



GABRIEL ARAÚJO E SILVA FERRAZ

**CAFEICULTURA DE PRECISÃO: ANÁLISE
ECONÔMICA E USO DA GEOESTATÍSTICA**

**LAVRAS - MG
2010**

GABRIEL ARAÚJO E SILVA FERRAZ

**CAFEICULTURA DE PRECISÃO: ANÁLISE ECONÔMICA E USO DA
GEOESTATÍSTICA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Máquinas e Automação Agrícola, para obtenção do título de Mestre.

Orientador
Dr. Fábio Moreira da Silva

**LAVRAS - MG
2010**

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

Ferraz, Gabriel Araújo e Silva.

Cafeicultura de precisão: análise econômica e uso da
geoestatística / Gabriel Araújo e Silva Ferraz. – Lavras: UFLA,
2010.

88 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2010.

Orientador: Fábio Moreira da Silva.

Bibliografia.

1. Agricultura de precisão. 2. Cafeicultura. 3. Variabilidade
espacial. 4. Viabilidade econômica. I. Universidade Federal de
Lavras. II. Título.

CDD – 338.16

GABRIEL ARAÚJO E SILVA FERRAZ

**CAFEICULTURA DE PRECISÃO: ANÁLISE ECONÔMICA E USO DA
GEOESTATÍSTICA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Máquinas e Automação Agrícola, para obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 02 de agosto de 2010.

Dr. Francisval de Melo Carvalho UFLA

Dr. Marcelo de Carvalho Alves UFMT

Dr. Fábio Moreira da Silva
Orientador

**LAVRAS - MG
2010**

A Deus

A Antônio Gabriel, meu pai, e Regina Cláudia, minha mãe, pelo amor, confiança, apoio e dedicação que me impulsionaram a seguir em frente

A Patrícia, por todo amor, carinho, companheirismo e por sempre me incentivar, apoiar e me manter no caminho

A minha irmã Cecília, pela amizade e carinho

Aos meus avós, por sempre acreditarem em meu esforço e serem um exemplo de vida

A Tita, por participar de toda a minha criação

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Departamento de Engenharia (DEG), pela oportunidade concedida para a realização do mestrado e de toda a graduação;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos;

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia da UFLA, pelos ensinamentos transmitidos, pela convivência e por toda ajuda na concretização deste curso;

Ao professor Dr. Fábio Moreira da Silva, pela orientação, amizade, convivência, paciência, confiança e apoio aos trabalhos desenvolvidos, e por toda a transmissão de conhecimentos;

Ao grupo Ximenes e Abreu na pessoa do Eng. Agro. Eric Miranda Abreu, proprietário da fazenda Brejão, por toda a ajuda e disponibilidade de sua propriedade e de dados imprescindíveis para a realização deste trabalho;

Ao prof. Francisval de Melo Carvalho e ao prof. Dr. Marcelo de Carvalho Alves, por toda a ajuda na realização deste trabalho, pela transmissão de conhecimentos e pela participação na banca examinadora;

Aos meus colegas Pedro Negrini, Rafael Bueno, Bruno Caetano, Luis Carlos Cirilo, Murilo Barros e Antônio Carlos da Silva, pela grande ajuda no desenvolvimento deste trabalho;

E aos amigos e colegas que estiveram sempre ao meu lado e contribuíram para que fosse possível a conclusão de meu curso.

“Nunca fiz nada dar certo por acidente;
nem nenhuma das minhas invenções
surgiu por acidente; elas vieram do meu
trabalho.”

Thomas A. Edison

RESUMO

O café é um dos principais produtos agrícolas do agronegócio brasileiro, e o Brasil se destaca no mercado internacional como líder de produção. A cada dia os produtores brasileiros investem ainda mais em tecnologias e práticas que possibilitem o aumento da produtividade, culminando assim no crescimento da renda dos agricultores. A agricultura de precisão pode ser uma alternativa para redução de custos no setor cafeeiro, já que o conhecimento de determinadas características do solo associado à resposta de produção do cafeeiro pode facilitar a aplicação localizada e racional dos insumos, com resultados ambientais e econômicos positivos. Algumas pesquisas foram desenvolvidas no intuito de caracterizar a variabilidade dos atributos (físicos e químicos) do solo e da planta (folhas e frutos) da cultura do cafeeiro, as quais utilizaram diferentes metodologias, em diferentes áreas e cultivares. Estudos de distribuição espacial de infestação de pragas e doenças, aplicações diferenciadas de fertilizantes e estudos da desfolha do cafeeiro em função da colheita manual dos frutos, também foram desenvolvidos. Estes diferentes trabalhos mostraram que a agricultura de precisão tem um grande potencial para ser aplicada na cafeicultura, e tornar-se uma ferramenta-chave para o desenvolvimento desta cultura. Sendo assim, o objetivo do presente trabalho é aplicar as técnicas de agricultura de precisão, utilizando-se a geoestatística no mapeamento de atributos químicos do solo e atributos da planta. Visa ainda estudar a viabilidade técnica e econômica da agricultura de precisão na cafeicultura, de modo a colaborar para a difusão desta tecnologia.

Palavras-chave: Agricultura de Precisão. Cafeicultura. Variabilidade Espacial. Viabilidade Econômica.

ABSTRACT

Coffee is one of the major agricultural products in the Brazilian agribusiness and Brazil is the major coffee producer of the world. Every day Brazilian producers invest more in technology and practices that allow increasing the yield resulting in more gains to the producers. The precision agriculture could be a feasible alternative to reduce costs in coffee sector, because the knowledge of some soil features associated with the coffee yield response could make the located an rational application of fertilizer easier, with environmental and economical positive results. Some research have been developed aiming to characterize the variability of the soil features (chemical and physics) and the variability of the plant (leaf and fruit) in the coffee agrossystem, with different methodologies, areas and cultivars. Studies of spatial distribution of pest and disease infestation, fertilizer in variable rates and leaf fall because of the manual harvest, also have been developed. These different studies showed the precision agriculture great potential to be applied in coffee field and became an important tool of this culture development. Therefore, the aim of this work is to apply the precision agriculture technique using the geostatistics to map soil chemical attributes and map plant attributes. And also study the technical and economical feasibility of the precision agriculture in a coffee field in order to collaborate with the diffusion of this technology.

Keywords: Precision Agriculture. Coffee Culture. Spatial Variability. Economics Feasibility.

SUMÁRIO

	CAPÍTULO 1.....	10
1	INTRODUÇÃO	10
2	REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO	12
2.1	Agricultura de precisão em lavoura cafeeira	12
2.1.1	Variabilidade dos atributos do solo	13
2.1.1.1	Adubação diferenciada	16
2.1.2	Variabilidade da produtividade do cafeeiro	17
2.1.2.1	Variabilidade da produtividade do cafeeiro relacionada à desfolha.....	21
2.1.3	Variabilidade da maturação e qualidade de bebida.....	22
2.1.4	Variabilidade da concentração de clorofila	22
2.1.5	Variabilidade de pragas e doenças na lavoura	24
2.1.6	Softwares e interpoladores	25
2.2	Geoestatística	26
2.2.1	Semivariograma.....	27
2.2.1.1	Modelos de semivariograma.....	30
2.2.1.2	Métodos de ajuste do semivariograma	31
2.2.1.3	Escolha de métodos e modelos de ajuste do semivariograma.....	33
2.2.2	Hipóteses de estacionariedade.....	33
2.2.3	Krigagem.....	35
	REFERÊNCIAS	37
	CAPÍTULO 2 Viabilidade econômica do sistema de adubação diferenciado comparado ao sistema de adubação convencional em lavoura cafeeira: um estudo de caso	43
1	INTRODUÇÃO	45
2	MATERIAL E MÉTODOS.....	48
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
4	CONCLUSÕES	62
	REFERÊNCIAS	63
	CAPÍTULO 3 Variabilidade espacial e temporal de atributos químicos do solo e da produtividade de uma lavoura cafeeira.....	66
1	INTRODUÇÃO	68
2	MATERIAL E MÉTODOS.....	70
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	76
4	CONCLUSÕES	85
	REFERÊNCIAS	86

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

O Brasil, nos últimos anos, vem se tornando referência internacional na atividade agropecuária. A cada dia os produtores brasileiros investem ainda mais em tecnologias e práticas que possibilitem o aumento da produtividade, culminando assim no crescimento da renda dos agricultores.

O café é um dos principais produtos agrícolas do agronegócio brasileiro, constituindo um grande fornecedor de receitas cambiais, e ainda é um produto no qual o país se destaca como líder na produção mundial. Desta maneira, a atividade cafeeira vem se transformando para se adequar à demanda do mercado, onde a cada dia são exigidos níveis tecnológicos elevados para que se obtenha um aumento de produtividade, redução de custos e restrição ao uso de agroquímicos. Por ser uma atividade de tamanha importância para a balança comercial brasileira, justifica-se a necessidade de buscar o conhecimento profundo de todos os processos produtivos envolvidos desde o plantio até a colheita dos frutos do cafeeiro.

A agricultura de precisão pode ser uma alternativa viável para redução de custos no setor cafeeiro, já que possibilita a aplicação de insumos de forma diferenciada, levando-se em consideração as exigências do cafeeiro e a disponibilidade de nutrientes no solo para cada localidade. O entendimento da variabilidade espacial na lavoura exige uma maior quantidade de informações, as quais podem ser obtidas a partir de operações de amostragens no campo. Essa é uma tecnologia a ser implantada em longo prazo na cafeicultura, uma vez que ainda há pouca tecnologia disponível no mercado para sua aplicação nesta cultura; há, porém, uma forte tendência para que seja adotada, tanto por pressão do mercado que exige cada vez mais alimentos produzidos de forma

ecologicamente consciente, como por parte dos produtores que veem na agricultura de precisão uma maneira de aumentar os lucros por meio da otimização do processo produtivo.

Na lavoura cafeeira, independentemente do sistema utilizado, há variação no tempo e espaço da produtividade das plantas, sendo muito comum plantas sem produção próximas a plantas produtivas, bem como a bienalidade da produção, caracterizada pela variação de anos com alta e baixa produção.

Constituindo a agricultura de precisão uma prática que envolve o conhecimento de várias áreas no campo das ciências agrárias, há uma crescente necessidade de pesquisas para que ela seja adotada em maior escala na cafeicultura.

Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo realizar um estudo de caso da aplicabilidade econômica da agricultura de precisão em uma lavoura cafeeira e também utilizar as técnicas geoestatísticas para caracterizar a estrutura e a magnitude de dependência espacial visando o mapeamento da variabilidade da produtividade do cafeeiro e dos atributos químicos do solo: fósforo e potássio, de forma a demonstrar metodologias que possam ser empregadas em lavouras cafeeiras.

2 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

Neste referencial bibliográfico será abordado o tema agricultura de precisão aplicada em lavoura cafeeira mostrando metodologias utilizadas por diversos autores para o mapeamento da produtividade do cafeeiro, de atributos do solo e da planta, bem como o de doenças e pragas. Também será dada ênfase na geoestatística, abordando seu histórico, ferramentas e hipóteses.

2.1 Agricultura de precisão em lavoura cafeeira

Agricultura de precisão, segundo Saraiva e Cugnasca (1998), é um novo paradigma de gerenciamento agrícola, que se baseia no conhecimento e na consideração da variabilidade espacial e temporal dos fatores de produção e da própria produtividade.

De acordo com Tschiedel e Ferreira (2002), a agricultura de precisão pode ser considerada como um amplo conceito, englobando tecnologias e novos conhecimentos de informática, eletrônica, geoprocessamento, entre outros. Este conceito incorpora um grande número de conhecimentos científicos e alta tecnologia, apresentando ao produtor novos termos, conceitos, equipamentos e tecnologias.

A agricultura de precisão pode ser definida também como um conjunto de tecnologias capaz de auxiliar o produtor rural a identificar estratégias a serem adotadas para aumentar a eficiência no gerenciamento da agricultura, maximizando a rentabilidade das colheitas, tornando o agronegócio mais competitivo. A Agricultura de Precisão tem como principal conceito aplicar no local correto, no momento adequado, as quantidades de insumos necessários à produção agrícola, para áreas cada vez menores e mais homogêneas, de acordo com a tecnologia e os custos envolvidos (DODERMANN; PING, 2004).

A Agricultura de Precisão na cafeicultura ainda é uma tecnologia a ser implantada em longo prazo, mas há uma forte tendência para que seja adotada, pela eficiência, sustentabilidade ecológica e econômica.

Ainda na cultura do cafeeiro, há um campo muito vasto para ser aplicada e pesquisada a Agricultura de Precisão, não só pela sua importância para nosso país, mas também pelo alto grau tecnológico e o valor econômico das lavouras (BALASTREIRE et al., 2001).

Alves, Queiroz e Pinto (2006) introduzem o termo “Cafeicultura de Precisão” que é entendido como o emprego das técnicas de agricultura de precisão na produção de café. As características do solo da cultura variam no espaço (distância e profundidade) e no tempo. Assim a cafeicultura de precisão pode ser definida como um conjunto de técnicas que visa à otimização do uso dos insumos agrícolas (fertilizantes, corretivos, sementes e defensivos) em função da variabilidade espacial e temporal de fatores associados ao sistema água-solo-planta.

Várias pesquisas foram desenvolvidas no intuito de caracterizar a variabilidade dos atributos (físicos e químicos) do solo e da planta (folhas e frutos) da cultura do cafeeiro, sendo utilizadas diferentes metodologias, em diferentes áreas e cultivares.

2.1.1 Variabilidade dos atributos do solo

Os atributos do solo, além de variarem no espaço, podem variar no tempo para cada posição no espaço. Esta variação, decorrente da ação de agentes naturais, assim como da ação do homem, deve se manifestar com maior intensidade em alguns atributos do que em outros (SLOT et al., 2001).

Segundo Cambardella et al. (1994), o conhecimento da variabilidade espacial do atributo do solo em um campo produtivo é importante para o refinamento das práticas de manejo e avaliação dos efeitos da agricultura.

Corá et al. (2004) afirmaram que conhecer a variabilidade dos atributos do solo, principalmente aquelas que controlam a produtividade das culturas, é fator importante em um sistema de produção que visa à sustentabilidade por meio do manejo localizado.

Hoje já estão disponíveis ferramentas que possibilitam a coleta, armazenamento e análise de dados, viabilizando estudos da variabilidade espacial. Para o mapeamento dos atributos químicos do solo ainda existe contestação quanto ao tamanho da grade amostral que varia com a metodologia escolhida pelas prestadoras de serviços, ou mesmo pelas unidades pesquisadoras.

Segundo Sá (2001), uma das maiores limitações para a coleta de informação de atributos do solo em escala adequada é seu alto custo de obtenção.

Atualmente no mercado prestador de serviços à cafeicultura, existem empresas que disponibilizam o serviço de agricultura de precisão na forma de coleta e de mapeamento das variáveis do solo. Poucos são os produtores e empresas que realizam a aplicação à taxa variáveis, principalmente utilizando máquinas. Isto se deve à pequena divulgação das técnicas de agricultura de precisão para os cafeicultores, e também à falta de equipamentos, como controladores, mais adequados aos mecanismos adubadores existentes.

Algumas metodologias de coleta de amostra de solo foram pesquisadas, a fim de se conseguir mapear os atributos do solo. Silva et al. (2007, 2008), desenvolvendo pesquisas em uma lavoura cafeeira, amostraram os atributos do solos utilizando pontos de cruzamento de uma malha, com intervalos regulares de 25 m, perfazendo um total de 67 pontos na área de 6,2 ha, retirando as

amostras na profundidade de 0,0-0,2 m, na projeção da barra da saia do cafeeiro, utilizando o trado como extrator.

Molin et al. (2002) estudaram duas lavouras cafeeiras, uma com 8,2 ha (campo 1) e outra com 5,3 ha (campo 2). Para a retirada das amostras foi utilizado um amostrador automatizado ATV nas grades regulares implementadas em cada área. No campo 1 foram retiradas 32 amostras (aproximadamente 3,9 amostras/ha), e no campo 2 foram retiradas 38 amostras (7,2 amostras/ha). Cada amostra era composta de 9 subamostras.

Molin et al. (2006), realizando amostragem de solo em uma lavoura cafeeira visando à recomendação de adubação em taxa variada, coletou um total de 16 pontos de amostragem em malha ajustada pelas linhas da cultura. Em cada ponto foram coletadas, com a utilização de um trado de rosca, 10 subamostras de material de solo para compor uma amostra composta representativa do ponto de amostragem, na profundidade de 0-20 cm.

