantes entre si do que os separados por distâncias maiores.

Os objetivos deste estudo foram: a) avaliar a variabilidade espacial da pressão de preconsolidação e umidade volumétrica de um Latossolo Vermelho Amarelo sob lavoura cafeeira e identificar as estruturas de dependência espacial através da construção de semivariogramas através da krigagem ordinária; b) verificar no mapa a profundidade com maior capacidade de suporte de carga (CSC) do solo; c) dar suporte a tomada de decisão no manejo do maquinário

agrícola da cultura cafeeira e utilizar esses mapas para a logística de manejo de tráfego de máquinas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em uma área da Fazenda da EPAMIG (Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais) sob o cultivo de café (*Coffea arabica* L.), implantada em fevereiro de 1999, localizada no município de Patrocínio, MG. Antes da implantação da lavoura cafeeira a área foi utilizada com pastagem. A área total do experimento é de 6000 m², com cafeeiros implantados no espaçamento de 3,80 x 0,70 m. A área encontra-se a 18° 59' 31" S de latitude sul e a 46° 59' 31" W de longitude, a oeste de Greenwich e a uma altitude de 934 m.

O município de Patrocínio está inserido em uma área geologicamente complexa, conhecida como Arco da Canastra, que separa as bacias sedimentares do São Francisco e do Paraná. O clima da região, segundo a classificação de Koppen, é do tipo Aw, com duas estações bem definidas, inverno seco e verão chuvoso, com precipitação média anual de 1620,1 mm (Silva & Malvino, 2005).

A vegetação predominante da região é do tipo cerrado. O relevo é plano a suave ondulado, com declividade média de 3%, sendo o solo classificado como um Latossolo Vermelho Amarelo (Embrapa, 2006) de textura muito argilosa.

O controle de plantas daninhas foi realizado com a aplicação de herbicida pré-emergência com ingrediente ativo oxyfluorfen. O controle fitossanitário foi realizado uma vez ao mês, utilizando pulverizador ARBUS 2000® com aproximadamente 2600 kg, quando completamente carregado. A adubação de cobertura, aplicada de 40 em 40 dias no período chuvoso, foi realizada utilizando-se uma adubadora modelo Fertinox; quando completamente carregada, tem capacidade para 600 kg. Em todas as operações agrícolas foi

utilizado um trator marca Massey Ferguson, modelo 275 potência de 45 kW no motor (61 cv), pneus traseiros R1 18.4-30 com pressão de inflação de 96,5 kPa e dianteiros R1 7.50-16 com pressão de inflação de 240 kPa, massa 3900 kg. A colheita é realizada com uma colhedora Jacto KTR Advance com massa de 6850 kg, pneus - G2 10x24", 10 lonas, com pressão de 276 kPa.

Amostragem

A amostragem foi realizada após a demarcação de uma malha retangular (40 m x 150 m), onde foram coletadas amostras indeformadas em anéis metálicos de 2,54 cm de altura por 6,30 cm de diâmetro com auxílio do amostrador tipo Uhland em 28 trincheiras (Figura 1), cada trincheira possui três degraus que correspondem as profundidades de 0-3, 10-13 e 25-28 cm (Figura 2), as dimensões dos degraus foram de 2,0 x 1,5 m, coletaram-se sete amostras indeformadas (dispostas em forma matricial) para cada degrau, totalizando 588 amostras. As amostras foram revestidas por filme plástico e parafina com a finalidade de preservar até a realização das análises físico-hídricas.

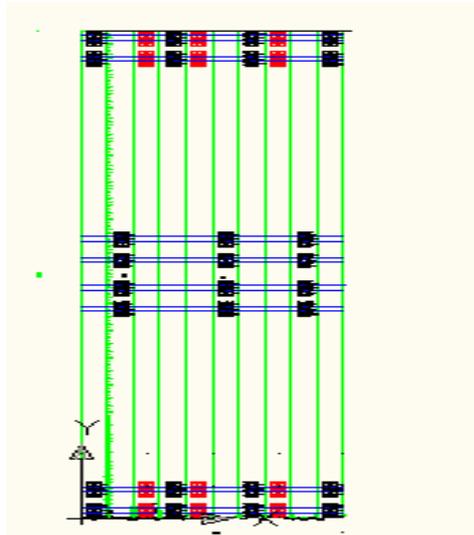


Figura 1. Distribuição das trincheiras na lavoura cafeeira, em que a cor preta indica sub-regiões amostradas, a cor verde indica as linhas do cafeeiro e a cor vermelha indica sub-regiões de futuras amostragens

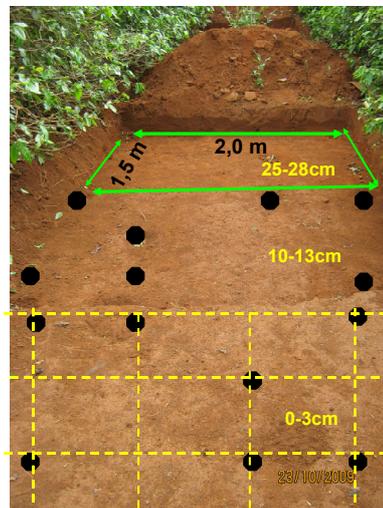


Figura 2. Trincheira com os três degraus que correspondem às profundidades 0-3, 10-13 e 25-28 cm

Análises de laboratório

Para a realização do ensaio de compressão uniaxial as amostras indeformadas foram inicialmente equilibradas no potencial matricial de 6 kPa que corresponde a capacidade de campo desse solo. A seguir essas amostras foram pesadas para a determinação da umidade gravimétrica (U) do solo. Em seguida as amostras foram submetidas ao ensaio de compressão uniaxial, usando consolidômetro pneumático Terraload S-450 (Durham Geo Enterprises, USA), conforme descrito por Dias Júnior (1994).

