

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

JAQUELINE ORLANDI PARIS

**PLANEJAMENTO E DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE
ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO E
PRODUTIVIDADE DA MACADÂMIA**

**São Mateus - ES
Fevereiro de 2018**

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

**PLANEJAMENTO E DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE
ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO E
PRODUTIVIDADE DA MACADÂMIA**

JAQUELINE ORLANDI PARIS

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. D.Sc. Ivoney Gontijo

São Mateus - ES

Fevereiro de 2018

Dados Internacionais de Catalogação na publicação (CIP)
(Divisão de Biblioteca Setorial do CEUNES - BC, ES, Brasil)
Bibliotecária: Marilzete de Almeida – CRB-6 ES-000721/O

P232p Paris, Jaqueline Orlandi, 1993-
Planejamento e distribuição amostral de atributos químicos
do solo e produtividade da macadâmia / Jaqueline Orlandi
Paris. – 2018.
67 f. : il.

Orientador: Ivoney Gontijo.
Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical) –
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Universitário
Norte do Espírito Santo.

1. Noz macadâmia. 2. Produtividade agrícola. 3. Solos -
Análise. I. Gontijo, Ivoney. II. Universidade Federal do Espírito
Santo. Centro Universitário Norte do Espírito Santo. III. Título.

CDU: 63

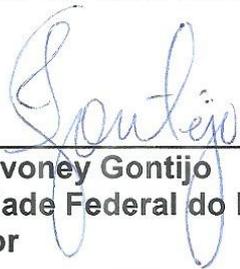
JAQUELINE ORLANDI PARIS

**PLANEJAMENTO E DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE ATRIBUTOS
QUÍMICOS DO SOLO E PRODUTIVIDADE DE MACADÂMIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura Tropical da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Agricultura Tropical.

Aprovada em 27 de fevereiro de 2018.

COMISSÃO EXAMINADORA



Prof. Dr. Ivoney Gontijo
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador



Prof. Dr. Fábio Luiz Partelli
Universidade Federal do Espírito Santo



Prof. Dr. Waylson Zancanella
Quartezeni
Instituto Federal do Espírito Santo

À Deus, *“Porque dele e por ele, e para ele, são todas as coisas; glória, pois, a ele eternamente. Amém”*. (Romanos 11:36).

Aos meus pais, Kaê e Angela, e à minha irmã, Alexandra.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por me conceder a vida, por ser meu refúgio, fonte de fé e esperança, me guiar nos momentos mais difíceis, me dar forças e direção para seguir meus planos e por me sustentar até aqui e em todos os momentos da minha vida.

Aos meus pais, Kaê e Angela, pelo amor, paciência, confiança e pelos valores que construíram em mim, os quais levarei por toda a vida. Agradeço por sempre acreditarem no meu potencial, me incentivando e apoiando incondicionalmente, por estarem ao meu lado e nunca medirem esforços para que eu pudesse alcançar meus objetivos.

À minha irmã, Alexandra, por ser meu exemplo de dedicação e conquistas.

Ao meu orientador Dr. Ivoney Gontijo, por aceitar o desafio de me orientar, pela amizade, pelos ensinamentos, dedicação, paciência e acima de tudo pela confiança e compreensão.

Agradeço aos professores do Programa de Pós-Graduação em Agricultura Tropical, pelo esforço, dedicação e ensinamentos passados ao longo de suas disciplinas.

Ao Douglas Gomes Viana, amigo essencial para condução pessoal e conclusão dessa etapa. Agradeço por toda amizade, companheirismo, conselhos e incentivo durante todo esse tempo e por cada palavra de apoio.

Às amigas Raquel Cristina Ramos e Amanda Duim pela amizade, tornando os dias melhores.

Aos amigos Arthur Barros Ziviani, Wallas de Oliveria Lima e Andressa Coelho de Oliveira, por me auxiliarem durante todo o período do experimento na coleta de dados em campo.

Ao Eduardo Oliveira de Jesus, por me auxiliar durante o processo de análise dos dados, com paciência e dedicação me ajudando.

À Joel Cardoso Filho e Francisco de Assis Ferreira, técnicos de laboratório que contribuíram com as análises, estando presentes e dispostos a ajudar na condução do projeto.

Ao senhor Eliseu Bonomo e família, pela gentileza e por cederem a estrutura necessária para realização deste trabalho.

Aos amigos do Programa de Pós Graduação em Agricultura Tropical e do curso de Agronomia, pela amizade, pelas conversas, e pelos bons momentos de descontração.

Aos demais amigos e familiares, pelo apoio e incentivo recebido ao longo de minha formação e que, de alguma forma, contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

À Universidade Federal do Espírito Santo, pela oportunidade de realização desse curso de mestrado e pela formação que me proporcionou.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pelo apoio financeiro com o fornecimento da bolsa estudantil.

Muito Obrigada!

SUMÁRIO

RESUMO	vi
ABSTRACT	viii
1. CAPÍTULOS	1
1.1 DELIMITAÇÃO DE ZONAS HOMOGÊNEAS PARA RECOMENDAÇÃO DE CALAGEM PARA MACADÂMIA UTILIZANDO GEOESTATÍSTICA	2
Resumo.....	2
Abstract.....	3
Introdução.....	3
Material e Métodos.....	5
Resultados e Discussão.....	9
Conclusões.....	14
Referências.....	15
1.2 PLANEJAMENTO AMOSTRAL DE ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO EM LAVOURA DE MACADÂMIA	19
Resumo	19
Abstract.....	20
Introdução.....	21
Material e Métodos.....	22
Resultados e Discussão.....	26
Conclusões.....	33
Referências.....	33
1.3 CORRELAÇÃO ENTRE TEORES DE NUTRIENTES DO SOLO, MORFOMETRIA E PRODUÇÃO DA MACADÂMIA NO NORTE DO ESPÍRITO SANTO	38
Resumo	38
Abstract.....	39
Introdução.....	39
Material e Métodos.....	41
Resultados e Discussão.....	44
Conclusões.....	51
Referências.....	51

RESUMO

PARIS, Jaqueline Orlandi; M.Sc.; Universidade Federal do Espírito Santo; Fevereiro de 2018; **Planejamento e distribuição espacial de atributos químicos do solo e produtividade da macadâmia**; Orientador: Ivoney Gontijo.

O conhecimento da variabilidade espacial dos atributos químicos do solo e da produtividade através do uso da geoestatística torna-se uma ferramenta para auxílio do manejo da noqueira macadâmia, controlando seu sistema de produção. Objetivou-se no presente estudo, determinar a variabilidade espacial dos atributos químicos 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. O experimento foi conduzido em lavoura de macadâmia, variedade HAES 344, com idade de 20 anos, plantada no espaçamento de 8,0 x 5,0 m (250 plantas ha⁻¹), em regime de irrigação por microaspersão no município de São Mateus – ES. Na área experimental com dimensões de 144 x 140 m (20.160 m²), foi demarcada uma malha com 100 pontos amostrais. Em cada ponto amostral foi determinada a produtividade e coletadas as amostras de solo, na profundidade 0,0-0,20 m para análise química de fósforo, potássio, cálcio, magnésio, ferro, cobre, zinco, manganês, matéria orgânica, sódio, acidez ativa, acidez potencial, alumínio, capacidade de troca catiônica à pH 7,0 e saturação por bases. A produtividade de cada planta da macadâmia foi realizada colhendo os frutos na projeção da copa da planta, delimitada pela divisão central entre plantas na fileira e entre linhas de plantio. Os dados foram submetidos à análise estatística descritiva, multivariada e geoestatística. Verificou-se estrutura de dependência espacial para todas variáveis em estudo, ajustando-se ao modelo esférico. A análise de mapas de isolinhas permitiu delimitar 3 zonas de manejo para

aplicação de calcário diferenciado. Os parâmetros estatísticos permitiu estabelecer o número adequado de amostras para análise dos atributos estudados que variaram de 1 a 18 pontos amostrais. A área em estudo apresentou tendência central de melhores condições para a cultura devido maiores teores de cálcio, magnésio, zinco, pH e baixo teor de H+Al. A associação da definição de zonas de manejo, do número de amostras e da variabilidade espacial dos atributos do solo pode ser usada para melhorar a eficiência de aplicação de insumos agrícolas, e para o desenvolvimento de estratégias de amostragem que minimizam os custos dentro de um erro conhecido e tolerável. A integração entre a análise de agrupamento hierárquico e a correlação linear de Pearson da morfometria das plantas, dos atributos do solo e da produtividade foi eficaz na determinação de grupos semelhantes e distintos entre si em uma lavoura de macadâmia.

ABSTRACT

PARIS, Jaqueline Orlandi; M.Sc.; Universidade Federal do Espírito Santo; February 2018; **Planning and spatial distribution of soil chemical attributes and productivity of macadamia**; Advisor: Ivoney Gontijo

Knowledge of the spatial variability of soil chemical attributes and productivity through the use of geostatistics becomes a tool to aid in the management of macadamia walnut, controlling its production system. The objective of this study was to determine the spatial variability of soil chemical attributes, as well as their spatial correlation with productivity, as well as to delimit zones of agricultural management and to propose a soil sampling methodology that best adjusts to the soil system conditions. management. The experiment was conducted in a macadamia plantation, HAES 344 variety, aged 20 years, planted at a spacing of 8.0 x 5.0 m (250 plants ha⁻¹), under a micro-sprinkler irrigation system in the municipality of São Mateus - ES. In the experimental area with dimensions of 144 x 140 m (20,160 m²), a mesh with 100 sample points was demarcated. At each sampling point, productivity and soil samples were collected at 0.0-0.20 m depth for the chemical analysis of phosphorus, potassium, calcium, magnesium, iron, copper, zinc, manganese, organic matter, sodium, active acidity, potential acidity, aluminum, cation exchange capacity at pH 7.0 and base saturation. The productivity of each macadamia plant was performed by harvesting the fruits in the crown of the plant, delimited by the central division between plants in the row and between planting lines. Data were submitted to descriptive, multivariate and geostatistical statistical analysis. We verified a spatial dependence structure for all variables under study, fitting the spherical model. The analysis of isoline maps allowed the delineation of 3 management zones for the application of differentiated limestone. The statistical parameters allowed to establish

the adequate number of samples to analyze the attributes studied that ranged from 1 to 18 sample points. The area under study presented a central tendency of better conditions for the culture due to higher levels of calcium, magnesium, zinc, pH and low H+Al content. The association of the definition of management zones, number of samples and spatial variability of soil attributes can be used to improve the efficiency of application of agricultural inputs, and to the development of sampling strategies that minimize costs within an error known and tolerable. The integration between hierarchical clustering analysis and Pearson's linear correlation of plant morphometrics, soil attributes and yield was effective in determining similar and distinct groups in a macadamia crop.

1. CAPÍTULOS

1.1 DELIMITAÇÃO DE ZONAS HOMOGÊNEAS PARA RECOMENDAÇÃO DE CALAGEM PARA MACADÂMIA UTILIZANDO GEOESTATÍSTICA

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 dos atributos de acidez do solo e da produtividade em uma lavoura de macadâmia, bem como a definição das zonas de manejo agrícola, utilizando técnicas geoestatísticas. O experimento foi conduzido em uma lavoura de macadâmia, no município de São Mateus – ES, plantada no espaçamento 8,0 x 5,0 (250 plantas ha⁻¹). A área experimental possui dimensões de 144 x 140 m (20.160 m²), onde demarcou-se uma malha de 100 pontos amostrais. Em cada ponto amostral foram determinadas a produtividade e coletadas amostras de solo, na profundidade 0,0-0,20 m para análise química de acidez ativa (pH), acidez potencial (H+Al), alumínio (Al), capacidade de troca catiônica à pH 7,0 (T) e saturação por bases (V), utilizados no cálculo de necessidade de calagem. Os dados foram submetidos à estatística descritiva e geoestatística. Verificou-se estrutura de dependência espacial para todas variáveis em estudo, ajustando-se ao modelo esférico. Com base na análise de mapas de isolinhas delimitou-se três zonas de manejo para aplicação de calcário diferenciado. 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: *Macadamia integrifolia*, estatística clássica, geoestatística, manejo do solo.

Abstract

The delimitation of management areas and the determination of the spatial variation of soil attributes and productivity can contribute to the rational application of agricultural inputs. The objective of this study was to determine the spatial variability of attributes of soil acidity and productivity in a macadamia crop, as well as the definition of agricultural management zones using geostatistical techniques. The experiment was conducted in a macadamia plantation, in the municipality of São Mateus - ES, planted in the spacing 8.0 x 5.0 m (250 plants ha⁻¹). The experimental area has dimensions of 144 x 140 m (20,160 m²), where a mesh of 100 sample points was demarcated. At each sampling point, productivity and soil samples were collected at depth 0.0-0.20 m for chemical analysis of active acidity, potential acidity, aluminum, cation exchange capacity at pH 7.0 and base saturation, used in calculating the need for liming. Data were submitted to descriptive and geostatistical statistics. We verified a spatial dependence structure for all variables under study, fitting the spherical model. Based on the analysis of isoline maps, three management zones were delimited for application of differentiated limestone. The association between knowledge of spatial variability and the definition of management zones can be used to improve the efficiency of application of agricultural inputs.

Keywords: *Macadamia integrifolia*, classical statistics, geostatistics, soil management.

Introdução

A macadâmia (*Macadamia integrifolia* Maiden e Betche) é uma frutífera nativa da Austrália que apresenta bom desenvolvimento em clima tropical e subtropical (BARRUETO et al, 2017); pertencente à família Proteaceae, com quatro espécies, sendo a *Macadamia integrifolia* a única plantada comercialmente no

mundo (SCHNEIDER et al., 2012). O Brasil é o quinto país em número de árvores de macadâmia plantadas, aproximadamente 1.040.000, e o sétimo em produção, com área de 6.500 ha. A grande maioria das árvores no Brasil ainda são jovens e não atingiram sua plenitude produtiva, fato que sinaliza um aumento de produção nos próximos anos (PIZA; MORIYA, 2014; RODRIGUES et al., 2015). Para o estado do Espírito Santo, a estimativa da produção de noz macadâmia, apesar de pequena, teve aumento significativo. Em 2016, a área colhida de 660 ha, produziu 480 toneladas, tendo rendimento médio de 727 kg ha^{-1} ; já em 2017, a área colhida de 693 ha, com produção de 1.409 toneladas, teve rendimento médio de 2.033 kg ha^{-1} ; uma variação no período 2017/2016 de 5,0% na área colhida, 193,5% na produção e 179,6% no rendimento médio (INCAPER, 2017).

A acidez do solo é um dos fatores que mais interferem na produtividade agrícola, especialmente nas regiões tropicais do globo (NATALE et al., 2012), promovendo o aparecimento de elementos tóxicos para as plantas (Al e H+Al), reduzindo o pH e a CTC do solo, que acarretam na limitação de produção das lavouras devido às deficiências dos nutrientes necessários (PREZOTTI et al., 2007). Portanto, a prática da calagem se torna indispensável para que sejam alcançadas produtividades elevadas, viabilizando economicamente a cultura (MELO et al., 2015; LEITE et al., 2017). De acordo com Raij (2011), a calagem, apesar de ser uma prática de manejo do solo reconhecidamente benéfica em condições de solo ácido, nem sempre é realizada, ou é de modo inadequado e, portanto, ineficaz. A aplicação de calcário promove a elevação do pH, a neutralização do alumínio tóxico, fornece cálcio e magnésio, propicia maior desenvolvimento do sistema radicular das plantas, melhorando a eficiência de uso dos nutrientes e da água que estão no solo (RAIJ, 2011).

Segundo Natale et al. (2012), as plantas perenes, assim como a macadâmia, permanecem longos períodos explorando praticamente o mesmo volume de solo, razão pela qual o ambiente radicular, em especial com respeito à acidez, merece a máxima atenção. No entanto, o conhecimento sobre o crescimento de macadâmia em condições adversas do solo, ou sobre os requisitos nutricionais da planta em geral, é limitado.

O método tradicional de gerenciamento de culturas baseia-se que a área cultivada é homogênea e as adubações não levam em consideração a variabilidade desta área. O manejo das culturas requer a identificação de sub-regiões

homogêneas dentro de um campo, geralmente chamado de zonas de manejo (GILL, et al., 2017). As zonas de manejo podem ser definidas como regiões homogêneas para as quais tomadas de decisão específicas devem ser consideradas. No entanto, a determinação das zonas de manejo não é direta devido às intrínsecas relações da variabilidade espacial das propriedades do solo que afetam os rendimentos das culturas (LEROUX et al., 2017).