Marques Junior et al. (2000) utilizaram duas subáreas plantadas com cafeeiros onde instalaram uma parcela de 200 por 850 metros, dividindo-as numa malha com espaçamento regular de 50 metros entre pontos, resultando em 68 pontos para cada malha. Os solos foram amostrados em duas profundidades (0-20 cm e 60-80 cm).

Souza (2006) estudou duas lavouras cafeeiras, uma com 2,0 ha submetida ao sistema convencional de produção por seis anos, e outra com 2,8 ha sob sistema orgânico por sete anos. As amostragens de solos foram feitas em espaçamento regulares de 15m na transeção e 16m entre transeções na profundidade de 0-20cm, utilizando um trado holandês, e retirando-se, para cada ponto amostral, nove subamostras de solo, sendo três em cada linha de plantio, e três, nas entrelinhas. Essas subamostras foram misturadas para formar uma amostra composta representativa de cada ponto de amostragem, o que totalizou

98 amostras compostas para o sistema convencional e 103 para o sistema orgânico.

Uma característica comum aos trabalhos de Marques Junior et al. (2000), Molin et al. (2002), Silva et al. (2007, 2008) e Souza (2006) é que os atributos de solo estudados apresentaram grau de dependência espacial forte e que, com os mapas de isovalores, foi possível definir zonas de altas e baixas fertilidades, que sugerem manejo regionalizado.

2.1.1.1 Adubação diferenciada

De acordo com Bernardi et al. (2004), a aplicação de fertilizantes a taxas variáveis tem potencial para otimizar o uso de fertilizantes, minimizar os impactos negativos da atividade agrícola no ambiente, uniformizar a produtividade de uma área e reduzir os custos com fertilizantes. A principal vantagem da Agricultura de Precisão está na possibilidade de aplicar insumos no local correto, no momento adequado, nas quantidades necessárias à produção agrícola, para áreas cada vez menores e mais homogêneas, tanto quanto a tecnologia e os custos envolvidos o permitam.

Molin et al. (2006) realizaram a aplicação em taxas variáveis de fósforo e potássio em uma lavoura cafeeira de 6,4 ha no ano de 2003. Para a aplicação em taxa variada foram adotados os resultados provenientes das amostras obtidas nos pontos georreferenciados da malha amostral, e em taxa fixa. A aplicação dos fertilizantes foi realizada em faixas, equivalentes às fileiras das plantas, utilizando um protótipo de adubadora de arrasto, com dosadores volumétricos de duas esteiras individuais e distribuição pneumática na faixa da projeção da copa das plantas. A máquina foi equipada com controlador para aplicação em taxa variada governada pela velocidade da esteira, combinada com a variação da altura da comporta sobre a esteira. A adubadora aplicava o fertilizante em taxa

variada no seu lado direito, respeitando o mapa de recomendação, enquanto do seu lado esquerdo realizava a aplicação adotada pelo agricultor. Os autores observaram que houve uma economia de 23% de fertilizante fosfatado e um acréscimo de 13% de fertilizante potássico quando aplicados em taxa variada. Estes observaram ainda que a área que recebeu aplicação de fertilizantes em taxa variada apresentou 34% de aumento de produtividade em relação àquela que recebeu em taxa fixa.

2.1.2 Variabilidade da produtividade do cafeeiro

O mapeamento da produtividade de uma determinada cultura é uma das fases pertencentes ao ciclo da agricultura de precisão. Tal fase é de suma importância, pois é na colheita que os produtores irão obter os resultados de seus esforços. Para a cultura de cereais, os métodos e equipamentos necessários já são relativamente bem conhecidos, bem fundamentados e difundidos. O mesmo não pode ser dito para a cultura do café, já que ainda são poucos os trabalhos encontrados na literatura, e ainda não existe tecnologia específica para esta cultura disponível no mercado, o que dificulta a coleta dos dados de produtividade em tempo real.

Molin (2001) e Queiroz, Dias e Mantovani (2000), afirmam que os mapas de produtividade podem ser utilizados como ponto de partida, a fim de avaliar as causas de variabilidade da produtividade das culturas, bem como verificar as possíveis causas de modificações que o sistema de manejo, em locais específicos, pode trazer. Para Molin (2001), o mapa de produtividade é a informação mais completa para se visualizar a variabilidade espacial das lavouras.

A colheita de café, comparativamente a outras culturas, é mais difícil de ser executada, em razão do formato da planta, da desuniformidade de maturação

e do elevado teor de umidade dos frutos, o que prejudica a mecanização das operações (FILGUEIRAS, 2001). Silva (2004) descreve que os mecanismos utilizados para se realizarem as operações, bem como a sua ordem, definem os sistemas de colheita, que podem ser classificados como manual, semimecanizado e mecanizado. Segundo Matiello et al. (2009), estima-se que 70% a 80% das lavouras brasileiras são colhidas manualmente. Estas características relatadas podem ser um dos motivos para a não existência de equipamento monitores de colheitas instalados em colhedoras de cafés, o que poderia ainda onerar os equipamentos existentes.

A cafeicultura permite o uso de metodologias de mapeamentos não somente na colheita mecanizada, mas também na colheita manual. Em seus trabalhos, Silva et al. (2007, 2008) realizaram a colheita manual dos frutos de cafeeiros sobre panos de 4 plantas em torno de pontos amostrais, devidamente georreferenciado, por meio do uso de GPS. O volume colhido de cada planta, após a abanação, foi medido em um recipiente graduado em litros. Após esta medição, foi retirado a média de produção das plantas, resultando no valor de produção para a ponto amostral. A área experimental de 6,2 ha, foi dividida em 2 malhas irregulares na distancia de 25 X 25 e 50 X 50 metros, totalizando 67 pontos de amostragem. Os autores concluíram que existiu variabilidade espacial da produtividade, e que a dependência espacial desta variável foi considerada forte.

Oliveira (2007), estudando a produtividade de uma área plantada com café Robusta, demarcou pontos de amostragens, definidos como células, situados dentro de uma grade irregular de aproximadamente 1 ha, totalizando 109 pontos. As coordenadas de cada ponto amostral foram adquiridas com um GPS geodésico. A coleta foi realizada em cada ponto central da célula num espaçamento de dez em dez metros, na linha do cafeeiro. Os frutos de café das cinco plantas de cada célula foram derriçados manualmente em peneiras e

posteriormente colocados em um saco devidamente identificado. No Laboratório foi determinada a produção de café úmido de cada saco (composto de cinco plantas). O autor concluiu que a análise geoestatística, combinada às técnicas de geoprocessamento, possibilitou mapear a variabilidade espacial e identificar a dependência espacial da produtividade do cafeeiro. Esta combinação mostrou-se ainda uma ferramenta extremamente útil no auxílio a programas de agricultura de precisão para a cafeicultura capixaba, visando, sobretudo, à sustentabilidade da atividade.

Souza (2006), estudando duas lavouras cafeeiras, uma com 2,0 ha submetida ao sistema convencional de produção por seis anos, e outra com 2,8 ha sob sistema orgânico por sete anos, colheram manualmente frutos em seis plantas de café por ponto na malha espaçadas de 16 m entre as linhas de plantio da cultura nas safras de 2003/2004 e 2004/2005. Depois de coletados, os grãos foram submetidos a limpeza para separação de galhos e folhas, e medidos em recipiente graduado em litros para determinação da produção em cada ponto na malha. O autor concluiu que a produtividade da cultura apresentou grau de dependência espacial forte.

Oliveira (2003) propôs uma metodologia para mapear variabilidade espacial da produtividade de cafés de montanha, composta da etapa de georreferenciamento, codificação e rotulação dos cafeeiros dentro do talhão. A etapa de colheita foi dividida em catação e colheita final, quando foram pesadas e amostradas todas as medidas colhidas no talhão, 129 na catação, e 339 na colheita final. Esta metodologia proposta permitiu mapear a variabilidade da produtividade; porém, a dificuldade da definição da área de influência de cada saco colhido resultou em valores de produtividade irreais em alguns pontos, demandando futuros estudos na definição dessa área e, ou, em metodologias de filtragem dos dados.

Em se tratando da colheita mecanizada dos frutos de cafeeiro, foi testado por Sartori et al. (2002) um monitor de produtividade para colhedoras automotrizes. Este monitor consiste em um sensor volumétrico, integrado ao coletor na esteira localizada no final do sistema de transporte interno. Para obtenção da produtividade em sacos de café em coco por hectare, era necessária uma amostragem manual no produto colhido para a determinação de um fator de correção do volume do café de lavoura para volume de café em coco. O autor concluiu que a obtenção de dados de produtividade mostrou-se apropriada, prática, suficientemente acurada e possível de ser incorporada ao projeto da colhedora.

Balastreire et al. (2001) realizaram um mapeamento da produtividade da cultura do café no município de Pinhal/SP, utilizando um sistema automático de pesagem de grãos e um DGPS, em uma área de 1,2 ha, e verificaram que há uma variabilidade da produtividade do café. O mapa de produtividade mostrou que existia uma região central do talhão onde a produtividade era bem maior que a média. Os autores concluíram que a investigação das causas que levaram a essa maior produtividade poderia permitir a tomada de providências que aumentariam a produtividade das demais áreas.

Leal (2002) realizou a colheita mecanizada dos frutos de cafeeiro em uma lavoura de café com 4 ha, utilizando uma colhedora automotriz, a qual despejava os frutos em uma carreta tracionada por um trator, equipada com uma estrutura de ferro para a fixação de 4 células de carga. As células possuíam capacidade de 9800 N, ligadas em paralelo e fixadas na estrutura. Para a recepção do café foi utilizado um “bigbag” fixado nas hastes por meio de ganchos posicionados na parte superior da estrutura. Para a localização da colhedora no campo, durante a operação de colheita, foi utilizado um DGPS. Após seus testes, o autor pode concluir que o sistema automático de medição da

produtividade desenvolvido apresentou-se adequado, podendo ser utilizado para a quantificação da variabilidade espacial da produtividade da cultura do café.

2.1.2.1 Variabilidade da produtividade do cafeeiro relacionada à desfolha

Um dos principais danos causados ao cafeeiro pela ação da colheita é a desfolha. A ocorrência frequente de tal fato proporcionará estresse da planta e redução da sua longevidade (BÁRTHOLO; GUIMARÃES, 1997). Com a desfolha, a planta produzirá menos no ano seguinte, uma vez que utilizará suas reservas para a recomposição da vegetação e, por conseguinte, terá uma menor frutificação (RENA et al., 1994).

Souza, Silva e Alves (2008) estudando a produtividade e a desfolha nos anos de 2005 e 2006 em uma lavoura cafeeira de 6,2 ha, dividida em 2 malhas irregulares na distância de 25 X 25 e 50 X 50 metros, totalizando 67 pontos georreferenciados de amostragem. Para a coleta dos dados de produtividade, o autor seguiu a metodologia proposta por Silva et al. (2007, 2008). Para a coleta dos dados de desfolha, após a colheita dos frutos das 4 plantas em torno do ponto georreferenciado, houve a separação dos frutos e das folhas, e a desfolha foi quantificada com base no peso de folhas (kg. planta^{-1}), usando-se um saco de juta e uma balança. Por meio de regressão linear, o autor observou uma relação linear significativa entre a produtividade e a desfolha de 0,75 e 0,83 para o ano de 2005 e 2006 respectivamente. O autor concluiu também que as variáveis em estudo apresentaram estrutura de dependência espacial, o que permitiu o seu mapeamento através do uso de Sistema de Informações Geográficas.

2.1.3 Variabilidade da maturação e qualidade de bebida

Oliveira (2003) propôs uma metodologia para mapear a variabilidade espacial da maturação dos frutos e a qualidade do café de montanha. Em um talhão de cerca de um hectare, o autor coletou 128 amostras para teste de bebida não encontrando variação de qualidade no mesmo. O autor encontrou, ainda, que a variação da umidade e maturação dos tipos de fruto pode causar erros de estimativa de produção, caso se adotem uma umidade média para todos os tipos de fruto, e percentuais de massa fixos para os tipos de fruto.

Alves (2009) desenvolveu um trabalho com o objetivo de analisar a variabilidade espacial e temporal da qualidade de bebida do café de montanha, para tal o autor amostrou, em cada um dos 60 talhões, cerca de 30 plantas por hectare, de forma aleatória. Em cada planta foram colhidos, manualmente, os frutos cereja de quatro ramos, um par em cada lado da planta, voltados para as entrelinhas. Todos os frutos coletados foram agrupados, formando uma amostra. De cada amostra de frutos cereja, foram retirados ao acaso quinze frutos, dos quais, utilizando-se de um refratômetro portátil, se fez a leitura do grau brix do suco obtido pela compressão dos mesmos. O teste de bebida foi realizado por dois provadores, tendo sido cada amostra composta de três xícaras que foram analisadas quanto às características sensoriais do café com base nas regras de competição nacionais e internacionais. O autor concluiu que existe uma variabilidade espacial e temporal dos valores de brix, e essa variabilidade está relacionada com a qualidade de bebida.

2.1.4 Variabilidade da concentração de clorofila

Alguns trabalhos foram desenvolvidos em lavouras cafeeiras no intuito de caracterizar a variabilidade e o mapeamento do teor de Nitrogênio presentes

na lavoura. Realizaram-se, principalmente, análises de clorofila, utilizando-se clorofilômetros digitais, os quais permitem a leitura diretamente no campo, sem necessidade de retirada de folhas e de envio ao laboratório.

Alves, Queiroz e Pinto (2006) citam um trabalho realizado na Universidade Federal de Viçosa, onde foi monitorada a concentração de clorofila de 818 cafeeiros, utilizando-se um determinador de clorofila digital portátil, que permite a leitura rápida e não destrutiva da amostra. As leituras de concentração de clorofila foram realizadas mensalmente entre os meses de setembro de 2003 a março de 2004 utilizando-se quatro folhas por planta; na altura média da planta, foram selecionados quatro ramos diametralmente opostos. Os autores encontraram variabilidade espacial e temporal no teor de clorofila.

Lima (2008) desenvolveu uma pesquisa objetivando mapear o teor de clorofila presente nas folhas de uma lavoura cafeeira. Para tal criou uma malha de 50 x 50m amostrando 30 folhas nos 67 pontos amostrais em uma área de 6,4 ha amostrando folhas de 3º ou 4º par, a partir das pontas dos ramos laterais, na altura média do cafeeiro. O autor encontrou variabilidade espacial do teor de clorofila o que possibilitou o mapeamento desta variável.

Rodrigues Junior (2008) realizou o georreferenciamento de uma lavoura cafeeira utilizando um DGPS, realizou amostragem com um sensor SPAD e também retirou amostras de folhas na área e as enviou ao laboratório. O autor concluiu que o sensor de clorofila SPAD não foi eficiente para a detecção do nível de nitrogênio na lavoura comercial em estudo. O autor também não detectou a dependência espacial dos nutrientes Mg, Mn, Fe e Cu com a grade de amostragem utilizada. Para os nutrientes N, P, K, Ca, S, Zn e B e valores de SPAD observou-se dependência espacial.

2.1.5 Variabilidade de pragas e doenças na lavoura

Alves et al. (2009a) realizaram estudos cujo objetivo era utilizar a geoestatística para caracterizar a estrutura espacial e mapear a variação espacial dos danos causados pela broca-do-café e pelo bicho mineiro em uma lavoura cafeeira. Para tal os autores monitoraram 67 pontos georreferenciados em uma área de 6,6 ha nos anos de 2005, 2006 e 2007. Os autores constataram que o mapeamento de sinais em frutos e folhas de café causados por pragas pode ser útil na inferência da ecologia e infestação de pragas na lavoura em diferentes épocas do ano. Com isso o estabelecimento de estratégias e táticas de controle pode ser aprimorado, possibilitando um controle mais efetivo com menores impactos ambientais e maior sustentabilidade da cultura do café, de acordo com a filosofia de manejo de pragas integrado com as técnicas de agricultura de precisão.

Em experimento realizado para caracterizar a magnitude e estrutura da dependência espacial da Ferrugem do cafeeiro e da Cercosporiose, Alves et al. (2009b) realizaram estudos em uma lavoura cafeeira de 6.6 ha, nos anos de 2005, 2006 e 2007. Visavam conhecer a incidência e severidade destas doenças em 67 pontos gerorreferenciados. Tais autores encontraram mapas de krigagem da ferrugem e da cercosporiose que permitiram a observação de que a intensidade das doenças foi distribuída em padrões de focos ao longo da lavoura, indicando que a estratégia atual de controle baseada na área total pode ser substituída pelo controle específico de forma diferenciada.