As amostras indeformadas foram mantidas dentro da célula de compressão e submetidas às pressões de 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1600 kPa. Cada pressão foi aplicada até obter 90% da deformação máxima fosse atingida (Taylor, 1948), sendo então aplicadas sucessivamente às pressões crescentes, sem efetuar o descarregamento das pressões previamente aplicadas. A variação da densidade do solo foi monitorada através de um extensômetro. Após o ensaio essas amostras foram secas em estufa, a 105°C por 48 horas, para a determinação da densidade do solo (D_s), conforme EMBRAPA (1997). A umidade volumétrica (θ) do solo foi calculada pela seguinte expressão $\theta = (U \times D_s)$.

A curva de compressão do solo foi obtida ajustando-se graficamente, para cada amostra, o logaritmo da pressão aplicada (base 10) no eixo das abcissas e a densidade do solo no eixo das ordenadas. Os valores de pressão de preconsolidação (σ_p) foram determinados de acordo com Dias Júnior & Pierce (1995).

Análise estatística descritiva e análise geoestatística

Para a análise estatística descritiva, inicialmente realizou-se um estudo exploratório de dados, com o programa estatístico Sisvar (Ferreira, 2000), utilizando cálculos de medidas de localização (média, mediana, moda, mínimo, máximo), medidas de dispersão (amplitude, desvio padrão, variância, coeficiente de variação) e medida de distribuição (assimetria e curtose), além do teste de probabilidade de Shapiro-Wilk. Dessa maneira verificou-se a normalidade dos atributos avaliados, que segundo Diggle & Ribeiro (2000), não é requisito indispensável, sendo que aqueles atributos que aproximam da distribuição normal proporcionam melhores previsões, quando associadas às técnicas de Geoestatística.

Para a análise do CV usou-se a classificação de Warrick & Nielsen (1980), com variabilidade baixa para valores menores de 12%, média para valores entre 12 e 60% e alta para valores maiores de 60%.

Para a análise da curtose a qual é representada na literatura vigente por a_4 ou b_2 , usou-se a classificação de Ferreira (2000), sendo o valor de $a_4 = 3$ é denominada de mesocúrtica, quando os valores de $a_4 > 3$ representam as distribuições leptocúrticas e valores de $a_4 < 3$ representam as distribuições platicúrticas.

Para a realização da análise Geoestatística, foi utilizado o programa R, por meio do pacote geoR, desenvolvido por Ribeiro Júnior & Diggle (2001). Para uma adequada análise espacial dos dados, considerou-se que cada ponto amostrado possui uma variável aleatória distinta, gerando um processo estocástico indexado no espaço (Cressie, 1991). A condição de estacionariedade intrínseca foi assumida para análise, a qual requer apenas a existência e estacionariedade do semivariograma, sem nenhuma restrição quanto à existência de variância finita (Vieira, 2000).

A partir desta hipótese, construíram-se os semivariogramas experimentais para os dados coletados nos 588 pontos amostrais. Os valores de semivariâncias foram estimados pela equação:

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

em que $N(h)$ é o número de pares de valores medidos $Z(X_i)$, $Z(X_i + h)$, separados por um vetor h (Journel & Huijbregts, 1978). O gráfico de $\hat{\gamma}(h)$ em função dos valores correspondentes de h , chamado semivariograma, é uma função do vetor h , portanto, dependem de ambos, magnitude e direção de h .

Após os cálculos das semivariâncias, foram ajustados os modelos teóricos do tipo esférico e exponencial pelo método de quadrados mínimos ponderados. Após a escolha do modelo do semivariograma, foram realizadas interpolações usando o método da krigagem ordinária, para prever e mapear os valores dos atributos em estudo.

O modelo esférico evidencia uma estrutura de correlação espacial crescente com a distância, até certo ponto (alcance), a partir do qual a semivariância torna-se constante, restringindo a área de influência amostral. Conforme Journel & Huijbregts (1991), o modelo exponencial atinge o patamar assintoticamente, tendo o alcance prático determinado por 3 vezes o alcance teórico.

Para a análise da relação $Co/(Co+C)$ que mede o grau de dependência espacial das variáveis do solo, usou-se a classificação de Cambardella et al. (1994), se a relação for $\leq 25\%$, a variável é considerada como fortemente dependente; entre 25 e 75%, a variável é considerada moderadamente dependente; e se a relação for $> 75\%$, a variável é considerada fracamente dependente.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Estatística descritiva

A análise com estatísticas descritivas clássicas apresentadas no (Quadro 1), e a sua discussão abaixo, se prestam apenas para permitir comparação, se desejado, com as características de outras massas de dados, não constituindo objeto de subsídios à inferências estatísticas que levam em consideração a dependência espacial. A análise fornecida pelos semivariogramas é mais adequada para subsidiar inferências sobre a estrutura de dependência espacial, capacidade essa que não possuem as estatísticas descritivas clássicas.

