

MAPEAMENTO DA FERTILIDADE DO SOLO PARA LAVOURAS CAFEIRAS EM DIFERENTES DENSIDADES AMOSTRAIS

Vanessa Castro Figueiredo¹; Fabio Moreira da Silva²; Gabriel Araújo e Silva Ferraz³; Marcelo Silva de Oliveira⁴; Margarete Lorderlo Volpato⁵

¹ Pesquisadora, DSc, Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais/EPAMIG, Três Pontas-MG, vcfigueiredo@epamig.br

² Professor, DSc, Universidade Federal de Lavras/UFLA, Departamento de Engenharia/DEG, Lavras-MG, famsilva@ufla.br

³ Professor, DSc, Universidade Federal de Lavras/UFLA, Departamento de Engenharia/DEG, Lavras-MG, gabriel.ferraz@deg.ufla.br

⁴ Professor, DSc, Universidade Federal de Lavras/UFLA, Departamento de Estatística/DEX, Lavras-MG, marcelo.oliveira@dex.ufla.br

⁵ Pesquisadora, DSc, Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais/EPAMIG, Lavras-MG, margarete@epamig.ufla.br

RESUMO: A agricultura de precisão baseia num conjunto de técnicas que explora a variabilidade espacial dos atributos de uma área. O objetivo deste trabalho foi mapear a fertilidade do solo da lavoura cafeeira em diferentes malhas amostrais, e definir a que melhor caracterize a variabilidade espacial para os atributos testados. O experimento foi desenvolvido no ano de 2014 na fazenda Três Pontas, Presidente Olegário/MG, em um pivô de 112 ha, lavoura cafeeira (*Coffea arabica* L.) cultivar Catuaí vermelho IAC 144. Demarcaram-se nas áreas 224 pontos georreferenciados (2,0 pontos/ha), os atributos químicos do solo testados foram: Fósforo (P) e Potássio (K). Para aplicação da metodologia foi desenvolvido e testado o índice de exatidão padronizado (IEP), índice de precisão padronizado (IPP) e o indicador de malha ótima padronizado (IMOP). A partir da malha 1 (2 pontos/ha) foi adotada a Malha 2 (1,0 ponto/ha). Os mapas, para cada atributo, permitiram visualizar a distribuição espacial na área, com mais detalhamento para as malhas com maior número de pontos amostrados, fato que não ocorre quando se utiliza somente análise da estatística clássica.

PALAVRA-CHAVE: cafeicultura de precisão, café, mapas, *grids*.

SOIL FERTILITY MAPPING FOR COFFEE CROPS IN DIFFERENT SAMPLE DENSITIES

ABSTRACT: Precision agriculture is based on a set of techniques that exploits the spatial variability of the attributes of an area. The objective of this work was to map the soil fertility of the coffee crop in different sample meshes, and to define the one that best characterizes the spatial variability for each tested attribute. The experiment was carried out in 2014 in Três Pontas farm, Presidente Olegário / MG, in a 112 ha pivot, coffee plantation (*Coffea arabica* L.) cultivar red Catuai IAC 144. In the areas 224 georeferenced points (2.0 points/ha), the chemical attributes of the soil tested were: Phosphorus (P), Potassium (K). To apply the methodology, the standardized accuracy index (IEP), the standardized precision index (IPP) and the standardized optimal mesh indicator (IMOP) were developed and tested. From mesh 1 (2 points/ha) was adopted the mesh 2 (1 points/ha). The maps, for each attribute, allowed visualizing the spatial distribution in the area, with more detail for the meshes with higher number of sampled points, a fact that does not occur when using only classical statistical analysis.

KEY WORDS: precision coffee, coffee, maps, *grids*.

INTRODUÇÃO

A cafeicultura, atividade de grande importância econômica e social para o país, é um segmento do agronegócio que expande cada dia mais. Ela é uma atividade cara, de alto custo de implantação, com retornos que acontecem a partir do terceiro ano de plantio. No país, há variações nos modelos de produção, que vão desde as lavouras tradicionais até as propriedades mais tecnificadas, que trabalham com técnicas de alto nível, dispoem de ferramentas da administração e da informática para estarem ligadas ao mercado (EPAMIG, 2008).