2.1.6 Softwares e interpoladores

No estudo da variabilidade e do mapeamento de atributos do solo e planta de lavouras cafeeiras, vários softwares e interpoladores foram utilizados nas mais diversas pesquisas.

Nos trabalhos de Silva et al. (2007, 2008) para se realizar o ajuste dos modelos de semivariograma foi utilizado o software GS⁺. Já para a obtenção dos mapas de distribuição espacial, obtidos por meio de interpolação por krigagem, foi utilizado o programa SURFER.

Para a análise e mapeamento de suas variáveis, Molin et al. (2002) utilizou a interpolação pelo método do inverso da distância e o software SSToolbox GIS. O mesmo software foi utilizado nos estudos de Molin et al. (2006), porém a krigagem foi escolhida como método interpolador.

Souza (2006) fez uso do programa SURFER para realizar as análises geoestatísticas, e o método interpolador escolhido foi krigagem para a elaboração dos mapas de isovalores dos atributos do solo e produtividade da lavoura cafeeira.

Leal (2002) utilizou o software GS⁺ para realizar as análises geoestatísticas, escolhendo a krigagem como método interpolador, e o SSToolbox GIS para a confecção dos mapas de produtividade da lavoura.

Alves et al. (2009a) utilizaram a geoestatística interpolando seus dados por meio da krigagem, utilizando-se do software R e de sua biblioteca geoR, que são livres. Alves et al. (2009b), também, utilizaram a geoestatística interpolando seus dados por meio da krigagem, utilizando-se do software Arcgis.

2.2 Geoestatística

A geoestatística surgiu na África do Sul, quando Daniel Krige em 1951, trabalhando com dados de concentração de ouro, concluiu que não conseguia encontrar sentido nas variâncias, se não levasse em conta a distância entre as amostras (VIEIRA, 2000). George Matheron é considerado o pai da Geoestatística por seus trabalhos nas bases teóricas de um método de interpolação espacial denominado Krigagem, na década de 60 (VALENCIA; MEIRELLEZ; BETTINI, 2004). Sendo assim, Matheron em 1963, na Escola de Minas de Paris, França, baseado nas observações de Krige, desenvolveu uma teoria, a qual ele chamou de teoria das variáveis regionalizadas que contém os fundamentos da geoestatística. Segundo essa teoria, a diferença nos valores de uma dada variável em dois pontos no espaço depende da distância entre eles de acordo com sua dependência espacial. Nesse caso, quando uma determinada propriedade varia de um local para outro com algum grau de organização ou continuidade, expresso através da dependência espacial, pode-se aplicar a Geoestatística para obter informações adicionais às obtidas com a análise clássica (VIEIRA, 2000).

A geoestatística é uma ferramenta importante para análise de dados no âmbito da Agricultura de Precisão. Pode ser usada no planejamento e mapeamento de amostragens do solo e planta, na análise da continuidade espacial e de atributos do solo e planta, e na interpolação dos dados através da krigagem (VALENCIA; MEIRELLEZ; BETTINI, 2004).

O objetivo da geoestatística aplicada à Agricultura de Precisão é caracterizar a variabilidade espacial dos atributos do solo e das plantas, e fazer estimativa, utilizando o princípio da variabilidade espacial a fim de se identificarem inter-relações destes atributos no espaço e no tempo, além de permitir estudar padrões de amostragem adequada (VIEIRA, 2000).

As técnicas geoestatísticas podem ser usadas para descrever e modelizar padrões espaciais (variografia), para prever valores em locais não amostrados (krigagem), para obter a incerteza associada a um valor estimado em locais não amostrados (variância de krigagem) e para otimizar malhas de amostragem (ANDRIOTTI, 2003).

A geoestatística é um conjunto de técnicas para estimar valores regionalizados e especializados de atributos ou características de determinada área a ser estudada, e segundo Cressie (1993), apesar de toda a sua complexidade formal, toda a geoestatística é baseada, fundamentalmente, em apenas dois conceitos: o semivariograma e a krigagem. O primeiro tem o papel de descrever a estrutura da variabilidade espacial, e o segundo possui a função de prever, não-tendenciosamente e com variância mínima, os valores não medidos (LAMPARELLI; ROCHA; BORGHI, 2001). Ainda de acordo com estes autores, a krigagem se distingue de outros métodos de interpolação por ser um método que utiliza um modelo empírico da continuidade espacial existente, ou do grau de dependência espacial com base na distância ou direção das amostras, expresso pelo semivariograma.

2.2.1 Semivariograma

Segundo Silva (1988), um dos métodos mais antigos de se estimar a dependência, no espaço ou no tempo, de amostras vizinhas é por meio da autocorrelação espacial das amostras, caracterizada pela dependência espacial detectada pelo semivariograma. O semivariograma analisa o grau de dependência espacial entre amostras dentro de um campo experimental, além de definir parâmetros necessários para a estimativa de valores em locais não amostrados, através da técnica de krigagem. O semivariograma clássico é estimado segundo a equação 1:

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

onde $N(h)$ 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 .

O Estimador clássico, descrito pela equação 1, é baseado no quadrado das diferenças entre os dados, sendo, desta forma, sensível aos pontos discrepantes. Um simples dado discrepante pode distorcer a estimativa do semivariograma, uma vez que ocorrem várias comparações pareadas ao longo de muitos ou de todos os intervalos (LARK, 2000). Além disto, os dados discrepantes não afetam os valores de todos os intervalos do semivariograma igualmente, estes podem distorcer a forma do semivariograma, o que afeta a determinação do efeito pepita por extrapolação. Tal distorção pode ser diminuída pela estimativa robusta do semivariograma (BACHMAIER, 2007).

De acordo com Cressie e Hawkins (1980), o estimador robusto dos valores do semivariograma é menos susceptível à influência dos valores discrepantes da massa de dados do que o estimador clássico. Assim o estimador robusto é descrito pela equação 2:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2} \frac{\left[N(h)^{-1} \sum_{N(h)} \sqrt{|Z(s+h) - Z(s)|} \right]^4}{0.457 + \frac{0.494}{N(h)}} \quad (2)$$

Este estimador assume que as diferenças $Z(s+h) - Z(s)$ são distribuídos de forma normal para todos os pares $(s+h, s)$. A transformação da raiz quadrada das diferenças são apresentadas como tendo momentos parecidos com aqueles da distribuição normal, e o denominador da equação é a correção de tendências.

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 (VIEIRA et al., 1983).

O semivariograma tende a aumentar conforme aumenta com a distância. Quando o semivariograma tende a estabilizar-se a uma constante, este limite é denominado patamar. O semivariograma pode se aproximar de forma assintótica ou atingir o patamar numa determinada distância. O patamar pode variar com a direção (VALÊNCIA; MEIRELES; BETTINI, 2004).

O efeito pepita é um parâmetro importante do semivariograma e indica variabilidade não explicada, considerando a distância de amostragem utilizada. Esse parâmetro pode ser expresso como percentagem do patamar, com o objetivo de facilitar a comparação do grau de dependência espacial das variáveis em estudo (TRANGMAR, 1985). De acordo com Valência, Meireles e Bettini (2004) o efeito pepita é definido como uma descontinuidade do semivariograma na origem, sendo este parâmetro utilizado para explicar duas fontes de variação: variação do atributo para distâncias menores que a considerada na grade de amostragem e erros de medição.

O alcance determina a região espacial até onde a variável é autocorrelacionada. Em geral pode variar com a direção (VALÊNCIA; MEIRELES; BETTINI, 2004). Os valores do alcance relativos aos semivariogramas têm uma importância considerável na determinação do limite da dependência espacial, o que pode ser também um indicativo do intervalo entre unidades de mapeamento de solos (TRANGMAR, 1985; WEBSTER, 2000). Se o semivariograma for constante e igual ao patamar para qualquer valor de h , temos o efeito pepita puro e, neste caso, temos a ausência total de dependência espacial, ou seja, a dependência espacial, se existir, será manifestada à distância ou tempo menor do que o menor espaçamento entre amostras.

2.2.1.1 Modelos de semivariograma

O modelo do semivariograma pode assumir muitas formas, dependendo do conjunto de dados e do espaçamento de amostragem. A escolha de um modelo teórico do semivariograma é um dos aspectos mais importantes das aplicações das variáveis regionalizadas, e pode ser uma das maiores fontes de ambiguidade e polêmicas nessas aplicações (VIEIRA, 2000).

Os principais modelos de semivariogramas utilizados na geoestatística são (Gráfico 1):

$$\text{- modelo esférico: } \gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] & (0 \leq h \leq a) \\ C_0 + C & (h > a) \end{cases}$$

$$\gamma(h) = C_0 + C \quad (h > a)$$

$$\text{- modelo exponencial: } \gamma(h) = C_0 + C \left[1 - e^{-3 \left(\frac{h}{a} \right)} \right] \quad (0 < h < a)$$

$$\text{- modelo gaussiano: } \gamma(h) = C_0 + C \left[1 - e^{-3 \left(\frac{h}{a} \right)^2} \right] \quad (0 \leq h \leq a)$$

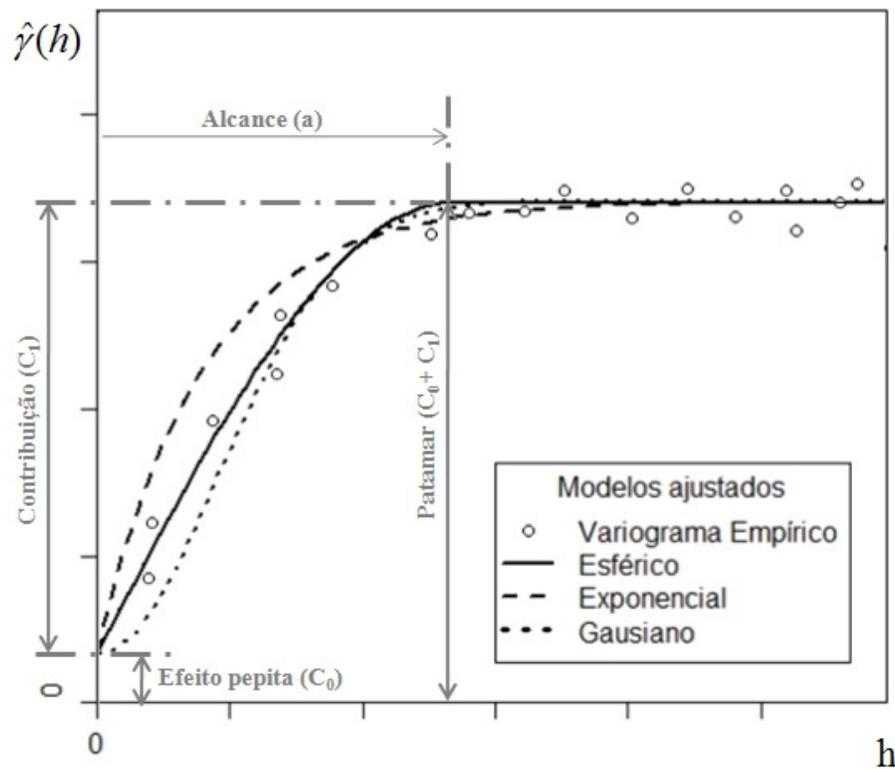


Gráfico 1 Exemplo de semivariograma, seus parâmetros e principais modelos de ajuste

2.2.1.2 Métodos de ajuste do semivariograma

De acordo com Mello et al. (2005), os métodos de ajuste de um semivariograma podem ser divididos em dois grupos:

- a) Ajuste dos modelos ao semivariograma experimental – Os métodos de ajuste deste grupo são: Método dos Quadrados Mínimos Ordinários (Ordinary Least Squares - OLS), Método dos Quadrados Mínimos Ponderados (Weight Least Squares - WLS) e método de ajuste denominado de “a sentimento”.

- b) Método de ajuste de um modelo direto aos dados - Método da Máxima Verossimilhança (Maximum Likelihood - ML) e Máxima Verossimilhança Restrita (Restrict Maximum Likelihood – REML).

Até a década de 1980, em função da pouca disponibilidade de recursos computacionais, o ajuste do modelo espacial ao semivariograma experimental era usualmente feito de forma visual, “a sentimento”, sem o auxílio de métodos matemáticos, e ficava à mercê da subjetividade do pesquisador (SILVA, 2006). Atualmente, com o aumento dos recursos computacionais, outros métodos de ajuste, livres da subjetividade, vêm sendo empregados.

O método da Máxima Verossimilhança consiste em maximizar a função de densidade de probabilidades, em relação aos efeitos fixos e aos componentes de variâncias dos efeitos aleatórios do modelo. Esse método é iterativo e fornece sempre estimativas positivas de componentes de variância. Verossimilhança significa semelhante à verdade e, então, denota a probabilidade de algo ser verdadeiro. Assim, máxima verossimilhança significa a máxima probabilidade de algo ser verdadeiro.

Um estimador de máxima verossimilhança possui propriedades tais como: ser assintoticamente não tendencioso, dar estimativa de variância mínima, ser consistente e invariante (SILVA, 2006).

Existem alguns problemas no uso deste estimador devido ao fato de ele não considerar a perda de graus de liberdade resultante da estimação dos efeitos fixos do modelo (OLIVEIRA, 1983).

Segundo Bussab e Morettin (2002), os métodos dos Mínimos Quadrados Ponderados e dos Mínimos Quadrados Ordinarios são um dos estimadores mais utilizados na Estatística. Ele se baseia no princípio dos quadrados mínimos, introduzido por Gauss em 1809. O método consiste em obter os valores dos parâmetros de um modelo que minimizam a soma do quadrado da diferença entre os valores observados e os estimados.

2.2.1.3 Escolha de métodos e modelos de ajuste do semivariograma

Nos estudos de geoestatística busca-se o melhor ajuste do semivariograma que servirá de base para realizar a krigagem, desta forma fazendo com que as estimativas se tornem mais confiáveis, o que permite a construção de mapas temáticos mais fiéis.

Faraco et al. (2008) cita que os métodos de validação comparam valores teóricos do modelo geoestatístico escolhido e os valores empíricos obtidos na amostragem. Com base na análise desses erros de estimação, poderá ser selecionado o melhor modelo de semivariância. Entre os principais critérios para validação, encontram-se os de Informação de Akaike, de Filliben, de validação cruzada e o máximo valor do logaritmo da função verossimilhança.

De acordo com Isaaks e Srivastava (1989), a validação cruzada é a técnica de avaliação de erros de estimativa que permite comparar valores preditos com os amostrados. O valor da amostra, em certa localização $Z(s_i)$, é temporariamente descartado do conjunto de dados e, então, é feita uma previsão por krigagem no local $\hat{Z}(s_i)$, usando-se as amostras restantes. Desta forma é possível retirar alguns valores que serão muito úteis para a escolha do método, como o Erro Médio (EM), o Desvio Padrão dos Erros Médios (DP_{EM}), o Erro Médio Reduzido (ER), e o Desvio Padrão dos Erros Médios Reduzidos (DP_{ER}).

2.2.2 Hipóteses de estacionariedade

Para o uso da krigagem devem-se assumir algumas hipóteses de estacionariedade a fim de se caracterizar uma variável aleatória ao longo do espaço. Segundo Valência, Meirelles e Bettini (2004), uma amostra na dimensão

espacial corresponde a uma única observação do fenômeno, não existindo assim, replicação do fenômeno.

Uma variável é estacionária se o desenvolvimento desse processo no tempo ou no espaço ocorrer de maneira mais ou menos homogênea, com oscilações aleatórias contínuas em torno de um valor médio, em que tanto a amplitude média como as oscilações mudam bruscamente no tempo ou no espaço. Segundo Cressie (1993), existem várias definições de estacionariedade, e de acordo com Valência, Meirelles e Bettini (2004), as mais comuns são: a estacionalidade de segunda ordem e a estacionalidade intrínseca.

