

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA TROPICAL

EDUARDO OLIVEIRA DE JESUS SANTOS

**VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS
FÍSICOS DO SOLO SOB LAVOURA DE CAFÉ
CONILON**

São Mateus – ES

Dezembro de 2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA TROPICAL

**VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS
FÍSICOS DO SOLO SOB LAVOURA DE CAFÉ
CONILON**

EDUARDO OLIVEIRA DE JESUS SANTOS

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agricultura Tropical, para a obtenção do título de Mestre em Agricultura Tropical.

Orientador: Prof. Dr. Ivoney Gontijo

São Mateus – ES

Dezembro de 2015

VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO SOB LAVOURA DE CAFÉ CONILON

EDUARDO OLIVEIRA DE JESUS SANTOS

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agricultura Tropical, para a obtenção do título de Mestre em Agricultura Tropical.

Aprovada: 14 de dezembro de 2015

Julião Soares de Souza Lima

Universidade Federal do Espírito Santo
(Membro Externo)

Fábio Luiz Partelli

Universidade Federal do Espírito Santo
(Membro Interno)

Ivoney Gontijo

Universidade Federal do Espírito Santo
(Orientador)

Aos meus pais, Jesulino de Jesus Santos e Evani Oliveira de Jesus Santos, pelo apoio em todos os momentos da minha vida, pelo amor, educação, ensinamentos, caráter e exemplo de vida. A minha irmã, pelo apoio, amizade e companheirismo ao longo de todo período da minha graduação e pós-graduação. As minhas duas avós, Conceição Maria e Ana Maria (*in memoriam*), pelo amor e os ensinamentos me passado ao longo do tempo. Aos meus amigos e professores pelo companheirismo durante toda vida acadêmica. E a minha namorada por todo carinho.

DEDICO

Agradecimentos

A Deus, por me conceder o dom da vida para lutar pelos meus objetivos, por sempre me abençoar e iluminar meus caminhos, e por me oferecer seu grande amor e infinita misericórdia.

Aos meus pais e minha irmã, por todo apoio e incentivo na minha formação acadêmica, principalmente pelo amor, carinho, ensinamentos e pelas orações. A minha avó dona Conceição Maria por ser tão atenciosa comigo e por todo carinho.

Ao Centro Universitário Norte do Espírito Santo – CEUNES da Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, por toda estrutura na minha vida acadêmica, tanto na graduação e na pós-graduação.

Aos professores, por partilhar o conhecimento e experiência e por toda amizade, durante o período da minha vida acadêmica no CEUNES.

Ao meu orientador Professor Ivoney Gontijo, por todo ensinamento, amizade e apoio nos projetos de pesquisa e nas publicações.

Aos laboratoristas Helder Pandolfi, Joel Cardoso e Francisco pelo apoio na condução do experimento e nos trabalhos das disciplinas.

Aos meus colegas Diego Capucho, Arthur Ziviani e Andressa Coelho pelo auxílio na condução do experimento.

Ao produtor Elizeu Bonomo, e seus filhos Ítalo e Sávio, por disponibilizar a área para a condução do experimento.

A todos meus amigos de curso da Agronomia e do Programa de Pós-Graduação de Agricultura Tropical, por cada sorriso, cada conversa no corredor, por todo companheirismo e por toda crítica. Agradeço a esse time grande: André Covre (Mansão), Pablo Souto (Casquinha), Luciano Canal, Lucas Nicole, Amanda, Ana Maria e entre outros.

A minha namorada Letícia por toda atenção e carinho.

SUMÁRIO

RESUMO.....	vi
ABSTRACT	vii
1. INTRODUÇÃO GERAL	01
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	04
2.1. Agricultura de Precisão	04
2.1.1.Ciclo da Agricultura de Precisão	05
2.2. Geoestatística.....	08
2.2.1. Semivariograma	09
2.2.2. Krigagem	12
2.2.3. Geoestatística na cultura de café conilon.....	13
2.2.4. Zonas de manejo.....	14
3. CAPÍTULOS.....	16
3.1.DELIMITAÇÃO DE ZONA DE MANEJO PARA APLICAÇÃO DE INSUMOS AGRÍCOLAS EM LAVOURA DE CAFÉ CONILON.....	17
Resumo	17
Abstract.....	18
Introdução	18
Material e Métodos.....	20
Resultados e Discussão.....	24
Conclusão	31
Referências Bibliográficas	32
3.2. VARIABILIDADE E CORRELAÇÃO ESPACIAL DA PRODUTIVIDADE COM OS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO EM UMA LAVOURA DE CAFÉ CONILON	36
Resumo	36

Abstract	37
Introdução	37
Material e Métodos	39
Resultados e Discussão	43
Conclusão	51
Referências Bibliográficas	51
3.3. PLANEJAMENTO AMOSTRAL DE ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO EM LAVOURA DE CAFÉ CONILON.....	56
Resumo	56
Abstract	57
Introdução	58
Material e Métodos	59
Resultados e Discussão	63
Conclusão	69
Referências Bibliográficas	69
4. CONCLUSÕES GERAIS	74
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75

RESUMO

SANTOS, Eduardo Oliveira de Jesus; M.Sc.; Universidade Federal do Espírito Santo; dezembro de 2015; **Variabilidade espacial de atributos físicos do solo sob lavoura de café conilon**. Orientador: Ivoney Gontijo.

O conhecimento da variabilidade espacial dos atributos físicos do solo através do uso da geoestatística pode ser uma ótima ferramenta para auxílio do manejo da cafeicultura. Objetivou-se no presente estudo, determinar a variabilidade espacial dos atributos físicos do solo, bem como sua correlação espacial com a produtividade, além de delimitar zonas de manejo agrícola e propor uma metodologia de amostragem de solo que melhor se ajuste às condições do sistema de manejo. Conduziu-se o experimento em uma lavoura de café conilon, implantada em 2010 com o genótipo Bamburral, em um espaçamento duplo 3,0 x 2,0 x 1,0 m (4.000 plantas ha⁻¹), localizada no município de São Mateus – ES. Instalou-se uma malha de amostragem irregular, com dimensões de 107 x 95,7 m (10.240 m²). Em cada ponto amostral, coletaram-se amostras de solo para realizar análise física do solo, onde foram determinados os valores de densidade do solo (D_s), densidade de partículas (D_p), macroporosidade (Macro) e microporosidade do solo (Micro), volume total de poros (VTP) e as frações granulométricas do solo. A produtividade foi estimada por meio da colheita da planta de cada ponto amostral, sendo seu valor multiplicado pela população de plantas por hectare. Os dados foram submetidos à análise estatística descritiva, multivariada e geoestatística. Com exceção da D_p , todos os atributos físicos do solo apresentaram dependência espacial, com índice de dependência espacial forte e moderado. Com auxílio da técnica de análise de agrupamento, delimitou-se 2 zonas de manejo. A associação entre o conhecimento da variabilidade espacial com a definição de zonas de manejo pode ser usado para melhorar a eficiência de aplicação de insumos agrícolas. Verificou-se correlação espacial positiva para Macro e VTP e negativa para D_s , Micro e CAD com a produtividade do café conilon. Recomenda-se, em condições similares à área experimental, coletar 3 amostras deformadas e 11 amostras indeformadas de solo para a determinação dos valores médios dos atributos físicos do solo.

Palavras-chave: Zonas de manejo, correlação espacial, planejamento amostral.

ABSTRACT

SANTOS, Eduardo Oliveira de Jesus; M.Sc.; Federal University of Espírito Santo; december of 2015; **Spatial variability of soil physical attributes under conilon coffee plantation**. Advisors: Ivoney Gontijo.

Knowledge of the spatial variability of soil physical properties through the use of geostatistics can be a great tool to aid the management of coffee. The aim of this study was to determine the spatial variability of soil physical properties and their spatial correlation with productivity, and delimit agricultural management zones and propose a soil sampling methodology that best fit to the management system conditions. The experiment was conducted in a conilon coffee plantation, deployed in 2010, with the Bamburral genotype, in a double spacing 3.0 x 2.0 x 1.0 m (4,000 plants ha⁻¹), located in São Mateus, state Espírito Santo, Brazil. It was installed an irregular sampling grid with dimensions of 107 x 95.7 m (10,240 m²). At each sampling point, soil samples were collected for physical analysis of the soil, where it was determined the soil bulk density (D_s), particle density (D_p), macroporosity (Macro) and soil microporosity (Micro), total porosity (VTP) and the size fractions of soil. The productivity was estimated through the in plant harvest for each sampling point, and its value multiplied by the population of plants per hectare. The data were submitted to descriptive statistical analysis, multivariate and geostatistical. Except for D_p , all physical soil attributes presented spatial dependence, with strong and moderate spatial dependency index. With the help of cluster analysis technique, it was delimited two management zones. The association between knowledge of the spatial variability with the definition of management zones can be used to improve application efficiency of agricultural inputs. There was a spatial correlation positive to Macro and VTP and negative for D_s , Micro and CAD with productivity conilon coffee. It was recommended, in similar conditions to the study area, collect 3 deformed samples of soil and 11 undisturbed soil samples to determine the average values of the soil physical properties.

Key words: Management zones, spatial correlation, sample planning.

1. INTRODUÇÃO GERAL

A cafeicultura é uma das principais atividades agrícolas do Brasil. Entre os anos de 2009 a 2014, esse setor gerou uma receita bruta de aproximadamente de 85,14 bilhões de reais através da produção de 276,4 milhões de sacas beneficiadas de café, contribuindo assim, para o desempenho econômico do agronegócio brasileiro e social por meio da geração de milhares de empregos diretos e indiretos em todas as fases de desenvolvimento das lavouras (CONAB, 2014).

No ano de 2014, o Brasil produziu cerca de 32,3 milhões de sacas beneficiadas de café arábica (*Coffea arabica* Linnaeus) em uma área de 1,51 milhões de hectares e 13 milhões de sacas beneficiadas de café conilon (*Coffea canephora* Pierre ex A. Froehner) em 444.279 hectares. O Espírito Santo é o maior estado produtor de café conilon, contribuindo com aproximadamente 76,32% da produção nacional (CONAB, 2014). Esta espécie de café está presente em mais de 80% dos municípios capixabas (PEZZOPANE et al., 2010).

No sistema de produção de café conilon, além do manejo da fertilidade do solo, deve-se atentar às características físicas do solo, tais como volume total de poros, microporosidade e macroporosidade, resistência à penetração e densidade

do solo. As condições dos atributos físicos em que o solo se encontra durante todo o ciclo da cultura influenciam consideravelmente a produtividade (BOTTEGA et al., 2011). Os atributos físicos estão relacionados com a qualidade estrutural dos solos, e são associados ao desenvolvimento do sistema radicular, aeração, infiltração e movimento de água no seu perfil.

Na cultura do cafeeiro conilon, o manejo do solo realizado, quanto à recomendação e aplicação de insumos (fertilizantes, corretivos e defensivos agrícolas), preparo do solo e/ou manejo de irrigação, é baseado no processo de amostragem convencional, ou seja, nos teores médios de uma amostra composta, oriunda de subamostras coletadas em zigue zague ao longo da lavoura (OLIVEIRA et al., 2008).

Entretanto, quando se considera o valor médio dos atributos do solo para recomendação de insumos e manejo de irrigação, a mesma quantidade dos fertilizantes e/ou corretivos agrícolas e lâmina d'água será aplicada em área total, atendendo a necessidade média e não considerando as necessidades específicas de cada região dentro da lavoura (CAVALCANTE et al., 2007a). Considerando o manejo do solo na cultura do café conilon realizado no estado do Espírito Santo, é importante o estudo da variabilidade espacial dos atributos do solo, por meio do mapeamento da fertilidade e das propriedades e características físicas do solo, visando realizar o manejo localizado dos insumos agrícolas, melhorando assim, o gerenciamento do sistema de produção e minimizando os impactos ambientais (CAVALCANTE et al., 2007b; BOTTEGA et al., 2013).

Visando maximizar a produção e a eficiência do manejo, a aplicação das novas tecnologias que permite obter informações a respeito da variação espacial dos atributos do solo e da planta é de grande importância para cafeicultura, por isso, o planejamento do processo de amostragem e o gerenciamento das práticas agrícolas são fundamentais para alcançar esses objetivos (SILVA et al., 2010a). A correlação existente entre o mapa de produção e dos atributos do solo é uma importante ferramenta de diagnóstico, que pode auxiliar nas tomadas de decisões em relação ao manejo a ser adotado (ZUCOLOTO et al., 2011).

Grego & Vieira (2005) salientam que a confecção de mapas isolinhas com os valores obtidos pela análise geoestatística através da krigagem são importantes para

a interpretação da variabilidade espacial. As informações mostradas nos mapas complementam a análise geoestatística, que são visualmente comparadas para o entendimento da distribuição espacial do solo e da planta no campo, e que são úteis para o planejamento agrícola e as tomadas de decisões (BOTTEGA et al., 2011).

Bernardi et al. (2014) salienta que a aplicação de técnicas de agricultura de precisão como a variabilidade espacial em sistema de cultivo é importante para que se possa aprimorar as opções de manejo e melhorar a rentabilidade do sistema de produção. Para se realizar o manejo localizado, deve-se conhecer a distribuição espacial da produção da lavoura, por meio do mapa isolinha dessa variável, portanto essa é a primeira etapa a ser observada. Em seguida deve-se correlacionar com os mapas dos atributos do solo e da planta, para definir o manejo a ser adotado (BIFFI & RAFAELI, 2008).

Com base no exposto, o presente trabalho teve como objetivo geral descrever a variabilidade espacial dos atributos físicos do solo em uma lavoura de café conilon (*Coffea canephora*) na cidade de São Mateus – ES. E também teve como objetivos específicos:

1. determinar a variabilidade espacial das frações granulométricas do solo, argila, silte e areia, e da produtividade de uma lavoura de café conilon, bem como a definir das zonas de manejo agrícola, utilizando a técnica de agrupamento por método hierárquico associado à geoestatística;
2. determinar a variabilidade espacial da densidade do solo e partículas, macroporosidade e microporidade do solo, volume total de poros e capacidade de armazenamento de água do solo, bem como sua correlação espacial com a produtividade de uma lavoura de café conilon cultivado em um Latossolo Amarelo distrófico;
3. estudar a variabilidade espacial dos atributos físicos do solo, em lavoura de café conilon e propor uma metodologia de amostragem de solo que melhor se ajuste às condições do sistema de manejo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Agricultura de Precisão

Atualmente, há uma necessidade de aumentar a eficiência de todos os setores do sistema econômico globalizado, principalmente no agronegócio, para manter a competitividade dos produtos no mercado. Devido à pressão pela conservação dos recursos naturais e o aumento da demanda por alimentos provocada pelo aumento populacional, o setor agrícola tem-se direcionado para a busca de maior eficiência e aumento de produção de forma sustentável, e uma das alternativas é o uso de sistemas de gerenciamento de informações para dados coletados no campo (JAKOB, 1999; TSCHIEDEL & FERREIRA, 2002).

A evolução da mecanização agrícola aliada à informática e tecnologia em geoprocessamento tem proporcionado à agricultura uma nova forma de se enxergar a propriedade, deixando de ser uma somente e sim várias propriedades dentro da mesma, porém com características específicas. Com essa visão, o produtor rural está tornando cada vez mais um empresário rural, por controlar cada vez mais a linha de produção (TSCHIEDEL & FERREIRA, 2002).

Visando maximizar a produção física e econômica das culturas, os agricultores vêm variando o manejo dos insumos agrícolas de acordo com o tipo de solo e desempenho da cultura. Entretanto, com o surgimento da mecanização agrícola, somente foi possível manejar economicamente as culturas em grandes lavouras com aplicação uniforme de insumos agrícolas. Com a criação do Sistema de Posicionamento Global (GPS), e associando aos equipamentos capazes de detectar a variabilidade espacial (monitores de colheita) e aplicar insumos às taxas variáveis, foi possível realizar o manejo das culturas de modo mais específico (SILVA et al., 2014).

A agricultura de precisão surge como um pacote tecnológico capaz de auxiliar o produtor rural no planejamento de estratégias de manejo a serem adotadas para aumentar a eficiência do gerenciamento da lavoura, baseando-se na variabilidade espacial dos atributos do solo e da planta, visando maximizar a rentabilidade e a eficiência de adubação, de pulverização e da colheita, culminando na elevação da produtividade e da qualidade final do produto, tornando o agronegócio mais competitivo face ao processo de globalização da economia, e contribuir, assim, para o sucesso da atividade agrícola (OLIVEIRA et al., 2007; SILVA et al., 2008a; CARVALHO et al., 2009; FERRAZ et al., 2012).

Apesar das várias formas de abordagem sobre a agricultura de precisão, o objetivo é sempre o mesmo: adotar estratégias que resolvam os problemas da heterogeneidade dos atributos do solo e da planta da lavoura. Atualmente, no Brasil, as soluções existentes estão focadas no manejo localizado de insumos agrícolas, entretanto não se deve perder de vista o conceito da agricultura de precisão que é, um sistema de gestão que considera a variabilidade espacial das lavouras em todos seus aspectos: produtividade, solo (características e propriedades químicas, físicas e biológicas) e incidência de plantas daninhas, de doenças e de insetos-praga (MAPA, 2013).

2.1.1. Ciclo da Agricultura de Precisão

A agricultura de precisão consiste em um ciclo, pois é aplicada em todas as etapas do cultivo através das diferentes ferramentas disponíveis. Na Figura 1, observa-se a ilustração do ciclo da agricultura de precisão, o qual inicia com a confecção do mapa isolinha da produtividade, passa pelo processo de amostragem do solo em malha ou grade, análise química e física, interpretação de dados, preparo do solo, plantio, recomendação e aplicação localizada de insumos e defensivos agrícolas e por fim o monitoramento da lavoura.



FIGURA 1. Ciclo da agricultura de precisão (KAGAMI et al., 2013).

O mapeamento da colheita é a informação mais completa para detectar a variabilidade espacial das lavouras, pois materializa o rendimento da cultura com a melhor exatidão possível. Portanto, é um dos primeiros procedimentos para a implantação da técnica de agricultura de precisão. As colhedoras usadas para essa finalidade possuem mecanismo de colheita (monitor de colheita), que permite o

registro de fluxo de grãos, ao mesmo tempo é registrado o posicionamento da máquina na lavoura, com o uso do receptor GPS (RODRIGUES, 2002; COELHO, 2003; MAPA, 2013).

Para o planejamento agrícola e as tomadas de decisões, devem-se realizar diagnósticos com intuito de identificar quais fatores que estão limitando a produção, portanto a associação do mapa de variabilidade espacial da colheita anterior com os mapas dos atributos do solo, de caracterização do relevo e os de incidência de insetos-pragas, doenças e ervas daninha são excelentes fontes de informações que servirão de auxílio.

Na etapa de preparo do solo, é feito a amostragem do solo em grade, onde as amostras são coletadas, georreferenciadas e submetidas análise químicas e físicas do solo em laboratório, em seguida os resultados são submetidos à análise geoestatística. Posteriormente, são confeccionados os mapas de variabilidade espacial da fertilidade e dos atributos físicos do solo, que serão utilizados para a recomendação de corretivos e fertilizantes agrícolas a taxas de aplicação variáveis.

Bottega et al. (2013) salienta que a determinação da distribuição espacial dos atributos do solo, por meio dos mapas isolinhas, proporciona a realização do manejo localizado da fertilidade do solo. Assim, as doses de insumos são aplicadas de forma variável, visando atender às necessidades específicas de cada local, otimizando o processo de produção e reduzindo os impactos ambientais causados pelas práticas agrícolas.

No plantio, a densidade de semeadura ou de transplântio é feita à taxa variável, de acordo com o potencial produtivo de cada parte da lavoura. À medida que ocorre o desenvolvimento da cultura implantada, ocorre a etapa de acompanhamento da lavoura, por meio do monitoramento de pragas e doenças. Assim, são gerados mapas populacionais de cada praga e da severidade das doenças, os quais são utilizados para aplicação localizada de defensivos agrícolas.

Riffel et al. (2012) corroboram que o pacote tecnológico da agricultura de precisão passou a ser estendido para a detecção da variabilidade espacial, manejo e controle localizado de plantas daninhas, de doenças e de insetos-praga, até então,

somente englobava o mapeamento da fertilidade do solo, aplicações localizadas de fertilizantes e monitoramento de operações de colheita.

2.2. Geoestatística

Quando aplicado na agricultura, o método estatístico clássico considera que a variabilidade dos atributos do solo em estudo ocorra de forma inteiramente aleatória e independente entre si, admitindo que seus atributos apresentem distribuição normal (LIBARDI et al., 1986; SANTOS & VASCONCELOS, 1987). Porém, Vieira (2000) salienta que as propriedades e características do solo apresentam intensa dependência espacial, necessitando, portanto, de análise geoestatística.

Nesse contexto, a geoestatística é uma importante ferramenta para o conhecimento da variabilidade espacial, pois possibilita a interpretação dos resultados com base na estrutura da variabilidade natural dos atributos avaliados, considerando a dependência espacial dentro do intervalo de amostragem (MACHADO et al., 2007). Também permite analisar adequadamente dados experimentais que, muitas vezes, são mal interpretados por se considerar a hipótese de aleatoriedade verdadeira, sem a ocorrência de dependência espacial (MIGUEL et al., 2009).

O princípio da geoestatística vem da teoria das variáveis regionalizadas, ou seja, refere-se ao estudo de uma função espacial numérica, que varia de um local para outro, com continuidade aparente e cujos valores são relacionados com a localização espacial que ocupam (MATHERON, 1962; FARACO et al., 2008). Matheron (1962) salienta que esta teoria, a diferença dos valores de um dado atributo tomados em dois pontos no campo depende da distância entre eles. Vieira et al. (2002) reforçam essa teoria salientando que, em valores medidos do atributo analisado em um determinado local estão de alguma forma em concordância com a

sua distribuição espacial, logo, as observações tomadas a curtas distâncias devem ser mais semelhantes do que aquelas tomadas a distâncias maiores.

Para uso da geoestatística na área da Ciência do Solo, serão necessárias algumas pressuposições. Existem três hipóteses de estacionaridade para uma função aleatória: hipótese de estacionaridade de segunda ordem, hipótese de tendência e hipótese intrínseca – pelo menos uma delas deve ser satisfeita para possibilitar a aplicação da geoestatística. Segundo Vieira (2000), a hipótese intrínseca requer somente a existência de estacionaridade do semivariograma, sem nenhuma restrição quanto à existência de variância finita, além de que a média não pode depender da posição espacial. Portanto, pode ser menos restritiva é usada frequentemente na análise geoestatística.