A agricultura de precisão prevê o aproveitamento da estrutura da variação espacial de elementos do solo, condicionantes da produtividade agrícola, para avançar na racionalização da aplicação de insumos e abrandamento de eventuais impactos ambientais (GONTIJO et al., 2012) advindos de superdosagens, resultando em menor produtividade média e maiores despesas comparadas com sistemas que utilizam gerenciamento diferenciado em agricultura de precisão (BOTTEGA et al., 2013). Pelo fato de projetos em agricultura de precisão produzirem grande quantidade de dados de solo e de planta, faz-se necessário utilizar processos ou técnicas que integrem esses dados com a finalidade de dimensionar corretamente as zonas de manejo. Portanto, para Lima et al. (2013), a geoestatística é uma ferramenta importante para analisar a distribuição espacial das características do solo, e permite a quantificação da magnitude e grau de dependência detalhada da variabilidade das variáveis estudadas usando a precisão de um interpolador.

Por meio do mapeamento dos atributos químicos do solo, é possível a identificação de regiões de maior homogeneidade, permitindo assim, que as práticas agronômicas possam ser transferidas para ambientes semelhantes (SANTOS, et al., 2015). Neste contexto, objetivou-se neste estudo estabelecer áreas homogêneas para aplicação de calcário e caracterizar a variabilidade espacial de características relacionadas à acidez e à produtividade de macadâmia em um Latossolo cultivado com macadâmia, utilizando geoestatística.

Material e Métodos

O experimento foi conduzido em uma área cultivada com macadâmia (*M. integrifolia* Maiden e Betche) variedade HAES 344, com idade de 20 anos, plantado no espaçamento de 8,0 x 5,0 m (250 plantas ha⁻¹), em regime de irrigação por microaspersão, localizada no município de São Mateus, Espírito Santo, Brasil, nas coordenadas UTM 24S (388.106,00 m E, 7.934.570,38 m S), altitude de 86 m e

declividade média de 4%. O solo foi classificado como Latossolo Amarelo distrocoeso (EMBRAPA, 2013) presente na região dos tabuleiros costeiros do norte do Espírito Santo. O clima do município de São Mateus é Aw, segundo classificação de Köppen, caracterizado por clima tropical úmido, com inverno seco e chuvas máximas no verão. A precipitação pluvial anual média de 1.200 mm concentra-se entre os meses de novembro e janeiro (ALVARES et al, 2013). A precipitação pluvial anual média para o ano de 2015 foi de 800 mm, concentrada entre os meses de fevereiro a maio. A temperatura média anual é de 24°C (INCAPER, 2018).

As mudas de macadâmia foram plantadas em consórcio em filas alternadas com *Coffea canephora*, cujo espaçamento era de 4,0 x 2,0 m. Antes do plantio da macadâmia foi aplicado 3.000 kg de calcário dolomítico com PRNT de 85% e na adubação de cova foi utilizado 300 g de superfosfato simples. Durante o primeiro ano foram aplicados: 30 g de ureia planta⁻¹ por 60 dias; no segundo ano: 200 g do formulado NPK 25-05-20 por planta por 60 dias entre os meses de agosto a março. A partir do terceiro até o oitavo ano a macadâmia continuou recebendo a adubação do segundo ano. No nono ano, o café foi retirado e a macadâmia passou a ser adubada anualmente com 150 kg de N, 80 kg de P₂O₅ e 160 kg de K₂O, entre os meses de setembro a março, com calagem anual de 2.000 kg de calcário dolomítico com PRNT de 85% no mês de maio.

Foi instalada uma malha irregular de 144 x 140 m (20.160 m²) com 100 pontos (Figura 1), com distância mínima de 5 m. A malha amostral foi delimitada em função da escolha das plantas sadias e com produção ativa. Para georreferenciamento da área foi utilizado um par de receptores Spectra Precision®, modelo PROMARK 220 geodésico. As coordenadas obtidas foram corrigidas e os dados processados pela Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) do IBGE apresentaram precisão de 10 mm + 1 ppm. Em cada ponto amostral foram coletadas quatro subamostras de solo na projeção da copa da macadâmia, utilizando um amostrador de solo tipo "sonda", na profundidade de 0,00-0,20 m, compondo uma amostra composta, para análise química da acidez ativa (pH em água), acidez potencial (H + Al), alumínio (Al), CTC potencial (T) e saturação por base (V), com base em métodos da Embrapa (2009).

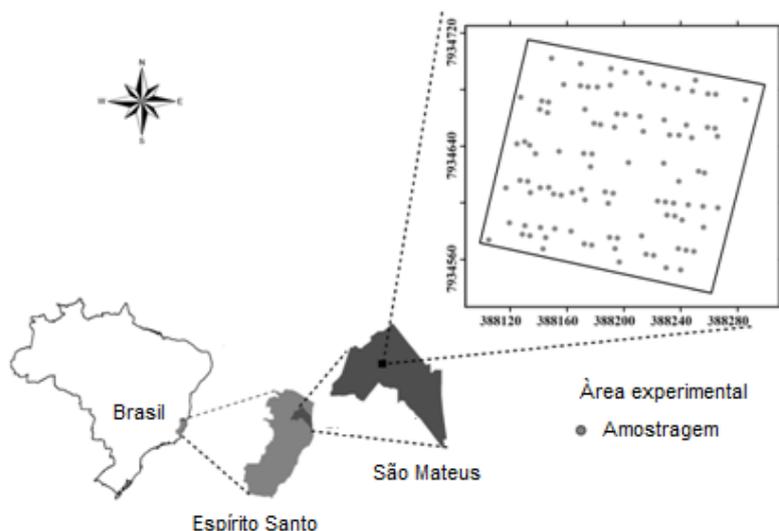


FIGURA 1. Representação digital do terreno com a distribuição espacial dos pontos de amostragem.

As necessidades de calagem (NC) foram determinadas com base no Manual de Recomendações de Calagem e Adubação para o Estado do Espírito Santo (PREZOTTI et al., 2007) usando o método de saturação por base aumentando a saturação ao nível de 70%. Foi considerado calcário com PRNT (Poder Relativo de Neutralização Total) de 100%, como mostrado na equação 1:

$$NC = \frac{T(V2-V1)}{PRNT} \times p \quad (1)$$

em que: T é a CTC a pH 7,0 em $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$; $V2$ a saturação por bases adequada à cultura a ser implantada, em %; $V1$ a saturação por bases atual do solo, em %; e p o fator de profundidade de aplicação do calcário.

A colheita da macadâmia foi realizada no período de fevereiro a junho de 2015, colhendo os frutos na projeção da copa da planta, delimitada pela divisão central entre plantas na fileira e entre linhas de plantio. Os frutos foram colhidos manualmente, coletados após caírem ao solo, com total de quatro colheitas que, pesadas e somadas, resultaram na produção de cada planta. Foi realizado o processo de retirada do carpelo e de macadâmias não consideradas viáveis economicamente. Somente foram consideradas as macadâmias em coco e economicamente viáveis para o cálculo de produtividade. Este processo resultou em

35% de descarte. Portanto 65% da produção foi considerada. Após, a produtividade em kg planta^{-1} foi convertida em t ha^{-1} .

Os dados obtidos foram submetidos à análise exploratória dos dados por meio da estatística descritiva, obtendo-se os seguintes parâmetros: média aritmética, mediana, coeficiente de variação e coeficiente de assimetria e de curtose. A análise de distribuição de frequência dos dados foi realizada para verificar sua normalidade, utilizando o teste de Shapiro-Wilk a 5%, utilizando o software Assisat versão 7.7 beta (SILVA, 2014).

A análise geoestatística visa definir o modelo de variabilidade espacial dos atributos do solo envolvidos neste estudo, obtendo-se, assim, os semivariogramas e, posteriormente, o mapeamento de cada atributo químico estudado através da krigagem ordinária. A análise da dependência espacial foi realizada 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. (2000), como mostrado na equação 2:

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

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 dois pontos x_i e $x_i + h$, separados pelo vetor h .

Para ajuste dos modelos matemáticos aos semivariogramas foi utilizado o método de tentativa e erro, que se baseia no ajuste manual dos semivariogramas até obter o melhor ajuste, aliado a menor soma de quadrado dos resíduos (SQR), e ao exame dos resultados da correlação de regressão de validação cruzada (CRVC), que avalia a qualidade da estimativa realizada pela krigagem ordinária (AMADO et al., 2007). Foi calculada o índice de dependência espacial (*IDE*), que é a proporção em percentagem da variância estrutural (C_1) em relação ao patamar ($C_0 + C_1$), que de acordo com Zimback (2001), apresenta os intervalos que considera: dependência espacial fraca ($IDE < 25\%$); moderada ($25\% \leq IDE < 75\%$) e forte ($IDE \geq 75\%$), como mostrado na equação 3:

$$IDE = \frac{C_1}{C_0 + C_1} \cdot 100 \quad (3)$$

Os mapas isolinhas de necessidades de calagem permitiram a delimitação de zonas homogêneas de manejo. O número de zonas estudadas foi definido com base no "sentimento", onde o pesquisador especificou o número de zonas em que ele desejava trabalhar, com base em critérios facilmente interpretados (SILVA JÚNIOR et al., 2012). Três zonas de gerenciamento homogêneas foram definidas com base sobre a facilidade de planejamento e desempenho agrícola e gerenciamento de insumos (SILVA JÚNIOR et al., 2012; NASCIMENTO et al., 2014). Com base na definição de zonas homogêneas, as necessidades de calagem médias foram calculadas, considerando todas as amostras pontos para cada região delimitada no mapa de necessidade de calagem.

Resultados e Discussão

A estatística descritiva é útil para resumir dados, controlar qualidade, identificar populações significativas e valores extremos (OUTEIRO et al., 2008), sendo assim, foi aplicada para avaliar tendência e dispersão dos dados. Foram obtidos médias e medianas (medidas de tendência central) semelhantes para mais de 90% dos parâmetros testados, indicando distribuição de dados simétricos. Isso foi confirmado pelos baixos valores dos coeficientes de assimetria e curtose, que estavam perto de zero (Tabela 1). Todos os parâmetros medidos tiveram distribuições normais de acordo com o Teste Shapiro-Wilk a $p < 0,05$, exceto Al.

O pH exibiu um coeficiente de variação (CV) baixo com base na classificação proposta por Warrick e Nielsen (1980). O pH do solo medido em água geralmente apresenta um baixo CV (HURTADO et al., 2009). No entanto, esse resultado reflete a variação no local de estudo, que pode ser observada para o mapa de isolinha do pH e provavelmente foi influenciado pela gestão do solo. Coeficientes intermediários foram observados para a H+Al, V, NC e produtividade da macadâmia, e foram observados CV elevados para Al. O CV elevado observado para o alumínio pode ser explicado pela distribuição não normal dos dados. Resultados semelhantes foram encontrados para Al em um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (GONTIJO et al., 2016). Dalchiavon et al. (2017) encontrou mesmos resultados de CV baixo para pH e T, e médio para H+Al e V para cultura da soja em um Latossolo Vermelho distrófico típico.

TABELA 1. Estatística descritiva do pH do solo, acidez potencial (H+Al), alumínio (Al), capacidade de troca de cátions potencial (T), saturação por bases (V), produtividade da macadâmia e necessidade de calagem (NC).

Estatística Descritiva	pH	H+Al ----- cmol _c dm ⁻³ -----	Al	T	V %	Prod. ----- t ha ⁻¹ -----	NC
Média	5,26	3,34	0,12	5,46	38,99	5,18	1,69
Mediana	5,30	3,30	0,10	5,30	39,00	5,10	1,69
CV (%)	4,91	16,76	89,67	11,36	20,67	21,09	27,23
Ass.	0,10	-0,05	0,73	0,29	-0,04	0,13	0,04
Curt.	0,02	-0,13	0,39	-0,20	-0,27	0,27	-0,02
p-valor	0,142*	0,229*	0	0,079*	0,658*	0,914*	0,634*

CV: Coeficiente de variação (%); Ass.: Coeficiente de assimetria; Curt.: Coeficiente de curtose; *: Distribuição normal pelo teste de Shapiro-Wilk, considerando $p < 0,05$.

Todas as variáveis estudadas apresentaram dependência espacial, expresso através de montagem modelo para os semivariogramas, exceto o T que ocorreu "efeito pepita puro" (Tabela 2; Figura 2). O modelo esférico foi o que melhor se ajustou a todos os parâmetros de química do solo medido. Resultados semelhantes foram encontrados para pH, H+Al, Al e NC por Santos et al. (2014) em um Latossolo Amarelo distrófico típico.

TABELA 2. Parâmetros estimados de semivariogramas experimentais das variáveis potencial hidrogeniônico (pH), acidez potencial (H+Al), alumínio (Al), CTC potencial (T), saturação por bases (V), necessidade de calagem (NC) e produtividade (Prod.).

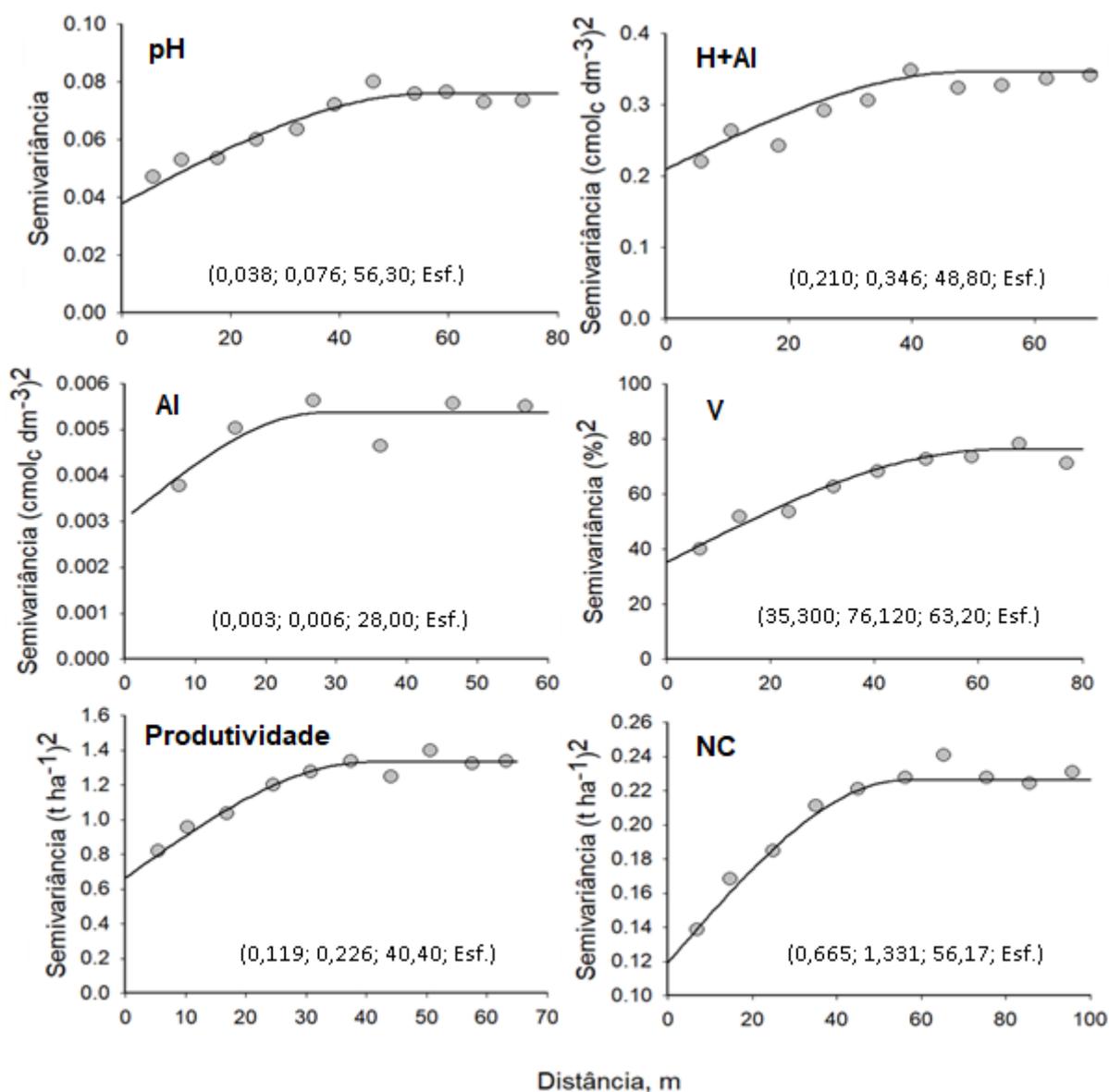
Parâmetros	pH	H+Al ----- cmol _c dm ⁻³ -----	Al	V %	Prod. ----- t ha ⁻¹ -----	NC
IDE	50,07	39,19	41,65	53,63	50,04	47,26
R ²	0,928	0,887	0,672	0,962	0,880	0,923
CRVC	0,771	0,555	0,698	0,800	0,557	0,751
SQR	$1,02 \cdot 10^{-4}$	$2,84 \cdot 10^{-3}$	$9,38 \cdot 10^{-7}$	52	0,04	$1,15 \cdot 10^{-3}$

IDE - Índice de dependência espacial (%); R² - Coeficiente de determinação; CRVC - coeficiente de regressão de validação cruzada; SQR - Soma de quadrado do resíduo; A - alcance (m).