Considerando todas as profundidades, observa-se que a umidade volumétrica do solo apresentou um baixo coeficiente de variação, enquanto que a pressão de preconsolidação apresentou um coeficiente de variação médio de acordo com o critério de Warrick & Nielsen (1980) (Quadro 1).

A pressão de preconsolidação e umidade volumétrica do solo apresentaram distribuição assimétrica à direita. De acordo com Ferreira (2009) a distribuição assimétrica à direita ocorre quando a média aritmética é aumentada por algum valor extraordinariamente elevado, então a média > mediana > moda. A mediana pode, em algumas ocasiões, ser mais vantajosa que a média pelo fato de não ser afetada pelos extremos. Se as distribuições são assimétricas, a mediana pode ser uma melhor medida de tendência central (Ferreira, 2009).

A umidade volumétrica na profundidade de 10-13 cm de acordo com Ferreira (2000) apresentou distribuição platicúrtica, isto significa que a distribuição possui alta variabilidade, enquanto que a umidade volumétrica nas profundidades de 0-3 e 25-28 cm e σ_p em todas as profundidades apresentaram distribuição leptocúrticas cuja distribuição é concentrada em torno da média

(homogeneidade), o ideal seria a distribuição mesocúrtica, a distribuição de freqüências é a própria distribuição normal.

A umidade volumétrica nas profundidades de 10-13 e 25-28 cm apresentaram os mesmos valores de média, mediana e moda, exceto a profundidade 0-3 cm. Apenas a umidade volumétrica do solo na profundidade de 10-13 cm apresentou uma distribuição normal com 1% de probabilidade pelo teste de Shapiro- Wilk (Quadro 1). O valor da estatística de Shapiro-Wilk (S.W.) para testar a normalidade foi apresentado apenas para permitir comparação, se desejado, com as características de outras massas de dados, não constitui objeto de subsídios às inferências estatísticas.

De acordo com Cressie (1991), a normalidade dos dados não é uma exigência da Geoestatística, mas é conveniente apenas que, no gráfico de distribuição normal, o atributo não apresente extremidades da distribuição muito alongadas, o que poderia indicar a presença de dados discrepantes (outliers), o que poderia comprometer as análises.

O desvio padrão, o CV, amplitude, mínimo e máximo fornecem a idéia da magnitude de variabilidade dos atributos físicos dos solos, porém, nada informa sobre a estrutura de dependência espacial destes atributos, o que só é possível por meio de técnicas geoestatísticas, em especial o semivariograma (Souza, 1999).

Quadro 1. Estatística descritiva da pressão de preconsolidação (σ_p), umidade volumétrica do solo (θ) em três profundidades

Parâmetro Estatístico	θ ($m^3 m^{-3}$)			σ_p (kPa)		
	Profundidade (cm)			Profundidade (cm)		
	0-3	10-13	25-18	0-3	10-13	25-18
n	195	194	196	195	194	196
Média	0,44	0,44	0,43	162,40	147,20	152,33
Mediana	0,44	0,44	0,43	154,49	138,80	140,72
Moda	0,46	0,44	0,43	152,12	134,76	132,72
Variância	0,0011	0,001	0,0014	2654,23	2900,82	2952,41
Desv.	0,033	0,0317	0,038	51,52	53,86	54,34
CV	7,65	7,15	8,82	31,72	36,59	35,67
Assimetria	0,29	0,15	0,63	1,42	2,04	1,10
Curtose	3,97	2,73	6,58	6,91	10,83	5,13
Mínimo	0,35	0,37	0,31	5,83	6,53	13,86
Máximo	0,58	0,52	0,64	366,41	417,21	373,68
Amplitude	0,23	0,15	0,33	7,0	7,62	6,62
S.W.	0,0038	0,028*	$4,6 \times 10^{-6}$	8×10^{-11}	0	$3,2 \times 10^{-3}$

* significativo a 1% de probabilidade de S.W., n- tamanho da amostra; Desv: desvio padrão, CV- coeficiente de variação, S.W- valor de probabilidade de Shapiro- Wilk.

Variabilidade espacial

A pressão de preconsolidação e umidade volumétrica do solo apresentaram dependência espacial (Quadro 2), sendo então ajustado os modelos esférico para a pressão de preconsolidação nas profundidades 0-3 e 10-13 cm e o modelo exponencial para a profundidade de 25-28 cm e para a umidade volumétrica do solo em todas as profundidades. Dessa forma, além da estacionariedade intrínseca, pode-se considerar também atendida a estacionariedade de segunda ordem e a presença de patamar nos modelos ajustados aos semivariogramas.

A pressão de preconsolidação apresentou um elevado efeito pepita para todas as profundidades analisadas quando comparada à umidade volumétrica do

solo (Quadro 2). O efeito pepita (Co) representa a variabilidade experimental completamente aleatória, não estruturada espacialmente. Frequentemente tal efeito é causado pela não-detecção da estrutura de variabilidade espacial em distâncias menores do que a menor distância de amostragem utilizada (Vieira, 2000).

O alcance prático para a pressão de preconsolidação nas profundidades de 0-3, 10-13 e 25-28 cm foram 8,33 m; 6,71 m; 7,54 m, respectivamente (Quadro 2). Para a umidade volumétrica do solo, os alcances práticos nas profundidades de 0-3, 10-13 e 25-28 cm foram 11,98 m; 14,98 m; 16,48 m, respectivamente (Quadro 2).