A geoestatística disponibiliza técnicas para confecções de mapas do comportamento de atributos georreferenciadas, utilizando o método de interpolação de informações a partir de dados obtidos em locais convenientemente amostrados e modelados em um semivariograma experimental (FARACO et al, 2008).

2.2.1. Semivariograma

A análise geoestatística é empregada para a determinação da estrutura de dependência espacial dos atributos do solo, por meio do cálculo de semivariância e do ajuste dos dados ao semivariograma experimental (VIEIRA et al., 1983). Essa ferramenta da geoestatística, expressa o grau de dependência espacial entre os pontos amostrais do grid de amostragem, por meio de seus parâmetros necessários para a estimativa de valores dos atributos em locais não amostrados, através da interpolação por Krigagem (BERTOLANI et al., 2000).

O semivariograma é a representação gráfica entre a semivariância dos atributos $\gamma(h)$ representada na coordenada Y, em função de uma determinada distância h , representada na coordenada X, ou seja, é uma função do vetor h e,

portanto, dependem de ambos em magnitude e direção de h , podendo ser definido como (VIEIRA, 2000):

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

sendo: $N(h)$ é o número de pares experimentais de observações $Z(x_i)$ e $Z(x_i + h)$ separados por uma distância h , sendo $Z(x_i)$ e $Z(x_i + h)$, valores numéricos observados dos dados analisados, para os pontos x_i e $x_i + h$ separados pelo vetor h .

Na FIGURA 2 mostra o semivariograma e seus principais parâmetros. O efeito pepita (C_0) é a interceptação do semivariograma com o eixo "Y", ou seja, o valor da semivariância para distância zero e indica a variabilidade não explicada, que pode ser devida a erros de medição ou variação não detectada pela escala de amostragem utilizada (McBRATNEY & WEBSTER, 1986; VIEIRA, 2000).

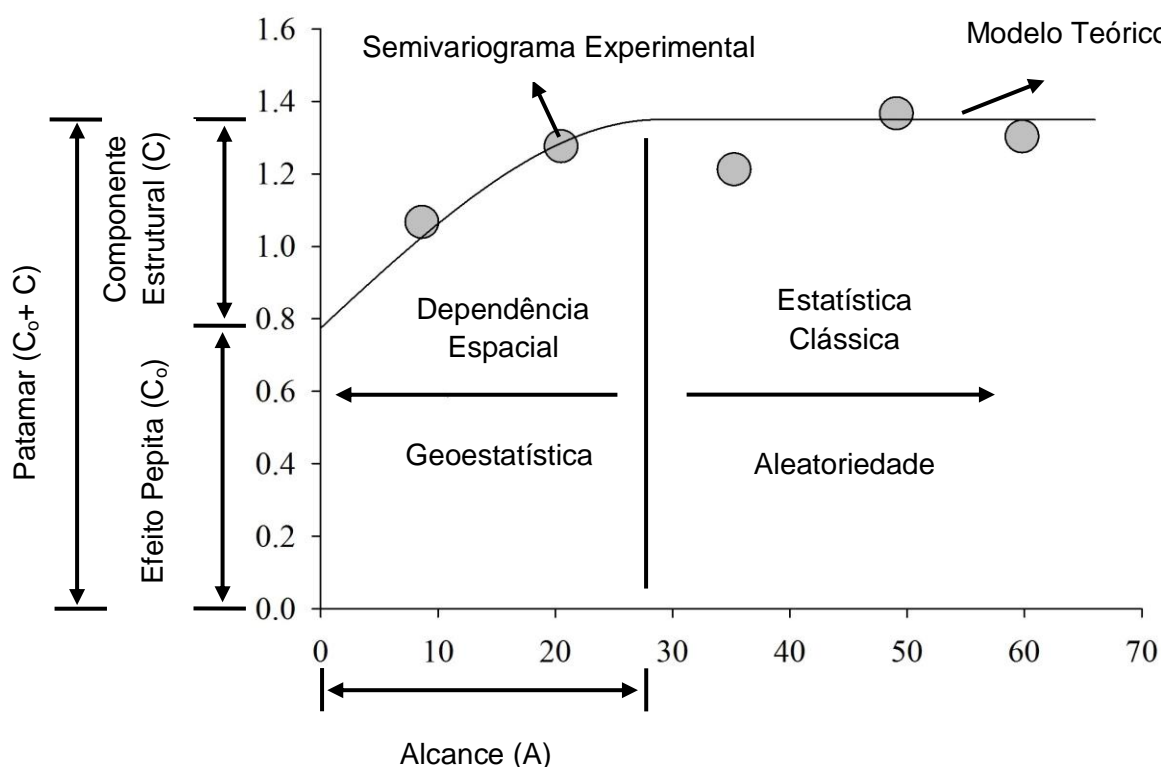


FIGURA 2. Semivariograma com seus principais parâmetros.

O patamar ($C_0 + C$) é a estabilização dos valores do semivariograma, ou seja, quando a semivariância dos dados se torna constante com as distâncias entre as

amostras e esse parâmetro permite a determinação da distância limite entre a dependência espacial e a independência entre as amostras (VIEIRA et al., 1983; SILVA et al., 2003). Já o componente estrutural (C), corresponde à diferença entre o patamar e o efeito pepita e representa a semivariância espacialmente estruturada (CAMBARDELLA et al., 1994).

O alcance é um importante parâmetro do semivariograma, e representa a distância da origem até onde o patamar começa a se estabilizar. Ou seja, à distância até onde os pontos amostrais estão correlacionados espacialmente entre si (VIEIRA et al., 1983). Souza et al. (2001) salienta que as amostras separadas por distâncias menores que o alcance são correlacionadas entre si, nesse caso, aplica-se a geoestatística. Já as amostras separadas por distâncias maiores, apresentam distribuição aleatória e, portanto sendo independentes, nesse caso, deve-se aplicar a estatística clássica.

Vieira (2000) reforça que o alcance é a linha divisória para a aplicação de geoestatística ou estatística clássica, e por isso o cálculo do semivariograma deveria ser feito rotineiramente para dados de campo para garantir as hipóteses estatísticas sob as quais serão analisados.

Na ocasião, em que o alcance é menor que o espaçamento mínimo entre as amostras do grid de amostragem, ocorre o efeito pepita puro ou ausência total de dependência espacial. Esse fenômeno é caracterizado, quando a semivariância for constante e igual ao patamar para qualquer valor de distância (h), apresentando assim, distribuição espacial completamente aleatória. Portanto, aplica-se para esses dados a estatística clássica (SILVA et al., 1989).

Os parâmetros efeito pepita e patamar são utilizados para a determinação do índice de dependência espacial (IDE), conforme a equação 2 (CAMBARDELLA et al., 1994):

$$IDE = \frac{C_0}{C_0 + C} 100 \quad (2)$$

De acordo com Cambardella et al. (1994), o índice de dependência espacial pode ser classificado como: IDE forte < 25%; IDE moderado de 25 a 75% e IDE fraco > 75%.

2.2.2. Krigagem

A adoção do sistema de manejo localizado na agricultura necessita de informações precisas sobre a variabilidade espacial dos atributos do solo e da planta (KERRY & OLIVER, 2007; KERRY & OLIVER, 2008), que podem ser obtidas por meio dos mapas isolinhas, através do método de interpolação por krigagem. Para Mello (2004) a krigagem é uma técnica de estimação de valores de atributos do solo em pontos não amostrados a partir de informações situadas em pontos amostrados no grid de amostragem, considerando a estrutura de dependência espacial do fenômeno.

Existem vários tipos de estimadores de krigagem: krigagem simples, ordinária, universal, blocos, dentre outros (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989). Sendo a krigagem ordinária a mais comumente utilizada por diversos autores em estudos de variabilidade espacial na área de ciência do solo (BOTTEGA et al., 2013; LIMA et al., 2013; OLIVEIRA et al., 2013; BERNARDI et al., 2014; NASCIMENTO et al., 2014; SANTOS et al., 2015a).

A krigagem ordinária é considerada um ótimo interpolador local, uma vez que seu princípio é a estimativa de valores dos atributos do solo e planta em locais não amostrados, usando as propriedades estruturais dos semivariogramas com desvios mínimos em relação aos valores conhecidos e sem tendenciosidade (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989; GREGO & VIEIRA, 2005). O estimador de krigagem ordinária é dado por:

$$z(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i z(x_i) \quad (3)$$

Sendo: $z(x_0)$ – estimativa de krigagem no ponto x_0 ; $z(x_i)$ – valores medidos em x_i , $i = 1, 2, 3, \dots, N$; e λ_i – pesos da krigagem calculados com base no semivariograma ajustado são atribuídos aos valores vizinhos $z(x_i)$ para estimar $z(x_0)$.

2.2.3. Geoestatística na cultura de café conilon

Os maquinários e equipamentos necessários para a adoção da agricultura de precisão são adotados mais intensamente para as culturas anuais (SILVA et al., 2008a), com destaque para a cultura da soja. Essa não é a realidade para o café conilon, entretanto Oliveira et al. (2008) salienta que a aplicação das técnicas de manejo localizado apresenta-se como alternativa de grande potencial para minimizar os impactos negativos provocados pela cafeicultura ao ambiente e aumentar a eficiência de aplicação de insumos.

No intuito de adaptar essa técnica à realidade do produtor de café conilon, vários estudos de aplicação da variabilidade espacial do solo e planta vêm sendo realizados no estado do Espírito Santo. Santos et al. (2015a) realizaram estudo da variabilidade espacial dos macronutrientes do solo em uma lavoura de café conilon, localizada no município de São Mateus – ES. Concluíram que a confecção dos mapas de fertilidade, por meio da krigagem, mostrou-se importante ferramenta na compreensão da distribuição espacial dos macronutrientes no solo, podendo ser fundamental no auxílio à tomada de decisão que vise atender a exigência nutricional na lavoura do café conilon.

Burak & Passos (2011) aplicaram a geoestatística para a determinação da variabilidade espacial das frações granulométricas e da porosidade do solo em uma área com relevo ondulado cultivada com café conilon, localizada no município de Cachoeiro de Itapemirim – ES. Para melhor visualização das formas do relevo da área foram avaliados a declividade, o fluxo acumulado do escoamento superficial e o Modelo Digital de Elevação. Nesse experimento foi estudada a influência do relevo sobre a distribuição espacial dos atributos físicos do solo. Concluíram que o fluxo acumulado do escoamento superficial e a declividade influenciaram no transporte de partículas, e locais menos susceptíveis a esse transporte apresentaram maiores teores de argila e menores valores de macroporosidade.

Silva et al. (2007) realizaram estudo da variabilidade espacial da erosão hídrica em um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico sob cultivo de café conilon. Foram confeccionados mapas isolinhas de variabilidade espacial dos teores de areia, silte e argila, da erodibilidade, do potencial natural de erosão, da perda de solo e do risco de erosão da área experimental. Concluíram que, para o presente estudo, a perda de solo na área está relacionada com a distribuição espacial das frações granulométricas, uma vez que os menores valores foram determinados na parte superior (> concentração de argila) e os maiores na parte inferior (> concentração de areia total).

Nos últimos anos vários experimentos aplicando a geoestatística na cultura do café conilon, por meio da confecção dos mapas de variabilidade espacial dos atributos do solo e na planta vêm sendo realizados, cujo intuito é a adaptação das técnicas de agricultura de precisão na cafeicultura. Muitas dessas pesquisas foram feitas em lavouras no estado do Espírito Santo (OLIVEIRA et al., 2008; SILVA et al. 2008b; SILVA et al., 2010b; SILVA et al., 2010c; COSTA & LIMA, 2011; QUARTEZANI et al., 2011; BURAK et al., 2012; LIMA et al., 2012; QUARTEZANI & ZIMBACK, 2012; SANTOS et al., 2013; LIMA et al., 2014; SANTOS et al., 2014; SILVA & LIMA, 2014).

2.2.4. Zonas de manejo

Os grandes problemas da implantação da técnica de agricultura de precisão na cultura de café conilon são a necessidade de malha de amostragem densa com intuito de determinar a variabilidade espacial dos atributos do solo (RODRIGUES JÚNIOR et al., 2011) e os raros maquinários agrícolas destinado para a realização de manejo diferenciado para cafeicultura.

Nesse contexto, uma das soluções seria a adoção dos conceitos de zonas de manejo agrícola nas lavouras de café conilon. Siqueira et al. (2010) salienta que com a delimitação das zonas de manejo, é possível identificar as sub-regiões de

maior homogeneidade, as quais permitem, que as práticas agronômicas possam ser transferidas para ambientes semelhantes.

Mann et al. (2010) salienta que a delimitação de zonas de manejo dependem da compreensão e identificação dos fatores responsáveis pela variação da produtividade. Para Rodrigues Júnior et al. (2011) a definição de zonas de manejo permite a adoção dos mesmos sistemas utilizados na agricultura convencional, tornando assim, mais fácil a aplicação de agricultura de precisão no manejo das culturas. Estudos de zonas de manejo vêm sendo realizado na cafeicultura por Rodrigues Júnior et al. (2011), Sanchez et al. (2013) e Santos et al. (2015b).

3. CAPÍTULOS

3.1. DELIMITAÇÃO DE ZONA DE MANEJO PARA APLICAÇÃO DE INSUMOS AGRÍCOLAS EM LAVOURA DE CAFÉ CONILON

Resumo

A delimitação das zonas de manejo e a determinação da variação espacial de atributos de solo e da produtividade podem contribuir para a aplicação racional de insumos agrícolas. Objetivou-se no presente estudo determinar a variabilidade espacial das frações granulométricas do solo, argila, silte e areia, e da produtividade de uma lavoura de café conilon, bem como a definição das zonas de manejo agrícola, utilizando a técnica de agrupamento por método hierárquico associado à geoestatística. O experimento foi conduzido em uma lavoura de café conilon, no município de São Mateus – ES, plantada no espaçamento duplo 3,0 x 2,0 x 1,0m (4.000 plantas ha⁻¹). A área experimental possui dimensões de 107 x 95,7m (10.240 m²), onde demarcou-se uma malha de 82 pontos amostrais. Em cada ponto amostral foram determinados a produtividade do café conilon e os teores das frações granulométricas do solo na profundidade de 0,00-0,20m. Os dados foram submetidos à análise multivariada e geoestatística. Verificou-se estrutura de

dependência espacial para todas variáveis em estudo. Com auxílio da técnica de análise de agrupamento, delimitou-se 2 zonas de manejo. A associação entre o conhecimento da variabilidade espacial com a definição de zonas de manejo pode ser usado para melhorar a eficiência de aplicação de insumos agrícolas.

Palavras-chave: *Coffea canephora*, geoestatística, análise multivariada.

Abstract

The delimitation of management zones and determination the spatial variability of soil attributes and productivity can contribute to the rational use of agricultural inputs. The purpose of this study was to determine the spatial variability of textural attributes of soil and productivity of coffee conilon plantation and defining agricultural management zone, using the technique of cluster analysis associated with geostatistics. The experiment was conducted in a coffee conilon plantation in the municipality of São Mateus, in the State of Espírito Santo, Brazil, planted in double spacing 3.0 x 2.0 x 1.0m (4,000 plants ha⁻¹). The experimental area has dimensions of 107 x 95.7m (10,240 m²), where we marked a grid of 82 sampling points. At each sample point it was determined the percentage of size fractions of soil at the depth of 0.00-0.20m and productivity. The data were subjected to multivariate and geostatistical analysis. There was spatial dependence structure for all variables under study. With the help of cluster analysis technique was delimited two management zones. The association between knowledge of the spatial variability in the definition of management zones can be used to improve application efficiency of agricultural inputs.

Key words: *Coffea canephora*, geostatistics, multivariate analysis.

Introdução

Atualmente, o café conilon (*Coffea canephora* Pierre ex A. Froehner) é a principal cultura no estado do Espírito Santo, gerando uma elevada receita econômica e milhares de empregos diretos e indiretos. Um dos principais fatores que eleva o custo de produção do cafeicultor são os insumos agrícolas, muitas vezes sendo aplicado de forma ineficiente. A associação entre os mapeamentos da produtividade e dos atributos do solo, utilizando a geoestatística, pode auxiliar no manejo mais eficiente da fertilidade do solo, contribuindo assim para uma maior precisão na aplicação de insumos e, conseqüentemente aumento na produção de grãos de café conilon.

Para Alves et al. (2013), o conhecimento da variabilidade espacial dos atributos do solo das lavouras é de fundamental importância para a adoção de práticas de manejo adequadas, não somente para a otimização da produtividade agrícola, mas também para a minimização dos impactos ambientais causado pela agricultura. Silva & Lima (2012) salienta que a variabilidade espacial das propriedades e características do solo e das plantas influencia a produção das culturas, é indispensável na agricultura moderna, uma vez que pequenas alterações no manejo podem levar a grandes diferenças do rendimento da lavoura.

Entretanto, apesar de serem relativamente raros os maquinários e implementos agrícolas destinados à aplicação de insumos em taxas diferenciadas, é possível adaptar os conceitos de zonas de manejo para a cafeicultura. Rodrigues Júnior et al. (2011) define zona de manejo como sub-região da lavoura que apresenta uma combinação de fatores limitantes de produtividade para a qual pode-se realizar aplicação de dose uniforme de insumos agrícolas. Para Miqueloni et al. (2015), as zonas de manejos são sub-áreas da lavoura que podem receber as mesmas práticas agrônômicas, devido ao seu potencial de resposta ser similar e por apresentarem mesmas limitações do uso agrícola.

A associação da técnica de análise multivariada com a geoestatística tem sido utilizada para delimitação das zonas de manejo, possibilitando assim, o uso de um conjunto de fatores determinantes para o desenvolvimento da cultura, bem como a identificação de sua variabilidade no cultivo (RODRIGUES JÚNIOR et al., 2011). Santos et al. (2015), trabalhando com a cultura do café conilon consorciado com a

seringueira, adotaram a associação do método agrupamento hierárquico, também conhecida como análise de Cluster, com a geoestatística para a definição das zonas de manejo, com intuito de realizar o manejo diferenciado dos macronutrientes do solo em cada zona.

Objetivou-se no presente estudo determinar a variabilidade espacial das frações granulométricas do solo, argila, silte e areia, e da produtividade de uma lavoura de café conilon, bem como a definir das zonas de manejo agrícola, utilizando a técnica de agrupamento por método hierárquico associado à geoestatística.

Material e Métodos

O experimento está situado próximo a Rodovia ES 381, Km 23, no município de São Mateus, região norte do estado do Espírito Santo, coordenadas UTM 7935440 m de latitude sul e 384440 m de longitude oeste, zona 24 K no datum WGS 1984. De acordo com a EMBRAPA (2013), o solo foi classificado como Latossolo Amarelo distrófico, com textura Franco Argilo Arenoso, com teores de argila, silte e areia de 231, 150 e 619 g kg⁻¹, respectivamente. O clima da região é Aw, segundo classificação de Köppen, caracterizado por clima tropical úmido, com inverno seco e chuvas máximas no verão.

A área experimental é cultivada com café conilon (*Coffea canephora* Pierre ex A. Froehner), com genótipo denominado Bamburral. A lavoura foi implantada em 2010, aproveitando o plantio de mamão anteriormente cultivado na área, adotou-se o espaçamento duplo entre plantas com 3,0 x 2,0 x 1,0 m (4.000 plantas ha⁻¹) com regime de irrigação por gotejamento. Na ocasião de implantação da lavoura, foi realizada a correção do solo com aplicação de 1.500 kg ha⁻¹ de calcário dolomítico em sulcos e na área total. No plantio, para cada metro de sulco, foi aplicado 5 kg de esterco de galinha em cobertura, além de 100 g de supersimples na cova. Após a retirada da cultura do mamão em 2012, quando o café conilon apresentava uma idade de 2 anos, a condução da lavoura era feita com fertirrigação. O manejo de

adubação e calagem da lavoura é feito anualmente, com base nos resultados obtidos na análise de solo e folha.

Instalou-se uma malha irregular de 107 x 95,7 m (10.240 m²) com 82 pontos, com distância mínima de 2 m (FIGURA 1). Para georreferenciamento da área foi utilizado um par de receptores GPS TechGeo[®], modelo GTR G2 geodésico cujos dados, após serem processados pela Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) do IBGE, apresentaram precisão de 10 mm + 1 ppm.

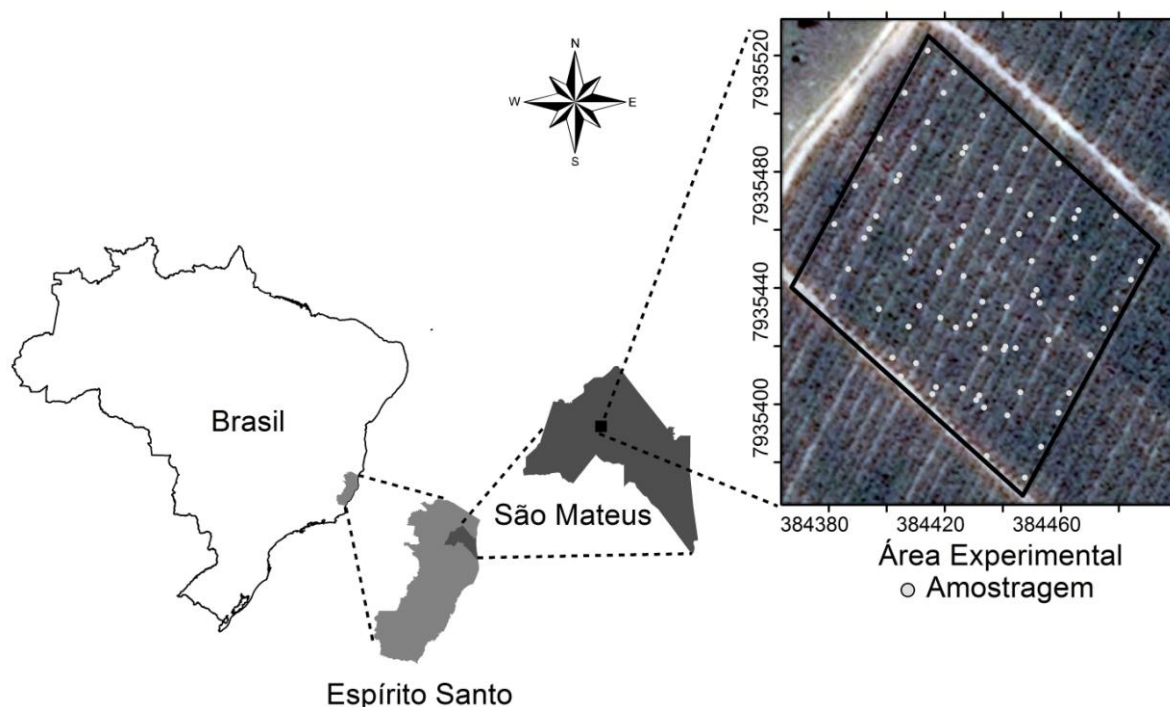


FIGURA 1. Mapa da área experimental, com a distribuição espacial dos pontos amostrais (*datum* WGS 1984, zona UTM 24 K sul).