O índice de dependência espacial foi classificado como moderado ($25 \leq IDE < 75\%$) para os todos os parâmetros. Quanto menor a proporção do efeito de pepita relativo ao patamar do semivariograma maior a dependência espacial apresentada pelos parâmetros estudados. Portanto, o método de krigagem ordinária resulta em melhores estimativas em áreas não amostradas e maior continuidade do fenômeno, menor variância estimada e maior confiança na estimativa do valor (LIMA et al., 2010). De acordo com os resultados, pode-se observar que os valores de pH, H+Al e V% podem ter sido influenciados pela aplicação desuniforme de calcário na área visto que apresentam dependência espacial moderada e ambos estão relacionados à aplicação deste corretivo (ZIMBACK, 2001).

O coeficiente de determinação (R^2) obtidos foram na ordem de 0,672 a próximos de 0,928, indicando que mais de 60% da variabilidade dos parâmetros testados para os valores da estimativa da semivariância podem ser explicados pelos modelos ajustados. Os coeficientes de regressão de validação cruzada (CRVC) resultaram em uma comparação entre os valores estimados e reais através de regressão (AMADO et al., 2007). Os CRVCs atingiu 80% para V, que também apresentou maior R^2 . Isso indica um erro menor na estimativa das variável usando krigagem ordinária e, portanto, maior confiabilidade.

O alcance indica a distância em que a amostragem dos pontos foi correlacionada. Os valores de alcance variaram entre 28 a 63,2 m para Al e V, respectivamente. Atributos que apresentam maior alcance de dependência espacial tendem a se apresentar mais homogêneos espacialmente, como pode ser observado para Saturação por Bases (V) (Figura 3); no entanto, baixos valores de alcance podem influir negativamente na qualidade das estimativas, uma vez que poucos pontos são usados para realização da interpolação (CORÁ et al., 2004). Neste estudo, uma distância mínima de 5 m entre amostras foi adotada, que possibilitou a detecção de variações em pequenas distâncias. Tal procedimento visa evitar a ocorrência do "efeito pepita puro", no caso, quando a distância mínima entre pontos coletados (malha amostral) é maior que a "dependência espacial" (ou alcance) do atributo estudado. Portanto, nas condições da presente pesquisa, assim como, visando auxiliar pesquisas futuras, na qual os mesmos atributos estejam envolvidos, os valores dos alcances a serem utilizados nos pacotes geoestatísticos, que alimentarão os pacotes computacionais empregados na agricultura de precisão, no geral, não deverão ser menores do que 10,6 m.



Os valores entre parênteses representam o efeito de pepita (Co), o patamar (Co + C) e o alcance (A), respectivamente. Esf. - modelo esférico.

FIGURA 2. Semivariogramas dos componentes de acidez do solo: acidez em água (pH), acidez potencial (H+Al), alumínio (Al), saturação por base (V), produtividade de uma lavoura de macadâmia e necessidade de calagem (NC).

A área de estudo apresentou fertilidade do solo menos favorável para o desenvolvimento da cultura nas regiões a sudoeste e nordeste (Figura 3). Nestas áreas, o solo era mais ácido, conforme indicado pelos valores de pH e saturação por base mais baixos e, conseqüentemente, precisou de doses mais elevadas de corretivos de acidez solo. Esses atributos estão relacionados de alguma maneira

entre si e com a calagem, podendo ser uma região em que foi depositado calcário dolomítico em quantidades menores, uma vez que o restante da área apresenta valores maiores para estes atributos. Portanto, é importante conhecer a variabilidade espacial da calagem para evitar qualquer eventual desequilíbrio nutricional na plantação de noz macadâmia.

Três zonas homogêneas de NC foram estabelecidas no local de estudo (Figura 3), facilitando a aplicação de calcário para agricultores. Isto está de acordo com estudos prévios, como a de Rodrigues Júnior et al. (2011), que estudou uma plantação de café Arábica e dividiu o local experimental de 2,1 ha em três zonas. Esses resultados sugerem uma diminuição da variabilidade espacial desses atributos, possivelmente causada pelo manejo da adubação diferenciada nas parcelas com a utilização da agricultura de precisão.

As diferenças na NC foram observadas entre os dois testes métodos: zonas homogêneas baseadas em agricultura de precisão e métodos tradicionais com uma única recomendação para toda a área (Tabela 3).

TABELA 3. Necessidade de calagem (NC) entre zonas homogêneas e métodos tradicionais em $t\ ha^{-1}$.

	Zonas homogêneas de manejo			Método tradicional
	1	2	3	
NC	0,95	1,68	2,31	1,69
Área (ha)	0,7	1,0	0,3	

Usando métodos tradicionais, a recomendação de calagem foi $1,69\ t\ ha^{-1}$. A adoção do método convencional resultaria em aplicação corretiva maior do que o necessário para uma parte do local estudado, a zona homogênea 1 (Figura 3), o que resultaria em excesso de calagem e um consequente desequilíbrio nutricional devido ao excesso de Ca e Mg e a indisponibilidade de micronutrientes catiônicos e fósforo. Para a zona de gerenciamento 3, a aplicação de calcário seria menor do que necessário e insuficiente para aumentar o pH para níveis adequados para um uso mais eficiente de fertilizantes aplicados. Aplicação de calcário de acordo com o método tradicional, seria apenas adequado para a zona de gerenciamento 2.

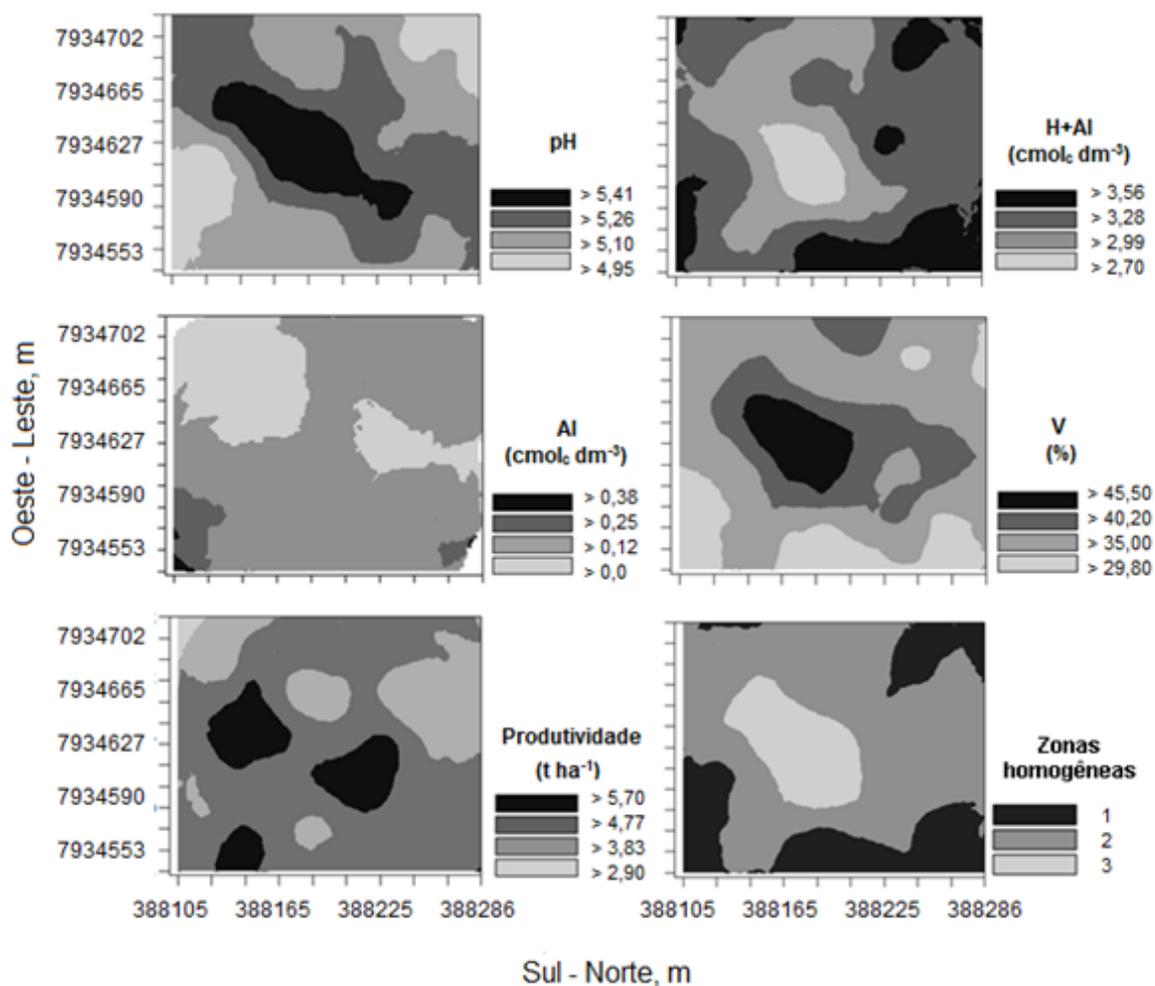


FIGURA 3. Mapas isolinhas dos componentes de acidez do solo: acidez em água (pH), acidez potencial (H+Al), alumínio (Al), capacidade de troca catiônica potencial (T), saturação por base (V), produtividade de uma lavoura de macadâmia, e necessidade de calagem (NC).

Oliveira et al. (2008) comparou método de amostragem recomendações de necessidades de calagem para uma cultura de café conilon e destacou que a análise de dados espaciais usando geoestatística permitiu a identificação de áreas com deficiência ou excesso calagem e fertilização, que não podem ser definidas usando o método de amostragem tradicional.

Conclusões

Todas as variáveis estudadas, exceto T, apresentaram dependência espacial com modelo esférico representando o melhor ajuste.

A variabilidade espacial das características do solo foi eficaz para a definição de zonas homogêneas na aplicação de calcário em uma plantação de macadâmia.

O conhecimento sobre variabilidade espacial e a definição de zonas homogêneas podem ser usadas para aumentar a eficiência de aplicações de calcário no solo.

Referências

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n.6, p. 711-728, 2013.

AMADO, T. J. C.; PES, L. C.; LEMAINSKI, C. L.; SCHENATO, R. B. Atributos químicos e físicos de Latossolos e sua relação com os rendimentos de milho e feijão irrigados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 4, p. 831-843, 2009.

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**, v.42, p.1101-1110, 2007.

BARRUETO, A. K.; MERZ, J.; HODEL, E.; ECKERT, S. The suitability of Macadamia and Juglans for cultivation in Nepal: an assessment based on spatial probability modelling using climate scenarios and in situ data. **Regional Environmental Change**, p. 1-13, 2017.

BERNARDI, A. C. C.; BETTIOL, G. M.; GREGO, C. R.; ANDRADE, R. G.; RABELLO, L. M.; INAMASU, R. Y. Ferramentas de agricultura de precisão como auxílio ao manejo da fertilidade do solo. **Cadernos de Ciência e Tecnologia**, Brasília, v. 32, n. 1/2, p. 205-221, 2015.

BOTTEGA, E. L.; QUEIROZ, D. M. DE; PINTO, F. DE 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**, v.44, p.1-9, 2013.

CORÁ, J. E.; ARAUJO, 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**, v. 28, n. 6, p. 1013-1021, 2004.

DALCHIAVON, F. C.; RODRIGUES, A. R.; LIMA, E. S. de; LOVERA, L. H.; MONTANARI, R. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo cultivado com

soja sob plantio direto. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v.16, n.2, p.144-154, 2017.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2 ed. Brasília: Embrapa; 2009. 627p.

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

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

GILI, A.; ÁLVAREZ, C.; BAGNATO, R.; NOELLEMAYER, E. Comparison of three methods for delineating management zones for site-specific crop management. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 139, p. 213-223, 2017.

GONTIJO, I.; NICOLE, L. R.; PARTELLI, F. L.; BONOMO, R.; SANTOS, E. O. J. Variabilidade e correlação espacial de micronutrientes e matéria orgânica do solo com a produtividade da pimenta-do-reino. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.1093-1102, 2012.

GONTIJO, I.; SANTOS, E. O. J.; PARTELLI, F. L.; GONTIJO, A. B. P. L.; PIRES, F. R. Determination of homogeneous zones for liming recommendations of black pepper using geostatistics. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.20, n.10, p.918-924, 2016.

HURTADO, S. M. C.; SILVA, C. A.; RESENDE, Á. V.; PINHO, R. G. V.; INÁCIO, E. S. B.; HIGASHIKAWA, F. S. Spatial variability of soil acidity attributes and the spatialization of liming requirement for corn. **Ciência e Agrotecnologia**, v.33, p.1351-1359, 2009.

INCAPER - INSTITUTO CAPIXABA DE PESQUISA, ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL. Consolidação das estatísticas agropecuárias de 2015-2016 e previsão da produção agrícola para 2017. **Boletim da Conjuntura Agropecuária Capixaba**, Vitória/ES – Ano III – Nº 9 – Março de 2017.

INCAPER - INSTITUTO CAPIXABA DE PESQUISA, ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL. Meteorologia: mapas de chuva acumulado e mensal e anual de 2015. Disponível em: <<https://meteorologia.incaper.es.gov.br/mapas-de-chuva-acumulado-mensal-e-anual-2015>>. Acesso em: 3 mar. 2018.

KÖPPEN,W. **Climatologia. México**, Fundo de Cultura Econômica, 1931.

LEROUX, C.; JONES, H.; CLENET, A.; TISSEYRE, B. A new approach for zoning irregularly-spaced, within-field data. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 14, p. 196-206, 2017.

LEITE, C. W.; LUZ, C. A. S. da; LUZ, M. L. G. S. da; GADOTTI, G. I.; NAVROSKI, R. Zonas de manejo nos níveis de fósforo e potássio no solo e a produtividade de arroz irrigado. **Engenharia na Agricultura**, v. 25, n. 2, p. 164-172, 2017.

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**, v.34, p.127-136, 2010.

LIMA, J. S. S.; SOUZA, G. S.; SILVA, S. A. Distribuição espacial da matéria orgânica, grau de flocculação e argila dispersa em água em área de vegetação natural em regeneração e pastagem. **Revista Árvore**, v.37, p.539-546, 2013.

MELO, C.A.D.; GUIMARÃES, F.A.R.; GONÇALVES, V.A.; BENEVENUTE, S. da S.; FERREIRA, G.L.; FERREIRA, L.R.; FERREIRA, F.A. Acúmulo de macronutrientes por plantas daninhas e de milho cultivadas em convivência em solo com diferentes manejos de fertilidade. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 36, p. 669-682, 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**, v.38, p.1101-1113, 2014.

NATALE, W.; ROZANE, D. E.; PARENT, L. E.; PARENT, S. Acidez do solo e calagem em pomares de frutíferas tropicais. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 34, n. 4, p. 1294-1306, 2012.

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**, v.28, p.176-186, 2008.

OUTEIRO, L., ÁSPERO, F.; ÚBEDA, X. Geostatistical methods to study spatial variability of soil cations after a prescribed fire and rainfall. **Catena**, v.74, p.310-320, 2008.

PIZA, P. L. B. T; MORIYA, L. M. Cultivo da macadâmia no Brasil. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 36, n. 1, p. 39-45, 2014.

PREZOTTI, L.C.; GOMES, J.A.; DADALTO, G.G.; OLIVEIRA, J.A. **Manual de recomendação de Calagem e adubação para o Estado do Espírito Santo - 5ª aproximação**. Vitória: SEEA/INCAPER/CEDAGRO; 2007. 305p.

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

RODRIGUES, D. A.; FREITAS, R. R.; LIRA, T. S.; XAVIER, T. P. Utilização dos resíduos provenientes do beneficiamento da noz macadâmia: uma revisão sistemática. **Brazilian Journal of Production Engineering**, v.1, n.1, p.1-13, 2015.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: IPNI, 2011. 420 p.

SANTOS, E. O de J.; GONTIJO, I.; SILVA, M. B da. Variabilidade espacial dos atributos de acidez do solo e necessidade de calagem para café conilon. **Coffee Science**, v. 9, n. 2, p. 275-283, 2014.

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

SCHNEIDER, L.M.; ROLIM. G. de S.; SOBIERAJSKI, G. da R.; PRELA-PANTANO, A.; PERDONÁ, M.J. Zoneamento agroclimático de noqueira-macadâmia para o brasil. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 34, p. 515-524, 2012.