Kondo (2003), estudou a variabilidade espacial da pressão de preconsolidação e umidade gravimétrica em lavoura cafeeira na profundidade de 0-5 cm sob a linha de tráfego nas umidades gravimétricas de 0,05, 0,15, 0,25, 0,35 e 0,45 kg kg⁻¹ e obteve os seguintes valores de alcance de 2,10; 1,81; 3,04; 4,36; 3,13 m, respectivamente. Gontijo et al. (2007), obtiveram valores de alcance igual a 19,5 m e 90 m para a σ_p e θ , respectivamente na profundidade de 0-3 cm.

Com base nos valores do grau de dependência espacial sugeridos por Cambardella et al. (1994), verificou-se que há uma moderada dependência espacial para a pressão de preconsolidação em todas as profundidades analisadas e para a umidade volumétrica na profundidade de 0-3 cm. Para a umidade volumétrica nas profundidades de 10-13 e 25-28 cm não se aplicou essa relação porque o efeito pepita nesse caso foi nulo.

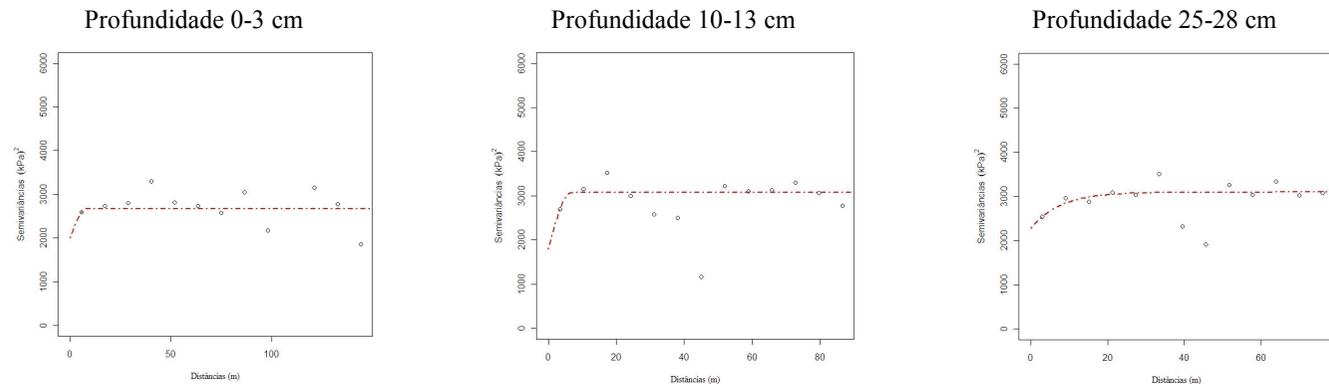


Figura 3. Semivariogramas da σ_p (kPa)

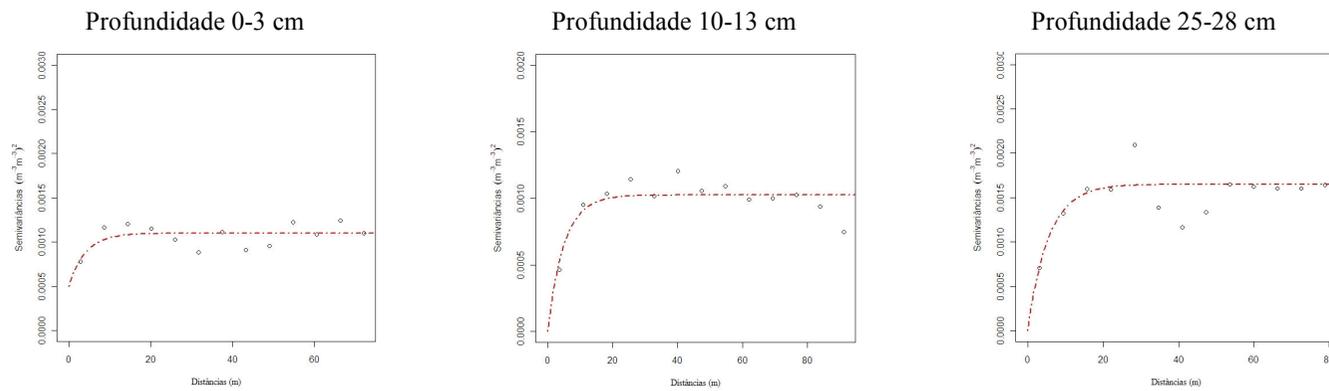


Figura 4. Semivariogramas da θ (m³ m⁻³)

Quadro 2. Estimativa dos parâmetros do modelo teórico ajustado para a pressão preconsolidação (σ_p) e umidade volumétrica (θ) do solo

Variável	Profundidade (cm)	Modelo	Efeito pepita	Contribuição	Alcance teórico (m)	Alcance prático (m)	Patamar	Grau Dependência (%)
σ_p	0-3	Esférico	2000	677.27	8.33	8.33	2667.23	75
	10-13	Esférico	1800	1276.75	6.71	6.71	2913.86	62
	25-28	Exponencial	2272.8	824.21	7.54	22.60	2952.41	77
θ	0-3	Exponencial	0.0005	0.0006	4.00	11.98	0.0011	45
	10-13	Exponencial	0	0.001	5.00	14.98	0.00099	-
	25-28	Exponencial	0	0.0016	5.50	16.48	0.0015	-

Krigagem

Uma vez conhecido o semivariograma da variável e sua estrutura de dependência espacial, pode-se realizar a interpolação de valores em qualquer ponto no campo de estudo, sem tendência e com variância mínima, através da krigagem ordinária. A técnica da krigagem permitiu que fossem obtidos os mapas da capacidade de suporte de carga e umidade volumétrica do solo.