Se a esperança matemática de uma variável aleatória é constante, independentemente da origem adotada no espaço ou no tempo, pode-se dizer que a variável é estacionária de primeira ordem e, portanto, a média será a mesma para todo o processo de acordo com uma hipótese mais fraca (mais abrangente); é a hipótese intrínseca. Na hipótese intrínseca tem-se:

a) A esperança $Z(x)$ existe e não depende do ponto x .

$$E[Z(x)] = m$$

b) Para qualquer vetor de h , a variância da diferença $[Z(x+h) - Z(x)]$ existe e não depende do ponto x .

$$\text{Var} [Z(x+h) - Z(x)] = E \{ [Z(x+h) - Z(x)]^2 \} = 2 \gamma(h)$$

A hipótese intrínseca é a hipótese mais frequentemente usada em geoestatística, por ser menos restritiva. O semivariograma exige apenas a hipótese intrínseca e conseqüentemente é a ferramenta mais difundida na geoestatística, enquanto o autocorrelograma exige a estacionariedade de ordem 2.

Uma função aleatória $Z(x_i)$ é estacionária de ordem 2 se:

a) A média é constante: $E [Z(x_i)] = m$

b) Para cada par de variáveis aleatórias, $Z(x_i)$, $Z(x_i+h)$ a função covariância, $\text{Cov} (h)$, existir e for função de h .

2.2.3 Krigagem

Na maioria das vezes, o interesse da análise geoestatística não se limita à obtenção de um modelo de dependência espacial, desejando-se também prever valores em pontos não amostrados. O interesse pode ser em um ou mais pontos específicos da área, ou obter uma malha de pontos interpolados que permitam visualizar o comportamento da variável na região, por meio de um mapa de isolinhas ou de superfície (SILVA, 2006).

A interpolação espacial é o processo de predição de uma variável em posições não amostradas, usando a informação de uma amostra (VALÊNCIA; MEIRELLES; BETTINI, 2004). A krigagem é o método de interpolação da geoestatística, que utiliza a dependência espacial expressa no semivariograma entre amostras vizinhas para estimar valores em qualquer posição dentro do campo, sem tendência e com variância mínima. Estas duas características fazem da krigagem um interpolador ótimo (BURGESS; WEBSTER, 1980).

A condição de não tendência significa que, em média, a diferença entre valores estimados e medidos para o mesmo ponto seja nula, e a condição de variância mínima significa que, embora possam existir diferenças ponto por ponto entre o valor estimado e o medido, essas diferenças devem ser mínimas.

Segundo Vieira (2000), para a aplicação da krigagem, assume-se que sejam conhecidas as realizações $z(x_1)$, $z(x_2)$, ..., $z(x_n)$ da variável $Z(x)$, nos locais x_1, x_2, \dots, x_n ; que o semivariograma da variável já tenha sido determinado; e que o interesse seja estimar um valor z^* na posição x_0 . O valor estimado $z^*(x_0)$ é dado por:

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

onde, N é o número de vizinhos, $z(x_i)$, envolvidos na estimativa, e λ_i são os pesos associados a cada valor medido. Para que o estimador seja um

interpolador, assume-se condição de não tendenciosidade e de mínima variância.

Para isso, são requeridas as condições:

$$E\{Z^*(x_0) - Z(x_0)\} = 0$$

$$Var\{Z^*(x_0) - Z(x_0)\} = E\{[Z^*(x_0) - Z(x_0)]^2\} = \textit{mínima}$$

Para que z^* seja uma estimativa não tendenciosa de z , a soma dos pesos das amostras tem que se igualar a 1.

$$\sum \lambda_i = 1$$

Para obter a variância mínima, introduz-se o multiplicador de Lagrange, e o sistema de krigagem resultante é deduzido segundo a equação 3:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(x_i, x_j) + \mu = \gamma(x_i, x_0); \quad i=1 \text{ a } N \quad (3)$$

onde, μ é o multiplicador de Lagrange. A variância de estimativa é dada por:

$$\sigma_E^2 = \mu + \sum \lambda_i \gamma(x_i, x_0)$$

REFERÊNCIAS

ALVES, E. A. **Variabilidade espacial e temporal da qualidade do café cereja produzido na região das serras de Minas**. 2009. 112 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2009.

ALVES, E. A.; QUEIROZ, D. M. de; PINTO, F. de A. de C. Cafeicultura de precisão. In: ZAMBOLIM, L. **Boas práticas agrícolas na produção de café**. Viçosa, MG: UFV, 2006. p. 189-223.

ALVES, M. C. et al. Geostatistical analysis of the spatial variation of the berry borer and leaf miner in a coffee agroecosystem. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 10, n. 12, p. 1-14, Dec. 2009a.

_____. Modeling spatial variability and pattern of rust and brown eye spot in coffee agroecosystem. **Journal of Pest Science**, Berlin, v. 82, n. 2, p. 137-148, May 2009b.

ANDRIOTTI, J. L. S. **Fundamentos de estatística e geoestatística**. São Leopoldo: UNISINOS, 2003. 165 p.

BACHMAIER, M. Using a robust variogram to find an adequate butterfly neighborhood size for one-step yield mapping using robust fitting paraboloid cones. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 8, n. 1/2, p. 75-93, Jan./Feb. 2007.

BALASTREIRE, L. A. et al. Agricultura de precisão: mapeamento da produtividade de uma cultura de café. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** Jaboticabal: SBEA, 2001. 1 CD-ROM.

BÁRTHOLO, G. F.; GUIMARÃES, P. T. G. Cuidados na colheita e preparo do café. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 19, n. 187, p. 33-42, 1997.

BERNARDI, A. C. de C. et al. Aplicação de fertilizantes a taxas variáveis. In: MACHADO, P. L. O. de A.; BERNARDI, A. C. de C.; SILVA, C. A. **Agricultura de precisão para o manejo da fertilidade do solo em sistema plantio direto**. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2004. p. 153-164.

BURGESS, T. M.; WEBSTER, R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties: II., block kriging. **Journal of Soil Science**, Baltimore, v. 31, n. 2, p. 333-341, 1980.

BUSSAB, W. O.; MORETTIN, P. A. **Estatística básica**. 5. ed. São Paulo: Saraiva, 2002. 526 p.

CAMBARDELLA, C. A. et al. Field scale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, May 1994.

CORÁ, J. E. et al. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cultura de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, n. 6, p. 1013-1021, nov./dez. 2004.

CRESSIE, N. **Statistics for spatial data**. New York: J. Wiley, 1993. 900 p.

CRESSIE, N.; HAWKINS, D. M. Robust estimation of the variogram. **Mathematical Geology**, New York, v. 12, n. 2, p. 115-125, 1980.

DODERMANN, A.; PING, J. L. Geostatistical integration of yield monitor data and remote sensing improves yield maps. **Agronomy Journal**, Madison, v. 96, n. 1, p. 285-297, Jan. 2004.

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

FILGUEIRAS, W. H. **Modelagem da planta de café por elementos finitos para estudos de colheita por vibração**. 2001. 81 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2001.

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

LAMPARELLI, A. C.; ROCHA, J. V.; BORGHI, R. **Geoprocessamento e agricultura de precisão: fundamentos e aplicações**. Guaíba: Agropecuária, 2001. 118 p.

LARK, R. M. A comparison of some robust estimators of the variogram for use in soil survey. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 51, n. 1, p. 137-157, Mar. 2000.

LEAL, J. C. G. **Mapeamento da produtividade na colheita mecanizada do café**. 2002. 89 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2002.

LIMA, S. I. **Estudo da variabilidade espacial da concentração de clorofila em lavoura cafeeira**. 2008. 34 p. Monografia (Graduação em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

MARQUES JÚNIOR, J. et al. Variabilidade espacial de propriedades químicas e físicas de latossolos em áreas de cerrado sob cultivo de café, em patrocínio, MG. In: BALASTREIRE, L. A. **O estado-da-arte da agricultura de precisão no Brasil**. Piracicaba: ESALQ, 2000. p. 105-112.

MATIELLO, J. B. et al. **Melhorando a colheita do café**. Varginha: Fundação Procafé, 2009. 44 p.

MELLO, J. M. et al. Ajuste e seleção de modelos espaciais de semivariograma visando à estimativa volumétrica de *Eucalyptus grandis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 1, n. 69, p. 25-37, dez. 2005.

MOLIN, J. P. **Agricultura de precisão: o gerenciamento da variabilidade**. Piracicaba: ESALQ, 2001. 83 p.

MOLIN, J. P. et al. Precision agriculture for coffee in Brazil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 6., 2002, Minneapolis. **Proceedings...** Minneapolis: ASA/CSSA/SSSA, 2002. p. 578-587.

_____. Taxa variada de P e K em um cafezal e sua influência na produtividade. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 4., 2006, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: USP/ESALQ, 2006. 1 CD-ROM.

OLIVEIRA, A. S. C. **Mapeamento da variabilidade espacial da produção na cafeicultura de montanha**. 2003. 82 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2003.

OLIVEIRA, R. B. **Mapeamento e correlação de atributos do solo e de plantas de café conilon para fins de agricultura de precisão**. 2007. 129 p. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, 2007.

OLIVEIRA, V. H. de. **Erodibilidade de seis solos do município de Lavras, MG, usando o nomograma**. 1983. 70 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1983.

QUEIROZ, D. M.; DIAS, G. P.; MANTOVANI, E. C. Agricultura de precisão na produção de grãos. In: BORÉM, A. et al. (Ed.). **Agricultura de precisão**. Viçosa, MG: UFV, 2000. p. 1-41.

RENA, A. B. et al. Fisiologia do cafeeiro em plantios adensados. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE CAFÉ ADENSADO, 1., 1994, Londrina. **Anais...** Londrina: Instituto Agrônômico do Paraná, 1996. p. 73-85.

RODRIGUES JÚNIOR, F. A. **Geração de zonas de manejo para cafeicultura usando sensor SPAD e análise foliar**. 2008. 64 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2008.

SÁ, M. F. M. **Abordagem quantitativa na predição espacial de atributos do solo e geração de zonas de manejo agrícola**. 2001. 117 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2001.

SARAIVA, A. M.; CUGNASCA, C. E. Sistemas para agricultura de precisão: equipamentos e programas. In: SILVA, F. M. da; BORGES, P. H. de M. **Mecanização e agricultura de precisão**. Lavras: UFLA, 1998. p. 159-202.

SARTORI, S. et al. Mapping the spatial variability of coffee yield with mechanical harvester. In: WORLD CONGRESS ON COMPUTERS IN AGRICULTURE AND NATURAL RESOURCES, 8., 2002, Saint Joseph. **Anais...** Saint Joseph: ASAE, 2002. p. 196-205.

SILVA, A. P. **Variabilidade espacial de atributos físicos do solo**. 1988. 105 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 1988.

SILVA, F. M. **Colheita mecanizada e seletiva do café: cafeicultura empresarial: produtividade e qualidade**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2004. 75 p.

SILVA, F. M. et al. Variabilidade espacial de atributos químicos e de produtividade na cultura do café. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 2, p. 401-407, mar./abr. 2007.

_____. Variabilidade espacial de atributos químicos e produtividade da cultura do café em duas safras agrícolas. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 1, p. 231-241, jan./fev. 2008.

SILVA, P. M. O. **Modelagem do escoamento superficial e da erosão hídrica na sub-bacia hidrográfica do ribeirão Marcela, Alto Rio Grande, MG**. 2006. 155 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.

SLOT, M. H. et al. Spatial variability in Palustrine wetlands. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, n. 2, p. 527-535, Mar. 2001.

SOUZA, C. K. **Variabilidade espacial de atributos de solo e produtividade em área cultivada com café orgânico e convencional**. 2006. 65 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2006.

SOUZA, J. C. S.; SILVA, F. M.; ALVES, M. C. Influence of manual harvest in the spatial variability of coffee yield and defoliation along two agricultural harvests. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 37., 2008, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: UFPR, 2008. p. 1-4.

TRANGMAR, B. B. Applications of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 38, n. 1, p. 45-94, Feb. 1985.

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

VALÊNCIA, L. I. O.; MEIRELLES, M. S. P.; BETTINI, C. Geoestatística aplicada à agricultura de precisão. In: MACHADO, P. L. O. de A.; BERNARDI, A. C. de C.; SILVA, C. A. **Agricultura de precisão para o manejo da fertilidade do solo em sistema plantio direto**. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2004. p. 37-56.

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

VIEIRA, S. R. et al. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, Berkeley, v. 51, n. 3, p. 1-7, 1983.

WEBSTER, R. Is soil variation random? **Geoderma**, Amsterdam, v. 97, n. 1/2, p. 149-163, 2000.

CAPÍTULO 2

Viabilidade econômica do sistema de adubação diferenciado comparado ao sistema de adubação convencional em lavoura cafeeira: um estudo de caso

RESUMO

A agricultura de precisão surge como uma importante ferramenta para melhorar o gerenciamento da atividade cafeeira, principalmente para esta cultura, que possui elevado custo de produção. O presente trabalho teve por objetivo fazer um estudo comparativo da viabilidade econômica de dois sistemas de adubação: o sistema com a utilização da agricultura de precisão e o sistema de aplicação de forma convencional. Os dados utilizados foram extraídos dos custos de produção da fazenda Brejão, no sul de Minas Gerais, em três áreas (22 ha, 10,52 ha e 6,23 ha), onde foram realizadas aplicações de adubos de forma diferenciada nas safras 2007/2008 e 2008/2009. A agricultura de precisão se caracterizou por coleta de amostras georreferenciadas de solo e aplicação de fósforo e potássio diferenciada. Os custos da adubação convencional foram obtidos por meio de simulações considerando a amostragem convencional do solo realizada nas glebas. Para efeito comparativo entre os sistemas de adubação, foram consideradas as operações e as quantidades de adubos necessárias a cada um dos sistemas de adubação. Entre os dois sistemas perceberam-se diferenças quanto aos elementos, e também nas quantidades que deveriam ser aplicadas. A adubação diferenciada foi vantajosa para as áreas de 22 ha e 10,52 ha, nas duas safras em estudo, e para a área de 6,23 ha somente foi vantajosa na última safra.

Palavras-chave: Adubação a Taxas Variáveis. Agricultura de Precisão. Custos. Viabilidade. Cafeicultura. Adubação Convencional.

ABSTRACT

The precision agriculture appears as an important tool to improve coffee field management, mainly to this culture that has high production costs. The present work intended to accomplish a comparative study of the economic feasibility of two fertilizer systems: one using the precision agriculture and other using conventional fertilization. The data base used was extracted for the production costs of the Brejão farm, in south of Minas Gerais, in three areas (22 ha, 10,52 ha e 6,23 ha), where were applied fertilizer in variable rates in the 2007/2008 and 2008/2009 crops. The precision agriculture was characterized by the georeferenced soil sampling and the application of phosphorus and potassium in variable rates. The conventional fertilization costs were obtained by simulations considering the traditional soil sampling performed at these areas. In order to compare the two fertilization systems, it was considered the operations and the amount of fertilizer necessary in each of the fertilization system. It was realized differences in the elements and in the amount that should be applied between the two systems. The variable rates fertilization was more profitable to the area of 22 ha and 10,52 ha in the two crops studied and to the area of 6,23 ha was profitable only to the last crop.

Keywords: Variable Rates of Fertilizer. Precision Agriculture. Costs. Viability. Coffee. Conventional Fertilization.

1 INTRODUÇÃO

O café é um dos principais produtos agrícolas na pauta das exportações brasileiras, constituindo um grande fornecedor de receitas cambiais (SILVA; REIS, 2001). Por ser uma cultura que apresenta elevado custo de produção, os cafeicultores estão sempre em busca da redução destes custos (OLIVEIRA et al., 2007a; RIBEIRO et al., 2009). Desta forma, possuir o domínio e o conhecimento de técnicas de produção e de manejo envolvidas na atividade cafeeira, bem como saber o efeito por elas causado na produção e no desenvolvimento da planta, é de suma importância para sua sustentabilidade e viabilidade econômica (CUSTÓDIO; GOMES; LIMA, 2007).

De acordo com Bliska et al. (2009), nos últimos anos, o agronegócio do café brasileiro internalizou novas técnicas de produção que promoveram impactos positivos sobre produtividade, competitividade e qualidade final do produto.

Segundo Carvalho et al. (2009), Oliveira et al. (2007b) e Silva et al. (2008), a agricultura de precisão se apresenta como um conjunto de tecnologias capaz de auxiliar o produtor rural a identificar as estratégias a serem adotadas para aumentar a eficiência no gerenciamento da agricultura. Inclui maximizar a rentabilidade das colheitas, tornando o agronegócio mais competitivo face ao processo de globalização da economia, e contribuir, assim, para o sucesso da atividade agrícola.

Como foi colocado acima, a agricultura de precisão não é apenas uma ferramenta tecnológica, mas constitui, sim, um conjunto de tecnologias e de componentes, com muitos dos quais os agricultores podem optar por formar um sistema que atenda suas necessidades e seu estilo de gestão (BATTE; EHSANI, 2006).