A cultura do café, apesar de sua importância econômica e social, carece de informações complementares para o seu sistema produtivo, principalmente em relação à sua extensão, distribuição espacial e o ambiente em que é cultivada. A variabilidade espacial é uma característica presente nas áreas, e o conhecimento e detalhamento da mesma são de grande importância e devem ser incorporados no planejamento do manejo das culturas, tratando o solo de maneira diferenciada em cada porção do terreno, aplicando realmente o que é necessário, na época correta e nas quantidades exigidas (MATIELLO et al., 2015).

Com o conhecimento das faixas de variação presente na área, através da coleta de dados georreferenciados é possível a confecção de mapas, para cada atributo do solo. Fato que não ocorre quando se utiliza somente a análise da estatística clássica. O mapa de fertilidade do solo trás uma informação para se visualizar a variabilidade espacial das lavouras.

Atualmente, a amostragem de solo em grades georreferenciadas, o mapeamento das propriedades e a aplicação de corretivos e fertilizantes em taxas variáveis são as tecnologias da Agricultura de Precisão mais utilizadas pelos produtores (BERNARDI; INAMASU, 2014).

Esses mapas são a informação mais completa para visualizar a variabilidade espacial das lavouras em relação aos fatores de produção.

Um fator importante no mapeamento de cafezais é o tamanho da malha a ser utilizada na amostragem (Figueiredo et al., 2018). Segundo Ferraz et al. (2017), a utilização de uma malha com tamanho insatisfatório pode gerar mapas que não refletem a realidade do campo e, assim, geram erros nas recomendações técnicas, o que poderia resultar em perdas aos seus usuários. De acordo com Nanni et al. (2011), a malha de amostragem utilizada nas mais diversas culturas são em torno de um ponto a cada dois a três hectares e, em algumas culturas, até um ponto é usado a cada quatro hectares.

Diante disso, o objetivo desse trabalho foi mapear a fertilidade do solo de uma lavoura cafeeira utilizando duas malhas amostrais, e definir a que melhor caracterize a variabilidade espacial para os atributos testados.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi desenvolvido na fazenda Três Pontas, no município de Presidente Olegário/MG, no ano de 2014, em um pivô de 112 ha, lavoura cafeeira irrigada (*Coffea arabica* L.) da cultivar Catuaí vermelho IAC 144, plantadas em dezembro/2005, no espaçamento de 4,0 m entre linhas e 0,5 m entre plantas, totalizando 5.000 plantas/ha.

Demarcaram-se na área em estudo, com a utilização de um equipamento receptor de sinal GNSS; 224 pontos amostrais georreferenciados, obtendo a chamada Malha 1 (2,0 pontos/ha) e a partir da Malha 1 foi criada a Malha 2; com 1,0 ponto/ha (Figura 1).

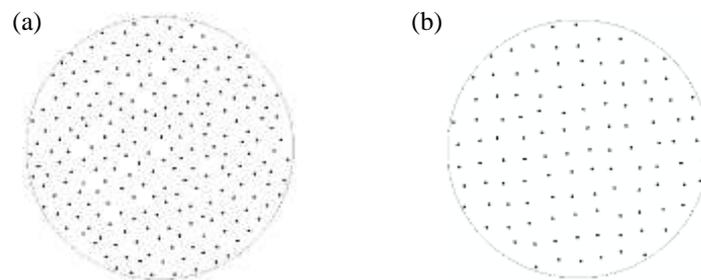


Figura 1. Malhas amostrais testadas para área de 112 ha, sendo (a) 2,0 pontos/ha; (b) 1,0 ponto/ha.

Em cada ponto georreferenciado na área foi feito a coleta dos dados de fertilidade de solo. Cada ponto amostral correspondeu a quatro plantas, sendo a coleta realizada em Julho/2014 com uso de um quadriciclo, por meio da retirada de subamostras na projeção da copa do cafeeiro na profundidade de 0 a 20 cm.

Para analisar a dependência espacial dos atributos em estudo foram utilizados semivariogramas, em que sua semivariância é classicamente estimada pela equação 1:

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

em que, $N(h)$ é o número de pares experimentais de observações $Z(x_i)$ e $Z(x_i + h)$ separados por uma distância h . O semivariograma é representado pelo gráfico $\hat{\gamma}(h)$ versus h . Do ajuste de um modelo matemático aos valores calculados de $\hat{\gamma}(h)$, são estimados os coeficientes do modelo teórico para o semivariograma denominado de efeito pepita (C_0); patamar ($C_0 + C_1$); e o alcance (a), conforme descrito por Bachmaier e Backers (2011).