Analisando-se a Figura 5a, verifica-se no mapa que predomina regiões com capacidade de suporte de carga (CSC) igual a 200 kPa (tonalidade alaranjada), a região com baixa CSC abaixo de 100 kPa (tonalidade verde), a região com CSC aproximadamente de 150 kPa (tonalidade amarelo). As regiões onde a CSC do solo é maior do que 200 kPa, notam-se pequenas regiões de tonalidade rosa. No mapa (Figura 5b), observa-se predominância de regiões que corresponde a CSC do solo de 100 kPa (tonalidade verde) e regiões com a CSC do solo variando de 200 a 100 kPa (tonalidade amarelo). Na figura 5c, nota-se que há um predomínio de regiões com CSC do solo variando entre 50 e 150 kPa com tonalidade verde e amarelo.

Na figura 6a observa-se que predomina regiões com umidade volumétrica aproximadamente de $0,45 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (tonalidade alaranjada). Na figura 6b a umidade volumétrica predominante foi de $0,45 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (tonalidade alaranjada). Na figura 6c há predomínio da umidade volumétrica do solo de $0,45 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, (tonalidade amarela) e algumas regiões com umidade volumétrica menor que $0,40 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (tonalidade verde).

Com base nesses resultados conclui-se que a profundidade de 0-3 cm está mais compactada que as demais profundidades analisadas. De acordo com o manual do fabricante, os rodados do trator Massey Ferguson modelo 275 aplicam uma pressão estática máxima de 240 kPa e a colhedora Jacto KTR aplicam uma pressão estática máxima de 276 kPa.

Então, com base nos mapas obtidos e nos potenciais matriciais críticos (umidade volumétrica correspondente) para o trator e colhedora mencionados no Capítulo 2 (Figuras 3a, 3b, 3c e 3d), tanto o trator como a colhedora não devem trafegar na área para a umidade volumétrica igual a $0,45 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, pois o solo possui capacidade de suporte de carga de 200 kPa nesta condição. Se essa condição for desrespeitada, a compactação adicional poderá ocorrer.

Os valores de umidade volumétrica crítica para o trator e colhedora mencionados no Capítulo 2, são de $0,36 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e $0,30 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ respectivamente. Para o tráfego do trator, deve-se esperar por um período, para que a umidade volumétrica atinja um valor menor que $0,36 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, enquanto que para o tráfego da colhedora deve-se esperar a umidade volumétrica atingir valor menor que $0,30 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

Outra alternativa, seria a redução da pressão de contato através da diminuição no peso sobre o eixo e/ou do aumento na área de contato rodado-solo (Raper, 2005). O aumento da área de contato, por sua vez, pode ser obtido mediante o emprego de rodados de maiores dimensões (esteiras ou pneus mais largos e/ou de maior diâmetro), de um número maior de rodas por eixo ou do aumento na flexibilidade da carcaça dos pneus (Canillas & Salokhe, 2001). Os pneus radiais são mais flexíveis que os diagonais, resultando assim em uma maior área de contato com o solo (Raper, 2005). Hillel (1982) relata ainda que rodados mais flexíveis, além de aumentarem a área de contato pneu-solo, são capazes de absorver parte da pressão aplicada, mediante a sua deformação.