De acordo com Dercon et al. (2006), Hurley, Oishi e Malzer (2005) e Mzuku et al. (2005), a agricultura de precisão baseia-se na premissa de que a gestão dos fatores de produção pode ser melhorada e a rentabilidade potencialmente elevada, quando os produtores tirarem proveito de informações de variabilidade espacial e tecnologias de aplicação de insumos a taxas variáveis. De acordo com Rider et al. (2006), as reduções de insumos são relacionadas a fatores complexos da planta, como o potencial produtivo, e por fatores ambientais, tais como chuva e propriedades do solo.

Silva, Moretto e Rodrigues (2004) citam que o adequado emprego da tecnologia de agricultura de precisão deve-se basear em análises econômicas que mostram seus benefícios, como o aumento da produtividade e a redução dos custos de produção. Paralelamente, tais informações permitem a racionalização da utilização de insumos agrícolas, minimizando os impactos ambientais da atividade.

Segundo Robert (2003), os resultados obtidos pelos estudos de viabilidade econômica da agricultura de precisão variam devido a fatores como: diferenças das condições naturais, situações distintas de produção, diferentes metodologias usadas na análise econômica, dificuldade em determinar os benefícios da tecnologia de informação e aumento da proteção ambiental.

Muitos estudos econômicos sobre agricultura de precisão ou tecnologia de aplicação diferenciada foram desenvolvidos (TOZER, 2009), porém estudos de análises econômicas para a adoção da agricultura de precisão no Brasil ainda foram pouco realizados (SILVA et al., 2007). Para a cafeicultura não é diferente, embora esta tecnologia já esteja presente no agronegócio do café.

O objetivo deste trabalho foi realizar um estudo comparativo sobre a viabilidade econômica da utilização da agricultura de precisão na aplicação de fósforo e potássio em taxas variáveis quando comparadas à aplicação destes

mesmos produtos de forma convencional em três lavouras cafeeiras na cidade de Três Pontas, sul de Minas Gerais.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Os dados foram extraídos de um experimento na fazenda Brejão, que está localizada no município de Três Pontas, sul de Minas Gerais, nas coordenadas geográficas médias 21°26'08" de latitude sul e 45°24'53" de longitude oeste de Greenwich, com uma área plantada de 38,75 hectares de lavoura do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) no espaçamento de 3,8m entre linhas e 0,8m entre plantas, totalizando 3289 plantas.ha⁻¹. O plantio dos cafeeiros foi realizado em dezembro de 2005. A área foi dividida em três glebas de diferentes tamanhos e com diferentes cultivares: Gleba 1 com 22 ha plantados com cafeeiro da cultivar Topázio, Gleba 2 com 10,52 ha plantados com cafeeiro da cultivar Mundo Novo 376/4 e a Gleba 3 com 6,23 ha plantados com cafeeiro da cultivar Acaiaí 474/19 (Gráfico 1).

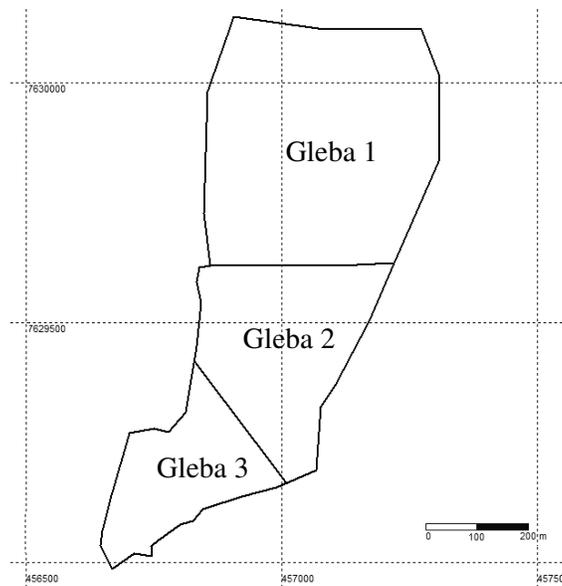


Gráfico 1 Limite da área de 38,75 ha de café com as divisões das glebas

Para a realização das análises econômicas, foram levantadas as informações de custo de todas as operações realizadas em cada gleba, considerando duas safras (2007/2008 e 2008/2009). Tais operações incluem: aplicação de herbicidas, de forma manual e mecanizada, capina manual, roçagem (manual e mecanizada), pulverização (manual e mecanizada), transporte de máquinas, equipamentos e pessoas, podas, desbrotas, plantios e replantios, retirada de cipó, calagem e gessagem e adubação.

Para a realização dos cálculos de custo de produção foi utilizado o software Gerente Agrícola – versão 15.35. Neste software são cadastrados todos os funcionários e seus respectivos salários, encargos sociais, de forma a se calcular o custo horário da mão de obra. Todas as máquinas e implementos possuem um cadastro de seu valor inicial, idade, consumo de combustível, preço do combustível, quantidade de horas utilizadas e manutenções realizadas. Desta forma, é calculado o custo horário, considerando também a depreciação do equipamento. Existe, ainda, o cadastramento do preço de aquisição e frete de todos os insumos (adubos, herbicidas, calcário e inseticidas).

As análises econômicas da operação de adubação química granular de fósforo e potássio foram realizadas por meio de um comparativo entre o sistema convencional e o sistema de aplicação diferenciada, levando-se em consideração os custos de amostragem do solo, análise de solo, mão de obra, adubo e maquinários utilizados, e considerando as outras operações iguais a ambos os sistemas. Os custos da aplicação a taxa variável foram levantados na propriedade nas safras 2007/ 2008 e 2008/2009 e para aplicação convencional foi realizada a simulação dos custos da operação para estas mesmas safras, considerando as amostras de solo realizadas nas glebas.

O sistema convencional caracteriza-se por realizar amostragens de solo de forma convencional, em que um trado holandês é utilizado por um funcionário da própria fazenda. Para a coleta destas amostras, realizou-se um

caminhamento na área com a coleta de 20 subamostras. Foram depois agrupadas e revolvidas, visando à homogeneização, de forma a constituir uma amostra composta. As amostras foram retiradas na projeção da saia do cafeeiro de 0 a 20 cm de profundidade, e de 20 a 40 cm, no mês de julho dos anos de 2007 e 2008. Desta forma, foram geradas 2 amostras de solo para cada gleba, sendo uma de 0-20 cm e outra de 20-40 cm.

Já o sistema de aplicação diferenciada de fertilizantes baseia-se no uso da Agricultura de Precisão. Para a coleta dos dados de fertilidade do solo foi demarcada na área uma malha de 1 ponto por hectare, num total de 38 pontos amostrais georreferenciados. Para a demarcação dos pontos de coleta, e para amostragem de solo, foi utilizado um quadriciclo equipado com broca pneumática e GPS geodésico. Em cada hectare foi realizado um caminhamento aleatório para a coleta de 8 subamostras que foram homogeneizadas para gerar 1 amostra composta, cujo valor representa o ponto georreferenciado. Tais subamostras foram retiradas na projeção da saia do cafeeiro de 0 a 20 cm de profundidade, no mês de julho dos anos de 2007 e 2008. Para a realização da amostragem e do mapeamento dos atributos químicos do solo, contratou-se uma empresa especializada nesta operação que será considerada como custo de amostragem do solo.

As amostras de solo, tanto a convencional quanto a diferenciada, foram enviadas ao Laboratório de Análise de Solo e Folha da Cooperativa dos Cafeicultores da Zona de Três Pontas (COCATREL) para se proceder às devidas análises. Os dados de solo analisados foram Fósforo (P), Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Enxofre (S), Capacidade de Troca de Cátions (CTC), Saturação de Bases (V) e potencial hidrogeniônico (pH).

No sistema de adubação diferenciada, após as análises laboratoriais das amostras do solo, foram produzidos mapas de variabilidade de cada atributo químico em questão, pela empresa contratada. A partir da análise dos mapas de

variabilidade, foram gerados mapas de recomendação de aplicação de fósforo e potássio para cada localidade. De posse destes mapas, e com um GPS de navegação, fez-se uma demarcação na lavoura de café para se realizar aplicação de adubos químicos em taxas variadas.

As análises das amostras retiradas pelo método convencional resultaram em recomendações homogêneas de aplicação de fertilizantes, baseando-se, desta maneira, na média da gleba. Realizou-se uma simulação da aplicação convencional, procurando utilizar os mesmos adubos que foram aplicados na forma diferenciada, salvo quando as necessidades de um elemento químico não foram requeridas por um dos sistemas. Desta forma, os custos de cada fertilizante que se diferenciava entre os sistemas, foram levantados com o próprio cafeicultor, o qual efetuou a compra dos fertilizantes para aplicar em outras propriedades. Os custos com máquinas (tratores e adubadoras) e mão de obra seguiram os valores horários pagos na adubação diferenciada.

Por se tratar de plantas novas, a primeira colheita só foi realizada no ano de 2008, desta forma, referente à safra 2007/2008. A produtividade, em sacos beneficiados do sistema de adubação diferenciada, foi obtida por meio da colheita manual na safra de 2007/2008, e por meio de colheita manual e mecanizada na safra 2008/2009.

A produtividade do sistema convencional foi simulada seguindo dois cenários: o primeiro, considerando que a adubação diferenciada não exerça efeitos na produtividade, ou seja, foi considerada a mesma produtividade obtida na adubação diferenciada; o segundo cenário seguiu os valores encontrados por Faulin (2010), no qual a aplicação de fertilizantes em doses variadas resultou em um aumento médio de 4 sacas por hectare, durante os 4 anos de seu estudo. Sendo assim, neste cenário, a produtividade do sistema convencional será a produtividade por hectare obtida no sistema de adubação diferenciada menos 1 saca/ha.

Para se calcular a renda, levantou-se a produtividade por hectare de cada gleba, sendo esta multiplicada pelo valor médio de venda da saca de café no ano de 2008, para a safra 2007/2008; e no ano de 2009, para a safra 2008/2009, obtidas da Cooperativa Regional de Cafeicultores em Guaxupé - COOXUPÉ (2010).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na tabela 1 são apresentadas as quantidades dos elementos químicos fósforo e potássio, que foram requeridos em cada hectare para cada um dos sistemas de adubação, e em cada uma das duas safras abordadas neste estudo.

Tabela 1 Quantidade de Fósforo (Kg/ha) e Potássio (Kg/ha) a ser aplicada na toda a lavoura sugerida pelo método Convencional de Adubação e pelo método da Agricultura de Precisão nas safras 2007/2008 e 2008/2009

	Gleba 1		Gleba 2		Gleba 3	
	P	K	P	K	P	K
Safra 2007/2008						
Convencional	0	53	45	35	0	59
Diferenciada	0	0	37	0	96	0
Safra 2008/2009						
Convencional	75	151	0	140	0	157
Diferenciada	0	102	0	112	0	112

Ao se observar a tabela 1, notou-se que na safra 2007/2008 para a gleba 1, a adubação a taxas variadas apresentou uma diminuição da quantidade de potássio (K) a ser aplicada com relação ao que deveria ter sido aplicado se fosse seguido o método convencional de adubação. Essa diminuição apresentou valores iguais a 53 Kg/ha. Para os valores de fósforo (P) não houve diferença, haja vista que nenhum método recomendou a aplicação deste elemento. Na safra 2008/2009 haveria um aumento de 75 Kg de P e 49 Kg de K, se o método escolhido fosse o convencional.

Esta diferença de quantidades de elementos que deveriam ser aplicados por cada sistema se reflete nos fertilizantes necessários e nas quantidades a serem aplicadas. Desta forma, os adubos aplicados na gleba 1 no sistema de adubação diferenciada foram: 477,3 Kg/ha de 43-00-00 na safra 2007/2008 e 309 Kg/ha de 20-00-24, 268,2 Kg/ha de Sulfato de Amônio (20-00-00), 277,3

Kg/ha de 27-00-10 e 16 Kg/ha de 43-00-00 na safra 2008/2009. A simulação da aplicação convencional resultou na utilização de 88,6 Kg/ha de Cloreto de Potássio e 477,3 Kg/ha de 43-00-00, e na segunda safra foram utilizados 414,5 Kg/ha de Superfosfato simples, 309 Kg/ha de 20-00-24, 268,2 Kg/ha de 20-00-00, 277,3 Kg/ha de 27-00-10, 16 Kg/ha de 43-00-00 e 82 Kg de Cloreto de Potássio em cada hectare.

Ao observar a tabela 2, pode-se perceber que o fato de se utilizar o Cloreto de Potássio, na primeira safra em estudo no método de adubação convencional, acarretaria um aumento de R\$ 80,80 por hectare com fertilizantes, e R\$ 11,25 por hectare com mão de obra. Mesmo com o aumento nos custos de amostragem do solo e mapeamento e, ainda, de análise laboratorial destas amostras, que seriam da ordem de R\$ 31,87/ha e R\$ 22,91/ha, respectivamente, a adubação diferenciada se mostrou mais vantajosa, reduzindo os custos em R\$ 37,27/ha.

Na segunda safra, os custos com fertilizantes na adubação diferenciada seriam R\$ 278,94/ha mais barato que na convencional. Além disto, os gastos com mão de obra, tratores e adubadoras também seriam reduzidos. O mesmo não acontece com a amostragem de solo e mapeamento, e com as análises laboratoriais. Portanto, nesta safra, as reduções de custos da adubação diferenciada foram da ordem de R\$ 317,27/ha.

Tabela 2 Custos (R\$/ha) da adubação diferenciada realizada em cada gleba e os custos (R\$/ha) da adubação convencional simulada para cada gleba em duas safras

	Safr 2007/2008		Safr 2008/2009	
	Dif	Conv	Dif	Conv
Gleba 1				
Fertilizantes	461,05	541,84	927,33	1206,27
Mão de obra	32,22	43,47	14,07	20,84
Tratores	-	-	14,45	71,42
Adubadoras	-	-	9,62	37,83
Coleta de Amostras de Solo	32,00	0,13	32,00	1,30
Análise de Solo Completa	24,00	1,09	24,00	1,09
Total	549,27	586,54	1021,48	1338,75
Gleba 2				
Fertilizantes	523,29	602,17	1245,30	1289,08
Mão de obra	59,26	70,43	29,23	30,68
Tratores	-	-	18,22	24,90
Adubadoras	-	-	14,66	23,50
Coleta de Amostras de Solo	32,00	0,28	32,00	2,04
Análise de Solo Completa	24,00	2,28	24,00	2,28
Total	638,55	675,16	1363,42	1372,48
Gleba 3				
Fertilizantes	766,52	585,38	1605,18	1772,14
Mão de obra	80,93	48,37	40,13	42,82
Tratores	-	-	34,54	73,10
Adubadoras	-	-	28,25	53,32
Coleta de Amostras de Solo	32,00	0,47	32,00	3,44
Análise de Solo Completa	24,00	3,85	24,00	3,85
Total	903,45	638,07	1764,10	1948,68

Na tabela 1, observa-se também que, para a gleba 2, na safra 2007/2008, na adubação diferenciada, houve uma redução de 8 Kg/ha de P e 35 Kg/ha de K, quando comparado com o método convencional. A recomendação da última safra indicou que a adubação convencional deveria aplicar 28 Kg/ha de K a mais do que a adubação a taxas variadas, e que as recomendações de P foram iguais a zero para ambos os sistemas.

Na gleba 2 foram aplicados, no sistema diferenciado, na safra 2007/2008, 47,5 kg/ha de 00-20-00, 142,6 Kg/ha de Termofosfato e 423 Kg/ha do adubo nitrogenado 43-00-00, e na safra 2008/2009 foram aplicados 423

Kg/ha de 20-00-24, 299,4 Kg/ha de 20-00-00, 80,8 Kg/ha de 27-00-10, 119 Kg/ha de 21-00-00 e 142,6 Kg/ha de 43-00-00. No sistema convencional, a simulação recomendou a aplicação de 58 Kg/ha de 00-20-00, 185 Kg/ha de Termofosfato, 58 Kg/ha de Cloreto de Potássio e 423 Kg/ha de 43-00-00 na safra 2007/2008, e na safra 2008/2009 seriam aplicados 432,5 Kg/ha de 20-00-24, 299,4 Kg/ha de 20-00-00, 80,8 Kg/ha de 27-00-10, 118,8 Kg/ha de 21-00-00, 142,6 Kg/ha de 43-00-00 e 47,5 Kg/ha de Cloreto de Potássio.