Em cada ponto amostral, foram coletadas quatro subamostras de solo na projeção da copa do cafeeiro na profundidade de 0,00-0,20m em cada um dos pontos cardeais, com auxílio de um amostrador de solo tipo “sonda”, formando uma amostra composta. Determinou-se os teores argila, silte e areia, pelo método do densímetro conforme a EMBRAPA (1997). A produtividade foi estimada colhendo-se uma planta por ponto amostral, sendo seu valor multiplicado pela população de plantas por hectare (4.000 plantas ha⁻¹).

Para determinação da estrutura de dependência espacial dos atributos físicos do solo e da produtividade do café conilon, realizou-se a análise geoestatística por meio do ajuste dos semivariogramas, com auxílio do programa computacional GS+ Versão 7[®] (GAMMA DESIGN SOFTWARE, 2004), que realiza os cálculos das semivariâncias amostrais, cuja expressão pode ser encontrada em Vieira et al. (1983):

$$\gamma(h) = \frac{\sum_{i=1}^{n(h)} [z(x_i + h) - z(x_i)]^2}{2n(h)} \quad (1)$$

em que: $n(h)$ número de pares amostrais $[z(x_i); z(x_i + h)]$ separados pelo vetor h , sendo $z(x_i)$ e $z(x_i + h)$, valores numéricos observados do atributo analisado, para os pontos x_i e $x_i + h$ separados pelo vetor h .

Posteriormente, realizou-se a interpolação dos valores dos atributos físicos do solo e da produtividade do café conilon, por meio da krigagem ordinária, para observar os mapas de variabilidade espacial das variáveis em estudo. Calculou-se a área e classificou-se os valores interpolados das frações granulométricas do solo e produtividade da lavoura de café conilon em faixas. Os mapas isolinhas foram confeccionados utilizando o software ArcGIS 10.2.2. (ESRI CORP, 2014).

Foi realizada análise de correlação de Pearson ($p < 0,01$), entre os valores de produtividade e das frações granulométricas do solo de cada ponto amostral. Para realização dessa análise, utilizou-se o software estatístico Action v. 2.3 (ACTION DEVELOPMENT CORE TEAM, 2012). Posteriormente, selecionaram-se as correlações significativas, nas quais os atributos apresentaram estrutura de dependência espacial, para serem ajustados os seus semivariogramas cruzados. A produtividade representou a variável primária e as frações granulométricas do solo a variável secundária. A estimativa dos semivariogramas cruzados foi realizada conforme a equação 2 (VIEIRA, 2000):

$$\gamma_{12}(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [Z_1(x_i) - Z_1(x_{i+h})][Z_2(x_i) - Z_2(x_{i+h})] \quad (2)$$

em que: $Z_1(x_i)$ – valor da variável primária no ponto x_i ; $Z_1(x_i + h)$ – valor da variável primária no ponto x_i adicionado de uma distância h ; $Z_2(x_i)$ – valor da variável

secundária no ponto x_i ; $Z_2(x_{i+h})$ – valor da variável secundária no ponto x_i adicionado de uma distância h e n – número de pares de pontos formados para uma dada distância h .

Para o ajuste dos semivariogramas simples e cruzados foram testados os modelos teóricos como o esférico, o exponencial e o gaussiano e definido os seus parâmetros: efeito pepita (C_o), patamar (C_o+C) e alcance (a). Na dúvida entre mais de um modelo para o mesmo semivariograma, considerou-se o maior valor do coeficiente de correlação (CRCV), obtido pelo método de validação cruzada (AMADO et al., 2007). Foi determinado o índice de dependência espacial (IDE), que é a proporção em percentagem do efeito pepita (C_o), em relação ao patamar (C_o+C), dada pela equação 3:

$$IDE = \frac{C_o}{C_o + C} 100 \quad (3)$$

Classificou-se o índice de dependência espacial, de acordo com Cambardella et al. (1994): (a) IDE forte < 25%; (b) IDE moderado de 25 a 75% e (c) IDE fraco > 75%.

Para a definição das zonas de manejo, submeteram-se os valores das variáveis em estudo de cada ponto amostral, à análise de agrupamento hierárquico, também conhecida como análise de Cluster, segundo o método Ward, com o intuito de classificar os pontos amostrais dos atributos do solo e da produtividade em grupos homogêneos. Assim, os pontos amostrais pertencentes a um mesmo grupo, são similares entre si. Enquanto os demais de grupos diferentes são heterogêneas, em relação às mesmas características (SILVA JÚNIOR et al., 2012; WEBSTER & OLIVER, 1990). Iniciou-se esta técnica, com a padronização dos dados, dada pela equação 4, para que cada variável tenha suas escalas normalizadas para o padrão Z ($\mu=0$; $s=1$):

$$Y_{ij} = \frac{X_{ij} - \bar{X}_{ij}}{S_i} \quad (4)$$

onde: X_{ij} – o valor da j -ésima observação da i -ésima variável; \bar{X}_{ij} – a média da variável X_{ij} ; S_i – desvio padrão da variável X_{ij} ; Y_{ij} – a j -ésima observação da i -ésima variável padronizada.

O número de zonas de manejo foi definido “a sentimento”, cujo pesquisador especifica o nível de agrupamento de acordo com um critério de fácil interpretação (MARDIA et al., 1997; SILVA JÚNIOR et al., 2012). Para realização da análise multivariada, utilizou-se o software estatístico Action v. 2.3 (ACTION DEVELOPMENT CORE TEAM, 2012). Foram confeccionados os mapas de zonas de manejo usando o interpolador inverso da distância ao quadrado (Inverse Distance Weighted – IDW), a partir dos grupos definidos, por meio do software ArcGIS 10.2.2. (ESRI CORP, 2014), em que cada ponto pertencente a um mesmo grupo foi colocado na mesma zona de manejo.

Resultados e Discussão

Os modelos matemáticos, ajustados aos semivariogramas pelo uso da geoestatística, mostraram que as variáveis em estudo apresentaram estrutura de dependência espacial (FIGURA 2). O modelo esférico foi o que melhor ajustou-se aos semivariogramas experimentais. Ajustes semelhantes foram encontrados por Lima et al. (2012) para argila em uma lavoura de café conilon, por Vieira et al. (2011) para a areia e argila estudando variabilidade espacial em um Latossolo Vermelho e por Ferraz et al. (2012) para produtividade em uma lavoura de café arábica cultivado em um Latossolo Vermelho-Amarelo.

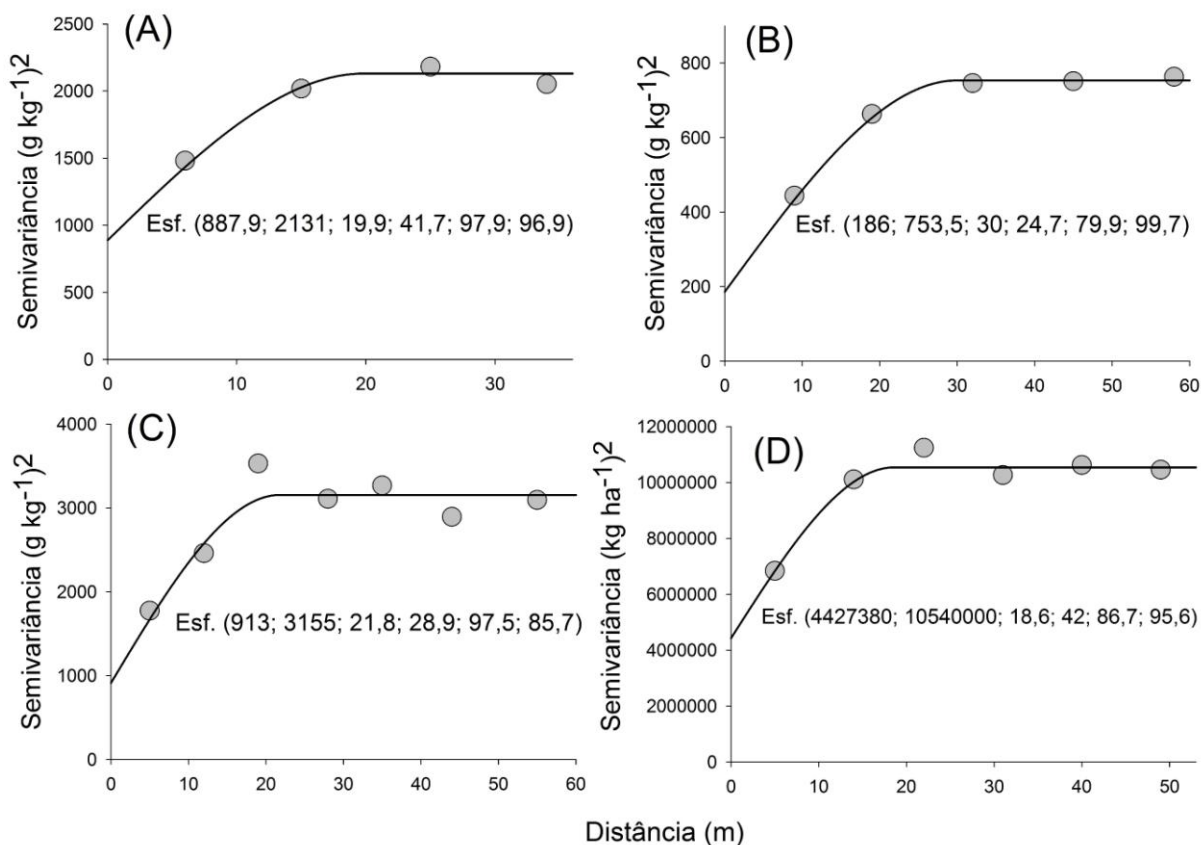


FIGURA 2. Modelos de semivariogramas ajustados para os teores de argila (A), silte (B) e areia (C) e produtividade do café conilon (D). Valores entre parênteses são efeito pepita (C_0), patamar (C_0+C), alcance (a), IDE, CRCV e R^2 , respectivamente. Esf. – modelo esférico.

De acordo com o IDE proposto por Cambardella et al. (1994) as variáveis em estudo foram classificadas como: forte e moderada dependência espacial. Somente para o silte, verificou-se ajuste de semivariograma com IDE < 25%, enquanto os ajustes para as demais variáveis apresentaram IDE variando entre 25 – 75%. Classificações semelhantes foram encontradas por Alves et al. (2014) para a areia e argila em um Latossolo Vermelho-Escuro, por Bottega et al. (2013) para argila e silte em um Latossolo Vermelho distrófico e por Silva et al. (2010) para produtividade de café conilon cultivado em um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico.

No presente estudo, o desempenho dos semivariogramas analisados pelos valores de coeficientes de determinação (R^2) variaram de 85,7 à 99,7%, isso significa que mais de 85,7% da variabilidade existente nos valores da semivariância estimada são explicadas pelos modelos ajustados. Verificaram-se bons ajustes de

CRCV para todos os atributos em estudo, com valores variando entre 79,9 e 97,9%, para o silte e argila, respectivamente.

Os valores das frações granulométricas do solo e da produtividade foram interpolados e classificados em faixas, utilizando-se a krigagem como interpolador, após o ajuste dos modelos dos semivariogramas, gerando assim, os mapas de variabilidade espacial (TABELA 1, FIGURA 3). Na FIGURA 3, pode-se visualizar a distribuição espacial para cada variável em estudo, observou-se que a região de maiores teores está representada com coloração mais escura. Verifica-se, na FIGURA 3 C, que as faixas dos teores de areia 2 (568 – 620 g kg⁻¹) e 3 (620 – 664 g kg⁻¹) correspondem 4.082 e 3.867m² respectivamente, e estão bem distribuídas ao longo lavoura e representam aproximadamente 77,6% da área em estudo.

TABELA 1. Faixas de valores interpolados para os mapas isolinhas para as frações granulométricas do solo e produtividade da lavoura de café conilon.

	Faixas				Total
	1	2	3	4	
	----- m ² -----				
Argila	1.494	3.194	3.983	1.569	10.240
Silte	2.003	1.674	5.376	1.187	10.240
Areia	1.085	4.082	3.867	1.206	10.240
Produtividade	1.323	4.017	4.243	657	10.240

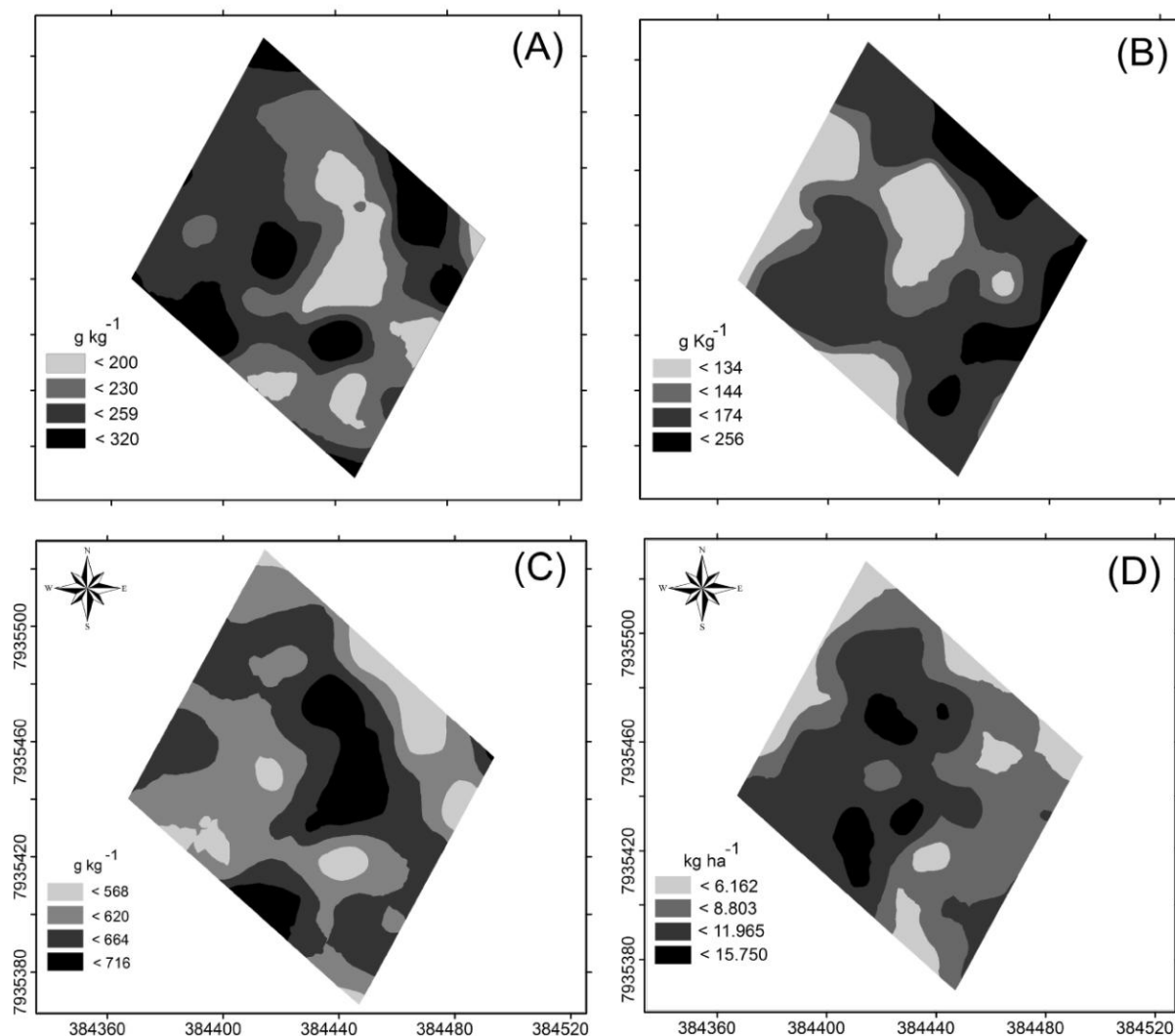


FIGURA 3. Mapas de variabilidade espacial dos teores de argila (A), silte (B) e areia (C) e produtividade da lavoura de café conilon (D).

Na FIGURA 3 A e B, observa-se que 69,9% e 51,9% da área experimental representam as faixas dos teores de argila ($201 - 259 \text{ g kg}^{-1}$) e silte ($144 - 174 \text{ g kg}^{-1}$), respectivamente. Ambas as faixas estão bem distribuídas ao longo da lavoura. Na FIGURA 3 D, no sentido centro oeste pode ser verificado em uma área de 4.900 m^2 , as maiores produtividades, variando entre $8.803 - 15.750 \text{ kg ha}^{-1}$.

Na TABELA 2, foi apresentada a matriz de correlação linear de Pearson entre a produtividade do café conilon e das frações granulométricas areia, argila e silte, ao nível de 1% de significância. Com exceção do silte, as demais frações granulométricas apresentaram correlação significativa com a produtividade.

Verificou-se coeficiente de correlação moderado e positivo para a produtividade *versus* fração areia ($r = 0,36^{**}$) e coeficiente de correlação moderado e negativo para a produtividade *versus* fração argila ($r = -0,31^{**}$). Silva & Lima (2013a) em estudos com atributos físicos do solo e sua relação com a produtividade do café arábica, obtiveram-se correlação positiva entre a produtividade *versus* fração areia, em um Latossolo Vermelho Amarelo úmido com textura argilosa. Montanari et al. (2015) verificaram correlação significativa positiva entre produtividade de matéria verde e seca de forragem com a fração granulométrica areia na camada de 0,0-0,10 m, em seu experimento sobre variabilidade espacial em Planossolo Hidromórfico cultivado com sorgo forrageiro.

TABELA 2. Matriz de correlação linear de Pearson entre a produtividade de café conilon e de atributos físicos do solo

Produtividade (kg ha ⁻¹)	Areia	Argila	Silte
	----- g kg ⁻¹ -----		
	0,36 ^{**}	-0,31 ^{**}	-0,21 ^{ns}

** – significativo à 1 %; ^{ns} – não significativo.

No presente estudo, a areia foi à fração granulométrica que apresentou maior valor de coeficiente de correlação, ou seja, a que mais influenciou de forma direta para a produção da lavoura de café conilon. Esse fato pode ser justificado por ser tratar de uma lavoura que recebe um alto nível tecnológico, sendo o manejo de adubação realizado com alta frequência via fertirrigação. Silva & Lima (2013a) salienta que a correlação positiva entre produtividade e fração areia pode está relacionada com a estruturação do solo. Para Prusk (2009) e Spohr et al. (2009), os solos arenosos apresentam taxas de infiltração de água muito maior do que os solos argilosos com estrutura instável.

Verificam-se na FIGURA 4, os ajustes dos semivariogramas cruzado para as variáveis que apresentaram correlação linear significativa e estrutura de dependência espacial. Ambas as relações produtividade *versus* fração areia e produtividade *versus* fração argila ajustaram-se ao modelo esférico e apresentaram IDE forte (< 25%). Verificou-se que 85,0% e 80,1% da produtividade do café conilon, representado pelo valor de coeficiente de determinação, pode ser explicada pela

variabilidade espacial da areia e argila, respectivamente. A FIGURA 4. A, apresenta a correlação espacial positiva para a produtividade *versus* fração areia. Isto significa que, em locais com maiores teores de areia tendem apresentar altos valores de produtividades, e vice-versa.

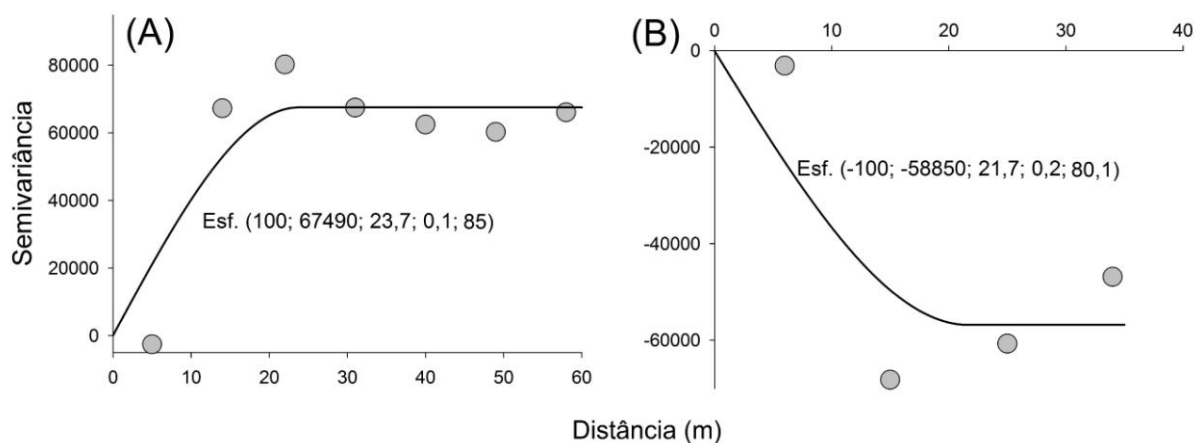


FIGURA 4. Semivariograma cruzado entre produtividade do café conilon e teores areia (A) e argila (B). Valores entre parênteses são efeito pepita (C_0), patamar (C_0+C), alcance (a), IDE e R^2 , respectivamente. Esf. – modelo esférico.

Entretanto, na FIGURA 4 B pode-se observar valores semivariância negativa. Silva & Lima (2013b) afirmam que essa correlação espacial negativa é comum em semivariograma cruzado.

Os resultados referentes à análise de agrupamento são apresentados na FIGURA 5, em que no dendrograma ilustrativo, houve a determinação de duas zonas de manejo (FIGURA 6), onde as zonas de manejo 1 e 2 correspondem a uma área de 6.391 m² e 3.849 m², respectivamente.