SILVA, F.A.S. Assistat. Versão 7.7 beta (2014). Disponível em <http://www.assistat.com/indexp.html>.

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**, v.16, p.415-424, 2012.

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**, v. 1. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p. 1-54.

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.

ZIMBACK, C.R.L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade do solo**. 2001. Tese (Livre-Docência)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

1.2 PLANEJAMENTO AMOSTRAL DE ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO EM LAVOURA DE MACADÂMIA

Resumo

A determinação do número de amostras utilizadas para determinar os valores dos atributos químicos 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 químicos do solo, em lavoura de macadâmia 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 macadâmia, no município de São Mateus - ES, plantada no espaçamento 8,0 x 5,0 m (250 plantas ha⁻¹). Instalou-se uma malha irregular de 144 x 140 m (20.160 m²) com 100 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. O CV foi considerado baixo para pH e médio para os demais atributos químicos do solo. Utilizando parâmetros estatísticos, estabeleceu-se o número adequado de amostras para análise dos atributos estudados que variaram de 1 a 18 pontos amostrais. Todos os atributos químicos do solo apresentaram estrutura de dependência espacial, ajustando-se ao modelo esférico. A área em estudo apresentou tendência central de melhores condições para a cultura devido maiores teores de cálcio, magnésio, zinco, pH e baixo teor de H+Al. 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: *Macadamia integrifolia*, estatística clássica, geoestatística, amostragem do solo.

Abstract

The determination of the number of samples used to determine the values of soil chemical attributes will result in the optimization of the workforce, in addition to enabling a better representation of these attributes. The objective of this work was to study the spatial variability of soil chemical attributes in macadamia plantations and to propose a soil sampling methodology that best adjusts to the conditions of the management system. The experiment was conducted in a macadamia plantation, in the municipality of São Mateus - ES, planted in the spacing 8.0 x 5.0 m (250 plants ha⁻¹). An irregular grid of 144 x 140 m (20,160 m²) was installed with 100 sample points. At each sampling point, soil samples were collected, at a depth of 0.0-0.20m. Data were submitted to descriptive statistics and to geostatistical analysis. The CV was considered low for pH and average for the other soil chemical attributes. Using statistical parameters, we established the adequate number of samples to analyze the attributes studied that ranged from 1 to 18 sample points. All the chemical attributes of the soil presented a structure of spatial dependence, adjusting to the spherical model. The area under study presented a central tendency of better conditions for the culture due to higher levels of calcium, magnesium, zinc, pH and low H+Al content. The determination of the number of samples and the spatial variability of the soil attributes can be used for the development of sampling strategies that minimize farmer costs within a known and tolerable error.

Keywords: *Macadamia integrifolia*, classical statistics, geostatistics, soil sampling.

Introdução

A macadâmia (*Macadamia integrifolia* Maiden e Betche) é uma frutífera nativa de origem australiana, apresenta bom desenvolvimento em clima tropical e subtropical (BARRUETO et al, 2017); pertencente à família Proteaceae, com quatro espécies, sendo a *Macadamia integrifolia* a única plantada comercialmente no mundo (SCHNEIDER et al., 2012). A macadâmia produz uma noz de alto valor econômico no mercado internacional e com grande aceitação entres os consumidores (MARROCOS et al., 2003). Para o estado do Espírito Santo, o aumento de área previsto é de 33 hectares, acompanhado de um aumento de produção que ultrapassa 190% na comparação com 2016. Dentre os municípios produtores da noz no estado, se destacam São Mateus e Castelo (INCAPER, 2017).

Informações a respeito dos teores dos nutrientes no solo são de fundamental importância para as culturas, pois é fator primordial para a caracterização da fertilidade do solo e determinante para a produtividade. O manejo da fertilidade do solo realizado na cultura da macadâmia, quanto à aplicação de insumos, é baseado nos valores médios de uma amostra composta, oriunda de subamostras coletadas em zigue-zague na área, desconsiderando a variabilidade natural do solo. No processo de amostragem do solo, densidade de amostragem é um fator importante para a determinação da propriedade do solo (OLIVEIRA et al., 2015) e a amostra mais adequada é aquela que representa da melhor maneira a área a ser avaliada, com um mínimo de unidades amostrais para atender a este objetivo. Siqueira et al. (2010) afirmaram que cerca de 80-85% dos erros na aplicação de insumos agrícolas, como fertilizantes e alterações do solo, podem ser atribuídos a amostragem mal planejada.

Quando não se conhece o grau de autocorrelação espacial entre os pontos amostrais de determinada propriedade do solo, como no caso da estatística clássica, frequentemente coleta-se uma quantidade excessiva de amostras para obter a precisão desejada. De acordo com Santos et al. (2013), a avaliação dessas características, mesmo em áreas homogêneas e em curtas distâncias, apresenta variação espacial que pode influenciar a produtividade da lavoura. Assim, a análise estatística e o conhecimento da dependência espacial das propriedades do solo é importante na indicação de um número mínimo de pontos suficientes para nortear o

processo de amostragem, reduzir a variação dos resultados a um nível aceitável promovendo redução nos custos de coleta (SANTOS et al., 2014).

Baseada nesse princípio, a geoestatística assume grande relevância, possibilitando determinar a variabilidade espacial de propriedades químicas do solo, otimizando a aplicação localizada de corretivos e fertilizantes, melhorando dessa maneira o controle do sistema de produção das culturas e minimizando as contaminações ambientais (CAVALCANTE et al., 2007). Em razão dessa variabilidade, é necessário estabelecer um critério rigoroso de amostragem que permita, a partir de técnicas de amostragem, extrair informações representativas de uma determinada área (OLIVEIRA et al., 2008; MONTANARI et al., 2012). Com isso, tem-se uma amostra representativa da população para que os resultados da análise do solo tenham validade técnica e científica, e que recursos não sejam empregados desnecessariamente e, ou, evitando amostragem não representativa (ROZANE et al., 2011).

Para a construção e delimitação dos mapas de solos, o planejamento amostral por meio da identificação do número de amostras apropriadas apresenta uma etapa importante a ser avaliada. A densidade de amostragem influencia diretamente o nível de detalhe a ser obtido (escala ou resolução) e os custos de mapeamento. Neste contexto, objetivou-se no presente trabalho estudar a variabilidade espacial dos atributos químicos do solo, em lavoura de macadâmia, e propor uma metodologia de amostragem de solo que melhor se ajuste às condições do sistema de manejo e determinar o número adequado de amostras para a determinação desses atributos, utilizando métodos da estatística clássica e da geoestatística.

Material e Métodos

A área experimental localizada-se no município de São Mateus, Espírito Santo, Brasil, nas coordenadas UTM 24S (388.106,00 m E, 7.934.570,38 m S), altitude de 86 m e declividade média de 4%. O solo foi classificado como Latossolo Amarelo distrocoeso (EMBRAPA, 2013) presente na região dos tabuleiros costeiros do norte do Espírito Santo. O clima do município de São Mateus é Aw, segundo classificação de Köppen, caracterizado por clima tropical úmido, com inverno seco e chuvas máximas no verão. A precipitação pluvial anual média de 1.200 mm

concentra-se entre os meses de novembro e janeiro (ALVARES et al, 2013). A precipitação pluvial anual média para o ano de 2015 foi de 800 mm, concentrada entre os meses de fevereiro a maio. A temperatura média anual é de 24°C (INCAPER, 2018).

O experimento foi conduzido em uma área cultivada com macadâmia (*M. integrifolia* Maiden e Betcher) variedade HAES 344, com idade de 20 anos, plantado no espaçamento de 8,0 x 5,0 m (250 plantas ha⁻¹), em regime de irrigação por microaspersão. As mudas de macadâmia foram plantadas em consórcio em filas alternadas com *Coffea canephora*, cujo espaçamento era de 4,0 x 2,0 m. Antes do plantio da macadâmia foi aplicado 3.000 kg de calcário dolomítico com PRNT de 85% e na adubação de cova foi utilizado 300 g de superfosfato simples. Durante o primeiro ano foram aplicados: 30 g de ureia planta⁻¹ por 60 dias; no segundo ano: 200 g do formulado NPK 25-05-20 por planta por 60 dias entre os meses de agosto a março. A partir do terceiro até o oitavo ano a macadâmia continuou recebendo a adubação do segundo ano. No nono ano, o café foi retirado e a macadâmia passou a ser adubada anualmente com 150 kg de N, 80 kg de P₂O₅ e 160 kg de K₂O, entre os meses de setembro a março, com calagem anual de 2.000 kg de calcário dolomítico com PRNT de 85% no mês de maio.

A amostragem de solo foi realizada por meio de coletas de quatro subamostras de solo na projeção da copa da macadâmia, utilizando um amostrador de solo tipo "sonda", na profundidade de 0,00-0,20 m, compondo uma amostra composta, em instalada uma malha de 144 x 140 m (20.160 m²) com 100 pontos (Figura 1), distância mínima de 5 m. Para georreferenciamento da área foi utilizado um par de receptores Spectra Precision®, modelo PROMARK 220 geodésico. As coordenadas obtidas foram corrigidas e os dados processados pela Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) do IBGE apresentaram precisão de 10 mm + 1 ppm. Em cada ponto amostral foram coletadas, para análise química de cálcio (Ca), magnésio (Mg), fósforo (P), potássio (K), ferro (Fe), cobre (Cu), manganês (Mn), zinco (Zn), pH em água, acidez potencial (H + Al) e matéria orgânica (MO), com base em métodos da Embrapa (2009).

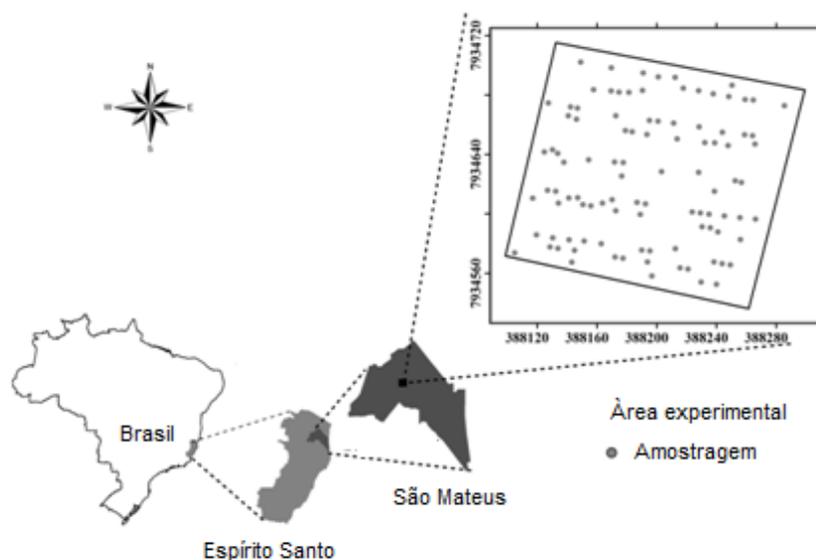


FIGURA 1. Representação digital do terreno com a distribuição espacial dos pontos de amostragem.

A colheita da macadâmia foi realizada no período de fevereiro a junho de 2015, colhendo os frutos na projeção da copa da planta, delimitada pela divisão central entre plantas na fileira e entre linhas de plantio. Os frutos foram colhidos manualmente, coletados após caírem ao chão, com total de quatro colheitas que, pesadas e somadas, resultaram na produção de cada planta. Foi realizado o processo de retirada do carpelo e de macadâmias não consideradas viáveis economicamente. Somente foram consideradas as macadâmias em coco e economicamente viáveis para o cálculo de produtividade. Este processo resultou em 35% de descarte. Portanto 65% da produção foi considerada. Após, a produtividade em kg planta^{-1} foi convertida em t ha^{-1} .

Inicialmente, os dados obtidos foram submetidos à análise exploratória dos dados por meio da estatística descritiva, obtendo-se os seguintes parâmetros: média aritmética, mediana, coeficiente de variação e coeficiente de assimetria e de curtose. A análise de distribuição de frequência dos dados foi realizada para verificar sua normalidade, utilizando o teste de Shapiro-Wilk a 5%, utilizando o software Assisat versão 7.7 beta (SILVA, 2014).

O número de subamostras (n) para obter valores médios representativos dos atributos químicos 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 análise geoestatística foi realizada 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), estimada pela equação 2:

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

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 dois pontos x_i e $x_i + h$, separados pelo vetor h .

Para ajuste dos modelos matemáticos aos semivariogramas foi utilizado o método de tentativa e erro, que se baseia no ajuste manual dos semivariogramas até obter o melhor ajuste, aliado a menor soma de quadrado dos resíduos (SQR), e ao exame dos resultados da correlação de regressão de validação cruzada (CRVC), que avalia a qualidade da estimativa realizada pela krigagem ordinária (AMADO et al., 2007). Foi calculada o índice de dependência espacial (IDE), que é a proporção em percentagem da variância estrutural (C_1) em relação ao patamar ($C_0 + C_1$), que de acordo com Zimback (2001), apresenta os intervalos que considera: dependência espacial fraca ($IDE < 25\%$); moderada ($25\% \leq IDE < 75\%$) e forte ($IDE \geq 75\%$), como mostrado na equação 3:

$$IDE = \frac{C_1}{C_0 + C_1} \cdot 100 \quad (3)$$

Resultados e Discussão

Os resultados referentes à análise descritiva para os elementos químicos estudados estão apresentados na Tabela 1. Os valores da média e da mediana, para os atributos químicos do solo, estão próximos, mostrando tendência de distribuição simétrica para todos os atributos, exceto K e Fe. Quanto aos resultados referentes ao teste de Shapiro-Wilk à 5% de probabilidade, verifica-se normalidade dos dados para o teor de Zn, pH, H+Al e MO, o que pode ser confirmado pelos baixos valores de assimetria e curtose (LITTLE e HILLS, 1978).

TABELA 1. Estatística descritiva dos dados de cálcio (Ca), magnésio (Mg), fósforo (P), potássio (K), ferro (Fe), cobre (Cu), manganês (Mn), zinco (Zn), acidez ativa (pH), acidez potencial (H+Al) e matéria orgânica (MO) em lavoura de macadâmia cultivada no município de São Mateus, ES.

Estatística descritiva	pH	Ca	Mg	H+Al	Fe	Cu	Mn	Zn	P	K	MO	
		----- cmol _c dm ⁻³ -----			----- mg dm ⁻³ -----							dag kg ⁻¹
Média	5,26	1,54	0,40	3,34	80,80	8,48	18,07	12,24	72,32	63,96	2,03	
Mediana	5,30	1,50	0,40	3,30	66,35	8,00	17,20	12,80	70,05	53,50	2,00	
CV (%)	4,91	21,8	24,30	16,76	48,0	31,9	47,0	35,1	26,4	47,1	16,1	
Ass.	0,10	0,57	0,20	-0,05	1,63	0,68	0,74	0,26	0,61	1,16	-0,13	
Curt.	0,02	0,03	0,40	-0,13	2,19	0,56	0,28	-0,19	0,36	0,62	0,00	
p-valor	0,142*	0,01	0	0,229*	0	0,004	0,002	0,358*	0,032	0	0,405*	

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 assimetria é mais sensível a valores extremos do que a média, mediana e o desvio padrão, uma vez que um único valor pode influenciá-lo, pois os desvios entre cada valor e a média são elevados à terceira potência (ISAAKS e SRIVASTAVA, 1989). Chaves e Farias (2009) afirmam que, mesmo que os dados não apresentem distribuições simétricas e se os coeficientes de assimetria e curtose forem próximos de zero, tal como valores médios e medianos próximos, como é o caso da maioria dos atributos neste solo, tratamentos geoestatísticos podem ser aplicados possibilitando avaliar a dependência espacial dos atributos haja vista que a normalidade dos dados não é uma exigência da geoestatística.

O fato de algumas variáveis não seguirem uma distribuição normal não influencia na análise, demonstrando maior importância à utilização de geoestatística

para representar a variabilidade encontrada (CLARK, 1979). Considerando que o solo é heterogêneo e, portanto, as variáveis não são aleatórias e independentes umas das outras, como representa um dado que segue distribuição normal, a utilização da geoestatística é aconselhável.