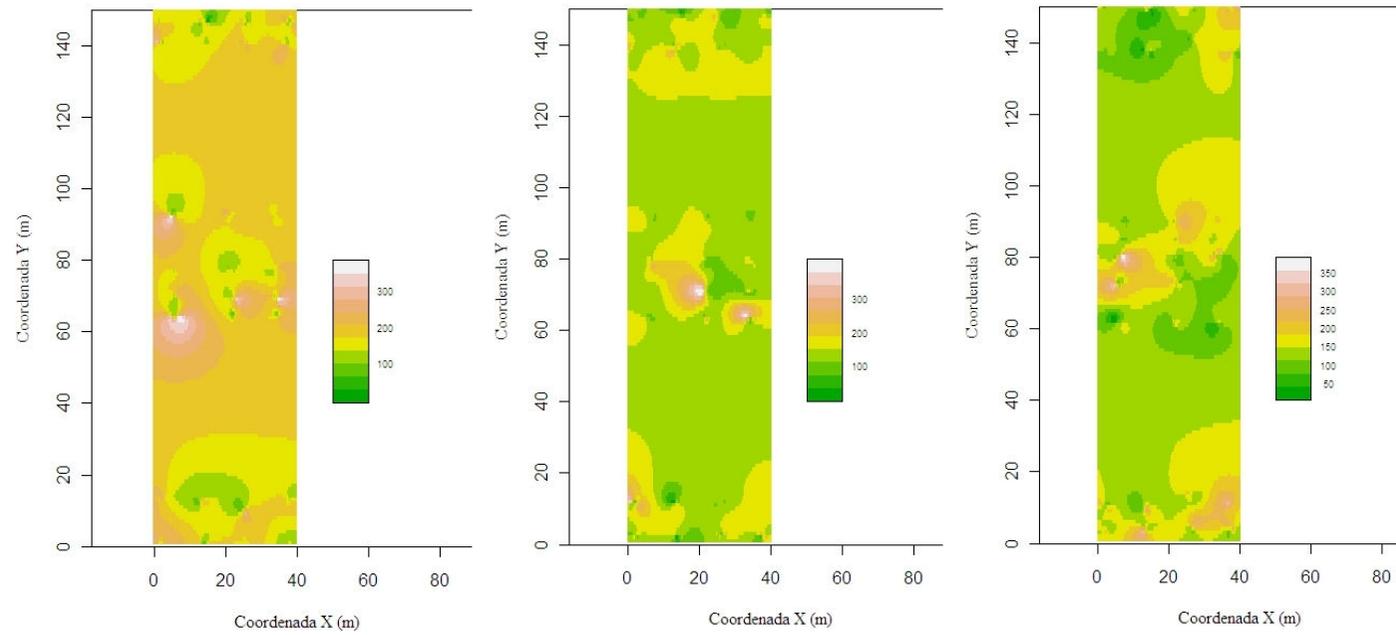


Figura 5a. Mapa da σ_p na profundidade de 0-3cm

Figura 5b. Mapa da σ_p na profundidade de 10-13 cm

Figura 5c. Mapa da σ_p na profundidade de 25-28 cm

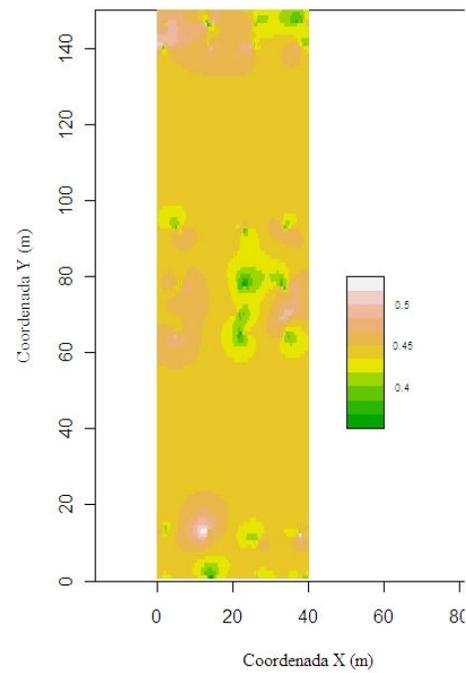


Figura 6a. Mapa da θ na profundidade de 0-3cm

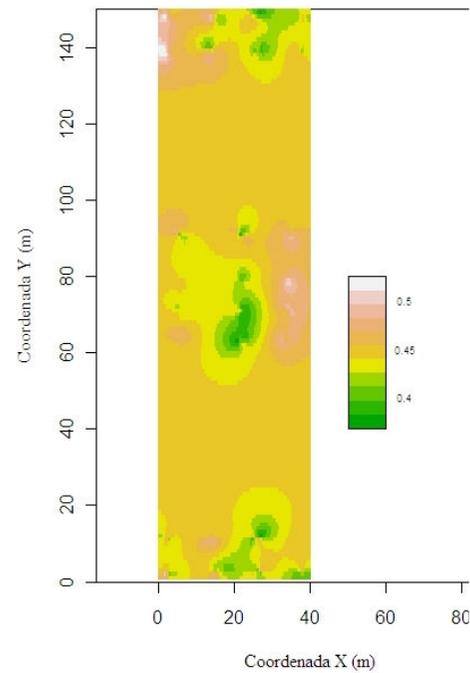


Figura 6b. Mapa da θ na profundidade de 10-13 cm

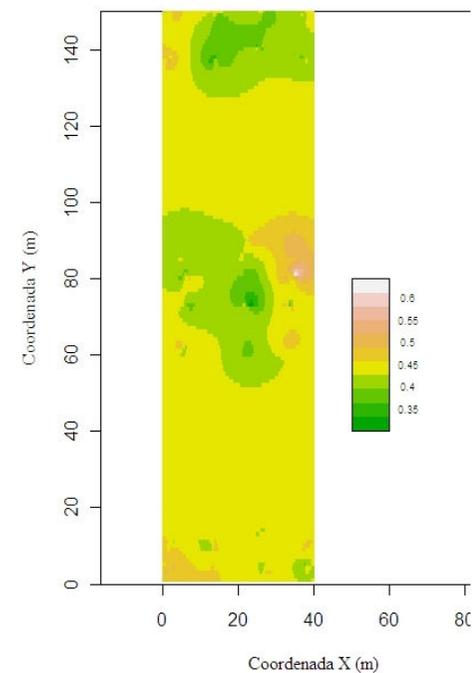


Figura 6c. Mapa da θ na profundidade de 25-28 cm

4 CONCLUSÃO

1. A pressão de preconsolidação e umidade volumétrica do solo apresentaram estrutura de dependência espacial e a técnica de krigagem ordinária demonstrou ser uma alternativa viável para a estimativa de dados em pontos não amostrados na área experimental.

2. A profundidade de 0-3 cm apresentou maior CSC do solo indicando que esta profundidade está mais compactada em relação às demais profundidades.