As diferenças de adubos aplicados por cada um dos métodos em estudo se refletem nos custos finais, que são apresentados pela tabela 2. A adubação diferenciada, na safra 2007/2008, apresentou redução de custos da ordem de R\$ 36,61/ha quando comparada com a adubação convencional. Esta diferença deve-se à redução dos custos com fertilizantes e mão de obra, que superaram o aumento de custos com a retirada de amostras do solo e sua análise laboratorial. Na safra 2008/2009, a redução de custos da adubação diferenciada comparativamente com a convencional foi da ordem de R\$ 9,07/ha, devido à redução de custos com fertilizantes, mão de obra, tratores e adubadoras. Esta redução de custos foi capaz de absorver o aumento dos gastos com coleta de amostras de solo e com análise laboratorial destas amostras.

Na tabela 1, encontram-se ainda as quantidades de cada elemento químico que deveriam ser aplicadas na gleba 3, em cada uma das duas safras em estudo. Desta forma, na safra 2007-2008, a adubação diferenciada recomendou a aplicação de 59 Kg/ha de K a menos do que a convencional; em contrapartida, a necessidade de P foi de 96 Kg/ha a mais do que a convencional recomendou. Na última safra em estudo, as aplicações em taxas diferenciadas sugeriram a aplicação de 45 Kg/ha de K a menos que a convencional, enquanto as recomendações de P foram iguais a zero para ambos os sistemas.

Ao se observar a diferença de quantidades necessárias de cada um dos elementos na gleba 3, sabe-se que isto gerará uma recomendação diferente para

cada um dos sistemas estudados. Assim a adubação diferenciada, na safra 2007/2008, aplicou 481,5 Kg/ha de 00-20-00, e 513,6 Kg/ha de 43-00-00, enquanto que a simulação do sistema convencional recomendou a aplicação de 98 Kg/ha de Cloreto de Potássio e 513,6 Kg/ha de 43-00-00. Pode-se perceber que na diferenciada houve a necessidade de se utilizar um fertilizante fosfatado, e que na convencional a necessidade foi de um fertilizante potássico. Desta maneira, o tipo de adubo exerceu uma forte influência na diferença entre os custos de aquisição do adubo e de mão de obra para aplicá-lo, diminuindo os custos do sistema convencional em R\$ 265,38/ha em relação à adubação diferenciada (tabela 2).

Na safra 2008/2009, a adubação diferenciada já apresentou custos mais baixos em relação à adubação convencional. A diminuição dos custos foi da ordem de R\$ 184,58/ha, resultantes da redução de gastos com fertilizantes, mão de obra, tratores e adubadoras da ordem de R\$ 166,96/ha, R\$ 2,69/ha, R\$ 38,56/ha e R\$ 25,07/ha, respectivamente. Isto demonstrou que a redução de gastos com estes itens foi primordial para abater o aumento de R\$ 28,56/ha e R\$ 20,15/ha devido, respectivamente, à coleta e análise de amostras do solo.

Bliska et al. (2009), em seu estudos, encontraram uma produtividade média do sul de Minas Gerais de 23,86 sacas/ha, resultando em um custo operacional total médio por hectare da ordem de R\$ 4323,49. No presente trabalho, o maior custo operacional total por hectare foi apresentado pela gleba 3, na safra 2007/2008, cujo valor foi de R\$ 4840,50 para o sistema de adubação diferenciada. Já o menor valor por hectare encontrado foi de R\$ 2771,53 na gleba 1 no sistema de adubação diferenciada na safra 2008/2009 (Tabela 3).

Mesmo a adubação diferenciada apresentando um custo de R\$ 32,00/ha com a operação de amostragem e de R\$ 24,00/ha com as análises laboratoriais, pode-se perceber que o principal fator responsável pelas diferenças entre os dois sistemas analisados foi a diferença entre o tipo de adubo e a quantidade

requerida por cada um dos sistemas. Segundo Duarte, Tavares e Reis (2010), os custos com fertilizante se destacam, por serem os mais elevados na lavoura cafeeira. Faulin (2010), em seus estudos, também percebeu diferenças entre os métodos de aplicação de fertilizantes na forma diferenciada e convencional. O autor concluiu que as adubações em doses diferenciadas reduziram o consumo de nitrogênio em 134,7 kg/ha e de potássio em 82,0 kg/ha. Para o nutriente fósforo, o autor observou que houve um aumento de 65 kg/ha.

Para se chegar à receita, será necessário que se obtenha a sua fonte, ou seja, a quantidade de sacos de café beneficiados que foram produzidos em cada gleba, e relacioná-los com seu preço de venda.

Desta maneira, sob o sistema de adubação diferenciada, a gleba 1 produziu em sua primeira colheita (safra 2007/2008) 341 sacos de café ou 15,5 sacos/ha, e na segunda colheita (safra 2008/2009), 451 sacos ou 20,5 sacos/ha de café beneficiado. A produção da gleba 2 foi de 11,8 sacos/ha ou seja 124 sacos na área total na safra 2007/2008 (primeira colheita), e 19,5 sacos/ha ou 205 sacos na safra 2008/2009. Já a gleba 3, apresentou na sua primeira colheita 9,5 sacos/ha (59,5 sacos na área total), e 21,2 sacos/ha (132,5 sacos na área total) na segunda colheita (safra 2008/2009).

Utilizando o valor médio anual das sacas de café comercializadas da ordem de R\$ 256,51 em 2008 e R\$ 260,69 em 2009 (COOXUPÉ, 2010), a gleba 1 apresentou uma receita por hectare de R\$ 3975,90 na safra 2007/2008 e de R\$ 5344,14 na safra 2008/2009. A gleba 2 apresentou receita de R\$ 3026,82 na safra 2007/2008 e R\$ 5083,45 na safra 2008/2009. A gleba 3 teve uma receita igual a R\$ 2436,84 e R\$ 5526,63, respectivamente, para as safras 2007/2008 e 2008/2009.

Para se calcular a produtividade provinda da adubação convencional, foram simulados dois cenários: o primeiro segue os mesmos valores encontrados na adubação diferenciada; já o segundo, levou em consideração os resultados

encontrados por Faulin (2010). Desta forma, no cenário dois, o sistema convencional, a gleba 1 produziria 319 sacos de café ou 14,5 sacos/ha, obtendo uma renda de R\$ 3719,39 por hectare na safra 2007/2008, e na safra seguinte produziria 429 sacos ou 19,5 sacos/ha, resultando em uma renda por hectare de R\$ 5083,45. A gleba 2 apresentaria uma produtividade de 113,7 sacos ou 10,8 sacos/ha, e uma renda por hectare de R\$ R\$ 2770,31 na safra 2007/2008, e na safra subsequente uma receita de R\$ 4822,76 provinda da produção de 18,5 sacos/ha de café beneficiado. Ao simularmos a gleba 3, esta apresentaria na safra 2007/2008 uma renda de R\$ 2180,33 referentes à produção de 8,5 sacos/ha de café, e na safra 2008/2009 uma produtividade de 20,2 sacos/ha, resultando na renda de R\$ 5265,94 por hectare.

A tabela 3 mostra os custos totais, considerando todas as operações realizadas em cada gleba, para cada hectare, e as receitas por hectare obtidas em cada gleba e em cada safra estudada, além de mostrar se houve lucro ou prejuízo da atividade, seguindo os dois cenários em estudo.

Pode-se perceber que no cenário 1, onde a produtividade dos dois sistemas foi considerada a mesma, o sistema de adubação diferenciada se mostrou mais vantajoso na gleba 1, demonstrando maior lucro nas duas safras em estudo. Na gleba 2, a adubação diferenciada apresentou um menor prejuízo na primeira safra, e um lucro maior na segunda safra. Na gleba 3, a adubação diferenciada apresentou maior prejuízo na primeira safra, e um lucro maior na última safra, quando comparado com o sistema de adubação convencional. O cenário dois apresentou o mesmo padrão do cenário 1.

Para obtenção do resultado geral, considerou-se a soma dos valores dos resultados das duas safras deflacionados, seguindo o Índice Geral de Preços - Disponibilidade Interna (IGP-DI), tomando como base a média do ano de 2008. Quando se considera o resultado geral do cenário 1, pode-se perceber que a agricultura de precisão apresentou lucro maior para as glebas 1 e 2, e um maior

prejuízo para a gleba 3. No cenário 2, a agricultura de precisão se mostrou mais vantajosa para todas as glebas. Ressalta-se que, com a produtividade menor no sistema convencional, a gleba 2 apresentaria prejuízo, o que não foi apresentado no sistema diferenciado. Nota-se, ainda, que o aumento de produtividade na adubação diferenciada garantiria à gleba 3 um menor prejuízo acumulado.

Tabela 3 Custos, receitas e o resultado entre Receitas menos os Custos da gleba 1, 2 e 3 nas safras 2007/2008 e 2008/2009 segundo os 2 cenários em estudo (R\$/ha) para os dois sistemas de adubação

Gleba	Aplicação	Safrá 2007/2008			Safrá 2008/2009			Resultado Geral
		Custos	Receitas	Resultado	Custos	Receitas	Resultado	
Cenário 1								
1	Dif	3200,50	3975,91	775,41	2771,53	5344,15	2572,61	3399,47
	Conv	3237,77	3975,91	738,13	3088,80	5344,15	2255,35	3038,59
2	Dif	4323,74	3026,82	-1296,92	3538,69	5083,46	1544,76	278,74
	Conv	4360,35	3026,82	-1333,53	3547,76	5083,46	1535,70	232,89
3	Dif	4840,56	2436,85	-2403,71	4476,31	5526,63	1050,31	-1332,39
	Conv	4575,18	2436,85	-2138,34	4660,89	5526,63	865,73	-1255,29
Cenário 2								
1	Dif	3200,50	3975,91	775,41	2771,53	5344,15	2572,61	3399,47
	Conv	3237,77	3719,40	481,62	3088,80	5083,46	1994,66	2516,18
2	Dif	4323,74	3026,82	-1296,92	3538,69	5083,46	1544,76	278,74
	Conv	4360,35	2770,31	-1590,04	3547,76	4822,77	1275,01	-289,53
3	Dif	4840,56	2436,85	-2403,71	4476,31	5526,63	1050,31	-1332,39
	Conv	4575,18	2180,34	-2394,85	4660,89	5265,94	605,04	-1777,70

4 CONCLUSÕES

A adubação diferenciada foi viável no acumulado das duas safras, independente do tamanho da área, quando esta proporcionou um aumento de 1 saca/ha em relação ao sistema de adubação convencional. Quando os sistemas apresentaram produtividades iguais, a agricultura de precisão foi viável economicamente para as áreas maiores, como foi observado nas glebas 1 e 2 com áreas de 22 ha e 10,52 ha, respectivamente.

Quando se trata das safras em separado, a adubação diferenciada foi vantajosa economicamente para a área de 22 ha e de 10,52 ha nas duas safras em estudo. Para a área de 6,23 ha, somente foi vantajosa para a última safra, independente do cenário.

Pôde-se perceber, neste trabalho, uma diferença entre os elementos químicos recomendados e também diferenças nas quantidades a serem aplicadas em cada um dos sistemas, e estas diferenças impactaram nos custos de produção.

Este estudo mostrou ainda a importância de não mais tratarmos a lavoura de forma homogênea, reconhecendo, assim, a existência da variabilidade dos nutrientes nas diversas localidades da lavoura. Desta forma, as técnicas propostas pela agricultura de precisão devem ser consideradas como importantes ferramentas para auxiliar o cafeicultor no manejo diferenciado da lavoura.

REFERÊNCIAS

- BATTE, M. T.; EHSANI, M. R. The economics of precision guidance with auto-boom control for farmer-owned agricultural sprayers. **Computers and Electronics in Agriculture**, New York, v. 53, n. 1, p. 28-44, Aug. 2006.
- BLISKA, F. M. M. et al. Custos de produção de café nas principais regiões produtoras do Brasil. **Informações Econômicas**, São Paulo, v. 29, n. 8, p. 5-20, ago. 2009.
- CARVALHO, G. R. et al. Comportamento de progênies F4 obtidas por cruzamentos de 'Icatu' com 'Catimor'. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n. 1, p. 47-52, jan./fev. 2009.
- COOPERATIVA REGIONAL DE CAFEICULTORES EM GUAXUPÉ. **Preço histórico do café**: preço médio das sacas de café comercializado na Cooxupé em R\$. Disponível em:
<<http://portaldb.cooxupe.com.br:8080/porta/precohistoricocafe.jsp>>. Acesso em: 3 jul. 2010.
- CUSTÓDIO, A. A. P.; GOMES, N. M.; LIMA, L. A. Efeito da irrigação sobre a classificação do café. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 3, p. 691-701, set./dez. 2007.
- DERCON, G. et al. Spatial variability in crop response under contour hedgerow systems in the Andes region of Ecuador. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 86, n. 1/2, p. 15-26, Apr. 2006.
- DUARTE, S. L.; TAVARES, M.; REIS, E. A. Comportamento das variáveis dos custos de produção da cultura do café no período de formação da lavoura. In: CONGRESSO DE CONTROLADORIA E CONTABILIDADE, 10., 2010, São Paulo. **Anais...** São Paulo: USP, 2010. 1 CD-ROM.
- FAULIN, G. C. **Influência da adubação em doses variadas na produtividade e no estado nutricional da cultura do café (*Coffea arabica* L.)**. 2010. 103 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2010.

HURLEY, T.; OISHI, K. G.; MALZER, G. Estimating the potential value of variable rate nitrogen applications: a comparison of spatial econometric and geostatistical models. **Journal of Agricultural and Resource Economics**, Bozeman, v. 30, n. 2, p. 231-249, 2005.

MZUKU, M. et al. Spatial variability of measured soil properties across site-specific management zones. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 69, n. 5, p. 1572-1579, May 2005.

OLIVEIRA, E. et al. Custos operacionais da colheita mecanizada do cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 6, p. 827-831, jun. 2007a.

_____. Eliminação de linhas em cafeeiros adensados por meio semimecanizado. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 6, p. 1826-1830, nov./dez. 2007b.

RIBEIRO, M. S. et al. Efeitos de águas residuárias de café no crescimento vegetativo de cafeeiros em seu primeiro ano. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 29, n. 4, p. 569-577, out./dez. 2009.

RIDER, T. W. et al. An economic evaluation of site-specific herbicide application. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 7, n. 6, p. 379-392, June 2006.

ROBERT, P. C. **The economical feasibility of precision agriculture**. Minnesota: Precision Agriculture Center, 2003. 11 p.

SILVA, C. B. et al. The economic feasibility of precision agriculture in Mato Grosso do Sul State, Brazil: a case study. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 8, n. 11, p. 255-265, Nov. 2007.

SILVA, C. B.; MORETTO, A. C.; RODRIGUES, R. L. Viabilidade econômica do uso da agricultura de precisão: o caso do Paraná. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA E SOCIOLOGIA RURAL, 42., 2004, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: Sociedade Brasileira de Economia e Sociologia Rural, 2004. 1 CD-ROM.

SILVA, F. M. da et al. Variabilidade espacial de atributos químicos e produtividade da cultura do café em duas safras agrícolas. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 1, p. 231-241, jan./fev. 2008.

SILVA, J. M.; REIS, R. P. Custo de produção do café na região de Lavras, MG: estudo de casos. **Ciência Agrotecnologia**, Lavras, v. 25, n. 6, p. 1287-1294, nov./dez. 2001.

TOZER, P. R. Uncertainty and investment in precision agriculture: is it worth the money? **Agricultural Systems**, Northam, v. 100, n. 1/3, p. 80-87, 2009.

CAPÍTULO 3

Variabilidade espacial e temporal de atributos químicos do solo e da produtividade de uma lavoura cafeeira

RESUMO

A agricultura de precisão surge como uma importante ferramenta para melhorar o gerenciamento da produção cafeeira, mostrando que o conhecimento de determinadas características do solo associado à resposta de produção do cafeeiro pode facilitar a aplicação localizada e racional dos insumos, com resultados ambientais e econômicos positivos. Desta forma, o presente trabalho objetivou utilizar ferramentas de agricultura de precisão aliadas a ferramentas da geoestatística para avaliar as variáveis fósforo, potássio e produção do cafeeiro, em três safras agrícolas, por meio de análises dos semivariogramas e de mapas de krigagem, e demonstrar que estas ferramentas são de grande valia para o manejo da cultura do café. Este trabalho foi conduzido na fazenda Brejão no município de Três Pontas, Minas Gerais, nas safras 2007/2008, 2008/2009 e 2009/2010, utilizando-se os atributos químicos do solo fósforo e potássio, amostrados por um quadriciclo com calador e dados de produção que foram obtidos por meio de colheita manual, ambos em pontos georreferenciados. Os atributos apresentaram grande variação no tempo, e para o fósforo houve uma maior uniformização ao longo das três safras estudadas. O modelo gaussiano ajustou-se para a variável produtividade em todos os anos estudados, e para o potássio em 2007 e 2008. O modelo exponencial se ajustou para o fósforo em 2007 e 2009, e o modelo esférico ajustou-se para o fósforo em 2008 e para o potássio em 2009.