Segundo a classificação proposta por Warrick e Nielsen (1980), os coeficientes de variação apresentaram-se baixos ($CV < 12\%$) para pH e médios ($12 < CV < 62\%$) para os demais atributos químicos, corroborando com Santos et al. (2013), Oliveira et al. (2015) e Azevedo et al. (2015). Resultados obtidos por Lima et al. (2010), em Argissolo Vermelho-Amarelo textura argilosa sob Mata Atlântica, e Santos et al. (2011), em Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico e cultura da pimenta-do-reino, tiveram CV médio para Ca, Mg e K. Gontijo et al. (2012), em mesmo solo, obteve CV médio para Fe, Cu, Mn, Zn e MO. Quanto menor o CV mais homogêneo tende a ser o conjunto de dados. Portanto, o baixo CV de variação para o pH é explicado pela normalidade encontrada entre seus dados através do teste de Shapiro-Wilk. O CV permite comparar a variabilidade entre amostras de variáveis com diferentes unidades, mas não permite a análise da variabilidade espacial das propriedades do solo ou seu padrão espacial (CAMARGO et al., 2008). Portanto, os atributos químicos dos solos foram posteriormente submetidos a análise geoestatística à qual teve correlação espacial, sendo expressa por modelos de semivariograma ajustados.

O coeficiente de variação dos dados permite calcular o número de amostras, com a finalidade de estimar o valor de um atributo, em determinada área, com base na fórmula de Cline (1944). 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%.

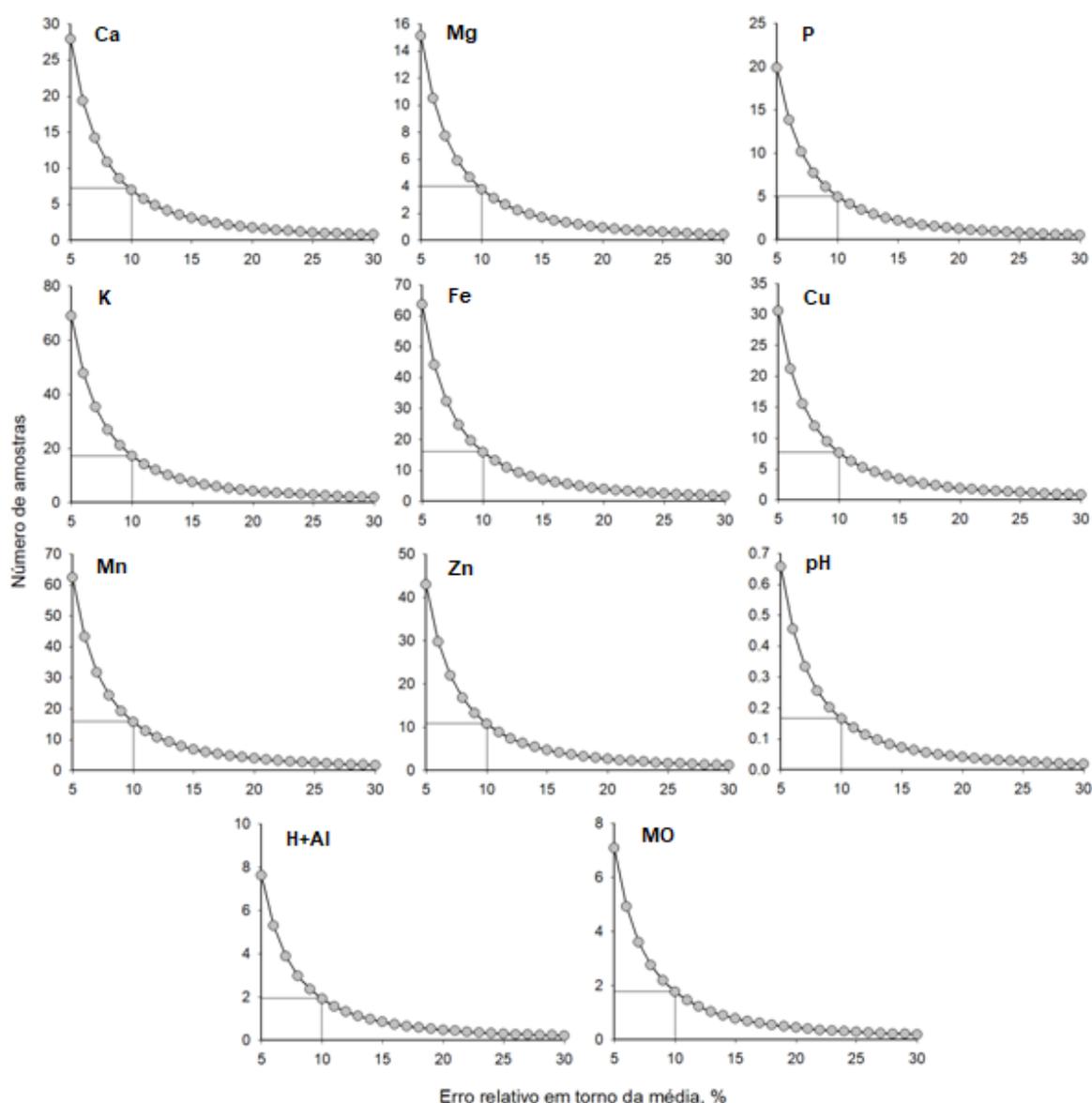


FIGURA 2. Números de pontos amostrais para estimativa da média dos atributos químicos do solo: cálcio (Ca), magnésio (Mg), fósforo (P), potássio (K), ferro (Fe), cobre (Cu), manganês (Mn), zinco (Zn), pH em água (pH), acidez potencial (H+Al) e matéria orgânica (MO) conforme o erro relativo em torno da média, com 5% de significância.

O número de amostras para obter variação de 10% em torno da média, com 5% de nível de significância foi de 7, 4, 5, 18, 17, 8, 18, 11, 1, 2 e 2 para Ca, Mg, P, K, Fe, Cu, Mn, Zn, pH, H+Al e MO, respectivamente (Figura 2). Aquino et al. (2014) obteve densidade amostral (pontos ha^{-1}) de 4, 16, 43, 23, 3 e 4 para Ca, Mg, P, K, pH e H+Al, respectivamente, pelo método do alcance estimado na análise geoestatística. Gontijo et al. (2007) salienta que à medida que se reduz a variação

em torno da média há aumento no número de subamostras. Entretanto, onera o processo de amostragem sem incremento proporcional em precisão. Considerando, portanto, que não se faz amostragem em separado para cada atributo químico (SOUZA et al., 1997) e, que o erro amostral está dentro do tolerável, 10% ao redor da média, recomendou-se coletar 18 amostras simples de solo nas condições estudadas, valor que está de acordo com a recomendação de Prezotti et al. (2007), que é de 15 a 20 amostras simples por área.

Os resultados referentes à análise geoestatística encontram-se na Tabela 2 e Figura 3. Para todos os atributos químicos, exceto Cu, verificou-se estrutura de dependência espacial com o modelo esférico ajustando-se às semivariâncias estimadas, comprovado pelos valores de R^2 dos nutrientes maiores que 0,887, ou seja, mais de 88,7% da variabilidade existente nos valores da semivariância estimada são explicadas pelos modelos ajustados, indicando que os modelos de semivariogramas adotados satisfazem às exigências de interpolação espacial.

TABELA 2. Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas experimentais para cálcio (Ca), magnésio (Mg), fósforo (P), potássio (K), ferro (Fe), cobre (Cu), manganês (Mn), zinco (Zn), pH em água (pH), acidez potencial (H+Al) e matéria orgânica (MO) em lavoura de macadâmia cultivada no município de São Mateus, ES.

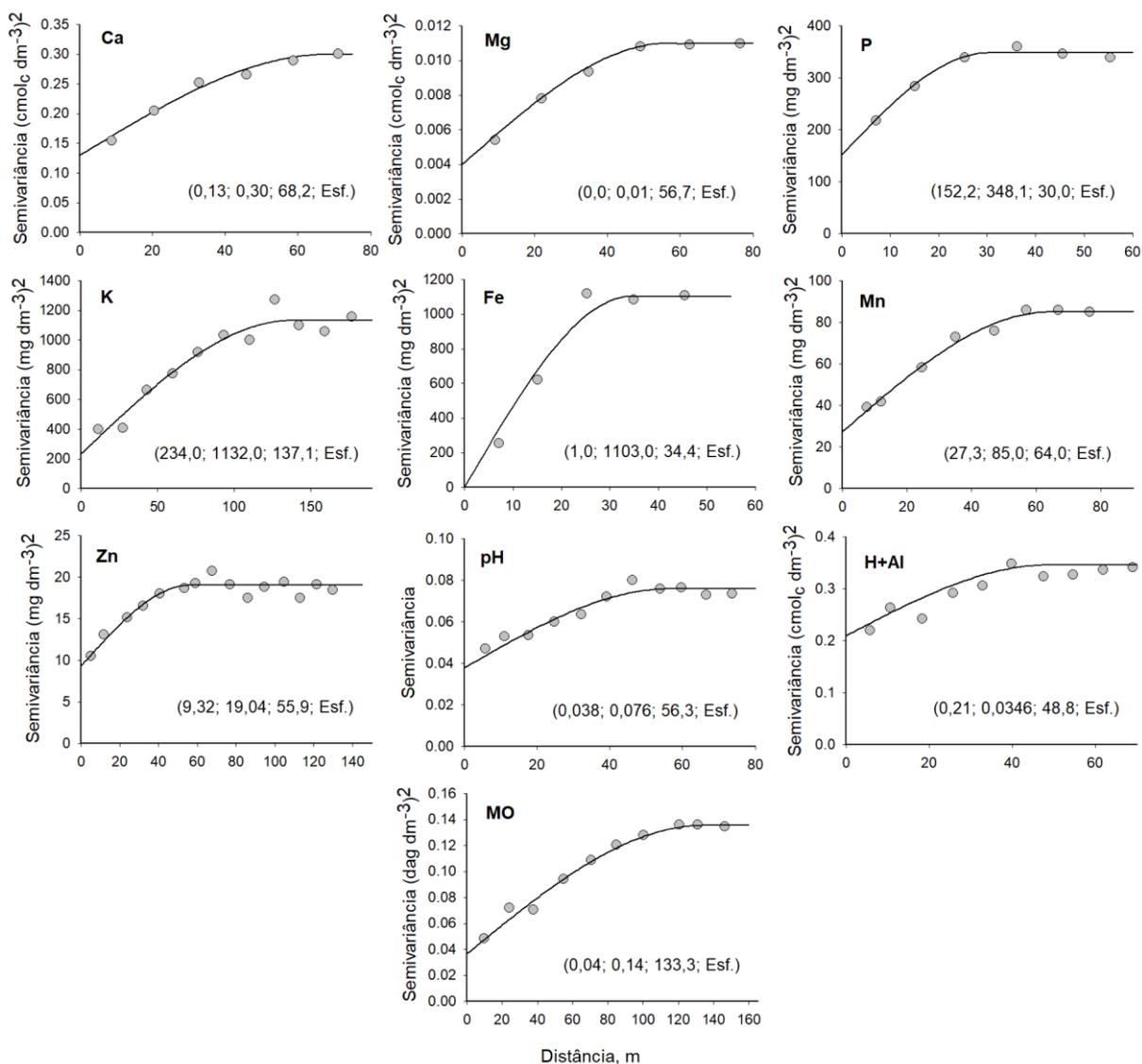
Parâmetros	IDE	R ² ----- %	CRVC -----	SQR
Ca	56,7	98,4	85,5	2,79 10 ⁻⁴
Mg	67,9	99,7	83,5	8,10 10 ⁻⁸
P	56,3	98,2	56,5	271
K	79,3	94,5	100,0	47201
Fe	99,9	97,4	98,8	24254
Mn	67,9	95,2	87,4	119
Zn	51,1	79,5	81,3	23,8
pH	50,0	92,7	80,0	1,02 10 ⁻⁴
H+Al	39,2	88,7	60,0	2,84 10 ⁻³
MO	50,0	97,0	91,5	2,78 10 ⁻⁴

GD: grau de dependência espacial; R2: coeficiente de determinação; CRCV: coeficiente de regressão da validação cruzada; SQR: soma de quadrado de resíduo.

O coeficiente de regressão da validação cruzada (CRCV) variou entre 56,5 e 100%, para P e K, respectivamente. Nessa análise, depois de obtido o modelo variográfico, cada valor original é removido do domínio espacial e, usando-se os demais, um novo valor é estimado para esse ponto. Desse modo, um gráfico pode ser construído mostrando a relação entre valores reais e estimados. A validação cruzada não prova que o modelo escolhido é o mais correto, mas sim que o mesmo não é inteiramente incorreto. O CRCV do K indica que sua estimativa no solo, utilizando a técnica da krigagem, apresenta um menor erro e, portanto, é mais confiável. A validação cruzada é uma forma para medir a incerteza da predição dos dados, ou seja, uma maneira de verificar a confiabilidade do modelo variográfico, que terá reflexos na interpolação dos dados e, conseqüentemente, no mapeamento por krigagem (BERNARDI et al., 2015). Faraco et al. (2008), estudando diversos critérios para validação de atributos do solo, concluíram que a validação cruzada foi o método mais adequado para escolha do melhor ajuste.

A análise do índice de dependência espacial (IDE) dos atributos químicos do solo mostrou que as variáveis K e Fe apresentaram grau de dependência espacial forte (< 75%), e IDE moderada (25 a 75%) para os demais atributos em estudo. De acordo com Seidel e Oliveira (2014), uma adequada descrição da dependência espacial é fundamental para revelar tanto o grau ou a magnitude da continuidade espacial de um atributo em estudos de variabilidade espacial quanto ao seu modo de variação (estrutura).

O alcance da dependência espacial é um parâmetro importante no estudo dos semivariogramas. Chaves e 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 30,0 a 137,1 metros, para a P e K, respectivamente (Figura 3). Os baixos alcance para P e Fe podem ser atribuídos a distância de 5 m usada na malha amostral não ser suficiente para o ajuste do semivariograma. Santos et al. (2013) afirma 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.



Os valores entre parênteses representam o efeito de efeito pepita (Co), o patamar (Co + C) e o alcance (A), respectivamente. Esf. - modelo esférico.

FIGURA 3. Semivariogramas das variáveis cálcio (Ca), magnésio (Mg), fósforo (P), potássio (K), ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn), pH em água (pH), acidez potencial (H+Al) e matéria orgânica (MO).

A área estudo apresentou tendência central dos atributos, onde foram observados os maiores valores de pH e os maiores valores das bases Ca e Mg (Figura 4), porque, de acordo com Ronquim (2010), as bases têm a propriedade de aumentar o pH do solo. Um padrão similar de distribuição espacial também foi encontrado por Azevedo et al. (2015) para macronutrientes e pH; e por Lima et al. (2010) entre Ca, Mg, K e pH. Do mesmo modo, valores mais elevados de pH foram observados coincidindo com a ocorrência de menores teores de H+Al (Figura

4). Resultados semelhantes foram encontrados por Lima et al. (2010) corroborando com Ronquim (2010), que concluíram que os solos menos ácidos, ou seja, os solos com maior pH, apresentam menores teor de H e Al permutáveis (Figura 4).

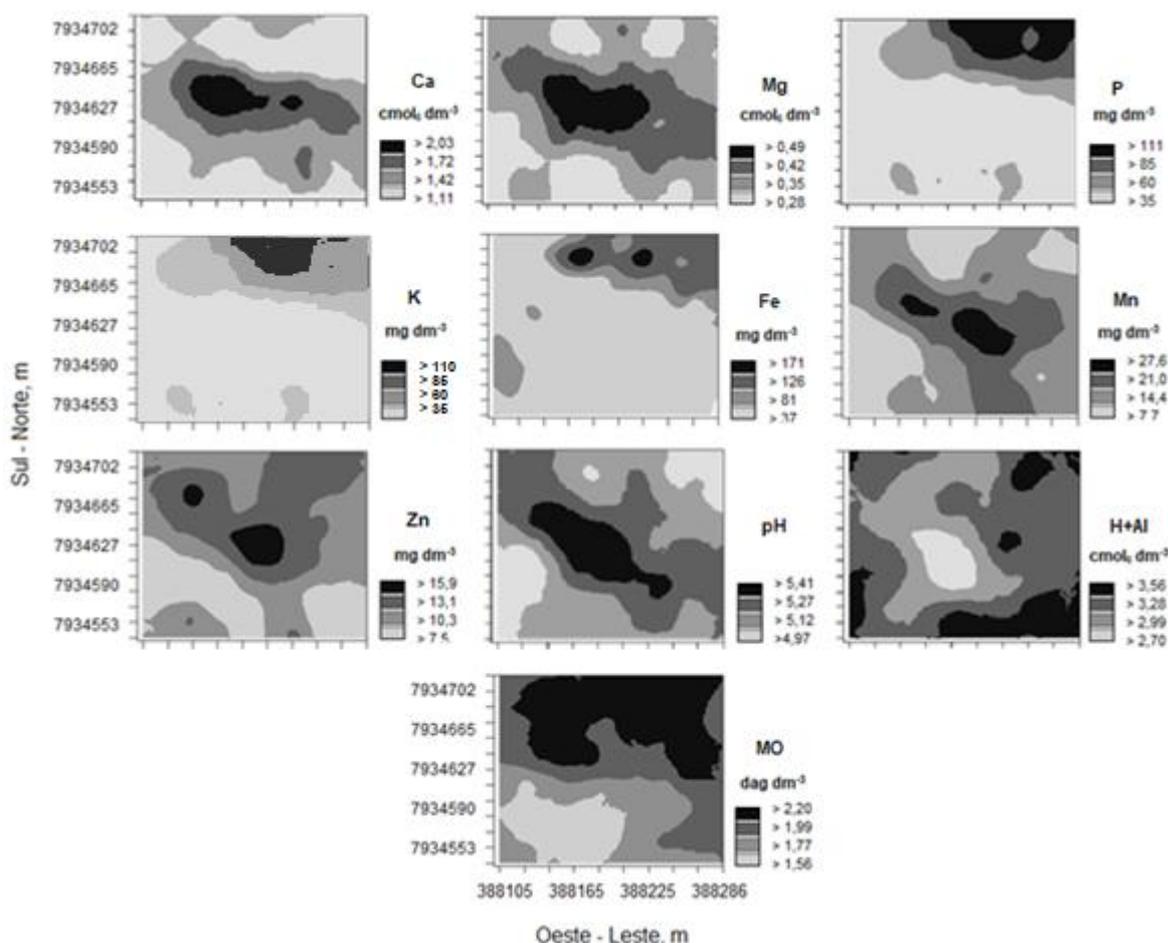


FIGURA 4. Mapas de isolinhas da distribuição espacial das variáveis cálcio (Ca), magnésio (Mg), fósforo (P), potássio (K), ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn), pH em água (pH), acidez potencial (H+Al) e matéria orgânica (MO).