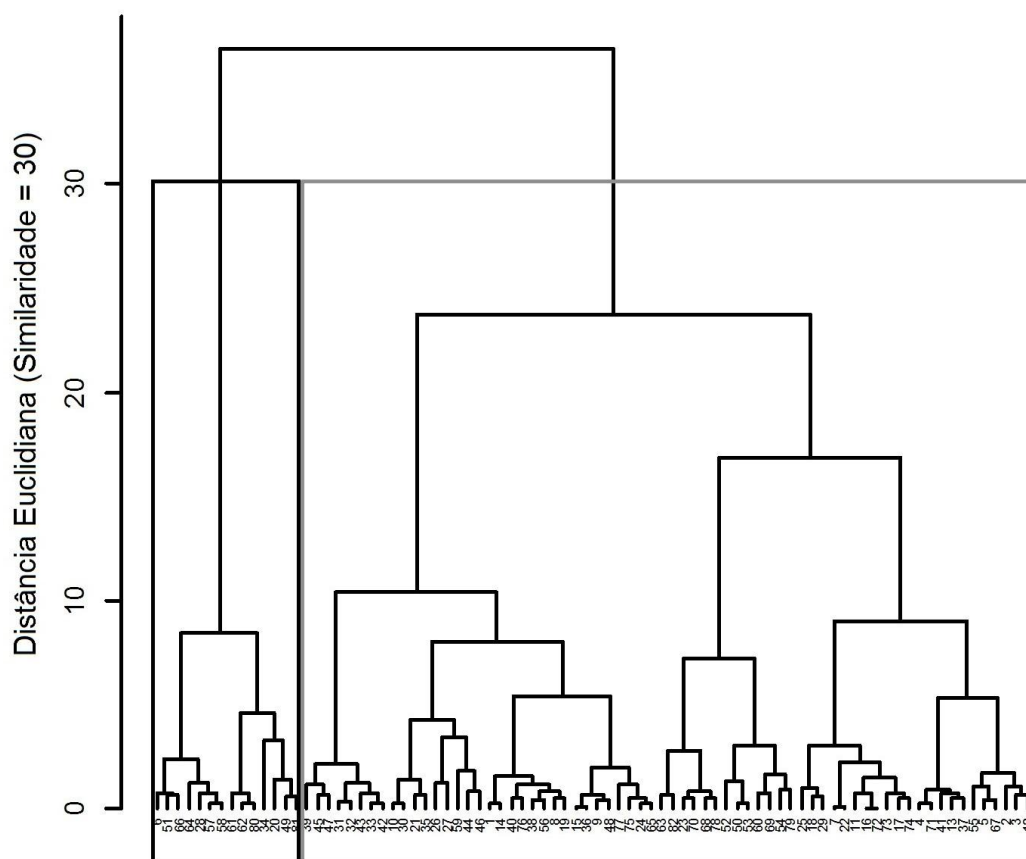


FIGURA 5. Dendrograma ilustrativo resultante da análise de agrupamento das frações granulométricas do solo e da produtividade (similaridade de 30,0).

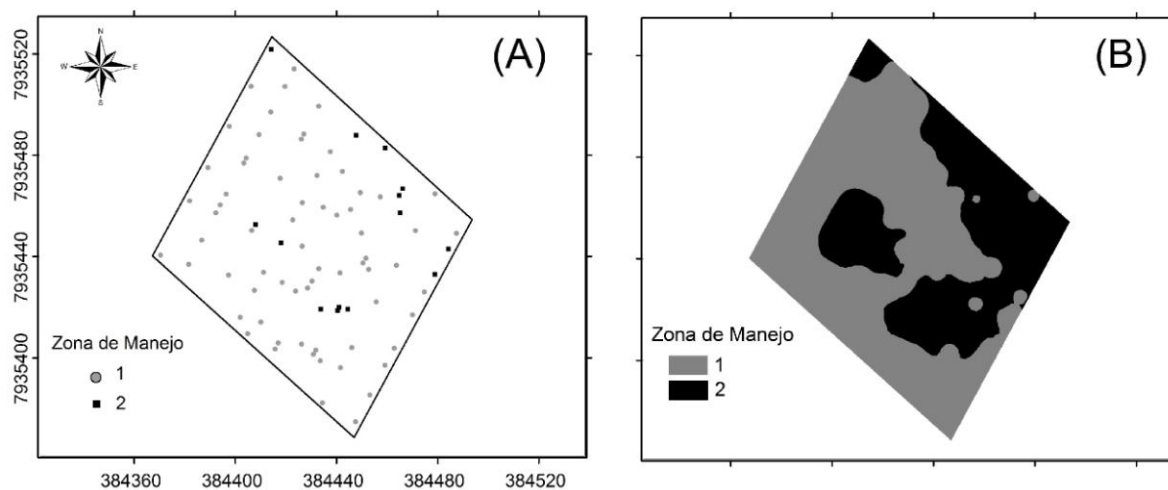


FIGURA 6. Distribuição espacial dos pontos amostrais das zonas de manejo geradas (A) e mapas isolinhas das zonas de manejo (B).

No presente estudo, definiu-se o número mínimo de duas zonas de manejo devido à área experimental ser relativamente pequena (10.238 m²) e por possibilitar o planejamento agrícola, facilitando a execução do manejo localizado de insumos na lavoura dos agricultores. Santos et al. (2015) delimitaram três zonas de manejo para macronutrientes do solo, em um Argissolo Amarelo distrófico, cultivado com café conilon consorciado com seringueira, em uma área experimental de 1.512 m². Delalibera et al. (2012), estudando zonas de manejo agrícola em uma lavoura de aproximadamente 96.000 m² sob Latossolo Vermelho Amarelo distrófico, delimitaram cinco zonas de manejo.

Na FIGURA 6 A, pode-se visualizar o posicionamento de cada ponto pertencentes às zonas de manejos 1 e 2. Verificou-se para a zona de manejo 2 que, aproximadamente 57% dos seus pontos, estão localizados na região nordeste a leste da lavoura. Essa região coincide com as faixas de variabilidade espacial de menor valor de produtividade e teores de areia e com maiores valores de silte e argila (FIGURA 3). Já a zona de manejo 1, correspondente a 82,9% dos pontos da malha amostral, encontra-se a maior parte na região central a oeste do mapa (FIGURA 6 A), sobrepondo com os maiores valores de produtividade.

A FIGURA 6 B, apresenta os limites referentes às zonas de manejo 1 e 2. Levando em consideração a inexistência de equipamento necessário para realizar o manejo localizado na cafeicultura e o intuito de aumentar a eficiência de aplicação de insumos agrícolas, o cafeicultor poderá realizar o manejo uniforme da calagem e da fertilidade do solo para cada zona de manejo em sua lavoura.

Conclusão

Verificou-se estrutura de dependência espacial para todas as frações granulométricas do solo e para a produtividade, com índice de dependência espacial moderado e forte.

A integração entre a análise de agrupamento hierárquico com variabilidade espacial dos atributos do solo e da produtividade foi eficaz na delimitação das zonas de manejo em uma lavoura de café conilon.

A associação entre o conhecimento da variabilidade espacial com a definição de zonas de manejo pode ser usado para melhorar a eficiência de aplicação de insumos agrícolas.

Referências Bibliográficas

ACTION DEVELOPMENT CORE TEAM. Action 2.3: ESTATCAMP. São Carlos, 2012.

ALVES, S.M.F.; QUEIROZ, D.M.; ALCÂNTARA, G.R.; REIS, E.F. Variabilidade espacial de atributos físico-químicos do solo usando técnicas de análise de componentes principais e geoestatística. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v.30, suplemento 1, p.22-30, 2014.

ALVES, S.M.F.; ALCÂNTARA, G.R.; REIS, E.F.; QUEIROZ, D.M.; VALENTE, D.S.M. Definição de zonas de manejo a partir de mapas de condutividade elétrica e matéria orgânica. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v.29, n.1, p.104-114, 2013.

AMADO, T.J.C.; PONTELLI, C.B.; SANTI, A.L.; VIANA, J.H.M.; SULZBACH, L.A.S. Variabilidade espacial e temporal da produtividade de culturas sob sistema de plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.42, n.8, p.1101-1110, 2007.

BOTTEGA, E.L.; QUEIROZ, D.M.; PINTO, F.A.C.; SOUZA, C.M.A. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo em sistema de semeadura direta com rotação de culturas no cerrado brasileiro. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v.44, n.1, p.1-9, 2013.

CAMBARDELLA, C.A. MOORNAM, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KARLEN, D.L.; TURCO, R.F.; KONOPKA, A.E.E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, n.5, p.1501-1511, 1994.

DELALIBERA, H.C.; WEIRICH NETO, P.H.; NAGATA, N. Management zones in agriculture according to the soil and landscape variables. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.32, n.6, p.1197-1204, 2012.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Rio de Janeiro, 2013. 353 p.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa CNPS, 1997. 212p.

ESRI CORP (2014). ArcGIS 10.2.2. Disponível em: <
<http://www.esri.com/software/arcgis> >.

FERRAZ, G.A.S.; SILVA, F.M.; CARVALHO, L.C.C.; ALVES, M.C.; FRANCO, B.C. Variabilidade espacial e temporal do fósforo, potássio e da produtividade de uma lavoura cafeeira. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.32, n.1, p.140-150, 2012.

GAMMA DESIGN SOFTWARE. **Geostatistics for the environmental sciences**. Version 7.0. Michigan, 2004. CD Rom.

LIMA, J.S.S.; OLIVEIRA, R.B.; SILVA, S.A. Spatial variability of particle size fractions of an Oxisol cultivated with conilon coffee. **Revista Ceres**, Viçosa, v.59, n.6, p.867-872, 2012.

MARDIA, A.K.V.; KENT, J.T.; BIBBY, J.M. **Multivariate analysis**. London: Academic Press, 1997. 518p.

MIQUELONI, D.P.; GIANELLO, E.M.; BUENO, C.R.P. Variabilidade espacial de atributos e perda de solo na definição de zonas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v.45, n.1, p.18-28, 2015.

MONTANARI, R.; PANACHUKI, E.; LOVERA, L.H.; CORREA, A.R.; OLIVEIRA, I.S.; QUEIROZ, H.A.; TOMAZ, P.K. Variabilidade espacial da produtividade de sorgo e de atributos do solo na região do ecótono cerrado pantanal, MS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.39, p.385-396, 2015.

PRUSK, F.F. **Conservação de solo e água: práticas mecânicas para o controle de erosão hídrica**. 2ª ed. Viçosa: UFV, 2009. 279 p.

RODRIGUES JÚNIOR, F.A.; VIEIRA, L.B.; QUEIROZ, D.M.; SANTOS, N.T. Geração de zonas de manejo para cafeicultura empregando-se sensor SPAD e análise foliar. **Revista Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.15, n.8, p.778-787, 2011.

SANTOS, E.O.J.; PINTO, F.B.; BARBOSA, M.A.; GONTIJO, I. Delineamento de zonas de manejo para macronutrientes em lavoura de café conilon consorciada com seringueira. **Coffee Science**, Lavras, v.10, n.3, p.309-319, 2015.

SILVA, S.A.; LIMA, J.S.S. Atributos físicos do solo e sua relação espacial com a produtividade do café arábica. **Coffee Science**, Lavras, v.8, n.4, p.395-403, 2013a.

SILVA, S.A.; LIMA, J.S.S. Relação espacial entre o estoque de nutrientes e a densidade de solo cultivado com cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 43, n.4, p. 377-384, 2013b.

SILVA, S.A.; LIMA, J.S.S. Multivariate analysis and geostatistics of the fertility of a humic rhodic hapludox under coffee cultivation. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.36, n.2, p.467-474, 2012.

SILVA, S.A.; LIMA, J.S.S.; SOUZA, G.S.; OLIVEIRA, R.B.; XAVIER, A.C. Lógica fuzzy na avaliação da fertilidade do solo e produtividade do café conilon. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v.41, n.1, p.9-17, 2010.

SILVA JÚNIOR, J.F.; SIQUEIRA, D.S.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T. Classificação numérica e modelo digital de elevação na caracterização espacial de atributos dos solos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.16, n.4, p.415-424, 2012.

SPOHR, R.B.; CARLESSO, R.; GALLÁRRETA, C.G.; PRÉCHAC, F.G.; PETILLO, M.G. Modelagem do escoamento superficial a partir das características físicas de alguns solos do Uruguai. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.39, n.1, p.74-81, 2009.

VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V., V.H.; SCHAEFER, G.R. (Ed) **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1, p.1-54.

VIEIRA, S.R.; DECHEN, S.C.F.; SIQUEIRA, G.M.; DUFRANC, G. Variabilidade espacial de atributos físicos e químicos relacionados com o estado de agregação de dois Latossolos cultivados no sistema de semeadura direta. **Bragantia**, Campinas, v.70, n.1, p.185-195, 2011.

VIEIRA, S.R.; HATFIELD, J.L.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, Berkeley, v.51, n.3, p.1-75, 1983.

WEBSTER, R.; OLIVER, M.A. **Statistical methods in soil and land resource survey**. Oxford: Oxford University Press. 1990. 316p.

3.2. VARIABILIDADE E CORRELAÇÃO ESPACIAL DA PRODUTIVIDADE COM OS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO EM UMA LAVOURA DE CAFÉ CONILON

Resumo

Estudos que visem elucidar o comportamento espacial dos atributos físicos do solo associada à resposta de produtividade das lavouras podem contribuir para o manejo do solo, possibilitando ganhos econômicos e ambientais. Objetivou-se no presente trabalho determinar a variabilidade espacial dos atributos físicos do solo, bem como sua correlação espacial com a produtividade de uma lavoura de café conilon cultivado em um Latossolo Amarelo distrófico. O estudo foi realizado em uma lavoura comercial de café conilon, em regime de irrigação por gotejamento, no município de São Mateus – ES. Instalou-se uma malha irregular de 107 x 95,7 m (10.240 m²) com 65 pontos, com distância mínima de 2 m. Em cada ponto amostral foram coletadas amostras de solo na projeção da copa do cafeeiro, na profundidade de 0,0-0,20 m. A produtividade da lavoura foi estimada por meio da colheita da planta a cada ponto amostral, sendo seu valor multiplicado pela população de

plantas por hectare (4.000 plantas ha⁻¹). Com exceção da Dp, todas as variáveis em estudo apresentaram dependência espacial, com IDE forte e moderado. Verificou-se correlação espacial positiva para macroporosidade e volume total de poros e negativa para densidade do solo, microporosidade e capacidade de armazenamento de água do solo com a produtividade do café conilon.

Palavras-chave: Geoestatística, semivariograma cruzado, manejo do solo.

Abstract

Studies aimed at elucidating the spatial behavior of soil physical attributes associated with crop yield response can contribute to soil management, enabling economic and environmental gains. The objective of this work was to determine the spatial variability of soil physical properties and their spatial correlation with the productivity of a conilon coffee plantation grown in a Yellow Latosol. The study was conducted in a commercial crop of conilon coffee, in drip irrigation system, in São Mateus, state Espírito Santo, Brazil. It was installed an irregular grid of 107 x 95.7 m (10,240 m²) with 65 points, with a minimum distance of 2 m. At each sample point, soil was collected from under the coffee conilon canopies in the 0.0-0.20 m layer. The productivity of the crop was estimated by the plant harvest of each sample point, and its value multiplied by the population of plants per hectare (4,000 plants ha⁻¹). Except for Dp, all the variables under study present spatial dependence, with strong and moderate spatial dependence index. There was a positive spatial correlation to macroporosity and total pore volume and negative for bulk density, microporosity and soil water storage capacity with productivity conilon coffee.

Keywords: Geostatistics, cross semivariogram, soil management.

Introdução

Atualmente, com o crescimento do êxodo rural, os cafeicultores capixabas vêm sofrendo com a carência de mão de obra para realizar o manejo de suas lavouras de conilon, principalmente no norte do estado, onde se localiza os maiores produtores. Com isso, e aliado à eficiência dos maquinários e implementos agrícolas para cafeicultura, o agricultor tem buscado mecanizar suas lavouras.

Entretanto, a intensificação do tráfego dos tratores agrícolas pode ocasionar problemas relacionados à compactação do solo. Severiano et al. (2010) salienta que operações de mecanização agrícola como preparo do solo, pulverização, colheita e entre outras, realizadas em solos com condições inadequadas de umidade, pode influenciar negativamente sua qualidade, proporcionando assim, o aumento da densidade, com aproximação das partículas sólidas entre si, provoca a redução da macroporosidade do solo.

Os impactos da intensificação do tráfego nas lavouras agrícolas afetam de forma significativa as propriedades físicas do solo (BLANCO-CANQUI et al., 2010), portanto é necessário o monitoramento dos atributos do solo para evitar a redução da produção da lavoura. Uma das formas de detectar a perda da qualidade estrutural do solo nas lavouras de café é através da aplicação de técnicas geoestatísticas (KAMIMURA et al., 2013; SILVA & LIMA, 2013b). O conhecimento da variabilidade espacial dos atributos físicos do solo junto com a produtividade do café conilon pode auxiliar nas decisões quanto ao planejamento e manejo a ser adotado. Grego et al. (2012) salienta que a detecção da distribuição espacial do solo e da planta podem otimizar o sistema de produção agrícola.

Para Montanari et al. (2013) a agricultura de precisão permitiu realizar estudo da produção das culturas em função da variabilidade dos atributos do solo. A correlação espacial, por meio da variação do espaço e do tempo, podem detectar atributos físicos do solo que afetam o rendimento das lavouras (DALCHIAVON et al., 2011). Estudos de correlação entre produtividade com atributos físicos do solo têm sido realizados por Silva & Lima (2013a) para cultura de café arábica, por Montanari et al. (2015) para a cultura do sorgo e por Carvalho et al. (2012) para a cultura do eucalipto.

Neste contexto, objetivou-se no presente estudo determinar a variabilidade espacial da densidade do solo, densidade de partículas, macroporosidade, microporosidade, volume total de poros e capacidade de armazenamento de água do solo, bem como sua correlação espacial com a produtividade de uma lavoura de café conilon cultivado em um Latossolo Amarelo distrófico.

Material e Métodos

Conduziu-se o experimento em uma lavoura de café conilon localizada nas coordenadas UTM 7935440 m de latitude sul e 384440 m de longitude oeste, zona 24 K no *datum* WGS 1984, no município de São Mateus, estado do Espírito Santo. Em 2010, a lavoura foi implantada, com o genótipo Bamburral, em um espaçamento duplo entre plantas de 3,0 x 2,0 x 1,0m (4.000 plantas ha⁻¹) com regime de irrigação por gotejamento.

Na ocasião de implantação da lavoura, aproveitando o plantio de mamão anteriormente cultivado na área, foi realizada a correção do solo com aplicação de 1.500 kg ha⁻¹ de calcário dolomítico em sulcos e na área total. No plantio, para cada metro de sulco, foi aplicado 5 kg de esterco de galinha em cobertura, além de 100 g de superfosfato simples na cova. Após a retirada da cultura do mamão em 2012, quando o café conilon apresentava uma idade de 2 anos, a condução da lavoura era feita com fertirrigação. O manejo de adubação e calagem da lavoura é feito anualmente, com base nos resultados obtidos na análise de solo e folha.

O controle de plantas daninhas é realizado com capina manual e/ou com aplicação de herbicida utilizando pulverizador costal com capacidade de 20L ou pulverizador COMILL[®], com capacidade de 2000L. O controle fitossanitário é feito de acordo com o acompanhamento de incidência de pragas e doenças na lavoura, utilizando o pulverizador COMILL[®]. Nessas operações agrícolas foi utilizado um trator Yanmar Agritech[®], modelo 1155 cafeeiro, com potência de 55 cv e 45,6 na tomada de força.

Foi instalada uma malha irregular de 107 x 95,7 m (10.240 m²) com 65 pontos, com distância mínima de 2 m (FIGURA 1). Os pontos amostrais foram georreferenciados utilizando um par de receptores GPS TechGeo[®], modelo GTR G2 geodésico cujos dados, após serem processados pela Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) do IBGE, apresentaram precisão de 10 mm + 1 ppm. O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Amarelo distrófico, de acordo com a EMBRAPA (2013). A análise granulométrica do solo na camada 0,0 – 0,20m indicou uma textura franco argilo arenoso, com teores de argila, silte e areia de 231, 150 e 619 g kg⁻¹, respectivamente. O clima da região é Aw, segundo classificação de Köppen, caracterizado por tropical úmido, com inverno seco e chuvas máximas no verão.

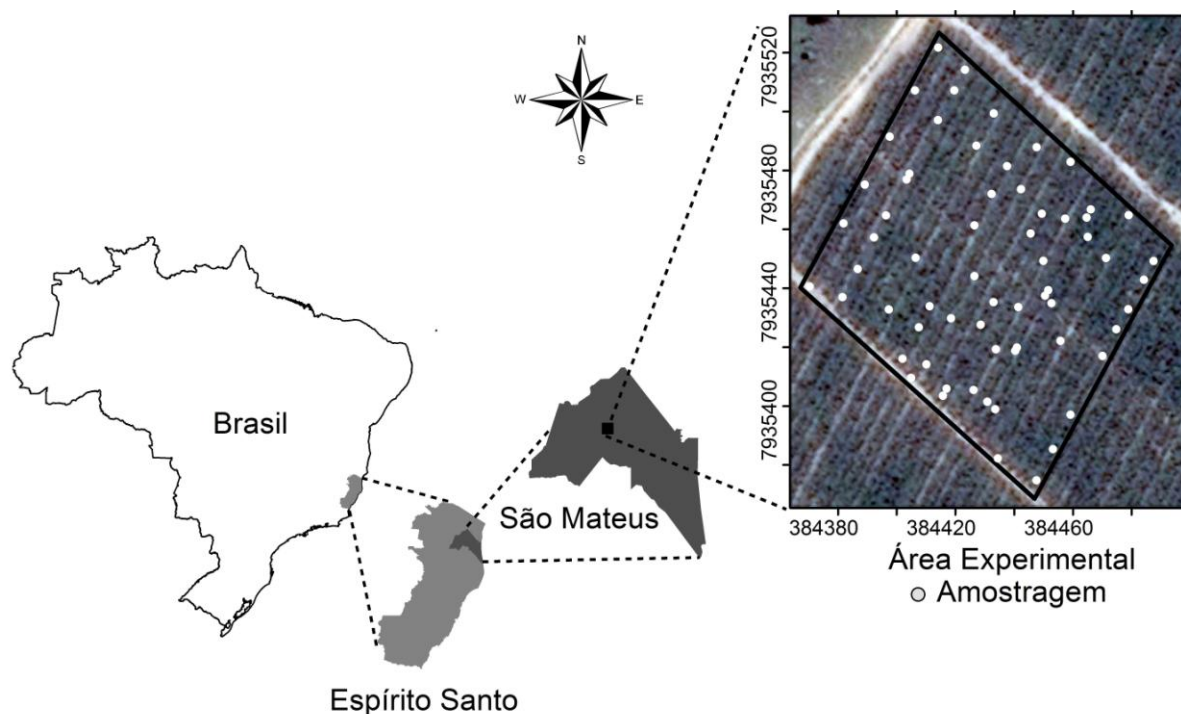


FIGURA 1. Localização da área de estudo e a distribuição espacial dos pontos amostrais.

Para a realização das análises físicas do solo, coletaram-se na projeção copa do cafeeiro, entre a planta e o rodado, amostras indeformadas, extraídas do solo em anéis volumétricos de aço inoxidável e amostras deformadas, extraídas com auxílio de um amostrador de solo tipo “sonda”, ambas na profundidade de 0,00 – 0,20 m em cada ponto amostral. As análises foram realizadas no Laboratório de

Física do Solo no Centro Universitário Norte do Espírito Santo (CEUNES) da Universidade Federal de Espírito Santo (UFES).