Palavras-chave: Geoestatística. Agricultura de Precisão. Krigagem. Semivariograma. Cafeeiro

ABSTRACT

The Precision Agriculture appears as an important tool to the management of coffee farms where the knowledge of some soil features associated with the coffee production could help the site specific application of fertilizing with positive environmental and economic results. So the aim of this article was to use precision agriculture and geostatistics to evaluate the variables phosphorus, potassium and the coffee plant yield, in three different crops, by evaluating the semivariogram and kriging maps and show that these tools are important to the coffee management. This study was conducted on the Brejão farm in Três Pontas, Minas Gerais, in 2007/2008, 2008/2009 e 2009/2010 crop. As a data base were used chemical soil data obtained by sampling in a georeferenced location using a quadricycle with a sampler and a GPS, and the yield data was obtained from manual harvest on the georeferenced location. The attributes showed a huge variation on time where the phosphorus have the major unimormization during the tree crops. The Gaussian model adjust to all crops to the coffee yield an to the potassium in 2007 and 2008. The exponential model adjusted to phosphorus in 2007 and 2009. The spherical adjusted to phosphorus 2008 and potassium 2009.

Keywords: Geostatistic. Precision Agriculture. Kriging. Semivariogram. Coffee plant.

1 INTRODUÇÃO

O café é um dos produtos mais importantes do agronegócio brasileiro. De acordo com o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 2009), o Brasil é o maior produtor do mundo, correspondendo a 35,71% da produção mundial, enquanto o segundo maior produtor, o Vietnã, corresponde a somente 12,42%. Sendo esta cultura tão importante para o Brasil, o estudo mais aprofundado de novas técnicas que visem ao aumento de produtividade, redução de custos e uso racional de fertilizantes torna-se de grande interesse.

A produtividade da cultura do café *Coffea arabica* L. sofre oscilações devido a fatores climáticos (CARVALHO et al., 2004), ocorrência de infestações fitossanitárias (CHAULFON et al., 1978), característica fisiológica da cultura (RENA et al., 1996), sistema de plantio adotado, densidade e população de planta (TOLEDO; BARROS, 1999), declividade e posição topográfica (SOUZA et al., 2004), dentre outros fatores ainda não bem elucidados (CARVALHO et al., 2006). Devido à diversidade de fatores que influenciam a produtividade do cafeeiro, o manejo da lavoura de forma homogênea pode acarretar a redução de rentabilidade do produtor rural. Nesse sentido, análises espaciais de produtividade tendem a possibilitar o gerenciamento mais eficiente do processo produtivo (ALVES et al., 2009).

Outro fator muito importante de ser analisado é o solo. Na atividade cafeeira, ainda hoje, muitos produtores não realizam análises do solo com a frequência necessária, desconhecendo os parâmetros mínimos para o manejo da fertilidade do solo de forma racional e eficiente. De acordo com Silva et al. (2003), o estudo da variabilidade espacial de propriedades do solo tem grande importância na escolha de uma área experimental, na coleta de amostras e interpretação de resultados, no levantamento e classificação de solos e nos esquemas de uso racional de fertilizantes.

A agricultura de Precisão surge como um conjunto de tecnologia capaz de auxiliar o produtor rural a identificar as estratégias a serem adotadas para aumentar a eficiência no gerenciamento do processo de produção, podendo maximizar a rentabilidade das colheitas e reduzir os custos de aplicação de insumos, tornando a atividade mais competitiva.

A geoestatística é uma ferramenta importante para análise de dados no âmbito da agricultura de precisão. Segundo Vieira (2000), o objetivo da geoestatística aplicada à agricultura de precisão é caracterizar a magnitude da variabilidade espacial dos atributos do solo e das plantas, e fazer estimativa, utilizando o princípio da variabilidade espacial a fim de se identificarem inter-relações destes atributos no espaço e no tempo, além de permitir estudar padrões de amostragem adequada.

Este estudo teve como objetivo utilizar técnicas de agricultura de precisão aliadas às ferramentas da geoestatística, para avaliar os atributos químicos do solo, fósforo e potássio, e a produtividade de uma lavoura cafeeira. Objetivou-se, também, realizar ajustes de semivariogramas a partir de diferentes métodos e modelos de forma a encontrar os melhores semivariogramas para a criação de mapas de krigagem, de grande valia para o manejo da cultura do café.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi desenvolvido na fazenda Brejão, localizada no município de Três Pontas, sul de Minas Gerais, em uma área de 22 hectares de lavoura de cafeeiro (*Coffea arabica* L.) da cultivar Topázio plantada em dezembro de 2005 no espaçamento de 3,8m entre linhas e 0,8m entre plantas, totalizando 3289 plantas.ha⁻¹. As coordenadas geográficas médias da área são de 21°25'58" de latitude sul e 45°24'51" de longitude oeste de Greenwich. Os pontos limites da área foram obtidos por meio do uso de GPS geodésico.

Para a coleta dos dados de produtividade, demarcou-se na área uma malha irregular num total de 54 pontos amostrais georreferenciados no ano de 2008 (Gráfico 1A), e uma malha irregular com 48 pontos no ano de 2009 e 2010 (Gráfico 1B). Para a demarcação destes pontos, foi utilizado o GPS de navegação Garmim GPS V. Cada ponto amostral corresponde a quatro plantas: duas plantas localizadas na rua de cafeeiros onde o ponto foi georreferenciado e as outras duas plantas localizadas em cada rua lateral ao ponto de referencia.

A produtividade de café (L.planta⁻¹) foi obtida por meio da colheita manual sobre panos das 4 plantas em torno do ponto amostral, e o volume colhido de cada planta, após a abanação, foi medido em um recipiente graduado em litros. Após esta medição, foi retirada a média de produção destas 4 plantas, resultando no valor de produção para o ponto amostral.

Para a coleta dos dados de fertilidade do solo, demarcou-se na área uma malha de 1 ponto por hectare, num total de 22 pontos amostrais georreferenciados (Gráfico 2A e 2B). Para a demarcação dos pontos de coleta e para amostragem de solo, utilizou-se um quadriciclo com broca pneumática e GPS geodésico. Em cada hectare foi realizado um caminhamento aleatório para a coleta de 8 subamostras que foram homogeneizadas para gerar 1 amostra

composta. Tais subamostras foram retiradas na projeção da saia do cafeeiro de 0 a 20 cm de profundidade, no mês de julho dos anos de 2007, 2008 e 2009

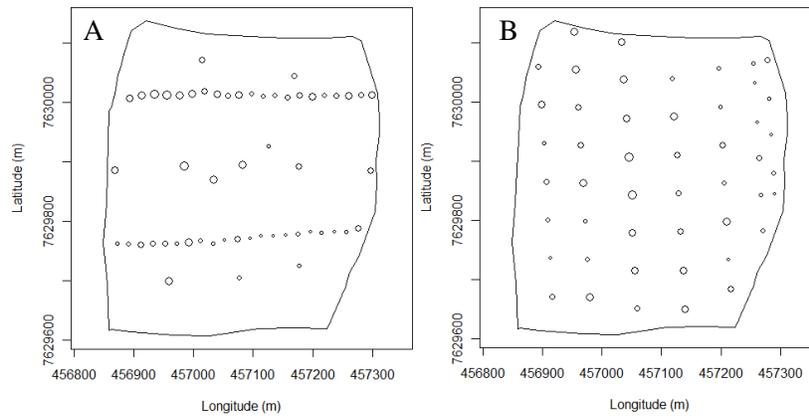


Gráfico 1 Grade de pontos amostrais georreferenciados para a coleta dos dados de produtividade nos anos de 2008 (a), 2009 (b) e 2010 (b)

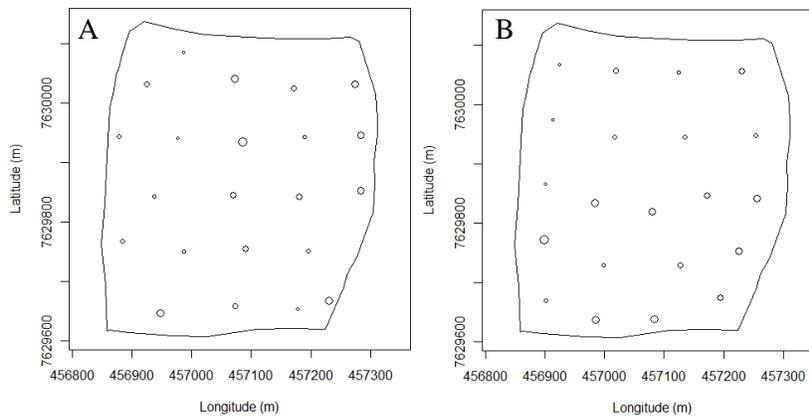


Gráfico 2 Grade de pontos amostrais georreferenciados para a coleta dos dados de solo no ano de 2007 (a), 2008 (b) e 2009 (b)

As amostras de solo foram enviadas ao Laboratório de Análise de Solo e Folha da Cooperativa dos Cafeicultores da Zona de Três Pontas (COCATREL) para se procederem as devidas análises dos atributos Fósforo (P) e Potássio (K).

A dependência espacial dos atributos do solo e da produção de café foram analisadas por meio de ajustes de semivariogramas, clássico e robusto, e interpolação por Krigagem ordinária. O semivariograma clássico foi estimado como segue:

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

onde $N(h)$ 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, conforme descrito por Vieira et al. (1983).

De acordo com Cressie e Hawkins (1980), o estimador robusto dos valores do semivariograma é menos susceptível à influência dos valores da massa de dados do que o estimador clássico. Assim o estimador robusto é descrito por:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2} \frac{\left[N(h)^{-1} \sum_{N(h)} \sqrt{|Z(s+h) - Z(s)|} \right]^4}{0.457 + \frac{0.494}{N(h)}}$$

Este estimador assume que as diferenças $Z(s+h) - Z(s)$ são distribuídos de forma normal para todos os pares $(s+h, s)$. A transformação da raiz quadrada das diferenças é apresentada como tendo momentos parecidos com aqueles da distribuição normal e o denominador da equação é a correção de tendências.

O ajuste dos modelos de semivariogramas foi escolhido em função dos Mínimos Quadrados Ordinários (OLS - *ordinary least square*), Mínimos Quadrados Ponderados (WLS - *weighted least squares*) estimados pelo modo clássico e pelo modo robusto e a Máxima Verossimilhança (ML - *maximum likelihood*) e a Máxima Verossimilhança Restrita (REML - *restricted maximum likelihood*) usando o estimador clássico. Foram testados, para todos os métodos, os modelos esférico, exponencial e o gaussiano, o que totalizou 18 semivariogramas para cada variável. Para a escolha dos métodos e dos modelos de ajuste do semivariogram, foi levada em consideração a validação cruzada dos dados (Figura 1). Após o ajuste dos semivariogramas foi realizada a interpolação dos dados por krigagem ordinária de forma a possibilitar a visualização dos padrões de distribuição espacial das variáveis na lavoura.

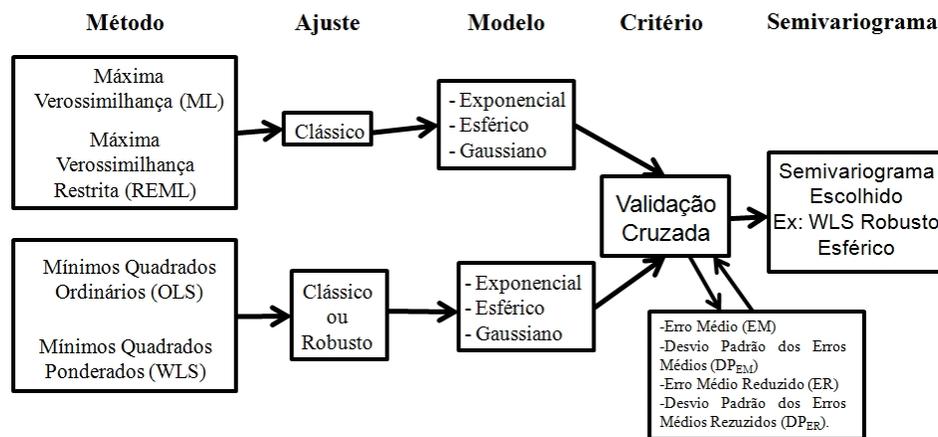


Figura 1 Esquema da escolha do melhor semivariograma

De acordo com Isaaks e Srivastava (1989), a validação cruzada é a técnica de avaliação de erros de estimativa que permite comparar valores preditos com os amostrados. O valor da amostra, em certa localização $Z(s_i)$, é temporariamente descartado do conjunto de dados e, então, é feita uma previsão

por krigagem no local $\hat{Z}(s_{(i)})$, usando-se as amostras restantes. Desta forma, é possível retirar alguns valores que serão muito úteis para a escolha do método como o Erro Médio (EM), o Desvio Padrão dos Erros Médios (DP_{EM}), o Erro Médio Reduzido (ER), e o Desvio Padrão dos Erros Médios Reduzidos (DP_{ER}). Assim, o Erro Médio por validação cruzada (EM) é obtido pela seguinte expressão:

$$EM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z(s_i) - \hat{Z}(s_{(i)}))$$

onde n é o número de dados; $Z(s_i)$, valor observado no ponto s_i ; e $\hat{Z}(s_{(i)})$ valor predito por krigagem ordinária no ponto s_i , sem considerar a observação $Z(s_i)$ (FARACO et al., 2008).

Segundo Cressie (1993) e McBratney e Webster (1986), o erro médio reduzido (ER), desvio padrão dos erros médios (DP_{EM}), desvio padrão dos erros reduzidos (S_{ER}) podem ser utilizados para avaliar os modelos. O erro médio reduzido (ER) é definido pela equação:

$$ER = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{Z(s_i) - \hat{Z}(s_{(i)})}{\sigma(\hat{Z}(s_{(i)}))}$$

onde $\sigma(\hat{Z}(s_{(i)}))$ é o desvio padrão da krigagem no ponto s_i , sem considerar a observação $Z(s_i)$.

O desvio padrão dos erros reduzidos (S_{ER}) é obtido a partir de:

$$S_{ER} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Z(s_i) - \hat{Z}(s_{(i)})|}{\sigma(\hat{Z}(s_{(i)}))}}$$

A diferença média entre os valores será mais próxima de zero quanto melhor for a estimativa. Os critérios de escolha baseados na validação cruzada devem encontrar o valor de EM e de ER mais próximo de zero, o valor DP_{EM} deve ser o menor, e o valor de S_{ER} deve ser o mais próximo de um.

O georreferenciamento da área foi realizado com base nas coordenadas geográficas obtidas pelo GPS na fase de demarcação dos pontos amostrais. Para a análise geoestatística e para a plotagem dos mapas foi utilizado sistema computacional estatístico R, por meio da biblioteca geoR (RIBEIRO; DIGGLE, 2001). Os mapas foram gerados na coordenada Universal Transversa de Mercator (UTM) na zona 23K, na qual está inserida a região de Três Pontas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise descritiva dos atributos do solo, potássio (mg dm^{-3}) e fósforo (mg dm^{-3}) nos anos de 2007, 2008 e 2009, e da produtividade do cafeeiro (L.planta^{-1}) nos anos de 2008, 2009 e 2010 é apresentada na tabela 1.