O principal aporte de material orgânico é oriundo de restos vegetais das podas e de produção deixados no solo e da senescência das folhas da planta de macadâmia. Contudo, apesar de deixados nas entrelinhas da lavoura o material orgânico pode ser mobilizado, devido ao escoamento superficial favorecido pelo relevo mais declivoso (Figura 4). A MO coincidiu com os valores mais elevados do micronutriente Fe e do macronutriente P, mostrando a importância da matéria orgânica nesses solos (Figura 4). Costa et al. (2014), em Latossolo Vermelho eutroférico observaram que P disponível esteve mais correlacionado com a matéria

orgânica (MO), demonstrada pela similaridade de áreas com teores mais elevados dessas duas variáveis nos mapas de distribuição espacial.

Conclusões

Todas as variáveis apresentaram dependência espacial, com índice de dependência espacial 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 18 subamostras de solo para a determinação dos valores médios dos atributos químicos 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

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n.6, p. 711-728, 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**, v.42, p.1101-1110, 2007.

AQUINO, R. E. de; MARQUES JÚNIOR, J.; CAMPOS, M. C. C.; OLIVEIRA, I. A. de; SIQUEIRA, D. S. Distribuição espacial de atributos químicos do solo em área de pastagem e floresta. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 44, n. 1, p. 32-41, 2014 .

AZEVEDO, J. R. de; BUENO, C. R. P.; PEREIRA, G. T. Spatial variability of soil properties in an agrarian reform settlement. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 6, p. 1755-1763, 2015.

BARRUETO, A. K.; MERZ, J.; HODEL, E.; ECKERT, S. The suitability of Macadamia and Juglans for cultivation in Nepal: an assessment based on spatial probability modelling using climate scenarios and in situ data. **Regional Environmental Change**, p. 1-13, 2017.

BERNARDI, J. V. E.; NEIRA, M. P.; MANZATTO, A. G.; HOLANDA, I B. B. de; ALMEIDA, R. de; BASTOS, W. R.; DÓREA, J. G.; LANDIM, P. B.; VIEIRA, L. C. G. Aplicação da Análise Geoestatística para Modelagem Espacial do Mercúrio e Matéria Orgânica em Solos Florestais na Amazônia Ocidental. **Journal of Social, Technological and Environmental Science**, v. 4, n.3, p. 31-46, 2015.

CAMARGO, L. A.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; HORVAT, R. A. Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de um Latossolo sob diferentes formas do relevo. II - Correlação espacial entre mineralogia e agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 2279-2288, 2008.

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

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**, v.40, p.211-218, 2009.

CLARK, I. **Practical geostatistics**. London: Applied Science, 1979. 128 p.

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

COSTA, V .L.; MARIA, I. C. de; CAMARGO, O. A.; GREGO, C. R.; MELO, L. C. A. Distribuição espacial de fósforo em Latossolo tratado com lodo de esgoto e adubação mineral. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n.3, p.287–293, 2014.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2 ed. Brasília: Embrapa; 2009. 627p.

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

FARACO, M. A.; URIBE-OPAZO, M. A.; SILVA, E. A. A. da; JOHANN, J. A.; BORSSOI, J. A. Seleção de modelos de variabilidade espacial para elaboração de

mapas temáticos de atributos físicos do solo e produtividade da soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p. 463-476, 2008.

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

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

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

GONTIJO, I. et al. Planejamento amostral da pressão de preconsolidação de um Latossolo Vermelho distroférico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 1245-1254, 2007.

GONTIJO, I.; NICOLE, L. R.; PARTELLI, F. L.; BONOMO, R.; SANTOS, E. O. DE JESUS. Variabilidade e correlação espacial de Micronutrientes e matéria orgânica do solo com a produtividade da pimenta-do-reino. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, n.4, p.1093-1102, 2012.

INCAPER - INSTITUTO CAPIXABA DE PESQUISA, ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL. Consolidação das estatísticas agropecuárias de 2015-2016 e previsão da produção agrícola para 2017. **Boletim da Conjuntura Agropecuária Capixaba**, Vitória/ES – Ano III – Nº 10 – Julho de 2017.

INCAPER - INSTITUTO CAPIXABA DE PESQUISA, ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL. Meteorologia: mapas de chuva acumulado e mensal e anual de 2015. Disponível em: <<https://meteorologia.incaper.es.gov.br/mapas-de-chuva-acumulado-mensal-e-anual-2015>>. Acesso em: 3 mar. 2018.

KÖPPEN,W. **Climatologia. México**, Fundo de Cultura Econômica, 1931.

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**, v.34, n.1, p.127-136, 2010.

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

OLIVEIRA, I. A. de; CAMPOS, M. C. C.; MARQUES JUNIOR, J.; AQUINO, R. E. de; TEIXEIRA, D. de B.; SILVA, D. M. P. da. Use of scaled semivariograms in the planning sample of soil chemical properties in southern amazonas, brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.39, n.1, p.31-39, 2015.

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**, v.28, p.176-186, 2008.

RONQUIM, C. C. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais**. Campinas: Embrapa; 2010. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 8).

ROZANE, D. E.; ROMUALDO, L. M.; CENTURION, J. F.; BARBOSA, J. C. Dimensionamento do número de amostras para avaliação da fertilidade do solo. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 32, n. 1, p. 111-117, 2011.

SANTOS, E. O. de J.; GONTIJO, I.; NICOLE, L.R. Distribuição espacial dos nutrientes em um Latossolo cultivado com pimenta-do-reino. **Enciclopédia Biosfera**, v.7, n.13, p.410-419, 2011.

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

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

SCHNEIDER, L. M.; ROLIM, G. de S.; SOBIERAJSKI, G. da R.; PRELA-PANTANO, A.; PERDONÁ, M. J. Zoneamento agroclimático de noqueira-macadâmia para o Brasil. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 34, p. 515-524, 2012.

SEIDEL, E. J.; OLIVEIRA, M. S. de. Novo índice geoestatístico para a mensuração de dependência espacial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 3, p. 699-705, 2014.

SILVA, F.A.S. Assistat. Versão 7.7 beta (2014). Disponível em <http://www.assistat.com/indexp.html>.

SIQUEIRA, D.S.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T. The use of landforms to predict the variability of soil and orange attributes. **Geoderma**, v.155, p.55-66, 2010.

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**, v.21, n.3, p.367-372, 1997.

VIEIRA, S. R.; HATFIEL, J. L.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, 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.

ZIMBACK, C.R.L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade do solo**. 2001. Tese (Livre-Docência)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

1.3 CORRELAÇÃO ENTRE TEORES DE NUTRIENTES DO SOLO, MORFOMETRIA E PRODUÇÃO DA MACADÂMIA NO NORTE DO ESPÍRITO SANTO

Resumo

A morfometria de uma planta e as suas variáveis são utilizadas para inferir sobre relações interdimensionais, e sua análise é importante para obter informações da sua estabilidade, vitalidade e produtividade. O objetivo do presente estudo foi investigar as correlações dos atributos químicos do solo, da produtividade da macadâmia e as variáveis morfométricas da planta que influenciam no desenvolvimento da macadâmia. O experimento foi conduzido em lavoura de macadâmia, no município de São Mateus - ES, plantada no espaçamento duplo 8,0 x 5,0 m (250 plantas ha⁻¹). Instalou-se uma malha irregular de 144 x 140 m (20.160 m²) com 100 pontos amostrais. Em cada ponto amostral foram coletadas amostras de solo, na profundidade 0,0-0,20m, assim como os dados morfométricos de cada planta: altura, área de copa, área vazia ao redor da planta e volume de copa. Os dados foram submetidos à aplicação da análise de correlação Linear de Pearson e a análises multivariadas. A análise da correlação de Pearson não apresentou significância para as variáveis morfométricas de planta e os nutrientes de solo. O uso da análise de agrupamento possibilitou a formação de quatro grupos de solo e diminuiu a variabilidade dos teores de elementos-traço nos solos pela formação de grupos mais homogêneos, além de evidenciar a relação dos diferentes solos em um mesmo grupo com a pedologia e o material de origem.

Palavras-chave: multivariada, correlação de Pearson, matriz de correlação.

Abstract

The morphometry of a plant and its variables are used to infer interdimensional relationships, and its analysis is important to obtain information about its stability, vitality and productivity. The objective of the present study was to investigate the correlations of soil chemical attributes, of macadmia productivity and plant morphometric variables that influence the development of macadmia. The experiment was conducted in a macadmia plantation, in the municipality of São Mateus - ES, planted in the double spacing 8.0 x 5.0 m (250 plants ha⁻¹). An irregular grid of 144 x 140 m (20,160 m²) was installed with 100 sample points. At each sampling point, soil samples were collected at depth 0.0-0.20m, as well as the morphometric data of each plant: height, crown area, empty area around the plant and crown volume. Data were submitted to the Pearson Linear correlation analysis and multivariate analyzes. The analysis of the Pearson correlation did not present significance for the plant morphometric variables and the soil nutrients. The use of cluster analysis allowed the formation of four soil groups and reduced the variability of trace element contents in the soils by the formation of more homogeneous groups, besides showing the relation of the different soils in the same group with pedology and source material.

Keywords: multivariate analysis, Pearson correlation, correlation matrix.

Introdução

A macadâmia (*Macadamia integrifolia* Maiden e Betche, família das *Proteaceae*), de origem australiana, foi introduzida no Brasil por volta de 1930. A cultura da macadâmia encontra-se em expansão no Brasil, ganhando cada vez mais espaço na cadeia agrícola. Atualmente, é uma das culturas mais rentáveis, e o Brasil apresenta-se entre os países com maior potencial para produção de noqueira-macadâmia, pois possui condições edafoclimáticas favoráveis (PIZA; MORIYA,

2014). Estudos com diferentes variedades e adensamento do plantio mostraram que, uma planta adulta, que produz em média 30 a 40 kg de nozes, aborta um número de frutos superior àqueles produzidos (ALMEIDA NETO, 1991; PERDONÁ et al., 2013). A macadâmia produz uma noz de alto valor econômico no mercado internacional e com grande aceitação entre os consumidores (MARROCOS et al., 2003). A principal região produtora é a Sudeste por apresentar às condições climáticas locais semelhantes às da região de origem da espécie, uma vez que estão em uma mesma faixa de latitude sul (OJIMA et al., 2005; SCHNEIDER et al., 2012; PIZA; MORIYA, 2014).

A crescente demanda de nutrientes por culturas cada vez mais produtivas, principalmente a macadâmia que é pouco estudada, assim como a expansão de lavouras para solos de baixa fertilidade, vem exigindo melhor compreensão da dinâmica dos nutrientes na lavoura, para que sejam evitados problemas de deficiência nutricional, que muito prejudicam a produtividade (SILVA et al., 2010). Além da produtividade, os nutrientes ditam o desenvolvimento e porte da planta, suas características biométricas. A determinação do espaço das culturas e a sua relação com a dimensão das árvores, os nutrientes do solo e a produtividade têm sido objeto de estudo de vários pesquisadores, como o feito por Fey et al (2014) com pinhão-manso. Estudos morfométricos estáticos e dinâmicos em vegetais lenhosos são de fundamental interesse para direcionar e adequar práticas culturais, tais como controle do espaçamento, poda e colheita (FEY et al., 2014). Diversos índices obtidos entre as dimensões da copa buscam descrever a capacidade de crescimento e produção das árvores e do plantio. Em especial as relações entre diâmetro de copa, altura e diâmetro da árvore e, diâmetro e comprimento de copa, são muito importantes nos estudos de competição em plantios florestais (PADOIN; FINGER, 2010).

Diante deste cenário de diversidade e complexidade de relações, é mais adequado a utilização de métodos estatísticos de correlação e multivariados que considerem as amostras e as variáveis em seu conjunto, permitindo extrair informações complementares que a análise univariada não consegue evidenciar (CARVALHO, et al., 2016). As técnicas multivariadas permitem avaliar simultaneamente um conjunto de características levando-se em consideração as correlações entre elas (PAYE et al., 2012). Essas técnicas possibilitam inferências sobre conjuntos de dados no nível de significância conhecido, permitindo assim

ampla faixa de compreensão da distribuição geral dos resultados (JOSÉ et al., 2013). Além disso, a análise multivariada reduz a complexidade do problema em questão, sem causar perda relevante de informação e, ao mesmo tempo, evidencia as relações entre as variáveis constituintes da base de dados.

Desta forma, objetivou-se no presente trabalho investigar as correlações dos atributos químicos do solo, da produtividade da macadâmia e as variáveis que influenciam o desenvolvimento da macadâmia, tais como a altura, área de copa, área vazia ao redor da planta e volume de copa em plantio comercial no município de São Mateus, estado do Espírito Santo.

Material e Métodos

O experimento foi realizado em uma área cultivada com macadâmia (*M. integrifolia* Maiden e Betche) variedade HAES 344, com idade de 20 anos, plantado no espaçamento de 8,0 x 5,0 m (250 plantas ha⁻¹) e em regime de irrigação por microaspersão, localizada no município de São Mateus, Espírito Santo, Brasil, nas coordenadas UTM 24S (388.106,00 E, 7.934.570,38 m S), altitude de 86 m e declividade média de 4%. O solo foi classificado como Latossolo Amarelo distrocoeso (EMBRAPA, 2013) presente na região dos tabuleiros costeiros do norte do Espírito Santo. O clima do município de São Mateus é Aw, segundo classificação de Köppen, caracterizado por clima tropical úmido, com inverno seco e chuvas máximas no verão. A precipitação pluvial anual média de 1.200 mm concentra-se entre os meses de novembro e janeiro (ALVARES et al, 2013). A precipitação pluvial anual média para o ano de 2015 foi de 800 mm, concentrada entre os meses de fevereiro a maio. A temperatura média anual é de 24°C (INCAPER, 2018).

As mudas de macadâmia foram plantadas em consórcio em filas alternadas com *Coffea canephora*, cujo espaçamento era de 4,0 x 2,0 m. Antes do plantio da macadâmia foi aplicado 3.000 kg de calcário dolomítico com PRNT de 85% e na adubação de cova foi utilizado 300 g de superfosfato simples. Durante o primeiro ano foram aplicados: 30 g de ureia planta⁻¹ por 60 dias; no segundo ano: 200 g do formulado NPK 25-05-20 por planta por 60 dias entre os meses de agosto a março. A partir do terceiro até o oitavo ano a macadâmia continuou recebendo a adubação do segundo ano. No nono ano, o café foi retirado e a macadâmia passou a ser adubada anualmente com 150 kg de N, 80 kg de P₂O₅ e 160 kg de K₂O, entre os

meses de setembro a março, com calagem anual de 2.000 kg de calcário dolomítico com PRNT de 85% no mês de maio.

Foi instalada uma malha 144 x 140 m (20.160 m²) com 100 pontos (Figura 1) e com distância mínima de 5 m. Para georreferenciamento da área foi utilizado um par de receptores Spectra Precision®, modelo PROMARK 220 geodésico. As coordenadas obtidas foram corrigidas e os dados processados pela Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) do IBGE apresentaram precisão de 10 mm + 1 ppm.