As amostras indeformadas foram devidamente preparadas, e posteriormente, saturadas por 48 horas em uma bandeja plástica, por meio da elevação de uma lâmina d'água até 2/3 da altura dos anéis. A massa de solo saturada foi pesada, e em seguida, as amostras foram submetidas à drenagem na tensão de 6 kPa (equivalente a 60 cm de coluna d'água) por 72 horas, em uma mesa de tensão Eijkelkamp[®], para a determinação da microporosidade do solo (EMBRAPA, 1997). Posteriormente, as amostras foram submetidas às tensões de 10 e 1500 kPa, utilizando o extrator de Richards SoilMoisture[®] com placa porosa, para determinar o teor de água na capacidade de campo (θ_{CC}) e ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), respectivamente. Por fim, as amostras foram levadas a estufa por 24 horas a uma temperatura de 105 °C, para obter os valores de massa de solo seco.

O volume total de poros (VTP) foi definido pela relação entre a densidade do solo (D_s) e a densidade de partículas (D_p), pela expressão $VTP = [1 - (D_s/D_p)]$. A D_s foi calculada pela relação entre massa seca do solo e o volume interno do anel. A macroporosidade do solo (Macro) foi determinada pela diferença entre o VTP e a microporosidade do solo (Micro). As amostras deformadas foram usadas para a determinação da D_p pelo método do balão volumétrico. As análises físicas do solo foram realizadas e os valores dos atributos do solo determinados, usando as orientações da Embrapa (1997). A capacidade de armazenamento de água do solo (CAD) para a profundidade de 0,00 – 0,20 m foi calculada pela expressão $CAD = [(\theta_{CC} - \theta_{PMP}) \cdot D_s \cdot 200]$. A produtividade foi estimada por meio da colheita da planta de cada ponto amostral, sendo seu valor multiplicado pela população de plantas por hectare (4.000 plantas ha⁻¹).

As análises de dependência espacial dos atributos do solo e da produtividade foram realizadas, pela aplicação da técnica geoestatística, através de ajustes de semivariogramas simples (VIEIRA et al., 1983), com base na pressuposição de estacionariedade da hipótese intrínseca, a qual é estimada pela equação 1:

$$\gamma(h) = \frac{\sum_{i=1}^{n(h)} [z(x_i + h) - z(x_i)]^2}{2n(h)} \quad (1)$$

em que: $n(h)$ número de pares amostrais $[z(x_i); z(x_i + h)]$ separados pelo vetor h , sendo $z(x_i)$ e $z(x_i + h)$, valores numéricos observados do atributo analisado, para os pontos x_i e x_{i+h} separados pelo vetor h .

Posteriormente, os modelos de semivariogramas simples ajustados foram usados no desenvolvimento de mapas isolinhas das variáveis em estudo, através da interpolação de seus valores, utilizando a técnica de krigagem ordinária. Para confecção dos mapas de variabilidade espacial foi utilizado o programa computacional ArcGIS 10.2.2. (ESRI CORP, 2014).

Para verificar a correlações espaciais entre a produtividade e os atributos do solo, realizaram-se os ajustes dos semivariogramas cruzados. A produtividade representou a variável primária e os atributos do solo, a variável secundária. A estimativa dos semivariogramas cruzados foi realizada conforme a equação 2 (VIEIRA, 2000):

$$\gamma_{12}(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [Z_1(x_i) - Z_1(x_{i+h})][Z_2(x_i) - Z_2(x_{i+h})] \quad (2)$$

em que: $Z_1(x_i)$ – valor da variável primária no ponto x_i ; $Z_1(x_i + h)$ – valor da variável primária no ponto x_i adicionado de uma distância h ; $Z_2(x_i)$ – valor da variável secundária no ponto x_i ; $Z_2(x_{i+h})$ – valor da variável secundária no ponto x_i adicionado de uma distância h e n – número de pares de pontos formados para uma dada distância h .

A análise geoestatística foi realizada com auxílio do software GS+ Versão 7[®] (GAMMA DESIGN SOFTWARE, 2004). Para o ajuste dos semivariogramas simples e cruzados foram testados os modelos teóricos como o esférico, o exponencial e o gaussiano e definidos os seus parâmetros: efeito pepita (C_0), patamar (C_0+C) e alcance (a). Na dúvida entre mais de um modelo para o mesmo semivariograma, considerou-se o maior valor do coeficiente de correlação (CRCV), obtido pelo método de validação cruzada (AMADO et al., 2007). Foi determinado o índice de

dependência espacial (IDE), que é a proporção em porcentagem do efeito pepita (C_0), em relação ao patamar (C_0+C), dada pela equação 3:

$$IDE = \frac{C_0}{C_0 + C} 100 \quad (3)$$

Classificou-se o índice de dependência espacial, de acordo com Cambardella et al. (1994): (a) IDE forte < 25%; (b) IDE moderado de 25 a 75% e (c) IDE fraco > 75%.

Resultados e Discussão

Na FIGURA 2 e TABELA 1 são apresentados os valores referentes aos parâmetros e os modelos dos semivariogramas que melhor se ajustaram ao comportamento da variabilidade espacial dos atributos físicos do solo e da produtividade de uma lavoura de café conilon. Com exceção da D_p , todas as variáveis em estudo apresentaram dependência espacial (FIGURA 2). Cambardella et al. (1994) e Grego & Viera (2005), relatam que o modelo esférico possui melhor adaptabilidade para descrever o comportamento dos atributos de solo e de plantas, desse modo, tornando-se uns dos mais usados na ciência do solo.

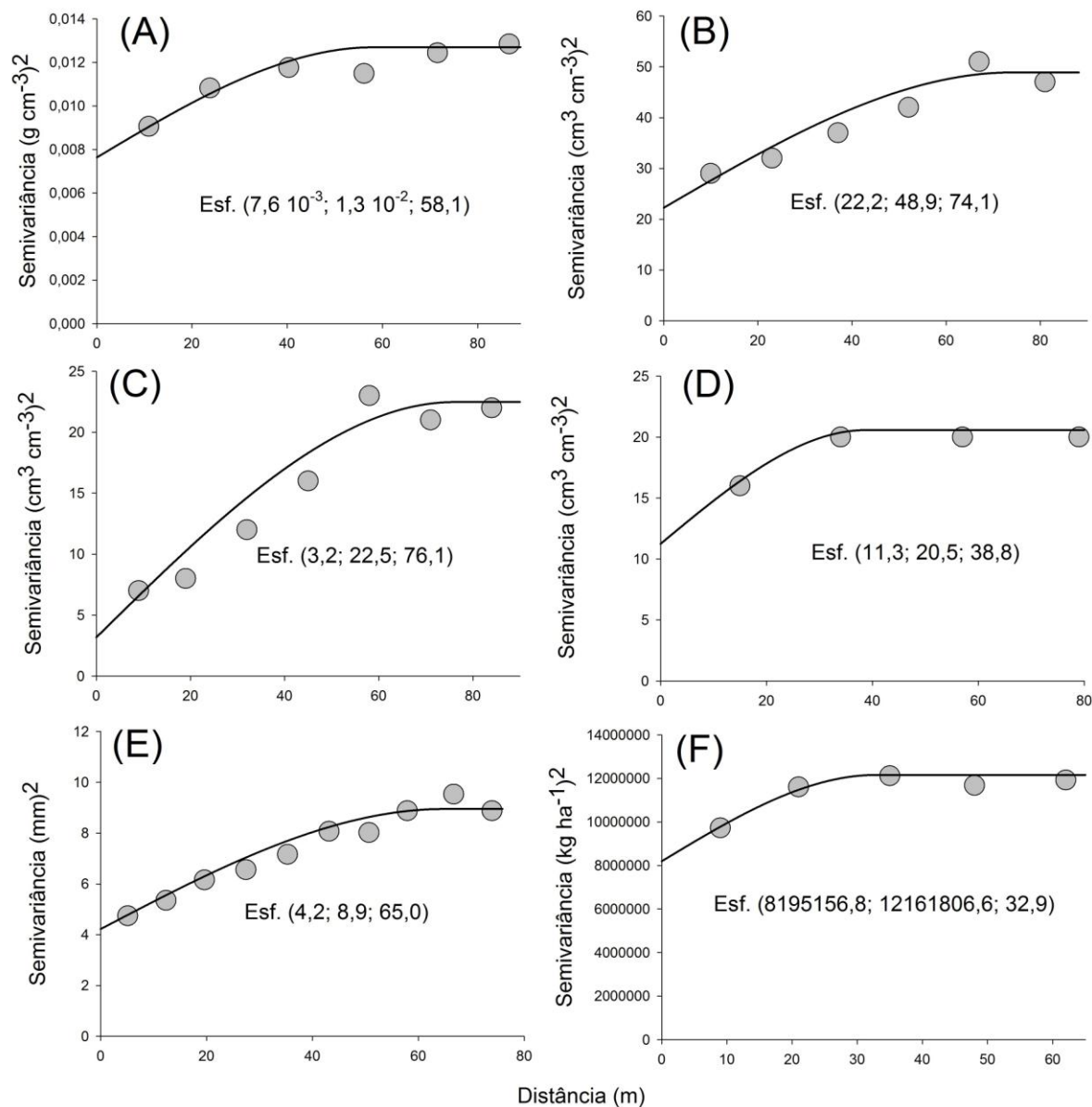


FIGURA 2. Modelos de semivariogramas ajustados para densidade do solo (A), macroporosidade (B) e microporosidade do solo (C), volume total de poros (D), capacidade de armazenamento de água do solo (E) e produtividade do café conilon (F). Valores entre parênteses são efeito pepita (C_0), patamar (C_0+C) e alcance (a) em metros, respectivamente. Esf. – modelo esférico.

TABELA 1. Parâmetros estimados dos semivariogramas experimentais para os atributos físicos do solo e a produtividade, em uma lavoura de café conilon.

Parâmetros	IDE	R ²	CRCV
	-----%-----		
Densidade do Solo	60,2	88,6	45,2
Macroporosidade	45,5	92,3	81,1
Microporosidade	14,1	93,3	87,0
VTP	54,7	99,8	28,4
CAD	46,7	95,5	90,9
Produtividade	67,4	95,4	104,5

VTP – volume total de poros; CAD – capacidade de armazenamento de água do solo; IDE – índice de dependência espacial; R² – coeficiente de determinação; CRCV – coeficiente de regressão de validação cruzada.

Ajustes semelhantes foram observados por Oliveira et al. (2015) para D_s, Macro e Micro em Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico abrupto sob área de floresta tropical e de pastagem, por Souza et al. (2010) para D_s em um Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar, por Siqueira et al. (2008) para CAD na camada de 0,0-0,10m em Latossolo Vermelho eutoférico e por Ferraz et al. (2012) para produtividade em uma lavoura de café arábica cultivado em um Latossolo Vermelho-Amarelo.

Em relação à ausência de estrutura de dependência espacial para D_p, Santos et al. (2012b) estudando o comportamento da variabilidade espacial dos atributos físicos do solo em um Neossolo Flúvico obteve resultado semelhante. Diante disso, Vieira (2000) salienta que os atributos que apresentam efeito pepita puro, pode assumir a independência espacial entre os pontos amostrais para distância maiores que a menor distância da malha amostral.

O efeito pepita (C₀) é o parâmetro do semivariograma, que indica a variabilidade não explicada pelo modelo, que pode ser devida a erros de medição ou variação não detectada pela escala de amostragem. A proporção desse valor com o patamar do modelo é um indicativo para avaliar o índice de dependência espacial

(CAMBARDELLA et al., 1994). Verificou-se IDE forte (< 25%) para o atributo Micro e IDE moderado para os demais atributos em estudo.

Classificações semelhantes foram encontradas por Guimarães et al. (2010) para D_s em um Nitossolo Vermelho distrófico, por Guedes Filho et al. (2010) para D_s e VTP em um Latossolo Vermelho distroférico, por Santos et al. (2012a) para Macro e Micro na camada de 0,0-0,10m em Latossolo Vermelho distroférico típico e por Fonseca et al. (2015) para a produtividade do café conilon. O IDE moderado pode ser explicado pelas variações extrínsecas ocasionadas pelas ações antrópicas como manejo do solo e tratos culturais mecanizados.

No presente estudo, os valores de coeficiente de determinação (R^2) variaram entre 88,6 a 99,8%, isso significa que mais de 88,6% da variabilidade existente nos valores de semivariância estimada pode ser explicadas pelos modelos ajustados. Verificou-se que o CRCV variou entre 28,4 à 104,5%, para VTP e produtividade do café conilon, respectivamente. O maior valor de CRCV indica que a estimativa da produtividade da lavoura, utilizando a técnica de krigagem, apresenta um menor erro e, portanto são mais confiáveis.

Com relação ao alcance de dependência espacial (a), verificam-se os menores valores para produtividade e VTP (32,9 e 38,8 m, respectivamente), valores intermediários para D_s e CAD (58,1 e 65 m, respectivamente) e valores maiores para Macro e Micro (74,1 e 76,1 m, respectivamente). Atributos que apresentam maior alcance de dependência espacial tendem a se apresentar mais homogêneos espacialmente, como pode ser observado no mapa de Micro e Macro (FIGURA 3 B e C). O alcance do VTP influenciou negativamente na confiabilidade da estimativa, esse atributo apresentou o menor alcance e também maior diferença entre pontos amostrados e estimados, como pode-se observar pelo menor CRCV. Corá et al, (2004) afirmam que baixos valores de alcance podem influir negativamente na qualidade das estimativas, uma vez que poucos pontos são usados para realização da interpolação.

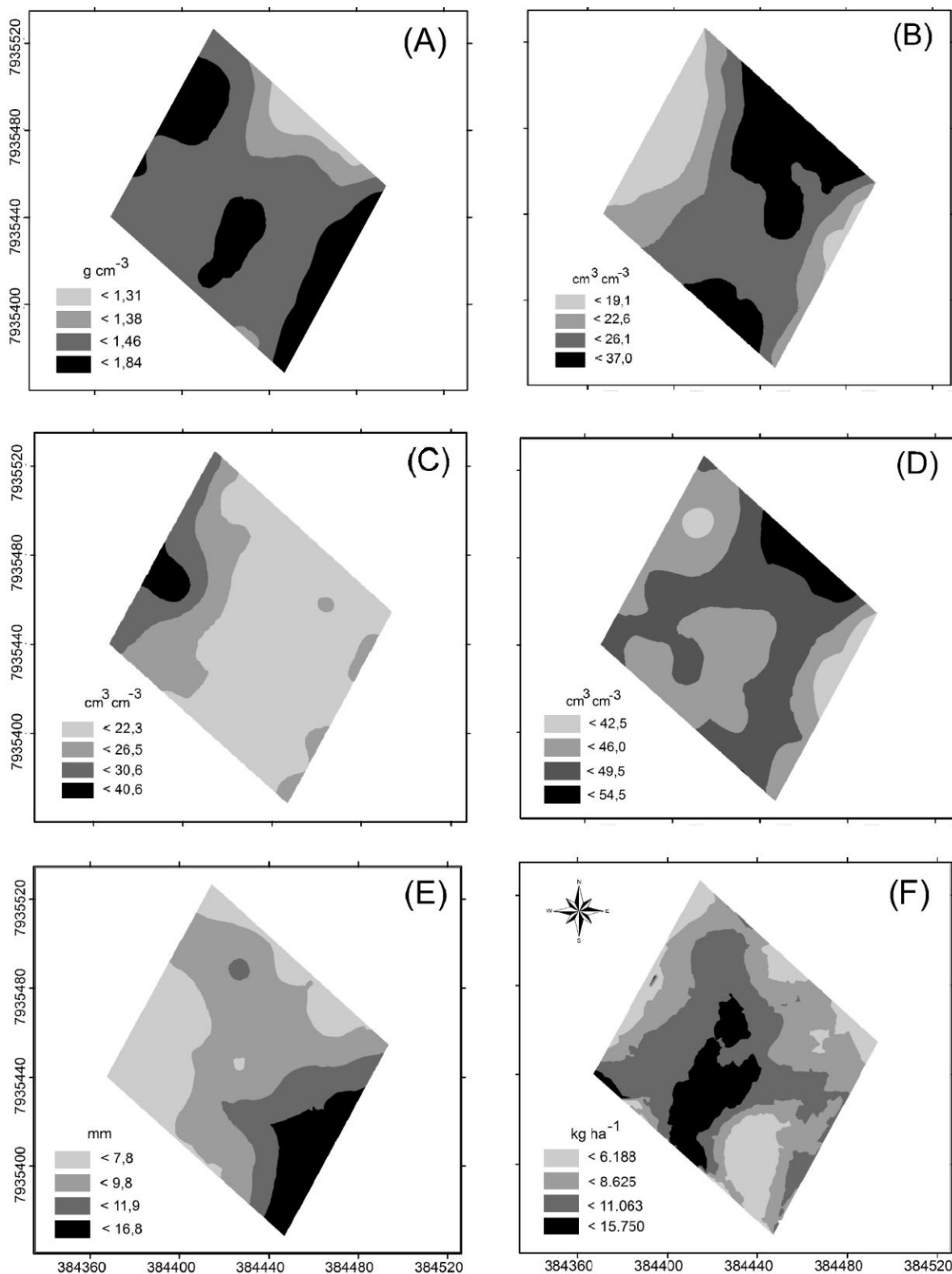


FIGURA 3. Mapas de variabilidade espacial da densidade do solo (A), macroporosidade (B) e microporosidade do solo (C), volume total de poros (D), capacidade de armazenamento de água do solo (E) e produtividade da lavoura de café conilon (F).

Os parâmetros dos modelos ajustados aos semivariogramas, utilizando o processo de krigagem, foram estimados os valores dos atributos físicos do solo e da produtividade do café conilon na área estudada. A partir dos valores estimados construíram-se os mapas de variabilidade espacial (FIGURA 3, TABELA 2). Na FIGURA 3, verificou-se que a região de maiores teores está representada com coloração mais escura. Na FIGURA 3 F, pode ser observada em uma área de 5.031 m², que as maiores produtividade, variando entre 8.625 – 15.750 kg ha⁻¹, localizam-se na região centro oeste da lavoura.

TABELA 2. Faixas de valores interpolados para os mapas isolinhas para atributos físicos do solo e produtividade da lavoura de café conilon.

	Faixas				Total
	1	2	3	4	
	----- m ² -----				
D _s	421	912	6.330	2.577	10.240
Macro	1.604	1.955	3.956	2.725	10.240
Micro	6.707	2.164	1.047	322	10.240
VTP	549	4.485	4.554	652	10.240
CAD	2.844	4.710	1.483	1.203	10.240
Produtividade	1.737	3.472	3.633	1.398	10.240

Na FIGURA 3 A, a faixa com os maiores valores de D_s (1,46 – 1,84 g cm⁻³), representam 25,16% da área em estudo e estão localizadas nas extremidades. Silva & Lima (2013b) salienta que as regiões da lavoura com maiores valores de D_s tendem a reduzir a disponibilidade de nutrientes para as plantas, conseqüentemente, tem-se uma redução na produtividade. Com relação ao mapa de variabilidade espacial da CAD (FIGURA 3 E), verificam-se que os maiores valores da capacidade do solo em armazenar água, representado pelas faixas 3 (9,8 – 11,9 mm) e 4 (11,9 – 16,8 mm), estão localizado na região sul. Bertol & Santos (1995) salienta que em regiões da lavoura com maiores valores de D_s, tendem a promover a redução da

macroporosidade do solo, podendo haver, em muitos casos, um incremento do volume de microporos, o que aumentaria o valor da CAD.

Verifica-se, na FIGURA 3 B e C, que as faixas dos teores de macroporosidade ($22,6 - 37,0 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) e microporosidade do solo ($< 22,3 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) correspondem 6.681 e 6.707 m^2 respectivamente, e estão localizados na região centro sul e leste oeste da área experimental. Na FIGURA 3 D, as faixas 2 ($42,5 - 46,0 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) e 3 ($46,0 - 49,5 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) do mapa isolinha do VTP, correspondem 4.485 e 4.554 m^2 respectivamente, e estão bem distribuídas ao longo lavoura e representam aproximadamente $88,27\%$ da área experimental. Para Reynolds et al. (2002), os valores de macroporosidade do presente estudo são considerados adequados para a planta, em que o limite crítico é de 10% do VTP. Portanto, deve-se ressaltar que o fluxo de gases no solo, ou seja, a oxigenação do sistema radicular do cafeeiro está intimamente relacionada ao seu volume de macroporos (SILVA et al., 2005).

Verificam-se na FIGURA 4, que todas as correlações espaciais entre a produtividade e os atributos do solo ajustaram-se ao modelo esférico. Somente a correlação produtividade *versus* Macro apresentou IDE moderado, enquanto as demais apresentaram IDE forte ($< 25\%$). Verificou-se, na FIGURA 4 B, correlação espacial positiva para a produtividade *versus* Macro. Isto significa que, em locais com maiores valores de macroporosidade do solo tendem apresentar altos valores de produtividades, e vice-versa.