Foi utilizado o método dos mínimos quadrados ponderados e os modelos esférico, exponencial e gaussiano, conforme o que melhor se ajustava para cada atributo e para as malhas testadas. Com os semivariogramas devidamente modelados, foi realizada a krigagem ordinária e os procedimentos de validação de krigagem para aferir a qualidade da interpolação. O software utilizado para as análises geoestatísticas e geração dos mapas foi o ArcGIS 10. O Índice geoestatístico, proposto por Seidel e Oliveira (2014) foi utilizado para mensurar a dependência espacial. Onde a dependência espacial é fraca, quando a razão foi inferior a 12,5%; moderada, entre 12,5% e 25% e dependência espacial forte, quando a razão foi superior a 25%. Esse índice pode ser utilizado para os modelos de semivariograma esférico, exponencial e gaussiano, e é expresso pela equação 2:

$$IDE_{Modelo(\%)} = FM \cdot \left(\frac{C_1}{C_0 + C_1} \right) \cdot \left(\frac{a}{q \cdot MD} \right) \cdot 100 \quad (2)$$

Em que FM é o fator do modelo; C_0 , o efeito pepita; C_1 , a contribuição; a , o alcance prático; e $q \cdot MD$, o valor que corresponde à fração (q) atingida da máxima distância (MD) entre pontos amostrados. Caso a relação $(a/q \cdot MD)$ resulte

em valor maior que 1, essa razão é, então, fixada em 1, para que assuma apenas valores entre zero e 1. Além disso, quanto maior o valor de FM, maior é a força da dependência espacial do modelo.

Uma das maneiras de se avaliar a qualidade da estimação e ajuste dos semivariogramas e, também, de outras características da pesquisa, tais como a malha amostral, é por meio da validação. Por meio da validação é possível retirar alguns valores que são úteis para a observação dos erros apresentados por cada malha, tais como a Média do Erro Padronizado (M_{EP}) (equação três), que deve apresentar o valor mais próximo de zero, e o Desvio Padrão do Erro Padronizado (DP_{EP}) (equação quatro), que deve ser o menor possível.

$$M_{(EP)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{[\hat{Z}(x_i) - Z(x_i)]}{\sigma_{k(x_i)}} \quad (3)$$

$$DP_{(EP)} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{[\hat{Z}(x_i) - Z(x_i)]^2}{\sigma_{k(x_i)}^2}} \quad (4)$$

Em que n é o número de dados; $\hat{Z}(x_i)$ é valor predito ou estimado por krigagem ordinária no ponto x_i , sem considerar a observação $Z(x_i)$; $Z(x_i)$ é o valor observado no ponto x_i ; e $\sigma_{k(x_i)}$ é o desvio padrão.

Por meio destes valores foi desenvolvida e testada uma metodologia que abrange como principal característica a utilização dos erros padronizados, o qual pode ser aplicada em várias circunstâncias, como por exemplo na comparação entre malhas de culturas diferentes, grande diferencial em relação à outras metodologias já anteriormente desenvolvidas (FIGUEIREDO et al., 2018).

Com a interpolação dos dados foi obtido os valores da Média do Erro Padronizado (M_{EP}) e do Desvio Padrão do Erro Padronizado (DP_{EP}), a partir desses dados foi desenvolvido e testado por este trabalho o Índice de Exatidão Padronizado (IEP) e o Índice de Precisão Padronizado (IPP), que representam a melhor malha amostral para áreas de até 100 ha (Figueiredo et al., 2018). Para teste destes índices e mapeamento das áreas em estudo foram utilizados os atributos do solo, Fósforo (P) e Potássio (K) amostrados no ano de 2014.

O valor da Média do Erro Padronizado (M_{EP}), obtido por validação, reflete a exatidão que a malha amostral irá apresentar. Para determinar um componente de exatidão que possibilitasse a comparação entre as malhas foi proposto e desenvolvido o conceito do Índice de Exatidão Padronizado (IEP) (equação 5).

$$IEP = 1 - \frac{|M_{EP}|}{mM_{EP}} \quad (5)$$

Em que M_{EP} é o valor da Média do Erro Padronizado, em módulo, da malha que se deseja comparar e mM_{EP} é o maior valor da Média do Erro Padronizado, em módulo, dentre todas as malhas analisadas.