3. Com base nos mapas da pressão de preconsolidação, o trator 275 Massey Ferguson e a colhedora Jacto KTR não devem trafegar na área, para a umidade volumétrica igual a $0,45 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, pois o solo possui capacidade de suporte de carga de 200 kPa nesta condição. Se essa condição for desrespeitada, a compactação adicional poderá ocorrer. Para o tráfego do trator, deve-se esperar por um período, para que a umidade volumétrica atinja um valor menor que $0,36 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, enquanto que para o tráfego da colhedora deve-se esperar a umidade volumétrica atingir valor menor que $0,30 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Consórcio Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento do Café CBP&D/ Café o apoio financeiro para o desenvolvimento do presente estudo. Aos funcionários da Fazenda Experimental da EPAMIG em Patrocínio – MG. O primeiro autor agradece à CAPES a concessão da bolsa de doutorado.

5 REFERÊNCIAS

AJAYI, A.E.; DIAS JÚNIOR, M.S.; CURI, N.; ARAÚJO JÚNIOR, C.F.; SOUZA, T. T. T.; INDA JÚNIOR, A. V. Strength attributes and compaction susceptibility of Brazilian Latosols. *Soil Till. Res.*, 105:122-127, 2009.

ALAKUKKU, L.; WEISSKOPF, P.; CHAMEN, W. C.T.; TIJINK, F.G.J.; LINDEN, J.P. van der; PIRES, S.; SOMMER, C.; SPOOR, G. Prevention strategies for field traffic induced subsoil compaction: a review: Part I – machine/soil interactions. *Soil Till. Res.* 73:145-160, 2003.

ARAÚJO JÚNIOR, C.F.; DIAS JÚNIOR, M.S.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALCÂNTARA, E.N. Capacidade de suporte de carga e umidade crítica de um Latossolo induzida por diferentes manejos. *R. Bras. Ci. Solo*, 35:115-131, 2011.

BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A. ed. *Methods of soil analysis*. 2.ed. Madison, ASA/SSSA, 1986a. Part 1. p. 363-375.

BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Particle density. In: KLUTE, A. ed. *Methods of soil analysis*. 2.ed. Madison, ASA/SSSA, 1986b. Part 2. p.377-382.

BOTTA, G.F.; JORAJURIA, D.; ROSATTO, H.; FERRERO, C. Light tractor traffic frequency on soil compaction in the Rolling Pampa region of Argentina. *Soil Till. Res.*, 86:9-14, 2006.

BOTTA, G.F.; POZZOLO, O.; BOMBEN, M.; ROSATTO, H.; RIVERO, D.; RESSIA, M.; TOURN, M.; SOZA, E.; VAZQUEZ, J. Traffic alternatives for harvesting soybean (*Glycine max* L.): Effect on yields and soil under a direct sowing system. *Soil Till. Res.*, 96:145- 154, 2007.

CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T. B.;KARLEN, D.L.; TURCO, R.F.; KONOPKA, A.E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58:1501-1511, 1994.

CANILLAS, E.C.; SALOKHE, V. M. Regression analysis of some factors influencing soil compaction. *Soil Till. Res.*, 61:167-178, 2001.

CARVALHO, T.M. de; SILVA, A.M. da; OLIVEIRA, M.S. de; AQUINO, L.H. de; FERREIRA, M.M. Variabilidade espacial da retenção de água em um Latossolo Vermelho-amarelo através da geoestatística. *Ci. e Prática* 16:521-528, 1992.

COSTA NETO, P.L.O. *Estatística*. 10. ed. São Paulo, Edgard Blucher, 1990. 264p.

CRESSIE, N.A.C. *Statistics for spatial data*. New York, J. Wiley, 1991. 379 p.
DIAS JÚNIOR, M. S. et al. Traffic effects on the soil preconsolidation pressure due to *Eucalyptus* harvest operations. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v. 62, n. 3, p. 248-255, May/June 2005.

DIAS JÚNIOR, M.S. & PIERCE, F.J. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. *Soil Technol.*, 8:139-151, 1995.

DIAS JÚNIOR, M.S.; PIERCE, F.J. Revisão de literatura. O processo de compactação do solo e sua Modelagem. *R. Bras.Ci. Solo*, 20:175-182, 1996.

DIGGLE, P. J.; RIBEIRO JÚNIOR, P. J. Model based geostistics. In: *SIMPÓSIO NACIONAL DE PROBABILIDADE E ESTATÍSTICA*, 14., Caxambu, 2000. Resumos...Caxambu: Associação Brasileira de Estatística, 2000. p.192.

EGUCHI, E.S. Variabilidade espacial de atributos físicos- hídricos de um solo Hidromórfico no município de Lavras-MG. 2001. 91 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2001.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUARIA - EMBRAPA
Centro Nacional de Pesquisas de Solos. Manual de métodos de análises de solo.
2. ed. Brasília, Produção de informação, 1997. 212 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUARIA – EMBRAPA.
Centro Nacional de Pesquisas de Solos. Sistema brasileiro de classificação de
solos. 2. ed. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 2006. 306 p.

FERREIRA, D. F. Estatística básica. 2. ed. Lavras, Ufla, 2009. 664 p.

FERREIRA, D.F. Análises estatísticas por meio do SISVAR para Windows 4.0.
In: REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE
INTERNACIONAL DE BIOMETRIA, 45., São Carlos, 2000. Anais. São
Carlos, UFSCAR, 2000. p.255-258.