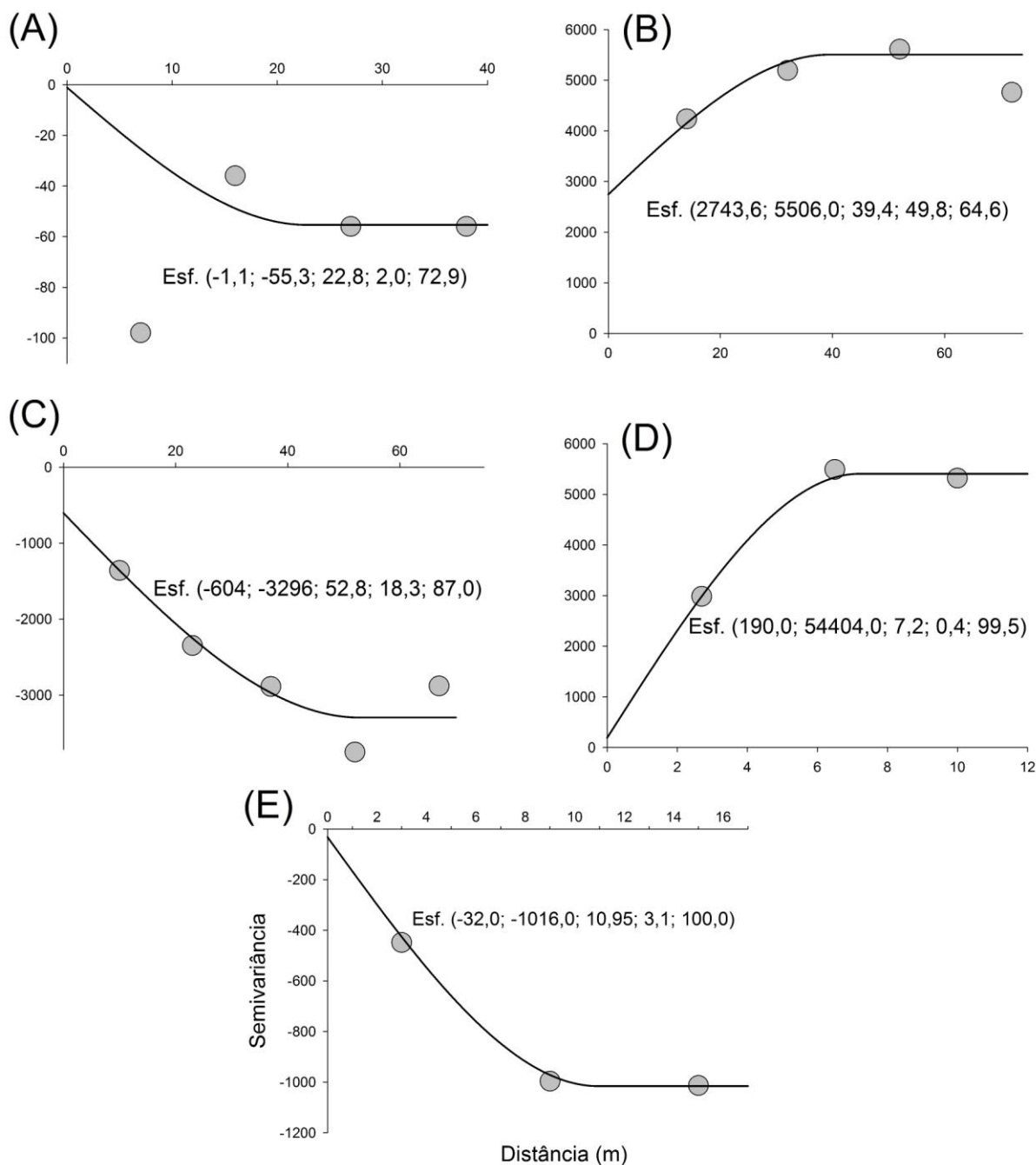


FIGURA 4. Semivariograma cruzado entre produtividade do café conilon e os valores de densidade do solo (A), macroporosidade (B) e microporosidade do solo (C), volume total de poros (D) e capacidade de armazenamento de água do solo (E). Valores entre parênteses são efeito pepita (C_0), patamar (C_0+C), alcance (a), IDE e R^2 , respectivamente. Esf. – modelo esférico.

Entretanto, na FIGURA 4 A, C e E, podem-se observar valores de semivariância negativa. Tal fato pode ser verificado pela interpretação da FIGURA 3 (A, C, E e F), que há relação inversa entre a produtividade e os valores de D_s , Micro

e CAD. Para Guimarães & Lopes (1986) os elevados valores da densidade do solo podem limitar o desenvolvimento e produtividade do cafeeiro. Altos valores de D_s podem promover o aumento da microporosidade do solo, devido à redução dos macroporos, com isso, têm um aumento da capacidade de armazenamento de água do solo.

Conclusão

Somente a densidade de partículas não apresentou estrutura de dependência espacial.

Todas as variáveis ajustaram-se ao modelo esférico, com IDE forte e moderado.

Verificou-se correlação espacial positiva para microporosidade e volume total de poros e negativa para densidade do solo, microporosidade e capacidade de armazenamento de água do solo com a produtividade do café conilon.

Referências Bibliográficas

AMADO, T.J.C.; PONTELLI, C.B.; SANTI, A.L.; VIANA, J.H.M.; SULZBACH, L.A.S. Variabilidade espacial e temporal da produtividade de culturas sob sistema de plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.42, n.8, p.1101-1110, 2007.

BERTOL, I.; SANTOS, J.C.P. Uso do solo e propriedades físico-hídricas no Planalto Catarinense. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.30,n.2, p.263-267, 1995.

BLANCO-CANQUI, H.; CLAASSEN, M.M.; STONE, L.R. Controlled traffic impacts on physical and hydraulic properties in an intensively cropped no-till soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.74, n.6, p. 2142-2150, 2010.

CAMBARDELLA, C.A. MOORNAM, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KARLEN, D.L.; TURCO, R.F.; KONOPKA, A.E.E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, n.5, p.1501-1511, 1994.

CARVALHO, M.P.; MENDONÇA, V.Z.; PEREIRA, F.C.B.L.; ARF, M.V.; KAPPES, C.; DALCHIAVON, F.C. Produtividade de madeira do eucalipto correlacionada com atributos do solo visando ao mapeamento de zonas específicas de manejo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.42, n.10, p.1797-1803, 2012.

CORÁ, J.E.; ARAÚJO, A.V.; PEREIRA, G.T.; BERALDO, J.M.G. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cultura de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 6, p.1013-1021, 2004.

DALCHIAVON, F.C.; CARVALHO, M.P.; ONÃ, F.S.; ANDREOTTI, M. Variabilidade espacial da produtividade do feijoeiro correlacionada com atributos químicos de um Latossolo Vermelho distroférico sob sistema de semeadura direta. **Bragantia**, Campinas, v.70, n.4, p.908-916, 2011.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Rio de Janeiro, 2013. 353 p.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

ESRI CORP (2014). ArcGIS 10.2.2. Disponível em: <
<http://www.esri.com/software/arcgis> >.

FERRAZ, G.A.S.; SILVA, F.M.; CARVALHO, L.C.C.; ALVES, M.C.; FRANCO, B.C. Variabilidade espacial e temporal do fósforo, potássio e da produtividade de uma lavoura cafeeira. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.32, n.1, p.140-150, 2012.

FONSECA, A.S.; LIMA, J.S.S.; SILVA, S.A.; XAVIER, A.C.; DRUMOND NETO, A.P. Spatial variability of the productivity and the nutritional condition of coffee canephora. **Coffee Science**, Lavras, v.10, n.4, p.420-428, 2015.

GAMMA DESIGN SOFTWARE. Geoestatics for the environmental sciences. Version 7.0. Michigan, 2004. CD Rom.

GREGO, C.R.; RODRIGUES, C.A.G.; NOGUEIRA, S.F.; GIMENES, F.M.A.; OLIVEIRA, A.; ALMEIDA, C.G.F.; FURTADO, A.L.S.; DEMARCHI, J.J.A.A. Variabilidade espacial do solo e da biomassa epigea de pastagem, identificada por meio da geoestatística. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.7, n.9, p.1404-1412, 2012.

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

GUEDES FILHO, O.; VIEIRA, S.R.; CHIBA, M.K.; NAGUMO, C.H.; DECHEN, S.C.F. Spatial and temporal variability of crop yield and some rhodic hapludox properties under no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, n.1, p.1-14, 2010.

GUIMARÃES P.T.G.; LOPES, A.S. Solos para o cafeeiro: características, propriedades e manejo. In: RENA A.B., MALAVOLTA E., ROCHA, M.; YAMADA, T. (Eds.) *Cultura do cafeeiro: fatores que afetam a produtividade*. Piracicaba, Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1986. p.115-161.

GUIMARÃES, R.M.L.; GONÇALVES, A.C.A.; TORMENA, C.A.; FOLEGATTI, M.V.; BLAINSKI, É. Variabilidade espacial de propriedades físico-hídricas de um Nitossolo sob a cultura do feijoeiro irrigado. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.30, n.4, p.657-669, 2010.

KAMIMURA, K.M.; SANTOS, G.R.; OLIVEIRA, M.S.; DIAS JÚNIOR, M.S.; GUIMARÃES, P.T.G. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo, sob lavoura cafeeira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.37, n.4, p.877-888, 2013.

MONTANARI, R.; NAGEL, P.L.; LUZ, A.P.; SILVA, E.N.S.; REZENDE, I.S.; SILVA, L. V.; MACHADO, F.C.; ROQUE, C.G. Correlação espacial e temporal de atributos físicos do solo com a produtividade do feijão em Chapadão do Sul – MS. **Revista Agrarian**, Dourados, v.6, n.21, p.289-302, 2013.

MONTANARI, R.; PANACHUKI, E.; LOVERA, L.H.; CORREA, A.R.; OLIVEIRA, I.S.; QUEIROZ, H.A.; TOMAZ, P.K. Variabilidade espacial da produtividade de sorgo e de atributos do solo na região do ecótono cerrado-pantanal, MS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.39, n.2, p.385-396, 2015.

OLIVEIRA, I.A.; MARQUES JÚNIOR, J.; CAMPOS, M.C.C.; AQUINO, R.E.; FREITAS, L.; SIQUEIRA, D.S.; CUNHA, J.M. Variabilidade espacial e densidade amostral da suscetibilidade magnética e dos atributos de Argissolos da região de Manicoré, AM. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.39, p.668-681, 2015.

REYNOLDS, W.D.; BOWMAN, B.T.; DRURY, C.F.; TAN, C.S. LU, X. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. **Geoderma**, Amsterdam, v.110, n.1-2, p.131-146, 2002.

SANTOS, D.; SOUZA, E.G.; NÓBREGA, L.H.P.; BAZZI, C.L.; GONÇALVES JÚNIOR, A.C. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho após cultivo de soja. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.8, p.843-848, 2012a.

SANTOS, K.S.; MONTENEGRO, A.A.A.; ALMEIDA, B.G.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; ANDRADE, T.S.; FONTES JÚNIOR, R.V.P. Variabilidade espacial de atributos físicos em solos de vale aluvial no semiárido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.16, n.8, p.828-835, 2012b.

SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G.C.; DIAS JÚNIOR, M.S.; CASTRO, M.B.; OLIVEIRA, L.F.C.; COSTA, K.A.P. Compactação de solos cultivados com cana-de-açúcar: II - quantificação das restrições às funções edáficas do solo em decorrência da compactação prejudicial. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.30, n.3, p.404-413, 2010.

SILVA, M.A.S.; MAFRA, Á.L.; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Atributos físicos do solo relacionados ao armazenamento de água em um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.35, n.3, p.554-552, 2005.

SILVA, S.A.; LIMA, J.S.S. Atributos físicos do solo e sua relação espacial com a produtividade do café arábica. **Coffe Science**, Lavras, v.8, n.4, p.395-403, 2013a.

SILVA, S.A.; LIMA, J.S.S. Relação espacial entre o estoque de nutrientes e a densidade de solo cultivado com cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v.43, n.4, p.377-384, 2013b.

SIQUEIRA, G.M.; VIEIRA, S.R.; CAMARGO, M.B.P. Variabilidade espacial do armazenamento e da perda média diária de água pelo solo no sistema de semeadura direta em Campinas, SP. **Bragantia**, Campinas, v.67, n.1, p.213-223, 2008.

SOUZA, Z.M.; CERRI, D.G.P.; MAGALHÃES, P.S.G.; SIQUEIRA, D.S. Spatial variability of soil attributes and sugarcane yield in relation to topographic location. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.14, n.12, p.1250-1256, 2010.

VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.V.H.; SCHAEFER, G.R. eds. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1, p.1-54.

VIEIRA, S.R.; HATFIELD, J.L.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, Berkeley, v.51, n.3, p.1-75, 1983.

3.3. PLANEJAMENTO AMOSTRAL DE ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO EM LAVOURA DE CAFÉ CONILON

Resumo

A determinação do número de amostras utilizadas para determinar os valores dos atributos físicos do solo resultará na otimização da mão de obra, além de possibilitar uma melhor representatividade desses atributos. Objetivou-se no presente trabalho, estudar variabilidade espacial dos atributos físicos do solo, em lavoura de café conilon e propor uma metodologia de amostragem de solo que melhor se ajuste às condições do sistema de manejo. O experimento foi conduzido em lavoura de café conilon, no município de São Mateus – ES, plantada no espaçamento duplo 3,0 x 2,0 x 1,0 m (4.000 plantas ha⁻¹). Instalou-se uma malha irregular de 107 x 95,7 m (10.240 m²) com 65 pontos amostrais. Em cada ponto amostral foram coletadas amostras de solo, na profundidade 0,0-0,20m. Os dados foram submetidos à aplicação da estatística descritiva e à análise geoestatística. Utilizando parâmetros estatísticos, estabeleceu-se o número adequado de amostras para análise dos atributos estudados que variaram de 1 a 12 pontos amostrais. Com exceção da densidade de partículas, todos os atributos físicos do solo apresentaram estrutura de

dependência espacial, ajustando-se ao modelo esférico. A determinação do número de amostras e da variabilidade espacial dos atributos do solo pode ser usada para o desenvolvimento de estratégias de amostragem que minimizam os custos do agricultor dentro de um erro conhecido e tolerável.

Palavras-chave: *Coffea conephora*, estatística clássica, geoestatística, amostragem do solo.

Abstract

The determination of the number of samples used to estimate the values of soil physical properties will result in the optimization of hand labor, and reduce errors inherent of soil management. This study aimed, studying spatial variability of soil physical properties in conilon coffee plantation and propose a soil sampling methodology best suited to the management system conditions. The experiment was conducted in conilon coffee plantation in the municipality of São Mateus, state Espírito Santo, Brazil, planted in double spacing 3.0 x 2.0 x 1.0 m (4,000 plants ha⁻¹). Was installed an irregular grid of 107 x 95.7 m (10,240 m²) with 65 sampling points. All samples were collected at depth of 0.0-0.20 m in order to evaluate the soil attributes. The data were submitted to descriptive statistical and geostatistical analysis. Using classical statistical parameters, established the adequate number of samples to analyze the studied attributes ranging from 1 to 12 points. With the exception of particle density, all physical soil attributes presented spatial dependence structure, adjusting to the spherical model. The determination of the number of samples and the spatial variability of soil attributes can be used to develop sampling strategies that minimize the farmer's costs within a tolerable error and known.

Keywords: *Coffea conephora*, classical statistics, geostatistics, soil sampling.

Introdução

Atualmente, os cafeicultores de conilon tem adotado o processo de modernização em suas lavouras, através do uso cada vez mais frequente dos tratores e implementos agrícolas para realização das operações de manejo, como: preparo do solo, adubação, tratos culturais, pulverização, colheita e entre outras. Entretanto, o manejo inadequado do solo e o intenso tráfego dos maquinários agrícolas podem provocar alterações nos atributos físicos do solo, ocasionando problemas como a degradação e a compactação do solo nas lavouras.

A determinação dos atributos físicos do solo é de fundamental importância para monitoramento do desenvolvimento da lavoura cafeeira, pois é fator primordial para caracterização da qualidade estrutural do solo é determinante para o aumento e manutenção de altas produtividades bem como para a sustentabilidade da cafeicultura. Mesmo em áreas homogêneas e em curtas distâncias, pode ocorrer variação espacial que influencia a produtividade do café conilon (OLIVEIRA et al., 2009). Neste contexto, Gontijo et al. (2007) salienta que no processo de amostragem tradicional, as subamostras podem ser coletadas próximas umas das outras, duplicando a informação dos valores dos atributos do solo. Assim, o conhecimento sobre a continuidade da distribuição espacial entre as subamostras, representada pelo alcance, permitirá a construção de conjuntos de dados independentes, possibilitando o uso da estatística clássica sem restrições.

Para Chung et al. (1995) o processo de amostragem do solo é um dos procedimentos mais importantes, tanto para os programas de pesquisas, quanto para o monitoramento do desenvolvimento das lavouras agrícolas, pois de nada adianta submeter as amostras de solo à análises físicas e químicas sofisticadas e rigorosas, se elas não caracterizarem a área em que será realizado o manejo do solo. Um sistema de amostragem representativo é aquele que melhor caracteriza a área a ser estudada, mas que seja obtida com o número mínimo de pontos amostrais visando não onerar o sistema de amostragem. Desse modo, a estatística descritiva pode auxiliar na indicação do número de pontos amostrais suficientes para reduzir a variação dos resultados a um nível aceitável (ROZANE et al., 2011).

Os solos usados para fins agrícolas, mesmos em pequenas áreas, apresentam variação dos valores de seus atributos ao longo da lavoura. Em virtude dessa variabilidade, deve-se estabelecer critério rigoroso de amostragem que permita, a partir de técnicas de amostragem, extrair informações representativas de uma determinada área (MONTANARI et al., 2012). No caso da estatística descritiva, que não leva em consideração a dependência espacial entre as subamostras de determinado atributo do solo, pode-se coletar quantidade excessiva de subamostras para obter a precisão desejada. Portanto, o conhecimento da variabilidade espacial do solo, por meio da geoestatística, é fundamental para orientar o processo de amostragem, evitando assim amostras não representativa (GONTIJO et al., 2007).

Propôs-se como objetivo, no presente trabalho, estudar a variabilidade espacial dos atributos físicos do solo, em lavoura de café conilon e propor uma metodologia de amostragem de solo que melhor se ajuste às condições do sistema de manejo.

Material e Métodos

A área experimental localiza-se em uma lavoura de café conilon, no município de São Mateus – ES, nas coordenadas UTM 7935440 m de latitude sul e 384440 m de longitude oeste, zona 24K no *datum* WGS 1984. A região apresenta clima tropical (Aw), segundo classificação de Köppen, caracterizado com inverno seco e chuvas máximas no verão. O solo foi classificado como Latossolo Amarelo distrófico (EMBRAPA, 2013), com textura franco argilo arenoso, com teores de argila, silte e areia de 231, 150 e 619 g kg⁻¹, respectivamente.

A área experimental é cultivada com café conilon (*Coffea canephora* Pierre ex A. Froehner), com genótipo denominado Bamburral. A lavoura foi implantada em 2010, aproveitando o plantio de mamão anteriormente cultivado na área, adotou-se o espaçamento duplo entre plantas com 3,0 x 2,0 x 1,0 m (4.000 plantas ha⁻¹) com regime de irrigação por gotejamento. Na ocasião de implantação da lavoura, foi

realizada a correção do solo com aplicação de 1.500 kg ha^{-1} de calcário dolomítico em sulcos e na área total. No plantio, para cada metro de sulco, foi aplicado 5 kg de esterco de galinha em cobertura, além de 100 g de supersimples na cova. Após a retirada da cultura do mamão em 2012, quando o café conilon apresentava uma idade de 2 anos, a condução da lavoura era feita com fertirrigação. O manejo de adubação e calagem da lavoura é feito anualmente, com base nos resultados obtidos na análise de solo e folha.

O controle de plantas daninhas é realizado com capina manual e/ou com aplicação de herbicida utilizando pulverizador costal com capacidade de 20L ou pulverizador COMILL[®], com capacidade de 2000L. O controle fitossanitário é feito de acordo com o acompanhamento de incidência de pragas e doenças na lavoura, utilizando o pulverizador COMILL[®]. Nessas operações agrícolas foi utilizado um trator Yanmar Agritech[®], modelo 1155 cafeeiro, com potência de 55 cv e 45,6 na tomada de força.

A amostragem do solo foi realizada por meio de coletas de amostras indeformadas, extraídas do solo em anéis volumétricos de aço inoxidável e amostras deformadas, extraídas com auxílio de um amostrador de solo tipo “sonda”, na projeção da copa do cafeeiro para a profundidade de 0,00 – 0,20m, em uma malha irregular de 107 x 95,7 m (10.240 m^2) com 65 pontos amostrais (FIGURA 1). As coordenadas de cada ponto amostral foram definidas com auxílio de um par de receptores GPS TechGeo[®], modelo GTR G2 geodésico.

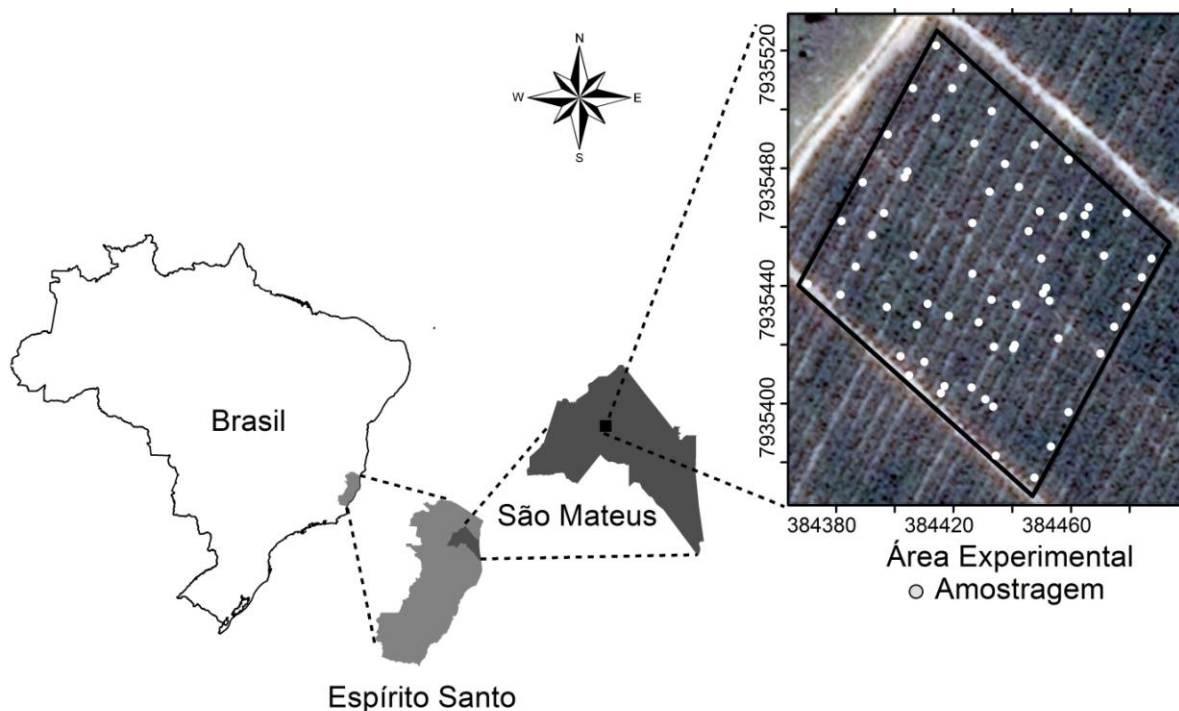


FIGURA 1. Localização e esquema de amostragem realizada na área experimental.

As análises foram realizadas no Laboratório de Física do Solo no Centro Universitário Norte do Espírito Santo (CEUNES) da Universidade Federal de Espírito Santo (UFES). Para a determinação da microporosidade do solo (Micro) e teor de água na capacidade de campo (θ_{CC}) e ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), de acordo com a metodologia da EMBRAPA (1997), as amostras indeformadas foram saturadas por um período de 48 horas, pela adição gradual de uma lâmina d'água em uma bandeja plástica, até atingir 2/3 da altura do anel, e em seguida pesadas e, submetidas às tensões: 6 kPa, em mesa de tensão Eijkelkamp® e 10 e 1.500 kPa, em câmara de Richards SoilMoisture®, com placa porosa. Por fim, as amostras foram levadas a estufa por 24 horas a uma temperatura de 105 °C, para obter os valores de massa de solo seco.