Já o valor do Desvio Padrão do Erro Padronizado (DP_{EP}), obtido por validação, reflete a precisão da malha. Também com o intuito de se comparar a componente de precisão da malha entre as diferentes malhas estudadas, foi desenvolvido e proposto o Índice de Precisão Padronizado (IPP) (equação 6).

$$IPP = 1 - \frac{DP_{EP}}{mDP_{EP}} \quad (6)$$

Em que DP_{EP} é o valor do Desvio Padrão do Erro Padronizado da malha que se deseja estudar e mDP_{EP} é o maior valor do Desvio Padrão Erro Padronizado apresentado pelo grupo de malhas analisadas. Os valores do IEP e IPP variam de zero a um e quanto mais próximo de um mais exata/precisa é a malha amostral e quanto mais próximo de zero mais inexata/imprecisa a malha amostral.

Para a escolha da melhor malha dentre as malhas em estudo, foi desenvolvido e testado o Indicador de Malha Ótima Padronizado (IMOP) que leva em consideração a ponderação entre o índice de exatidão e precisão padronizado (equação 7).

$$IMOP = (0,5 \times IEP) + (0,5 \times IPP) \quad (7)$$

O IMOP varia de zero a um e quanto mais próximo de um (ou 100%) melhor a malha (mais exata e mais precisa) e quanto mais próximo de zero (0%) pior (mais inexata e mais imprecisa) a malha será (FIGUEIREDO et al., 2018).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foi possível identificar a existência de dependência espacial dos atributos em estudo, por meio do ajuste de um modelo matemático aos semivariogramas dos atributos químicos do solo. Logo, foram gerados os mapas de distribuição espacial pelo método da krigagem ordinária utilizando o programa Arc Gis. Por meio dos mapas foi possível observar a distribuição espacial das variáveis, em função das malhas amostrais.

Os mapas desempenham papel fundamental no processo de tomada de decisão, quando se está trabalhando com agricultura de precisão. É a informação mais completa para se visualizar a variabilidade espacial das lavouras. Dessa forma, a utilização das tecnologias, como a geoestatística, permite amparar decisões estratégicas e complexas em relação ao sistema de manejo adotado, seus efeitos ambientais e na produtividade das diferentes culturas. Essa é a contribuição da geoestatística para o desenvolvimento de uma produção agrícola sustentável em agricultura de precisão (GREGO; OLIVEIRA; VIEIRA, 2014).

O comportamento observado nos mapas (Figuras 2 e 3) de atributos da fertilidade do solo é que classes que ocupam porções menores do terreno são envolvidas por classes mais abundantes e deixam de existir, perdendo sua representatividade à medida que a densidade amostral diminui. Ou seja, à medida que a densidade amostral diminui menor é a variabilidade espacial na área observada.