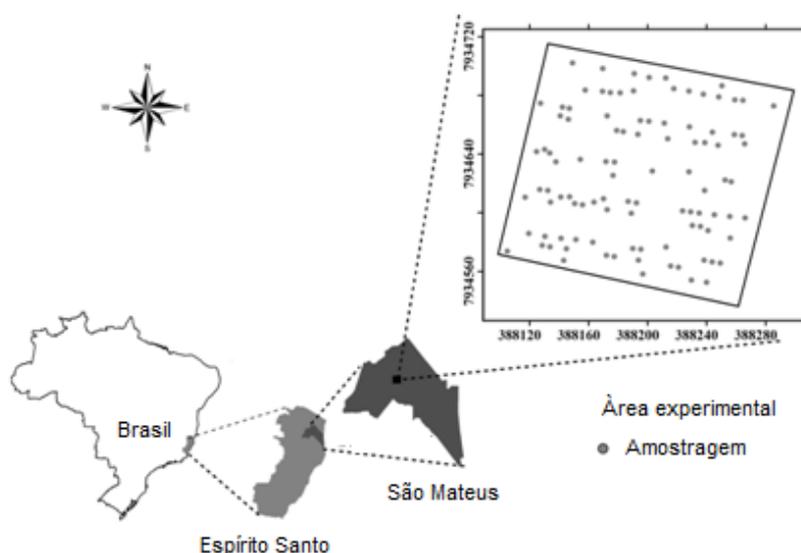


FIGURA 1. Representação da distribuição espacial dos pontos de amostragem.

Em cada ponto amostral foram coletadas quatro subamostras de solo na projeção da copa da macadâmia, utilizando um amostrador de solo tipo "sonda", na profundidade de 0,00-0,20 m, compondo uma amostra composta, para análise química dos elementos e atributos químicos do solo: fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), ferro (Fe), cobre (Cu), zinco (Zn), manganês (Mn), alumínio (Al), sódio (Na), acidez potencial (H+Al), acidez ativa (pH), matéria orgânica (MO), de acordo com Embrapa (2009).

Foram realizadas avaliações morfométricas: de altura de plantas, área de copa, área vazia ao redor da planta e volume de copa. A altura de plantas foi estimada utilizando o Hipsômetro de Christen (SOARES et al., 2009). O volume de copa (V) foi estimado pela medida da altura da planta (H), o diâmetro da copa no

sentido da linha (DI) e no sentido perpendicular à rua (Dr), pela fórmula: $V = (\pi/6) \times H \times DI \times Dr$ (TURREL, 1946).

Um VANT (veículo aéreo não tripulado) controlado remotamente e equipado com uma câmara digital RGB com um sensor de imagem foi usado para tirar fotos aéreas da área de estudo para identificação das plantas georreferenciadas. As imagens obtidas foram processadas pelo programa ArcGis no qual foram realizadas as medições de diâmetro e área de copa da planta, assim como área vazia ao redor da planta.

A colheita da macadâmia foi realizada no período de fevereiro a junho de 2015, colhendo os frutos na projeção da copa da planta, delimitada pela divisão central entre plantas na fileira e entre linhas de plantio. Os frutos foram colhidos manualmente, coletados após caírem ao chão, com total de quatro colheitas que, pesadas e somadas, resultaram na produção de cada planta. Foi realizado o processo de retirada do carpelo e de macadâmias não consideradas viáveis economicamente. Somente foram consideradas as macadâmias em coco e economicamente viáveis para o cálculo de produtividade. Este processo resultou em 35% de descarte. Portanto 65% da produção foi considerada. Após, a produtividade em kg planta^{-1} foi convertida em t ha^{-1} .

Os dados obtidos foram submetidos à análise exploratória dos dados por meio da estatística descritiva, obtendo-se os seguintes parâmetros: média aritmética, mediana, coeficiente de variação e coeficiente de assimetria e de curtose. A análise de distribuição de frequência dos dados foi realizada para verificar sua normalidade, utilizando o teste de Shapiro-Wilk a 5%, utilizando o programa estatístico Assistat versão 7.7 beta (SILVA, 2014).

A correlação linear de Pearson foi empregada para avaliar o grau de relacionamento entre as seguintes variáveis: altura (H), área de copa (AC), área vazia (AV), volume de copa (VC), acidez ativa (pH), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), alumínio (Al), acidez potencial (H+Al), sódio (Na), matéria orgânica (MO), ferro (Fe), cobre (Cu), zinco (Zn) e manganês (Mn). Para realização dessa análise, utilizou-se o software estatístico Action v. 3 (ACTION DEVELOPMENT CORE TEAM, 2017).

Para a definição dos grupos semelhantes das variáveis estudadas, os valores das variáveis foram submetidos 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 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 1, para que cada variável tenha suas escalas normalizadas para o padrão Z ($\mu=0$; $s=1$):

$$Y_{ij} = \frac{X_{ij} - \bar{X}_{ij}}{S_i} \quad (1)$$

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.

Resultados e Discussão

A distribuição de frequência normal, representante típica dos dados da planta, é a ideal para um estudo estatístico (PASSOS et al., 2012). Na Tabela 1, H, AC, pH, H+Al, MO, Zn e produtividade da planta apresentaram distribuição de frequência normal, com média e mediana bem próximas, assim como assimetria e curtose. Embora alguns atributos não apresentassem distribuição normal, optou-se por não transformá-los, considerando que a ausência de distribuição normal não é crítica em análise conjunta com multivariada, quando se trabalha com grande número de amostras ou repetições (FADIGAS et al., 2002).

O coeficiente de variação foi considerado baixo (< 12%) para H e pH, alto para Al (> 62%) e médio (12 < CV < 62%) para os demais atributos do solo, de acordo com o critério de classificação proposto por Warrick e Nielsen (1980). O pH exibiu um coeficiente de variação (CV) baixo, sendo que de acordo com Hurtado et al. (2009), geralmente o pH em água apresenta um baixo CV.

Os valores médios dos atributos químicos do solo foram classificados de acordo com Prezotti et al. (2007) para o Estado do Espírito Santo em: baixos para Mg e Al; médios para pH, K, Ca, H+Al e MO; e altos para P, Fe, Cu, Zn e Mn.

TABELA 1. Estatística descritiva das variáveis altura da planta (H), área de copa (AC), área vazia (AV), volume de copa (VC), acidez ativa (pH), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), alumínio (Al), acidez potencial (H+Al), matéria orgânica (MO), ferro (Fe), cobre (Cu), zinco (Zn), manganês (Mn) e produtividade.

Estatística Descritiva	Média	Mediana	CV (%)	Ass.	Curt.	p-valor
H (m)	8,61	8,65	10,1	-0,13	-0,47	0,566*
AC (m ²)	36,67	36,93	24,99	0,10	-0,32	0,409*
AV (m ²)	63,48	59,42	28,44	1,46	2,56	0
VC (m ³)	179,58	175,89	31,97	0,49	-0,14	0,036
pH	5,26	5,30	4,91	0,10	0,02	0,142*
P (mg dm ⁻³)	72,32	70,05	26,4	0,61	0,36	0,032
K (mg dm ⁻³)	63,96	53,50	47,1	1,16	0,62	0
Ca (cmol _c dm ⁻³)	1,54	1,50	31,8	0,57	0,03	0,009
Mg (cmol _c dm ⁻³)	0,40	0,40	24,30	0,20	0,40	0
Al (cmol _c dm ⁻³)	0,12	0,10	89,67	0,73	0,39	0
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	3,34	3,30	16,76	-0,05	-0,13	0,229*
MO (dag dm ⁻³)	2,03	2,00	16,1	-0,127	0,000	0,405*
Fe (mg dm ⁻³)	80,80	66,35	48,0	1,63	2,19	0
Cu (mg dm ⁻³)	8,48	8,00	31,9	0,68	0,56	0,004
Mn (mg dm ⁻³)	18,07	17,20	47,0	0,737	0,285	0,002
Zn (mg dm ⁻³)	12,24	12,80	35,1	0,264	-0,188	0,359*
Produtividade (t ha ⁻¹)	5,18	5,10	21,1	0,13	0,27	0,914*

CV: Coeficiente de variação (%); Ass.: Coeficiente de assimetria; Curt.: Coeficiente de curtose; *: Distribuição normal pelo teste de Shapiro-Wilk, considerando p <0,05.

Os valores de pH são úteis para classificar a acidez ativa, desde solos muito ácidos (pH < 4,50) a solos fracamente alcalinos (pH entre 7,10- 7,80) (RIBEIRO, et al., 1999). Nos solos que apresentam elevada acidez, ocorre dissolução de alumínio, que passa a ser um componente da acidez total. O alumínio é a principal causa da acidez excessiva dos solos, podendo tornar-se um elemento fitotóxico. Em condições de acidez elevada também pode ocorrer a solubilização de outros metais, como os metais pesados, disponibilizando-os para absorção pelas plantas (MOURA, et al. 2006). Os solos, geralmente contêm menos magnésio que cálcio, porque o magnésio não é adsorvido tão fortemente pela argila e pela matéria orgânica, sendo

sujeito à lixiviação (BRADY; WEIL, 2012). A adição de cálcio em um solo deficiente em magnésio pode causar desequilíbrio nutricional, reduzindo o crescimento das plantas (MOURA et al. 2006).

O crescimento das árvores é distribuído diferencialmente entre biomassa do fuste, dos ramos e folhagem e das raízes, de acordo com a disponibilidade do espaço vital (INOUE et al., 2011).

Em relação a morfometria, o volume de copas apresentou correlação positiva com altura de plantas, área de copa e área vazia (Tabela 2). A avaliação do volume de copa permitiu observar que altura das plantas em campo acompanha o efeito da compensação de crescimento da árvore em relação as áreas vazias, uma vez que foram observadas as árvores mais altas, ou seja, a área vazia permite maior desenvolvimento da copa. O volume de copa apresentou efeito direto sobre a produtividade (SPINELLI et al., 2010). Verifica-se que existe uma tendência positiva da área de copa (AC) com a área vazia ao redor da planta (AV) disponível. De acordo com Inoue et al. (2011), além de fatores de sítio, como solo, disponibilidade de água, nutrientes, radiação, entre outros, e do clima, o espaço vital requerido por uma árvore num talhão é de extrema importância, principalmente na fase do crescimento. Em espaços mais amplos, as copas das árvores são mais desenvolvidas (LELES et al., 2011), devido ao maior espaço disponível para ser utilizado. Portanto, quanto maior o espaço vazio ao redor de uma planta, mais ela tende a se desenvolver. Padoin e Finger et al. (2010) verificaram que árvores com maior altura dominante apresentaram maior diâmetro de copa permitindo afirmar que nos povoamentos mais velhos, as copas são mais largas e necessitam de maior espaço de crescimento.

A área de copa, influenciada pelo diâmetro de copa, indica o espaço necessário para que as plantas possam se desenvolver sem que haja competição entre elas. Diâmetro de copa superior ao espaçamento utilizado pode indicar a necessidade de desbaste de algumas plantas ou podas de parte dos ramos (FEY, et al., 2014). No entanto, o desbaste não é prática comum em áreas de macadâmia, enquanto as pesquisas do efeito da poda sobre a produtividade ainda são limitadas.

A altura constitui-se em uma importante característica da árvore e pode ser determinada ou estimada. Em florestas plantadas, sua determinação ou estimativa é muito importante para o cálculo do volume, de incrementos em altura e, em determinadas situações, pode servir como indicadora da qualidade produtiva de um

local (SILVA et al., 2012). De acordo com a Food and Agriculture Organization of the United Nations - FAO (1981), apesar de o volume representar com maior precisão a qualidade produtiva, a altura dominante é bastante empregada, pela facilidade de determinação e por ser pouco influenciada pelo espaçamento e desbastes realizados.

A produtividade da macadâmia não apresentou correlação com os atributos químicos do solo, indicando que, possivelmente, outras variáveis afetaram a produtividade. Resultados semelhantes foram encontrados por Montezano et al. (2006) entre produtividade do milho e teor de Mg, P e K disponíveis e Sana et al. (2014) entre produtividade do algodoeiro e os atributos químico H+Al.

A MO tem elevada capacidade de reter íons, já que as substâncias húmicas que a compõe apresentam alta CTC, sendo determinantes como carga negativa dos solos em ambientes tropicais intensamente intemperizados (CANELLAS et al., 2008). Este atributo correlacionou-se positivamente com todos os micronutrientes catiônicos (Fe, Cu, Zn e Mn) em estudo (Tabela 2). A presença da matéria orgânica no solo está associada com a disponibilidade, a quantidade e a retenção de alguns micronutrientes no solo como Fe, Cu, Mn e Zn, e à medida que ela se decompõe, ocorre a liberação destes micronutrientes (SILVEIRA et al., 2002). A MO também tem grande afinidade com os metais, em decorrência de ligantes ou grupos que formam quelatos ou complexos organo-metálicos (ROSSET et al., 2016). Hodgson (1963) e Randhawa e Broadbent (1965), sugeriram que os ácidos húmico e fúlvico têm papel importante na adsorção do zinco e do cobre, já que ambos estão presentes na superfície do solo, mas a afinidade maior determinada é entre a MO e o cobre (Cu). Entretanto, o Cu têm sua atividade diminuída após a quelação (BALDOTTO; BALDOTTO, 2014). Tanto o ácido húmico quanto o ácido fúlvico são capazes de adsorver zinco em relação à variação do pH e, então, esse fato reflete uma competição com o H⁺ (RANDHAWA; BROADBENT, 1965; SCHNITZER; SKINNER, 1966). Este resultado evidencia o potencial deste atributo como um indicador da qualidade do solo em áreas agrícolas exercendo papel fundamental no solo, agindo em sua estrutura e no suprimento de macro e micronutrientes (ZANÃO JÚNIOR, et al., 2007).

TABELA 2. Estatística descritiva das variáveis morfométricas, atributos químicos do solo e da produtividade.

Fator	Prod	H	AC	AV	VC	pH	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	MO	Fe	Cu	Zn	Mn
Prod	-	0.41**	0.50**	0.15	0.50**	0.24*	-0.17	-0.16	0.22*	0.14	-0.18	-0.16	0.01	-0.09	0.01	0.20	0.17
H		-	0.35**	0.02	0.55**	-0.03	-0.16	-0.19	0.05	-0.01	-0.10	0.11	-0.13	-0.25*	-0.15	-0.05	0.04
AC			-	0.33**	0.90**	0.03	0.04	-0.12	0.15	0.10	0.02	0.11	-0.12	-0.33**	0.21*	0.12	0.17
AV				-	0.27**	0.01	-0.14	0.15	-0.04	0.09	-0.18	-0.02	0.12	-0.04	0.12	0.18	0.11
VC					-	-0.06	0.05	-0.12	0.09	0.01	0.02	0.11	-0.16	-0.28**	0.09	0.02	0.07
pH						-	-0.26*	-0.07	0.54**	0.77**	-0.47**	-0.57**	0.22*	-0.21*	0.12	0.53**	0.66**
P							-	-0.07	-0.18	-0.36**	0.43**	0.35**	0.00	0.02	0.14	-0.27**	-0.15
K								-	-0.27**	-0.04	-0.15	-0.09	0.29**	0.51**	0.16	0.20*	-0.07
Ca									-	0.77**	-0.44**	-0.22*	0.19	-0.38**	0.05	0.35**	0.47**
Mg										-	-0.51**	-0.42**	0.26**	-0.31**	0.11	0.48**	0.56**
Al											-	0.31**	-0.40**	-0.06	-0.08	-0.39**	-0.34**
H+Al												-	-0.06	-0.12	0.00	-0.22*	-0.22*
MO													-	0.40**	0.29**	0.36**	0.22*
Fe														-	0.09	0.01	-0.20*
Cu															-	0.29**	0.21*
Zn																-	0.64**
Mn																	-

Prod: produtividade; H: altura; AC: área de copa; AV: área vazia; VC: volume de copa; * significativo a 5% de probabilidade; ** significativo a 1% de probabilidade.

Existe uma elevada ciclagem de nutrientes que são estreitamente dependentes das transformações da matéria orgânica do solo, como o K, que permanece na forma iônica livre nas células, sendo liberado logo que os materiais orgânicos frescos chegam ao solo, e os sais de Ca e de Mg do ácido fítico são conhecidos por fitina, sendo importantes na ciclagem de nutrientes nos ecossistemas (BALDOTTO et al., 2010). Dados que explicam correlação positiva da MO com Mg e K.