A densidade do solo (D_s) foi calculada pela relação entre massa seca do solo e o volume interno do anel. O volume total de poros (VTP) foi definido pela relação entre a densidade do solo e a densidade de partículas (D_p), pela expressão $VTP = [1 - (D_s/D_p)]$. A macroporosidade do solo (Macro) foi determinada pela diferença entre o VTP e a microporosidade do solo (Micro). As amostras deformadas foram usadas para a determinação da D_p pelo método do balão volumétrico e das

frações granulométricas do solo pelo método do densímetro. As análises físicas do solo foram realizadas e os valores dos atributos do solo determinados, usando as orientações da EMBRAPA (1997). A capacidade de armazenamento de água do solo (CAD) para a profundidade de 0,00 – 0,20 m foi calculada pela expressão $CAD = [(\theta_{CC} - \theta_{PMP}) \cdot Ds \cdot 200]$.

Inicialmente, submeteram-se os resultados referentes aos atributos do solo à análise estatística descritiva, obtendo-se as seguintes medidas: média aritmética, mediana, variância amostral, desvio padrão, valores máximo e mínimo e coeficiente de variação, de assimetria e de curtose, bem como a verificação da normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk, a 5% de probabilidade, utilizando o software estatístico Action v. 2.3 (ACTION DEVELOPMENT CORE TEAM, 2012).

O número de subamostras (n) para obter valores médios representativos dos atributos físicos do solo em estudo, para um nível de confiança desejado, pode ser calculado pela equação 1 (CLINE, 1944):

$$n = \left(\frac{t_{\alpha/2} \cdot CV}{er} \right)^2 \quad (1)$$

em que: $t_{\alpha/2}$ – valor da tabela de distribuição de Student para o nível de probabilidade $\alpha/2$ (bilateral); CV – coeficiente de variação (%); e, er – erro relativo admitido em torno da média (%).

Para a caracterização da variabilidade espacial dos atributos do solo, utilizou-se a técnica geoestatística, por meio dos ajustes de semivariogramas simples (VIEIRA et al., 1983), com base na pressuposição de estacionariedade da hipótese intrínseca, a qual é estimada pela equação 2:

$$\gamma(h) = \frac{\sum_{i=1}^{n(h)} [z(x_i + h) - z(x_i)]^2}{2n(h)} \quad (2)$$

em que: $n(h)$ número de pares amostrais $[z(x_i); z(x_i + h)]$ separados pelo vetor h , sendo $z(x_i)$ e $z(x_i + h)$, valores numéricos observados do atributo analisado, para os pontos x_i e $x_i + h$ separados pelo vetor h .

A análise geoestatística foi realizada com auxílio do software GS+ Versão 7[®] (GAMMA DESIGN SOFTWARE, 2004). Para o ajuste dos semivariogramas simples e cruzados foram testados os modelos teóricos como o esférico, o exponencial e o gaussiano e definido os seus parâmetros: efeito pepita (C_o), patamar (C_o+C) e alcance (a). Na dúvida entre mais de um modelo para o mesmo semivariograma, considerou-se o maior valor do coeficiente de correlação (CRCV), obtido pelo método de validação cruzada (AMADO et al., 2007). Foi determinado o índice de dependência espacial (IDE), que é a proporção em percentagem do efeito pepita (C_o), em relação ao patamar (C_o+C), dada pela equação 3:

$$IDE = \frac{C_o}{C_o + C} 100 \quad (3)$$

Classificou-se o índice de dependência espacial, de acordo com Cambardella et al. (1994): (a) IDE forte < 25%; (b) IDE moderado de 25 a 75% e (c) IDE fraco > 75%.

Resultados e Discussão

Verificou-se normalidade dos dados para os atributos D_s , Macro e as frações granulométricas areia e argila, referentes ao teste de Shapiro-Wilk à 5% de probabilidade, o que pode ser confirmado pela proximidade dos valores de médias e medianas e baixos valores do coeficiente de assimetria e curtose (TABELA 1), mostrando haver distribuição simétrica para os atributos do solo (LITTLE & HILLS, 1978).

TABELA 1. Estatística descritiva dos dados de densidade do solo e partículas, macroporosidade e microporosidade do solo, volume total de poros, capacidade de armazenamento de água do solo e teores areia, silte e argila obtidos a partir de 65 amostras, em uma lavoura de café conilon.

Estatística	D _s	D _p	Macro	Micro	VTP	CAD	Areia	Silte	Argila
Descritiva	---- g dm ⁻³ ----	----- cm ³ cm ⁻³ -----	----- cm ³ cm ⁻³ -----	----- cm ³ cm ⁻³ -----	----- mm -----	----- g kg ⁻¹ -----	----- g kg ⁻¹ -----	----- g kg ⁻¹ -----	----- g kg ⁻¹ -----
Média	1,43	2,54	23,35	22,35	45,79	8,92	620,26	151,12	228,62
Mediana	1,43	2,53	23,66	21,65	46,28	8,73	624	148	220
VA	0,01	1,1 10 ⁻³	41,54	18,05	20,16	9,11	2924,4	775,67	1749,62
DP	0,11	0,03	6,45	4,25	4,49	3,02	54,08	27,85	41,83
CV	7,62	1,34	27,60	19,0	9,81	33,84	8,72	18,43	18,30
Mínimo	1,12	2,44	4,62	16,43	28,08	3,49	510	104	140
Máximo	1,84	2,63	36,98	40,62	54,48	16,79	716	256	320
Ass.	0,49	-0,05	-0,31	1,46	-0,84	0,65	-0,32	0,92	0,22
Curt.	2,05	0,93	-0,29	3,47	2,17	0,34	-0,84	1,56	- 0,53
p-valor	0,07*	1,3 10 ⁻⁴	0,42*	3,7 10 ⁻⁵	0,02	0,03	0,05*	0,01	0,08*

VA – variância amostral; DP – desvio padrão; CV – coeficiente de variação; Ass. – coeficiente de assimetria; Curt. – coeficiente de curtose; * – distribuição normal pelo teste de Shapiro-Wilk, a 5% de probabilidade.

O coeficiente de variação foi considerado baixo (< 12%) para D_s, D_p, VTP e fração areia e médio (12 < CV < 62%) para os demais atributos do solo, de acordo com o critério de classificação proposto por Warrick & Nielsen (1980). Classificação semelhantes foram encontrados por Tavares et al. (2012) para D_s, VTP e areia em um Argissolo Coeso cultivado com cana de açúcar, por Grego et al. (2012) para as frações argila e silte em um Latossolo Vermelho-Amarelo sob pastagem e por Campos et al. (2013b) para D_s, D_p, VTP, Macro, Micro e as frações argila e silte em um Argissolo Vermelho em área de floresta.

Na FIGURA 2, observa-se o número de amostras de solo necessário, para representar a área em estudo, ao nível de 5%, para variações em torno da média, medidas pelo erro relativo, de 5 a 30%. A quantidade de amostras para obter variação de 10% em torno da média, com 5% de nível de significância foi de 1; 1; 8; 4; 1; 11; 1; 3 e 3 para D_s, D_p, Macro, Micro, VTP, CAD, areia, silte e argila,

respectivamente. Gontijo et al. (2007) salienta que com a redução do erro relativo em torno da média, ocorre o aumento do número de amostras no processo de amostragem. Portanto, o aumento da exatidão da estimativa dos atributos do solo em estudo está associado ao acréscimo considerável do esforço, onerando o esquema de amostragem sem incremento proporcional em precisão.

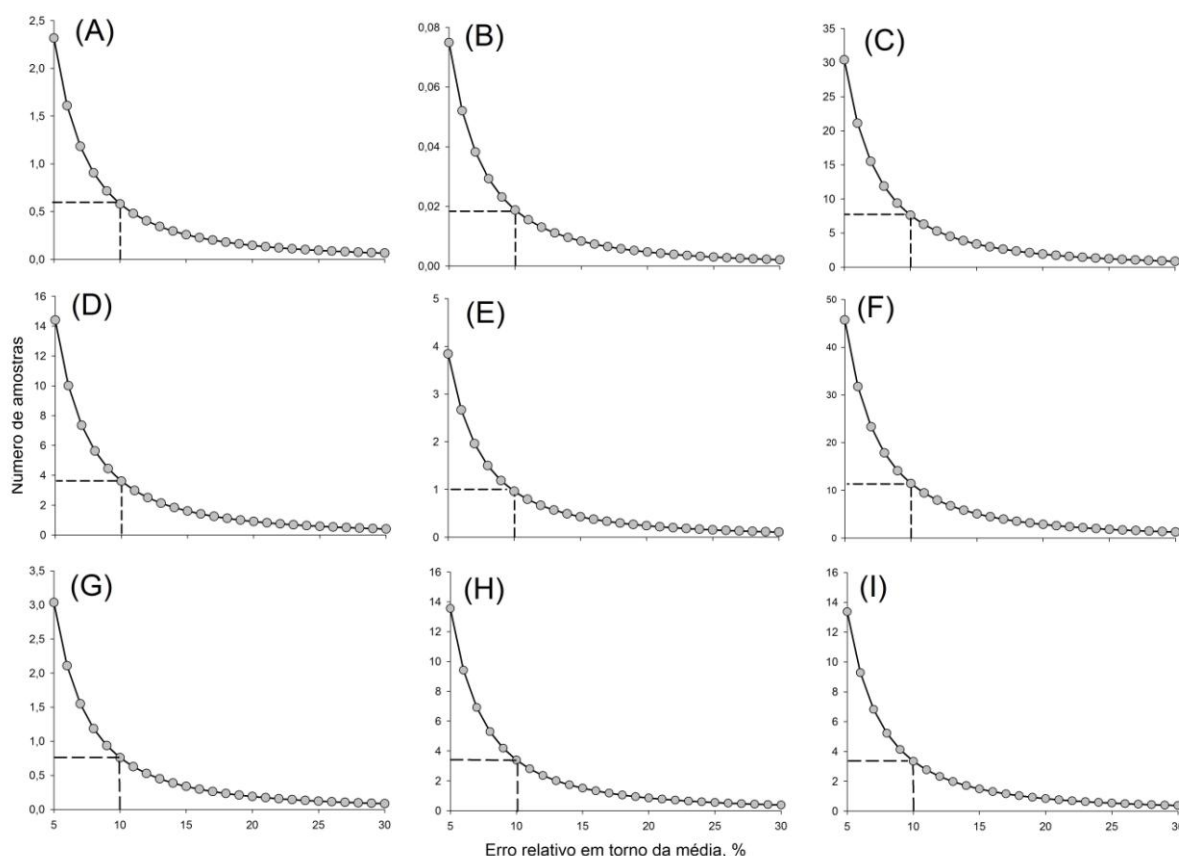


FIGURA 2. Números de pontos amostrais para estimativa da média da densidade do solo (A), densidade de partículas (B), macroporosidade (C) e microporosidade do solo (D), volume total de poros (E), capacidade de armazenamento de água do solo (F), frações areia (G), silte (H) e argila (I), conforme o erro relativo em torno da média, com 5% de significância.

Certificando que o erro admissível está dentro do tolerável, 10% ao redor da média, recomenda-se para o presente estudo, efetuar a amostragem de 3 sub-amostras deformadas de solo e 11 amostras indeformadas de solo. Tendo em vista que as amostras deformadas do solo são usadas para determinar os teores de argila, silte, areia e densidade de partículas e as amostras indeformadas usadas para determinar a D_s , VTP, Macro, Micro e CAD, em ambas as situações não se faz amostragem em separado para cada atributo físico do solo. Isto significa que a

precisão final realizada após o processo de amostragem vai depender das variáveis consideradas (SANTOS et al., 2014; SOUZA et al., 1997).

Os resultados referentes à análise geoestatística encontram-se na TABELA 2 e FIGURA 3. Verificou-se que, somente houve a ausência de estrutura de dependência espacial para a densidade de partículas. Isso significa que os dados da D_p apresentaram “efeito pepita puro”, ou seja, distribuição aleatória para distâncias maiores que a menor distância da malha de amostragem que foi 2 m. Montanari et al. (2013) aplicando o estudo da variabilidade espacial em um Latossolo cultivado com feijão, obteve resultado semelhante para D_p em amostras coletadas em três profundidades: 0,0-0,10m, 0,10-0,20m e 0,20-0,30m.

TABELA 2. Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas experimentais para densidade do solo e partículas, macroporosidade e microporosidade do solo, volume total de poros, capacidade de armazenamento de água do solo e teores areia, silte e argila em uma lavoura de café conilon.

	D_s	D_p	Macro	Micro	VTP	CAD	Areia	Silte	Argila
Parâmetros	-- g dm ⁻³ --		----- cm ³	cm ³	----- cm ³	mm	----- g kg ⁻¹	-----	-----
Modelo	Esf.	EPP	Esf.	Esf.	Esf.	Esf.	Esf.	Esf.	Esf.
C_o	7,6 10 ⁻³	-	22,2	3,2	11,3	4,2	1292,9	306,7	1,0
$C+C_o$	1,3 10 ⁻²	-	48,9	22,5	20,5	9,0	3205,7	792,3	2145,9
SQR	1,7 10 ⁻⁶	-	34,7	19,0	5,7 10 ⁻²	1,3	99335	2010	113615
IDE (%)	60,2	-	45,5	14,1	54,7	46,7	40,3	38,7	0,05
R^2 (%)	88,6	-	92,3	93,3	99,8	95,5	92,3	97,3	97,6
CRCV (%)	45,2	-	81,1	87,0	28,4	9,09	106,7	80,4	82,2
Alcance(m)	58,1	-	74,1	76,1	38,8	65,0	24,6	41,0	21,3

C_o – efeito pepita; $C+C_o$ – patamar; SQR – soma de quadrado de resíduo; IDE – índice de dependência espacial; R^2 – coeficiente de determinação; CRCV – coeficiente de regressão de validação cruzada; EPP – efeito pepita puro; Esf. – modelo esférico.

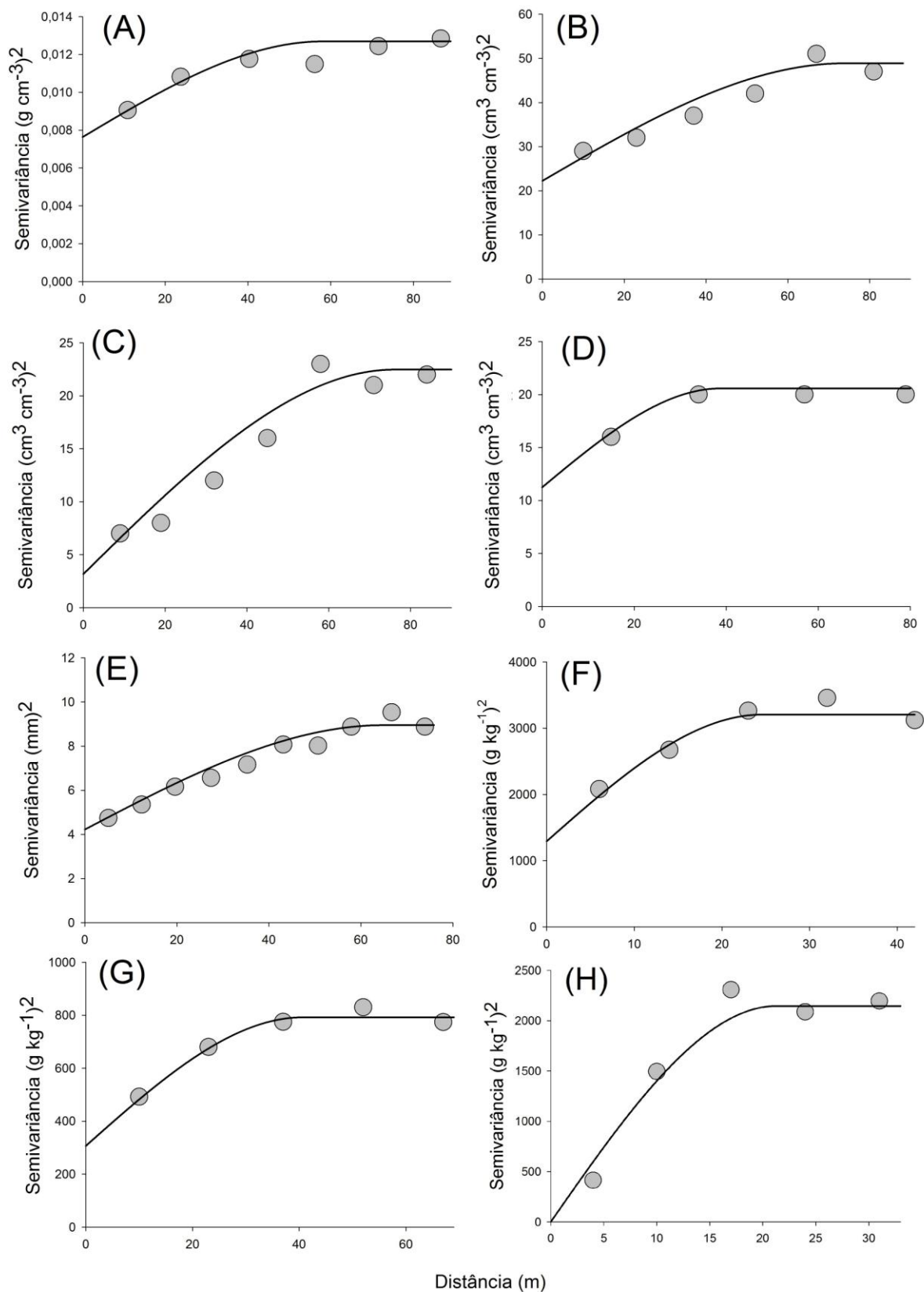


FIGURA 3. Modelos de semivariogramas ajustados para densidade do solo (A), macroporosidade (B) e microporosidade do solo (C), volume total de poros (D),

capacidade de armazenamento de água do solo (E), frações areia (F), silte (F) e argila (H) em uma lavoura de café conilon.

As demais variáveis apresentaram estrutura de dependência espacial e ajustaram-se ao modelo esférico. Ajustes semelhantes foram encontrados por Campos et al. (2013a) para argila e D_s em Cambissolo Háplico e por Pellin et al. (2015) para o VTP em um Latossolo Vermelho distrófico cultivado com cana de açúcar e por Campos et al. (2013b) para a fração argila, Macro, Micro, VTP e D_s em Argissolo Vermelho.

De acordo com a classificação de Cambardella et al. (1994), somente a microporosidade do solo e a argila exibiram IDE forte ($< 25\%$), enquanto as demais variáveis em estudo apresentaram IDE moderado ($25\% > IDE < 75\%$). Classificações semelhantes foram encontradas por Silva & Lima (2013) para argila e D_s , por Siqueira et al. (2009) para silte e Micro, por Leão et al. (2010) para as frações argila e silte e por Camargo et al. (2010) para VTP.

Lima et al. (2006 e 2010) corroboram que quanto menor IDE, ou seja, proporção entre o efeito pepita em relação ao patamar, maior será a dependência espacial apresentada pelos atributos físicos do solo em estudo, desse modo, verifica-se maior continuidade do fenômeno, menor variância da estimativa e maior confiança no valor estimado.

O alcance da dependência espacial é um parâmetro importante no estudo dos semivariogramas. Chaves & Farias (2009) define como a distância máxima em que os pontos amostrais do atributo do solo se correlacionam espacialmente entre si. Isso significa que os pontos amostrais localizados em distâncias maiores que o alcance apresenta distribuição aleatória independente entre si, portanto e, desse modo é aplicada a estatística clássica. Os valores de alcance variaram entre 21,3 a 76,1 metros, para a argila e Micro, respectivamente.

Santos et al. (2013) corrobora que o alcance do semivariograma, pode auxiliar no processo de amostragem, pois proporciona a correta distribuição do número de amostras para a estimativa dos atributos do solo, de acordo com a escala de estudo. Sendo assim, para garantir a independência espacial, as amostras

deformadas devem ser coletadas a uma distância maior que o valor do alcance. Entretanto, para as amostras indeformadas do solo que apresentaram valores de alcance altos, recomenda-se realizar o processo de amostragem dos 11 pontos amostrais em ziguezague.

Conclusão

Com exceção da densidade de partículas, verificou-se estrutura de dependência espacial para todos os atributos em estudo, com IDE forte e moderado.

O número de amostras varia conforme o uso e manejo do solo e o erro aceitável para a estimativa dos atributos em estudo.

Recomenda-se, em condições similares à área experimental, coletar 3 amostras deformadas e 11 amostras indeformadas de solo para a determinação dos valores médios dos atributos físicos do solo, associando-se menores custos de amostragem com uma maior representatividade.

A determinação do número de amostras e da variabilidade espacial dos atributos do solo pode ser usada para o desenvolvimento de estratégias de amostragem que minimizam os custos do agricultor dentro de um erro conhecido e tolerável.

Referências Bibliográficas

ACTION DEVELOPMENT CORE TEAM. Action 2.3: ESTATCAMP. São Carlos, 2012.

AMADO, T.J.C.; PONTELLI, C.B.; SANTI, A.L.; VIANA, J.H.M.; SULZBACH, L.A.S. Variabilidade espacial e temporal da produtividade de culturas sob sistema de plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.42, n.8, p.1101-1110, 2007.

CAMARGO, L.A.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G.T. Spatial variability of physical attributes of an alfisol under different hillslope curvatures. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, n.3, p. 617-630, 2010.

CAMBARDELLA, C.A. MOORNAM, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KARLEN, D.L.; TURCO, R.F.; KONOPKA, A.E.E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, n.5, p.1501-1511, 1994.

CAMPOS, M.C.C.; OLIVEIRA, I.A.; AQUINO, R.E.; BERGAMIN, A.C.; SILVA, D.A.P. Distribuição espacial de atributos físicos do solo em área cultivada com cana-de-açúcar. **Revista Agro@ambiente On-line**, Boa Vista, v.7, n.2, p.119-128, 2013a.

CAMPOS, M.C.C.; SOARES, M.D.R.; SANTOS, L.A.C.; OLIVEIRA, I.A.; AQUINO, R.E.; BERGAMIN, A.C. Variabilidade espacial dos atributos físicos em um Argissolo Vermelho sob floresta. **Comunicata Scientiae**, Bom Jesus, v.4, n.2, p.168-178, 2013b.