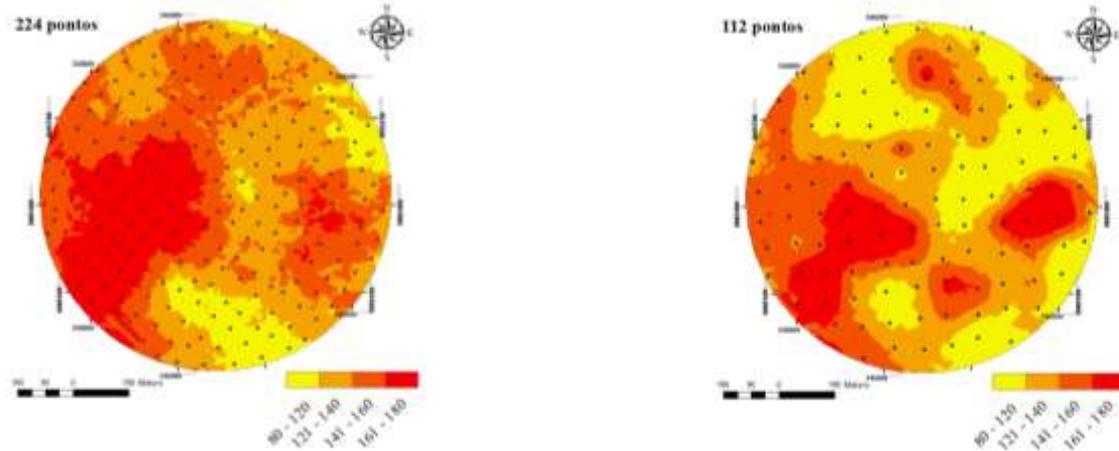


Figura 2. Distribuição espacial do fósforo (P), em 2014, para a área de 112 ha nas diferentes malhas amostrais.

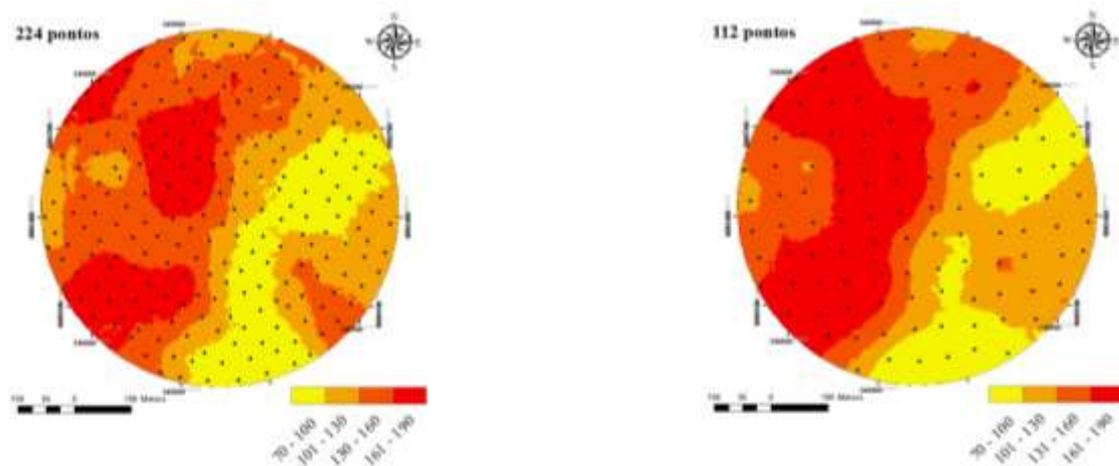


Figura 3. Distribuição espacial do potássio (K), em 2014, para a área de 112 ha nas diferentes malhas amostrais.

Todas as densidades amostrais diferiram entre si para os atributos estudados, evidenciando que, dentre os detalhamentos propostos no trabalho, não foi encontrada uma estabilização dos resultados, nem estabilização da precisão com a diminuição da densidade amostral, nem estabilização da densidade amostral com aumento do detalhamento amostral. Com os mapas das Figuras 2 e 3, foi possível perceber que a malha com maior número de pontos georreferenciados proporcionou, na maioria dos casos, mapas de melhor qualidade e melhor detalhamento da variabilidade espacial da área. A análise dos dados por meio dos mapas possibilitou a distinção de regiões com menor e maior variabilidade dos atributos avaliados.

Para Caon e Genu (2013), na densidade amostral de uma amostra a cada 1 ha, os atributos apresentaram boa qualidade de exatidão em relação aos mapas gerados com a maior densidade amostral. As demais densidades amostrais que compreendem uma amostra a cada 2 e 4 ha apresentaram qualidade de razoável a ruim, sendo, então, ineficiente para utilização em agricultura de precisão que preza, justamente, a qualidade de representação das características encontradas a campo. Pressupondo que uma maior densidade amostral corresponde mais fortemente à realidade encontrada a campo, e que são necessários mapas de dados que apresentem, no mínimo, boa qualidade de exatidão para a sua utilização, é possível atrelar à densidade amostral de uma amostra por hectare a suficiência de qualidade para uso na agricultura de precisão.

Cherubin et al. (2015) estudando o atributo Fósforo (P) pode observar que o aumento no número de amostras coletadas (n), proporcionado por malhas amostrais menores, possibilita identificar locais da área onde os teores de P são extremos e, se não corrigidos, podem induzir à ocorrência de zonas de restrição à produtividade das culturas.