GONTIJO, I. et al. Atributos físico-hídricos de um latossolo de cerrado em
diferentes posições de amostragem na lavoura cafeeira. R. Bras. Ci. Solo,
Viçosa, MG, v. 32, n. 6, p. 2227-2234, nov./dez. 2008.

HAMZA, M.A.; ANDERSON, W.K. Soil compaction in cropping systems: A
review of the nature, causes and possible solutions. Soil Till. Res. 82:121-145,
2005.

HILLEL, D. Introduction to soil physics. New York: Academic Press, 1982. 364
p.

HOLTZ, R. D.; KOVACS, W. D. An introduction to geotechnical engineering.
New Jersey: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1981. 733 p.

IMHOFF, S. Indicadores de qualidade estrutural e trafegabilidade de Latossolos
e Argissolos Vermelhos. 2002. 94 f. Tese (Doutorado em Agronomia – Solos e
Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”,
Piracicaba, 2002.

JORAJURÍA, D.; DRAGHI, L. The distribution of soil compaction with depth and the response of a perennial forage crop. *J. Agric. Eng. Res.*66:261–265, 1997.

JOURNEL, A.G.; HUIJBREGTS, Ch.J. *Mining Geostatistics*. London: Academic Press, 1978. 600 p.

JOURNEL, A.G.; HUIJBREGTS, Gh.J. *Mining geostatistics*. London: Academic Press, 1991. p. 600.

KONDO, M. K. Compressibilidade de três latossolos sob diferentes usos. 1998. 95 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1998.

KONDO, M. K. Variabilidade espacial do comportamento compressivo do solo e mapas de trafegabilidade na cultura do cafeeiro irrigado. 2003. 166 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2003.

KONDO, M. K.; DIAS JÚNIOR, M. S. Compressibilidade de três latossolos em função da umidade e uso. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, MG, v. 23, n. 2, p. 211-218, 1999.

LARSON, W. E.; GUPTA, S. C.; USECHE, R. A. Compression of agricultural soil from eight soil orders. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 44, n. 6, p. 1127- 1132, Nov. 1980.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production, *Adv. Soil Sci.*, 1:277- 294, 1985.

LI, Y.X.; TULLBERG, J. N.; FREEBAIRN, D. M. Wheel traffic and tillage effects on runoff and crop yield. *Soil Till. Res.* 97:282-292, 2007.

MATHERON, G. The theory of regionalized variables and its application. Paris: Les Cahiers du centre de Morphologie Mathématique, Fas. 5, C.G. Fontainebleau, 1971. 211p.

RAPER, R. L. Agricultural traffic impacts on soil. *J. Terramech.*, 42:259-280, 2005.

RIBEIRO, J. R.; DIGGLE, P. P.; GeoR: a package for Geostatistical analysis. *R-News*, Rochester, v. 1, n.2, p.15-18, 2001.

SCHÄFFER, B.; ATTINGER, W.; SCHULIN, R. Compaction of restored soil by heavy agricultural machinery—Soil physical and mechanical aspects. *Soil Till. Res.*, 93: 28-43, 2007.

SERVADIO, P.; MARSILIA, A.; VIGNOZZI, N.; PELLEGRINI, S.; PAGLIAI, M. Effects on some soil qualities in central Italy following the passage of four wheel drive tractor fitted with single and dual tires. *Soil Till. Res.*, 84:87-100, 2005.

SILVA, E.M. & MALVINO, S.S.A.B. Análise climática do município de Patrocínio (MG). *Caminhos Geografia*, 10:93-108, 2005. Disponível em: <www.ig.ugu.br/revista/caminhos>.

SILVA, R.B.; DIAS JÚNIOR, M.S.; SILVA, F.A.M.; FOLE, S.M. O tráfego de máquinas agrícolas e as propriedades físicas, hídricas e mecânicas de um Latossolo dos cerrados. *R. Bras. Ci. Solo*, 27:973-983, 2003.

SOUZA, L.C. de. Variabilidade espacial da Salinidade de um solo aluvial no semi-árido paraibano. 1999. 77p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1999.

TARAWALLY, M.A.; MEDINA, H.; FRÓMETA, M.E.; ITZA, C.A. Field compaction at different soil-water status: effects on pore size distribution and

soil water characteristics of a Rhodic Ferralsol in Western Cuba. *Soil and Till. Res.*, 76:95-103, 2004.

TAYLOR, D. W. *Fundamentals of soil mechanics*. New York: John Wiley, 1948. 770 p.

TORMENA, C.A.; ROLOFF, G.; SÁ, J.C.M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem preparo inicial e tráfego. *R. Bras. Ci. Solo*, 22:301-309, 1998.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo* 22:573-581, 1998.

TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Advances in Agronomy*, San Diego, v. 38, p. 45-94, 1985.

VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudo de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V., & SCHAEFER, C.E.G.R. *Tópicos em Ciência do Solo*. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1, p. 1-55.

VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial de argila, silte e atributos químicos em uma parcela experimental de um Latossolo roxo de Campinas (SP). *Bragantia*, 56:181-190, 1997.

VIEIRA, S.R.; HATFIELD, J.L.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. *Hilgardia*, Berkeley, 51:1-75, 1983.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. ed. *Applications of soil physics*. New York, Academic Press, 1980. 319-344p.