CHAVES, L.H.G.; FARIAS, C.H.A. Variabilidade espacial de cobre e manganês em Argissolo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v.40, n.2, p.211-218, 2009.

CHUNG, C.K.; CHONG, S.K.; VARSA, E.C. Sampling strategies for fertility on a stoy silt loam soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.26, n.5/6, p.741-763, 1995.

CLINE, M.G. Principles of soil sampling. **Soil Science**, Baltimore, v.58, n.4, p.275-288, 1944.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Rio de Janeiro, 2013. 353 p.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa CNPS, 1997. 212p.

GAMMA DESIGN SOFTWARE. **Geoestatistics for the environmental sciences**. Version 7.0. Michigan, 2004. CD Rom.

GONTIJO, I.; DIAS JÚNIOR, M.S.; OLIVEIRA, M.S.; ARAUJO JÚNIOR, C.F.; PIRES, B.S.; OLIVEIRA, C.A. Planejamento amostral da pressão de preconsolidação de um Latossolo Vermelho Distroférico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, p.1245-1254, 2007.

GREGO, C.R.; RODRIGUES, C.A.G.; NOGUEIRA, S.F.; GIMENES, F.M.A.; OLIVEIRA, A.; ALMEIDA, C.G.F.; FURTADO, A.L.S.; DEMARCHI, J.J.A.A. Variabilidade espacial do solo e da biomassa epigea de pastagem, identificada por meio da geoestatística. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.47, n.9, p.1404-1412, 2012.

LEÃO, M.G.A.; MARQUES JÚNIOR, J.; SOUZA, Z.M.; PEREIRA, G.T. Variabilidade espacial da textura de um Latossolo sob cultivo de citros. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.34, n.1, p.121-131, 2010.

LIMA, J.S.S.; OLIVEIRA, J.T.S.; OLIVEIRA, R.B.; ALMEIDA, V.S.; VANZO, F.L. Estudo viabilidade de métodos geoestatísticos na mensuração da variabilidade espacial da dureza da madeira de Paraju (*Manilkara sp.*). **Revista Árvore**, Viçosa, v.30, n.4, p.651-657, 2006.

LIMA, J. S. S.; SOUZA, G. S.; SILVA, S. A. Amostragem e variabilidade espacial de atributos químicos do solo em área de vegetação natural em regeneração. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 34, n. 1, p. 127-136, 2010.

LITTLE, T.M.; HILLS, F.J. **Agricultural experimentation**. New York: John Wiley & Sons, 1978. 350p.

MONTANARI, R.; PELLIN, D.M.P.; SILVA JÚNIOR, C.A.; CARVALHO, M.P.; GIOIA, M.T.; DALCHIAVON, F.C.; GONZÁLEZ, A.P. Correlação entre produção de feijão e atributos físicos de um Latossolo em Mato Grosso do Sul. **Revista Ceres**, Viçosa, v.60, n.6, p.772-784, 2013.

MONTANARI, R.; SOUZA, G.S.A.; PEREIRA, G.T.; MARQUES JÚNIOR, J.; SIQUEIRA, G.M. The use of scaled semivariograms to plan soil sampling in sugarcane fields. **Precision Agriculture**, Netherlands, v.35, p.1234-1239, 2012.

PELLIN, D.M.P.; MONTANARI, R.; LIMA, E.S.; LOVERA, L.H.; CORRÊA, A.R. Variabilidade de atributos físicos de um Latossolo Vermelho sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Caatinga**, Mossoró, v.28, n.1, p.28-38, 2015.

OLIVEIRA, P.C.G.; FARIAS, P.S.; LIMA, H.V.F.; OLIVEIRA, F.A.; PITA, J.D. Variabilidade espacial de propriedades químicas do solo e da produtividade de citros na Amazônia Oriental. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.13, n.6, p.708-715, 2009.

ROZANE, D.E.; ROMUALDO, L.M.; CENTURION, J.F.; BARBOSA, J.C. Dimensionamento do número de amostras para avaliação da fertilidade do solo. **Semina**, Londrina, v.32, n.1, p.111-118, 2011.

SANTOS, E.O.J.; GONTIJO, I.; SILVA, M.B. Planejamento amostral dos teores de Cu, Fe, Mn, Zn e Na em um Latossolo cultivado com café conilon. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lajes, v.13, n.3, p.318-326, 2014.

SANTOS, E.O.J.; GONTIJO, I.; SILVA, M.B. Planejamento amostral de propriedades químicas do solo em lavoura de café conilon. **Coffee Science**, Lavras, v.8, n.4, p.423-431, 2013.

SILVA, S.A.; LIMA, J.S.S. Atributos físicos do solo e sua relação espacial com a produtividade do café conilon. **Coffee Science**, v.8, n.4, p.395-403, 2013.

SIQUEIRA, G.M.; VIEIRA, S.R.; DECHEN, S.C.F. Variabilidade espacial da densidade e da porosidade de um Latossolo Vermelho eutroférico sob semeadura direta por vinte anos. **Bragantia**, Campinas, v.68, n.3, p.751-759, 2009.

SOUZA, L.S.; COGO, N.P.; VIEIRA, S.R. Variabilidade de propriedades físicas e químicas do solo em um pomar cítrico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.21, n.3, p.367-372, 1997.

TAVARES, U.E.; ROLIM, M.M.; PEDROSA, E.M.R.; MONTENEGRO, A.A.A.; MAGALHÃES, A.G.; BARRETO, M.T.L. Variabilidade espacial de atributos físicos e mecânicos de um Argissolo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.16, n.11, p.1206-1214, 2012.

VIEIRA, S.R.; HATFIELD, J.L.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, Berkeley, v.51, n.3, p.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, 1980. p.319-344.

4. CONCLUSÃO GERAL

Houve ausência de estrutura de dependência especial somente para a D_p . As demais variáveis apresentaram dependência espacial e ajustaram-se ao modelo esférico, com índice de dependência espacial forte e moderado.

A associação entre a análise de Cluster e a análise geoestatística das frações granulométricas do solo e da produtividade foi eficaz na delimitação das 2 zonas de manejo, cujo o intuito é melhorar a eficiência de aplicação de insumos.

A correlação espacial possibilita observar a influência dos atributos físicos do solo sobre a produtividade. Nas condições de estudo, verificou-se correlação espacial positiva para a fração areia, macroporosidade e volume total de poros e negativa para fração argila, densidade do solo, microporosidade e capacidade de armazenamento de água do solo.

Para o desenvolvimento de estratégias do processo de amostragem que minimizam os custos do agricultor dentro de um erro conhecido e tolerável, recomenda-se, em condições similares à área de estudo, a coleta de 3 amostras deformadas e 11 amostras indeformadas de solo para a determinação dos valores médios dos atributos do solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BERNARDI, A.C.C.; RABELLO, L.M.; INAMASU, R.Y.; GREGO, C.R.; ANDRADE, R. G. Variabilidade espacial de parâmetros físico-químicas do solo e biofísicos de superfície em cultivo do sorgo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.18, n.6, p.623-630, 2014.

BERTOLANI, F.C.; GONZÁLEZ, A.P.; LIÑARES, M.L.; VÁZQUEZ, E.V.; MIRANDA, J.G.V. Variabilidade espacial da rugosidade superficial do solo medida com rugosímetros de agulhas e laser. **Bragantia**, Campinas, v.59, n.2, p.227-234, 2000.

BIFFI, L.J.; RAFAELI, S.L. Comportamento espacial de variáveis agronômicas da maçã “fuji” durante dois anos de observações no planalto serrano de santa Catarina. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v.30, n.4, p.975-980, 2008.

BOTTEGA, E.L.; BOTTEGA, S.P.; SILVA, S.A.; QUEIROZ, D.M.; SOUZA, C.M.A.; RAFULL, L.Z.L. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em um Latossolo Vermelho distroférico. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v.6, p.331-336, 2011.

BOTTEGA, E.L.; QUEIROZ, D.M.; PINTO, F.A.C.; SOUZA, C.M.A. Variabilidade espacial de atributos do solo em sistema de semeadura direta com rotação de culturas no cerrado brasileiro. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v.44, n.1, p.1-9, 2013.

BURAK, D.L.; PASSOS, R.R. Variabilidade espacial das frações texturais e da porosidade do solo em relevo ondulado sob cultivo de café conilon. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v.7, n.12, p.1-11, 2011.

BURAK, D.L.; PASSOS, R.R.; ANDRADE, F.V. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo sob cafeeiro Conilon: relação com textura, matéria orgânica e relevo. **Bragantia**, Campinas, v.71, n.4, p.538-547, 2012.

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 Science Society America Journal**, Madison, v.58, n.5, p.1501-1511, 1994.

CARVALHO, G.R.; BOTELHO, C.E.; BARTHOLO, G.F.; PEREIRA, A.A.; NOGUEIRA, Â.M.; CARVALHO, A.M. Comportamento de progênies F4 obtidas por cruzamentos de 'Icatu' com 'Catimor'. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.33, n.1, p.47-52, 2009.

CAVALCANTE, E.G.S.; ALVES, M.C.; PEREIRA, G.T.; SOUZA, Z.M. Variabilidade espacial de MO, P, K e CTC do solo sob diferentes usos e manejos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.37, n.2, p.394-400, 2007a.

CAVALCANTE, E.G.S.; ALVES, M.C.; SOUZA, Z.M.; PEREIRA, G.T. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo sob diferentes usos de manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, p.1329-1339, 2007b.

COELHO, A. M. Agricultura de precisão: manejo da variabilidade espacial e temporal dos solos e das culturas. In: CURI, N.; MARQUES, J.J.; GUILHERME, L.R.G.; LIMA, J.M.; LOPES, A.S.; ALVAREZ, V.,V.H. (Ed) **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. v.3, p. 249-290.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Café, Safra 2014, Quarto Levantamento**. Brasília: MAPA/CONAB, 2014. 51p. Disponível em: < http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/14_12_22_09_53_55_boletim_dezembro_2014.pdf >. Acesso em: 27 de maio de 2015

COSTA, F.P.; LIMA, J.S.S. Cokrigagem na distribuição espacial do cálcio baseado no pH em um Latossolo cultivado com café conilon. **Nucleus**, Ituverava, v.8, n.1, p.269-276, 2011.

FARACO, M.A.; URIBE-OPAZO, M.A.; SILVA, E.A.A.; JOHANN, J.A.; BORSSOI, J.A. Seleção de modelos de variabilidade espacial para elaboração de mapas temáticos de atributos do solo e produtividade da soja. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, v.32, p.462-476, 2008.

FERRAZ, G.A.E.S.; SILVA, F.M.; CARVALHO, L.C.C.; ALVES, M.C.; FRANCO, B.C. Variabilidade espacial e temporal do fósforo, potássio e da produtividade de uma lavoura cafeeira. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.32, n.1, p.140-150, 2012.

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

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

JAKOB, A.A.E. **Estudo da correlação entre mapas de variabilidade de propriedades do solo e mapas de produtividade para fins de agricultura de precisão**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Agrícola. FEAGRI. Campinas - SP, 1999, 145p.

KAGAMI, F.; COSTA, G.; SOUZA, H.; THAME, P. **Ciclo da Agricultura de Precisão**. 2013. Disponível em: < <http://fatecap.blogspot.com.br/2013/03/ciclo-da-agricultura-de-precisao.html> >. Acesso em: 16 de junho de 2015.

KERRY, R.; OLIVER, M.A. Determining nugget: sill ratios of standardized variograms from aerial photographs to kriging sparse soil data. **Precision Agriculture**, Netherlands, v.9, n.1-2, p.33-56, 2008.

KERRY, R.; OLIVER, M.A. Comparing sampling needs for variograms of soil properties computed by the method of moments and residual maximum likelihood. **Geoderma**, Amsterdam, v.140, n.4, p.383-396, 2007.

LIBARDI, P.L.; PREVEDELLO, C.L.; PAULETTO, E.A.; MORAES, S.O. Variabilidade espacial da umidade, textura e densidade de partículas ao longo de uma transeção. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.10, n.2, p.85-90, 1986.

LIMA, J.S.S.; COSTA, F.P.; XAVIER, A.C.; OLIVEIRA, R.B.; SILVA, S.A. Spatial and temporal variability of the productivity of *Coffea canephora*. **Coffee Science**, Lavras, v.9, n.3, p.400-407, 2014.

LIMA, J.S.S.; OLIVEIRA, R.B.; SILVA, S.A. Spatial variability of particle size fractions of na Oxisol cultivated with conilon coffee. **Revista Ceres**, Viçosa, v.59, n.6, p.867-872, 2012.

LIMA, J.S.S.; SILVA, S.A.; SILVA, J.M. Variabilidade espacial de atributos químicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado em plantio direto. **Revista Ciências Agrônômicas**, Fortaleza, v.44, n.1, p.16-23, 2013.

MACHADO, L.O.; LANA, Â.M.Q.; LANA, R.M.Q.; GUIMARÃES, E.C.; FERREIRA, C.V. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo em áreas sob sistema plantio convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, p.591-599, 2007.

MANN, K.K. ; SCHUMANN, A.W. ; OBREZA, T.A. Delineating productivity zones in a citrus grove using citrus production, tree growth and temporally stable soil data. **Precision Agriculture**, Netherlands, v.12, p.457-472, 2010.

MATHERON, G. **Traité de Géostatistique Appliquée**. Technip, Paris, 333p. 1962.

McBRATNEY, A.B.; WEBSTER, R. Choosing functions for semivariograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.37, n.3, p.617-639, 1986.

MELLO, J.M. **Geoestatística aplicada ao inventário florestal**. Tese de Doutorado em Recursos Florestais. Escola Superior Luiz de Queiroz. Piracicaba-SP, 2004, 111p.

MIGUEL, F.R.M.; VIEIRA, S.R.; GREGO, C.R. Variabilidade espacial da infiltração de água em solo sob pastagem em função da intensidade de pisoteio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.44, n.11, p.1513-1519, 2009.

MINISTERIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO – MAPA. **Agricultura de precisão**. Brasília: MAPA/ACS, 2013. 36 p. (Boletim Técnico). Disponível em: <
http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/file/Desenvolvimento_Sustentavel/Agricultura-Precisao/Boletim%20T%C3%A9cnico%20-%20Agricultura%20de%20Precis%C3%A3o%202013.pdf >. Acesso em: 11 de junho de 2015.

NASCIMENTO, P.S.; SILVA, J.A.; COSTA, B.R.S.; BASSOI, L.H. Zonas homogêneas de atributos do solo para o manejo de irrigação em pomar de videira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.38, n.4, p.1101-1113, 2014.

OLIVEIRA, E.; SILVA, F.M.; GUIMARÃES, R.J; SOUZA, Z.M. Eliminação de linhas em cafeeiros adensados por meio semimecanizado. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.31, n.6, p.1.826-1.830, 2007.

OLIVEIRA, I.R.; TEIXEIRA, D.B.; PANOSSO, A.R.; CAMARGO, L.R.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T. Modelagem geoestatística das incertezas da distribuição espacial do fósforo disponível no solo, em área de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.37, n.6, p.1481-1491, 2013.

OLIVEIRA, R.B.; LIMA, J.S.S.; XAVIER, A.C.; PASSOS, R.R.; SILVA, S.A.; SILVA, A.F. Comparação entre métodos de amostragem do solo para recomendação de calagem e adubação do cafeeiro conilon. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.28, n.1, p.176-186, 2008.

PEZZOPANE, J.R.M.; CASTRO, F.S.; PEZZOPANE, J.E.M.; BONOMO, R.; SARAIVA, G.S. Zoneamento de risco climático para a cultura do café Conilon no Estado do Espírito Santo. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v.41, n.3, p.341-348, 2010.

QUARTEZANI, W.Z.; ZIMBACK, C.R.L. Simulação sequencial direta na identificação e quantificação de incertezas associada à estimação da produção de café conilon. **Revista Energia na Agricultura**, Botucatu, v.27, n.4, p.148-162, 2012.

QUARTEZANI, W.Z.; ZIMBACK, C.R.L.; LANDIM, P.M.B.; OLIVEIRA, R.B. Eficiência da cokrigagem na estimativa da produtividade do café conilon. **Revista Energia na Agricultura**, Botucatu, v.26, n.1, p.113-125, 2011.

RIFFEL, C.T.; GARCIA, M.S.; SANTI, A.L.; BASSO, C.J.; DELLA FLORA, L.P.; CHERUBIN, M.R.; EITELWEIN, M.T. Densidade amostral aplicada ao monitoramento georreferenciado de lagartas desfolhadoras na cultura da soja. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 43, p. 2112-2119, 2012.

RODRIGUES, J.B.T. **Variabilidade espacial e correlações entre atributos de solo e produtividade na agricultura de precisão**. Dissertação de Mestrado. UNESP. Botucatu - SP, 2002, 116p.

RODRIGUES JÚNIOR, F.A.; VIEIRA, L.B.; QUEIROZ, D.M.; SANTOS, N.T. Geração de zonas de manejo para cafeicultura empregando-se sensor SPAD e análise foliar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.15, n.8, p.778-787, 2011.

SANCHEZ, M.G.B.; MARQUES JÚNIOR, M.; SIQUEIRA, D.S.; CAMARGO, L.A.; PEREIRA, G.T. Delineation of specific management areas for coffee cultivation based on the soil-relief relationship and numerical classification. **Precision Agriculture**, Netherlands, v.14, p.201-214, 2013.

SANTOS, E.O.J.; GONTIJO, I.; SILVA, M.B. Spatial variability of soil acidity attributes and liming requirement for conilon coffee. **Coffee Science**, Lavras, v.9, n.2, p.275-283, 2014.

SANTOS, E.O.J.; GONTIJO, I.; SILVA, M.B. Planejamento amostral de propriedades químicas do solo em lavoura de café conilon. **Coffee Science**, Lavras, v.8, n.4, p.423-431, 2013.

SANTOS, E.O.J.; GONTIJO, I.; SILVA, M.B.; NETO DRUMOND, A.P. Variabilidade espacial de macronutrientes em uma lavoura de café conilon no Norte do Espírito Santo. **Revista Ciências Agrônômicas**, Fortaleza, v.46, n.3, p.469-476, 2015a.

SANTOS, E.O.J.; PINTO, F.B.; BARBOSA, M.A.; GONTIJO, I. Delineamento de zonas de manejo para macronutrientes em lavoura de café conilon consorciada com seringueira. **Coffee Science**, Lavras, v.10, n.3, p.309-319, 2015b.

SANTOS, H.L.; VASCONCELOS, C. Determinação do número de amostras de solo para análise química em diferentes condições de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.11, p.97-100, 1987.

SILVA, A.A.; LANA, R.M.Q.; LANA, Â.M.Q.; BOMTEMPO, L.F.; COUTO JÚNIOR, P.A. Mapas de fertilidade de solo em área manejada com agricultura de precisão cultivada com café. **Brazilian Geographical Journal: Geosciences and Humanities research medium**, Ituiutaba, v.5, n.1, p.194-204, 2014.

SILVA, A.A.; LIMA, J.S.S.; OLIVEIRA, R.B.; SOUZA, G.S.; SILVA, M.A. Análise espacial da erosão hídrica em um latossolo vermelho amarelo sob cultivo de café conilon. **Revista Ciências Agrônômicas**, Fortaleza, v.38, n.4, p.335-342, 2007.

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 Ciência do Solo**, Viçosa, v.13, n.1, p.1-5, 1989.

SILVA, F.M.; SOUZA, Z.M.; FIGUEIREDO, C.A.P.; VIEIRA, L.H.S.; OLIVEIRA, E. Variabilidade espacial de atributos químicos e produtividade da cultura do café em duas safras agrícolas. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.32, n.1, p.231-241, 2008a.

SILVA, S.A.; LIMA, J.S.S. Spatial estimation of foliar phosphorus in different species of the genus *Coffea* based on soil properties. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.38, n.5, p.1439-1447, 2014.

SILVA, S.A.; LIMA, J.S.S.; XAVIER, A.C.; TEIXEIRA, M.M. Variabilidade espacial de atributos químicos de um Latossolo vermelho-amarelo húmico cultivado com café. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, n.1, p.15-22, 2010a.

SILVA, S.A.; LIMA, J.S.S.; SOUZA, G.S.; OLIVEIRA, R.B. Avaliação de interpoladores estatísticos e determinísticos na estimativa de atributos do solo em agricultura de precisão. **Idesia**, Chile, v.26, n.2, p.75-81, 2008b.

SILVA, S.A.; LIMA, J.S.S.; SOUZA, G.S.; OLIVEIRA, R.B.; SILVA, A.F. Variabilidade espacial do fósforo e das frações granulométricas de um Latossolo Vermelho Amarelo. **Revista Ciências Agrônomicas**, Fortaleza, v.41, n.1, p.1-8, 2010b.

SILVA, S.A.; LIMA, J.S.S.; SOUZA, G.S.; OLIVEIRA, R.B.; XAVIER, A.C. Lógica fuzzy na avaliação da fertilidade do solo e produtividade do café conilon. **Revista Ciências Agrônomicas**, Fortaleza, v.41, n.1, p.9-17, 2010c.

SILVA, V.R.; REICHERT, J.M.; STORCK, L.; FEIJÓ, S. Variabilidade espacial das características químicas do solo e produtividade de milho em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, n.6, p.1013-1020, 2003.

SIQUEIRA, D.S.; MARQUES JÚNIOR, J.; MATIAS, S.S.R.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; BAFFA, O.; OLIVEIRA, L.C. Correlation of properties of Brazilian Haplustalfs with magnetic susceptibility measurements. **Soil Use and Management**, Oxford, v.26, n.4, p.425-431, 2010.

SOUZA, Z.M.; SILVA, M.L.S.; GUIMARÃES, G.L.; CAMPOS, D.T.S.; CARVALHO, M.P.; PEREIRA, G.T. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo Vermelho distrófico sob semeadura direta em Selvíria (MS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.3, p. 699-707, 2001.

TSCHIEDEL, M.; FERREIRA, M.F. Introdução à agricultura de precisão: conceitos e vantagens. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.32, n.1, p.159-163, 2002.

VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V., V.H.; SCHAEFER, G.R. (Ed) **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1, p.1-54.

VIEIRA, S.R.; HATFIELD, J.L.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, Berkeley, v.51, n.3, p.1-75, 1983.

VIEIRA, S.R.; MILLETE, J.; TOPP, G.C.; REYNOLDS, W.D. Handbook for geostatistical analysis of variability in soil and climate data. In: ALVAREZ V., V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R.; BARROS, N.F.; MELLO, J.W.V.; COSTA, L.M. (Ed.) **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. v.2, p.1-45.

ZUCOLOTO, M.; LIMA, J.S.S.; COELHO, R.I. Correlação e variabilidade espacial de atributos químicos do solo e produção de bananeira prata-anã. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v.33, n.1, p.479-484, 2011.