Oliveira et al. (2007), estudando a correlação de atributos do solo e da planta do café, encontrou que os parâmetros químicos do solo não foram consistentes na explicação da produtividade observada. Assim, para os anos agrícolas avaliados, os atributos químicos tiveram pouca influência na produtividade.

Enfim, esta análise de correlação entre os atributos do solo e da produtividade pode estar dependente de outros fatores além da nutrição mineral, tais como as condições de temperatura e precipitação. No entanto, deve-se ter como perspectiva a utilização do diagnóstico foliar como meio de intervenção para corrigir, *a priori*, desequilíbrios que, eventualmente, possam condicionar a produção do cafeeiro.

Carvalho (2016) estudando a Densidade amostral ótima para Cafeicultura de Precisão em área de 22 ha encontrou para a produtividade e fertilidade do solo do cafeeiro que, a malha mais adequada foi à malha de 2,0 pontos/ha.

CONCLUSÕES

1. Foi possível quantificar a existência da variabilidade espacial para as variáveis, nas duas malhas amostrais estudadas.
2. Pela análise geoestatística, combinada às técnicas de geoprocessamento, foi possível mapear a variabilidade espacial e identificar a dependência espacial dos atributos do solo, mostrando-se uma ferramenta extremamente útil para auxiliar em programas de agricultura de precisão para a cafeicultura.
3. Os mapas, para cada atributo, permitiram visualizar a distribuição espacial na área, com mais detalhamento para as malhas com maior número de pontos amostrados, fato que não ocorre quando se utiliza somente análise da estatística clássica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BACHMAIER, M.; BACKERS, M. Variogram or semivariogram?: variance or semivariance?: Allan variance or introducing a new term. **Mathematical Geosciences**, Berlin, v. 43, n. 6, p. 735-740, 2011.
- BERNARDI, A. C. de C.; INAMASU, R. Y. **Adoção da agricultura de precisão no Brasil**. In: BERNARDI, A. C. de C.; NAIME, J. de M.; RESENDE, A. V. de; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (Ed.). Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar. Brasília, DF: EMBRAPA, 2014. p. 559-577.
- CAON, D.; GENU, A. M. Mapeamento de atributos químicos em diferentes densidades amostrais e influência na adubação e calagem. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 17, n. 6, p. 629-639, 2013.
- CARVALHO, L. C. C. **Determinação da densidade amostral ótima para a geração de mapas temáticos na Cafeicultura de Precisão**. 2016. 230 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.
- CHERUBIN, M. R. et al. Dimensão da malha amostral para caracterização da variabilidade espacial de fósforo e potássio em Latossolo Vermelho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 50, n. 2, p. 168-177, 2015.
- EPAMIG - Informe Agropecuário. **Planejamento e Gerenciamento da Cafeicultura**. Belo Horizonte: EPAMIG, v. 29, n. 247, 2008, 132 p.,
- FERRAZ, G. A. S. et al. Methodology to determine the soil sampling grid for precision agriculture in a coffee field. **DYNA**, Medellín, v. 84, p. 316-325, 2017.
- FIGUEIREDO, V. C. et al. Development of a methodology to determine the best grid sampling in precision coffee growing. **Coffee Science**, Lavras, v. 13, n. 3, p. 312 - 323, 2018.
- GREGO, C. R.; OLIVEIRA, R. P. de; VIEIRA, S. R. **Geoestatística aplicada a agricultura de precisão**. In: BERNARDI, A. C. de C.; NAIME, J. de M.; RESENDE, A. V. de; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (Ed.). Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar. Brasília, DF: EMBRAPA, 2014. cap. 5, p. 74-83.
- MATIELLO, J. B. et al. **Cultura de café no Brasil: Manual de recomendações**. Varginha: Futurama, 2015, 585 p.
- NANNI, M. R. et al. Optimum size in grid soil sampling for variable rate application in site-specific management. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 68, n. 3, p. 386-392, 2011.
- OLIVEIRA, E. et al. Eliminação de linhas em cafeeiros adensados por meio semimecanizado. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 6, p. 1826-1830, 2007.
- SEIDEL, E. J.; OLIVEIRA, M. S. Novo índice geoestatístico para a mensuração da dependência espacial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.38, n. 3, p. 699-705, 2014.