Os atributos de acidez do solo Al e H+Al tiveram correlações negativas com os macroelementos Ca e Mg, o que era de se esperar, já que estes nutrientes são mais disponíveis em solos com menor disponibilidade daqueles. Resultados de pesquisas têm demonstrado que Al^{3+} no meio de crescimento influencia a absorção de elementos essenciais, como P, Ca e Mg (MATTIELLO et al. 2008). Em solos de pH levemente ácido ou neutro, o Al está, essencialmente, na forma de óxidos ou aluminos-silicatos. Apenas P teve correlação positiva. Em pH elevado, o P precipita com Ca, mas não é o caso deste solo com pH médio de 5,3 (Tabela 1), por isso o P tem correlação positiva com os atributos de acidez. Estudos sugerem que uma parcela importante da CTC, seja atribuída ao Al e ao H, além do Al^{3+} trocável, todos considerados cátions abundantes em condições de solos lixiviados e responsáveis pela acidez (BALDOTTO; BALDOTTO, 2014). Isso se explica pela presença de MO, já que a matéria orgânica do solo apresenta vários grupos funcionais, especialmente os grupos carboxílicos e fenólicos, que podem liberar o H que irá compor os íons envolvidos na capacidade de troca de cátions do solo (RANGEL; SILVA, 2007).

O pH teve correlação linear negativa com P, Al, H+Al, Na e Fe; e correlação linear positiva com Ca, Mg, MO, Zn e Mn. Resultado semelhante também foi encontrado por Paye et al (2012) entre o atributo pH e os elementos Mn e Zn para amostras de solo do estado do Espírito Santo. Não houve correlação entre pH e morfometria das plantas. Lima et al. (2010) afirma que existe similaridade com o pH do solo e dados da planta, já que este atributo é relevante para o crescimento das plantas, pois está diretamente relacionado à disponibilidade de nutrientes e é um potencial indicador da qualidade do solo.

A Figura 2 é um dendrograma elaborado para verificar a associação entre as variáveis, sendo uma alternativa que apresenta resultados que podem ser associados a matriz de correlações. As variáveis foram agrupadas com base no seu

grau de semelhança, visando classificá-las em grupos mais ou menos homogêneos. Estabeleceram-se as delimitações com base na análise visual do dendrograma, na qual foram avaliados os pontos de alta mudança de nível.

Com isso, foi admitido um corte na distância euclidiana de 20, favorecendo uma divisão de grupos, indicando que, com o uso conjunto dos atributos químicos e morfométricos é possível ordenar os dados em dois grupos; grupo 1 (G1): Prod, pH, Mg, Al, H+Al, Ca, MO, Mn, Zn e Cu; e grupo 2 (G2): VC, H, AC, AV, K, P e Fe. Semelhanças são observadas entre os estudos feitos com correlação de Pearson (Tabela 3) e a análise multivariada (Figura 2).

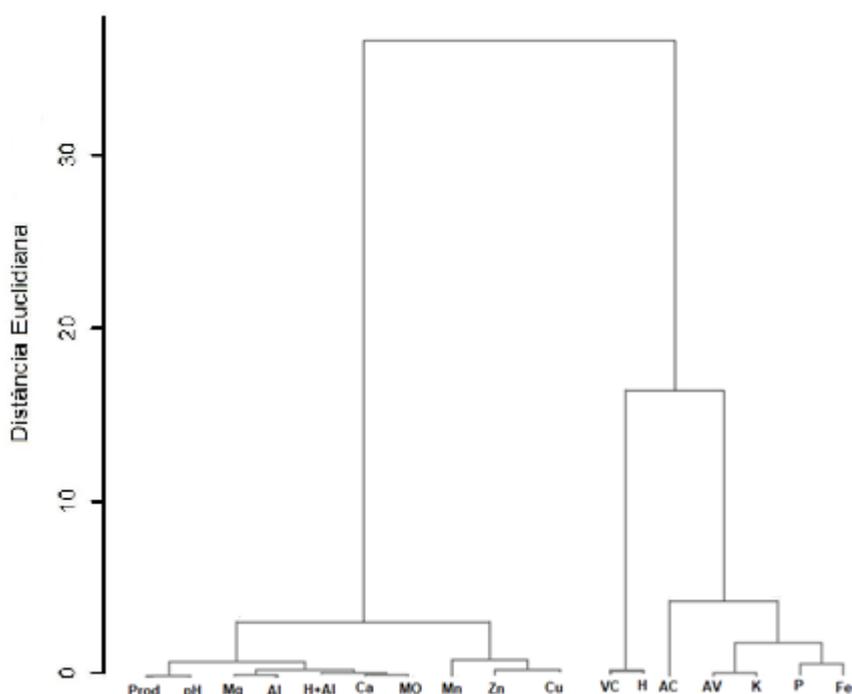


FIGURA 2. Dendrograma ilustrativo resultante da análise de agrupamento das variáveis morfométricas da planta, atributos químicos do solo e da produtividade da macadâmia. Método de ligação de Ward e distância Euclidiana.

Observa-se claramente a divisão dos grupos entre nutrientes e as variáveis morfométricas. Na matriz de correlações, o Fe apresentou-se significativo para as variáveis VC, H e AC, o que pode justificar que tenha ficado no mesmo grupo (G2) que as características morfométricas. O mesmo ocorre para produtividade, pH e Ca, mas não ocorre entre produtividade e as características morfométricas, já que na matriz de correlações, ocorreu significância entre algumas estas. Conforme

esperado, os microcatiônicos Cu, Mn e Zn agruparam-se juntamente com a MO, demonstrando a importância desse atributo na disponibilização destes micronutrientes. Trabalhos semelhante envolvendo variáveis de solo e características de planta foram feitos por Lovera et. al. (2104) na cultura da pupunha e Teodoro (2016) em plantio florestal de Canafístula.

Conclusões

Não houve significância entre as variáveis morfométricas de planta e os atributos químicos do solo pela correlação linear de Pearson.

A integração entre a análise de agrupamento hierárquico com a correlação linear de Pearson da morfometria das plantas, dos atributos do solo e da produtividade foi eficaz na determinação de grupos semelhantes e distintos entre si em uma lavoura de macadâmia.

Referências

ACTION DEVELOPMENT CORE TEAM. Action 3: ESTATCAMP. São Carlos, 2017.

ALMEIDA NETO, J. de T. P. A colheita e o beneficiamento da macadâmia. In: SÃO JOSÉ, A. R. (Org.). **Macadâmia: tecnologia de produção e comercialização**. Vitória da Conquista: DFZ/UESB, 1991. p. 131-147.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n.6, p. 711-728, 2013.

BALDOTTO, M. A.; CANELA, M.C.; CANELLAS, L.P.; DOBBSS, L. B.; VELLOSO, A. C. X. Redox index of soil carbon stability. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1543-1551, 2010.

BALDOTTO, M. A.; BALDOTTO, L. E. B. Ácidos húmicos. **Revista Ceres**, v. 61, Suplemento, p. 856-881, 2014.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da Natureza e Propriedades dos Solos**. 3 ed. Porto Alegre: Bookman, 2012. 716p.

CANELLAS, L. P.; MENDONÇA, E. S.; DOBBS, L. B.; BALDOTTO, M. A.; VELLOSO, A. C. X.; SANTOS, G. A.; AMARAL SOBRINHO, N. M. B. Reações da Matéria Orgânica do Solo. In: Santos, G. A.; Silva, L. S. da; Canellas, L. P.; Camargo, F. A. O. (Eds.). **Fundamentos da Matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2 ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. 45-64p.

CARVALHO, S. R. L. de; VILAS-BOAS, G. da S.; FADIGAS, F. S. Estimativa da concentração de metais pesados em solos dos tabuleiros do recôncavo da Bahia. **Cadernos de Geociências**, v. 7, n. 1, 2010.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2 ed. Brasília: Embrapa; 2009. 627p.

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

FADIGAS, F. de S.; AMARAL-SOBRINHO, N. M. B do; MAZUR, N.; ANJOS, L. H. C dos; FREIXO, A. A. Concentrações naturais de metais pesados em algumas classes de solos brasileiros. **Bragantia**, v. 61, n. 2, 151-159, 2002.

FEY, R.; MALAVASI, U. C.; MALAVASI, M. M.; SCHULZ, D. G.; DRANSKI, J. A. L. Relações interdimensionais e produtividade de pinhão-mansô (*Jatropha curcas* L.) em sistema silvipastoril. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 35, n. 2, p. 613-624, 2014.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **El eucalipto em la repoblación forestal**. Roma, 1981. 723 p.

HODGSON, J. F. Chemistry of the micronutrient elements in soils. **Advances in Agronomy**, v. 15, p. 119-59, 1963.

HURTADO, S. M. C.; SILVA, C. A.; RESENDE, Á. V.; PINHO, R. G. V.; INÁCIO, E. S. B.; HIGASHIKAWA, F. S. Spatial variability of soil acidity attributes and the spatialization of liming requirement for corn. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 33, n. 811 p.1351-1359, 2009.

INCAPER - INSTITUTO CAPIXABA DE PESQUISA, ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL. Meteorologia: mapas de chuva acumulado e mensal e anual de 2015. Disponível em: <<https://meteorologia.incaper.es.gov.br/mapas-de-chuva-acumulado-mensal-e-anual-2015>>. Acesso em: 3 mar. 2018.

INOUE, M. T.; FIGUEIREDO FILHO, A.; LIMA, R. Influência do espaço vital de crescimento na altura e diâmetro de *Pinus taeda* L. **Scientia Forestalis**, v. 39, n. 91, p. 377-385, 2011.

JOSÉ, J. V.; REZENDE, R.; FREITAS, P. S. L. de; HONGYU, K.; PERBONI, A.; MARQUES, P. A. A.; DIAS, C. T. dos S.; COELHO, R. D. Análise multivariada e geoestatística de variáveis físico-hídricas de diferentes solos. **Water Resources and Irrigation Management**, v. 2, n. 3, p. 121-129, 2013.

KÖPPEN, W. **Climatologia. México**, Fundo de Cultura Econômica, 1931.

LELES, P. S. S.; ABAURRE, G. W.; ALONSO, J. M.; NASCIMENTO, D. F. do; LISBOA, A. C. Crescimento de espécies arbóreas sob diferentes espaçamentos em plantio de recomposição florestal. **Scientia Forestalis**, v. 39, n. 90, p. 231-239, 2011.

LIMA, C. G. da R.; CARVALHO, M. de P. de; NARIMATSU, K. C. P.; SILVA, M. G. da; QUEIROZ, H. A. de. Atributos físico-químicos de um Latossolo do cerrado brasileiro e sua relação com características dendrométricas do eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 163-173, 2010.

LOVERA, L. H.; LIMA, E. S.; MONTANARI, R.; TOMAZ, P. K.; ROSA, P. A. L. Atributos químicos de um cambissolo por meio de análise multivariada na cultura da pupunha. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 1, n. 2, p. 8-16, 2014.

MACHADO, S. do A.; FIGUEIREDO FILHO, A. **Dendrometria**. Curitiba: UFPR, 2003. 309 p.

MARROCOS, P. C. L.; MARTINEZ, H. E. P.; VENEGAS, V. H. A.; BRUCKNER, C. H.; CANTARUTTI, R. B. Interação P x Fe em mudas de macadâmia. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 25, p. 323-325, 2003.

MATTIELLO, E. M.; PEREIRA, M. G.; ZONTA, E.; MAURI, J.; MATIELLO, J. D.; MEIRELES, P. G.; SILVA, I. R. da. Produção de matéria seca, crescimento radicular e absorção de cálcio, fósforo e alumínio por *Coffea canephora* e *Coffea arabica* sob influência da atividade do alumínio em solução. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 1, p. 425-434, 2008.

MOURA, M. C. S de; LOPES, A. N. C.; MOITE, G. C.; MOITA NETO, J. M. Estudo multivariado de solos urbanos da cidade de teresina. **Química Nova**, v. 29, n. 3, p. 429-435, 2006.

OJIMA, M.; DALL'ORTO, F. A. C.; BARBOSA, W.; RIGITANO, O. **Macadâmia integrifolia** Maid. e Bet. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, Seção de Fruticultura de Clima Temperado, 2005, p.1-2 (Boletim, 2000).

PADOIN, V; FINGER, C. A. G.. Relações entre as dimensões da copa e a altura das árvores dominantes em povoamentos de *Pinus taeda* L. **Ciência Florestal**, v. 20, n. 1, p. 95-105, 2010.

PASSOS, M. de; de 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**, v. 42, n. 10, p. 1797-1903, 2012.

PAYE, H. de S.; MELLO, J. W. V. de; MELO, S. B. de. Métodos de análise multivariada no estabelecimento de valores de referência de qualidade para elementos-traço em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 3, p. 1031-1041, 2012.

PERDONÁ, M. J.; MARTINS, A. M.; SUGUINO, E.; SORATTO, R. P. Nutrição e produtividade da noqueira macadâmia em função de doses de nitrogênio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.48, n.4, p.395-402, 2013.

PIZA, P. L. B. DE T.; MORIYA, L. M. Cultivo da macadâmia no brasil. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 36, n. 1, p. 039-045, 2014.

PREZOTTI, L.C.; GOMES, J.A.; DADALTO, G.G.; OLIVEIRA, J.A. **Manual de recomendação de Calagem e adubação para o Estado do Espírito Santo - 5ª aproximação**. Vitória: SEEA/INCAPER/CEDAGRO; 2007. 305p.

PRODAN, M.; PETERS, R.; COX, F.; REAL, P. **Mensura Forestal**. San José: IICA/BMZ/GTZ, 1997. 561 p.

RANDHAWA, N.S.; BROADBENT, F.E. Soil organic matter-metal complexes: 5. Reactions of zinc with model compounds and humic acid. **Soil Science**, v. 99, p. 295-300,1965.

RANGEL, O. J. P.; SILVA, C. A. Estoques de carbono e nitrogênio e frações orgânicas de Latossolo submetido a diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 80, p. 1609-1623, 2007.

ROSSET, E.; COLELLA, J. C.; NASCIMENTO JUNIOR, J. R. A. do; VIEIRA, S. A. Efeitos de fertilizante organomineral na produção de tomate (*Lycopersicon esculentum*). **Revista UNINGÁ Review**, v. 25, n. 2, p. 12-17, 2016.

SCHNEIDER, L. M.; ROLIM, G. S.; SOBIERAJSKI, G. R.; PRELA-PANTANO, A.; PERDONÁ, M. J. Zoneamento agroclimático de noqueira-macadâmia para o Brasil. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.34, n.2, p.515-524, 2012.

SCHNITZER, M.; SKINNER, S. I. M. Organo metallic interactions in soils: 5. Stability constants of Cu^{++} , Fe^{++} , and Zn^{++} fulvic acid complexes. **Soil Science**, v. 102, p. 361-5,1966.

SILVA, F.A.S. Assistat. Versão 7.7 beta (2014). Disponível em <http://www.assistat.com/indexp.html>.

SILVA, G. F. da; OLIVEIRA, O. M. de; SOUZA, C. A. M. de; SOARES, C. P. B.; LEMOS, R. Influência de diferentes fontes de erro sobre as medições de alturas de árvores. **Cerne**, v. 18, n. 3, p. 397-405, 2012.

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.

SILVA, S. de A.; LIMA, J. S. de S.; SOUZA, G. S. de. Estudo da fertilidade de um Latossolo Vermelho-Amarelo húmico sob cultivo de café arábica por meio de geoestatística. **Revista Ceres**, v. 57, n. 4, p. 560-567, 2010.

SILVEIRA, P. M. da; CUNHA, A. A. da. Variabilidade de micronutrientes, matéria orgânica e argila de um Latossolo submetido a sistemas de preparo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 9, p. 1325-1332, 2002.

SOARES, C. P. B.; NETO, F. P.; SOUZA, A. L. **Dendrometria e Inventário Florestal**. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa – MG: Ed. UFV, 2009. 276 p.

TURRELL, F. M. **Tables of surfaces and volumes of spheres and of prolate and oblate spheroids and spheroidal coefficients**. Berkeley: University of California, 1946. 153p.

SPINELL, V. M.; ROCHA, R. B.; RAMALHO, A. R.; MARCOLAN, A. L.; VIEIRA JÚNIOR, J. R.; FERNANDES, C. de F.; MILITÃO, J. S. L. T.; DIAS, L. A. dos S. Componentes primários e secundários do rendimento de óleo de pinhão-mansão. **Ciência Rural**, v.40, n.8, p.1752-1758, 2010.

TEODORO, J. V. **Avaliações multivariada, geoestatística e de medidas repetidas de um experimento sob delineamento sistemático tipo “leque”**. 2016. 110 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2016.

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

ZANÃO JÚNIOR, L. A.; LANA, R. M. Q.; GUIMARÃES, E. C. Variabilidade espacial do pH, teores de matéria orgânica e micronutrientes em profundidades de amostragem num Latossolo Vermelho sob semeadura direta. **Ciência Rural**, v. 37, n. 4, p. 1000-1007, 2007.