Tabela 1 Estatística descritiva para as variáveis: potássio (mg dm^{-3}) e fósforo (mg dm^{-3}), nos anos de 2007, 2008 e 2009, e da produtividade do cafeeiro (L.planta^{-1}) em 2008, 2009 e 2010

	Mín	Máx	\bar{X}	Md	DP	Var	CV	k
K 07	143	226,00	185,20	186	24,69	609,68	13,33	-0,90
K 08	88	207,00	150,50	150	38,66	1494,76	25,69	-1,46
K 09	88	174,00	116,90	113	24,05	578,53	20,58	1,38
P 07	3	64,00	16,14	8,00	17,49	305,93	108,39	3,51
P 08	1	35,00	10,00	7,00	9,13	83,40	91,32	2,38
P 09	3	66,00	9,19	5,00	13,49	182,06	146,82	17,74
Prod 08	0.03	3,95	1,45	1,21	1,36	1,85	50,01	0,31
Prod 09	0.68	6,49	2,72	2,46	0,96	0,93	33,96	-1,22
Prod 10	1,08	10,2	4,93	4,59	2,07	4,41	41,96	-0,30

Mín – valor mínimo da variável; Md – Mediana; \bar{X} – Média; Máx – Valor máximo da variável; DP - Desvio Padrão; Var – Variância; CV - Coeficiente de variação; k- Coeficiente de Curtose

Segundo Gomes e Garcia (2002), os coeficientes de variação (CV) menores que 10% indicam homogeneidade, e Frogbrook et al. (2002), citam que valores elevados de CV podem ser considerados como os primeiros indicadores da existência de heterogeneidade nos dados. Pela análise da tabela 1, nenhuma variável estudada apresentou coeficiente de variação menor que 10%, indicando desta foram que todas possuíam variabilidade. O fósforo, em todos os anos, apresentou os maiores valores de CV. Silva et al. (2008), em seus estudos, também encontraram valores de CV alto para o P.

A partir da análise dos valores mínimos e máximos, e também da média dos atributos, tanto do solo quanto da planta, é possível perceber que existe uma grande variação nos dados. Esta grande amplitude revela os problemas que

podem ocorrer quando se usa a média dos valores para o manejo da fertilidade, pois em alguns locais da área a aplicação de fertilizante será inferior à dosagem necessária, em outros será aplicado de forma ideal, e em outros, ainda, poderá haver aplicação excessiva. Dessa forma, a adubação em taxas diferenciadas surge para corrigir tais problemas.

Somente o conhecimento desta amplitude, porém, não é suficiente para saber quais são os locais onde se encontram os altos teores, e os locais onde se encontram os teores mais baixos de uma determinada variável. Neste caso, torna-se necessário lançar mão de ferramentas geoestatísticas, para que se possa identificar a variabilidade espacial dos dados, bem como para realizar a produção de mapa, a fim de possibilitar o gerenciamento satisfatório das intervenções necessárias.

Faraco et al. (2008), avaliando a qualidade do ajuste dos modelos teóricos espaciais segundo o Critério de Informação de Akaike, de Filliben, de Validação Cruzada, e o valor máximo do logaritmo da função verossimilhança, concluíram que o método da Validação Cruzada foi o mais adequado para escolha do melhor ajuste do modelo de variabilidade espacial, resultando em mapas temáticos mais acurados.

Neste trabalho, a validação cruzada foi o critério utilizado para a escolha dos métodos de ajuste do semivariograma acompanhando a sequência: primeiramente avaliou-se o Erro Médio (EM), o qual deve ser o mais próximo de zero, depois foi avaliado o Desvio Padrão do Erro Médio (DP_{EM}), observando o menor valor possível; em seguida avaliou-se o Erro Médio Reduzido (ER), que deveria ser o mais próximo de zero, e por fim o valor Desvio Padrão dos Erros Médios Reduzidos (S_{ER}) mais próximo de 1.

Foram encontrados erros médios variando de 0 (Potássio em 2009) a 0,1254 (Fósforo 2007), os valores do desvio padrão do erro médio variaram de 0,6907 (Produtividade em 2008) e 30,32 (Potássio 2008), o erro médio reduzido

teve valores -0,00001 (Fósforo 2008) a 0,015 (Produtividade 2008), e o desvio padrão dos erros reduzidos apresentou valores variando de 1,01155 para o fósforo em 2007 e 2,235 para o Potássio 2009. Os métodos e modelos que melhor se ajustaram às variáveis, bem como os parâmetros estimados dos semivariogramas experimentais e parâmetros da validação cruzada podem ser observados na tabela 2.

Na escolha dos métodos de ajuste dos modelos de semivariograma, a variável fósforo teve seu ajuste segundo o Método dos Quadrados Mínimos Ponderados utilizando o estimador clássico (WLS-C) para os anos de 2007 e 2008, e robusto (WLS-R) para o ano de 2009; o WLS-C ajustou-se também para o potássio no ano de 2008. Para os dois outros anos, a variável potássio teve seu semivariograma ajustado pelo método da máxima verossimilhança (ML). Para a produtividade, cada ano ajustou-se a um método.

Baseando-se na metodologia de análise geoestatística, foi possível quantificar a magnitude e a estrutura de dependência espacial de todas as variáveis e em todos os anos estudados, pois o valor absoluto da diferença entre duas amostras observadas aumentou quando as amostras se distanciavam, até um valor no qual a localidade não mais exercia influência, o que culminou na estabilidade do semivariograma experimental a partir da distância que separa a variabilidade estruturada da aleatória, o que pode ser observado no Gráfico 3.

Tabela 2 Métodos, Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas experimentais para as variáveis: potássio (mg dm^{-3}) e fósforo (mg dm^{-3}) nos anos de 2007, 2008 e 2009 e para a produtividade da cultura do cafeeiro (L planta^{-1}) nos anos de 2008, 2009 e 2010

	Método	Modelo	C₀	C₁	C₀+C₁	a	EM	DP_{EM}	ER	S_{ER}
P 07	WLS -C	Exp	0,00	351,34	351,34	47,33	0,12540	18,853	0,00335	1,012
P 08	WLS - C	Esf	0,00	74,59	74,59	103,44	-0,00019	9,654	-0,00001	1,091
P 09	WLS - R	Exp	10,00	27,48	37,48	25,94	0,00408	14,120	0,00033	2,253
K 07	ML	Gaus	272,58	306,87	579,45	98,45	0,01602	23,754	0,00038	1,035
K 08	WLS - C	Gaus	402,98	2426,33	2829,3	317,24	-0,01561	30,322	-0,00633	1,237
K 09	ML	Esf	497,63	53,35	550,98	81,67	0,00000	25,255	0,00000	1,050
Prod 08	ML	Gaus	0,35	0,59	0,93	122,54	0,02203	0,690	0,01539	1,014
Prod 09	OLS - R	Gaus	0,41	2,07	2,48	127,87	-0,00002	1,223	0,00044	1,447
Prod 10	REML	Gaus	2,82	2,01	4,83	123,48	0,00076	1,935	0,00017	1,011

C₀ – Efeito Pepita; C₁ - Contribuição; C₀+C₁ – Patamar; a - alcance; EM - Erro Médio; DP_{EM} - Desvio Padrão do Erro Médio; ER - Erro Médio Reduzido; S_{ER} Desvio Padrão dos Erros Médios Reduzidos; WLS – C – Mínimos Quadrados Ponderados estimador Clássico; WLS – R – Mínimos Quadrados Ponderados estimador Robusto; ML – Máxima Verossimilhança; REML – Máxima Verossimilhança Restrita; OLS – R - Mínimos Quadrados Ordinário estimador Robusto; Esf – Esférico; Exp – Exponencial; Gaus – Gaussiano.

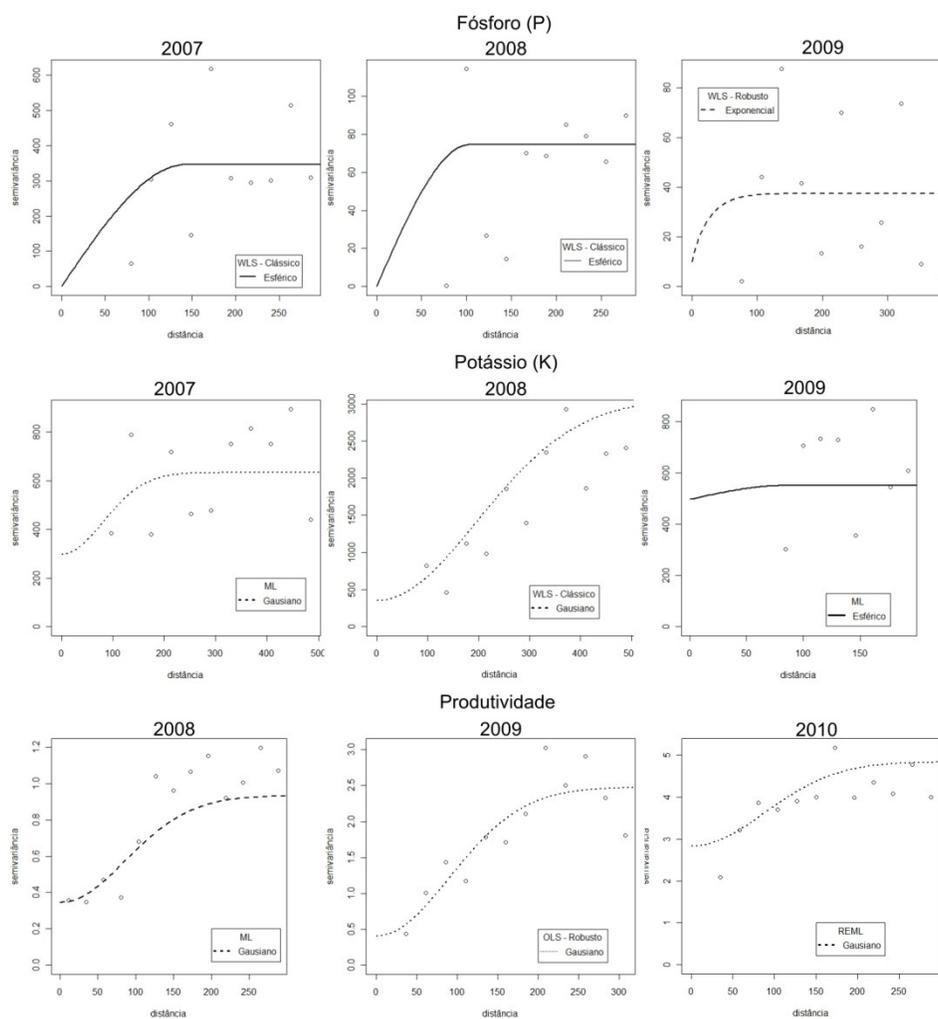


Gráfico 3 Semivariogramas escolhidos em função do método e modelo para as variáveis químicas do solo: fósforo (mg dm^{-3}) e potássio (mg dm^{-3}) nos anos de 2007, 2008 e 2009, e da produtividade (L.planta^{-1}) 2008, 2009 e 2010

Segundo Grego e Vieira (2005), o modelo matemático esférico é o que predomina nos trabalhos em ciência do solo. Silva et al. (2008), realizando estudos em uma lavoura cafeeira, encontram que o modelo esférico ajustou-se tanto para as variáveis fósforo e potássio quanto para a produtividade. Silva et

al. (2010), em seus estudos de uma lavoura cafeeira em três safras, ajustaram o modelo esférico para a produtividade. Neste trabalho, porém, os resultados foram diferentes, sendo que o modelo esférico só foi ajustado duas vezes, o que pode ser justificado pelo fato de os trabalhos não utilizarem o modelo gaussiano e ainda por não terem testado outros métodos de ajustes. No presente trabalho, a variável fósforo ajustou-se ao modelo exponencial nos anos de 2007 e 2009, e ao modelo esférico no ano de 2008; o potássio, nos dois primeiro anos ajustou-se ao modelo gaussiano, e para o ano de 2009 ao modelo esférico; a produtividade ajustou-se ao modelo gaussiano em todos os anos estudados.

De acordo com McBratney e Webster (1986), o efeito pepita é um importante parâmetro do semivariograma, e indica variabilidade não explicada, considerando a distância de amostragem utilizada. Percebeu-se que o efeito pepita zero foi encontrado para a variável P em 2007 e 2008. O efeito pepita para a variável K variou de 272,58 em 2007 a 497,63 em 2009. Para a produtividade, a variação do efeito pepita foi de 0,35 em 2008 a 2,87 em 2010.

Os valores do alcance relativos aos semivariogramas têm uma importância considerável na determinação do limite da dependência espacial, o que pode ser também um indicativo do intervalo entre unidades de mapeamento de solos (TRANGMAR, 1985; WEBSTER, 2000) ou também dos atributos relacionados às plantas. As variáveis estudadas apresentaram diferentes alcances de dependência espacial: a variável P no ano de 2009 apresentou o menor alcance (25,94 m), e a variável K em 2008 apresentou o maior alcance (317,24 m). Para a produtividade, percebeu-se que os valores de alcance variando de 122,54 m a 127,87 m.

Silva et al. (2008), estudando duas safras de uma lavoura cafeeira (2002/2003 e 2003/2004), encontraram que a variável P apresentou efeito pepita de 0,09 e um alcance de 86,05m na primeira safra e 0,52 e 210,04 m, respectivamente, na segunda safra. Para o K os valores da primeira safra foram

579 e 142,08 m, e na segunda safra “C₀” igual a 973 e “a” igual a 188,02m. Para a produtividade, o autor encontrou os valores de efeito pepita iguais a 0,58 e 0,79, e alcance de 65,04 m e 60,43m, respectivamente, para a primeira e segunda safra. Silva et al. (2010) estudando a produtividade de cafeeiros em três safras encontraram valores de alcance iguais a 21,3m, 27,6m, 36,0m e efeito pepita igual a 0 para as duas primeiras safras, e 0,76 na última safra estudada. Estas diferenças encontradas entre os autores, podem ser devidas à idade das plantas, ao relevo da lavoura e tratamentos fitossanitários realizados.

Posteriormente foram estimados valores da produtividade, do fósforo e do potássio pela krigagem ordinária, tendo como base a dependência espacial dos modelos de semivariogramas. Desta forma, pôde-se observar que a krigagem apresentou um bom desempenho para estimar os valores não amostrados destas variáveis, devido à realização dos melhores ajustes do semivariograma. Sendo assim, foi possível construir mapas de distribuição espacial para todas as variáveis deste estudo (Gráfico 4), que permitiram visualizar a variabilidade espacial na área em cada ano, além de possibilitar a observação da variabilidade temporal.

Uma análise visual em todos os mapas mostra como os atributos químicos do solo e da produtividade variam no espaço e também no tempo. Percebeu-se que cada variável possuiu um padrão de distribuição espacial e temporal diferenciado.

Pela análise dos mapas de fósforo, percebe-se uma homogeneização da distribuição espacial ao longo dos anos, ou seja, com o passar dos anos o fósforo diminuiu sua dispersão na área. Isto, provavelmente, se deve aos efeitos da observação diferenciada da área e das recomendações de adubação proposta pela agricultura de precisão, pois caso houvesse aplicação convencional de fósforo, provavelmente os dados seriam mais heterogêneos na área.

Observando-se os mapas de potássio, ano a ano, percebem-se, facilmente, as localidades em que era necessária a aplicação de adubos potássicos, e os locais onde ela não se fazia necessária. Portanto, a utilização destes mapas contribuiu para o manejo diferenciado da lavoura, permitindo assim aplicações mais eficientes de fertilizantes. Também foi possível perceber como este atributo variou ao longo dos 3 anos em estudo.

A partir da análise dos mapas citados, fica evidente o problema de se usar o valor médio para recomendação de adubação do solo deixando claros os locais onde se necessitam de aplicações e locais onde não foram necessários a aplicação de fertilizantes.

A produtividade média encontrada na colheita de 2008 foi de 1,45 (1 planta⁻¹), 2,72 (1 planta⁻¹) em 2009, e para o ano de 2010 a produtividade média desta lavoura foi de 4,93 (1 planta⁻¹). Ao se analisar o mapa de produtividade do ano de 2008 e 2009 pôde-se perceber que a região central destes mapas representa as maiores produtividades da lavoura, enquanto que na parte mais oeste do mapa a produtividade é menor. No ano de 2010, o local de maior produtividade foi a região sul da área, e locais de baixa produtividade ficaram dispersos na área. Desta forma, a utilização destes mapas deve vir em conjunto com a manipulação dos mapas de atributos químicos do solo, objetivando-se a encontrar os motivos da ocorrência da variação da produtividade, principalmente em se tratando de baixas produtividades.

Os mapas de produtividade podem ainda ser utilizados no gerenciamento da colheita, na estimativa de produtividade e na contratação de pessoal para a colheita manual. Na colheita mecanizada do café, podem ser utilizados para se planejar o esvaziamento da carreta do trator de apoio à colhedora, ou em caso de colhedoras que possuem reservatórios próprios, no planejamento do momento de se esvaziarem os mesmos.

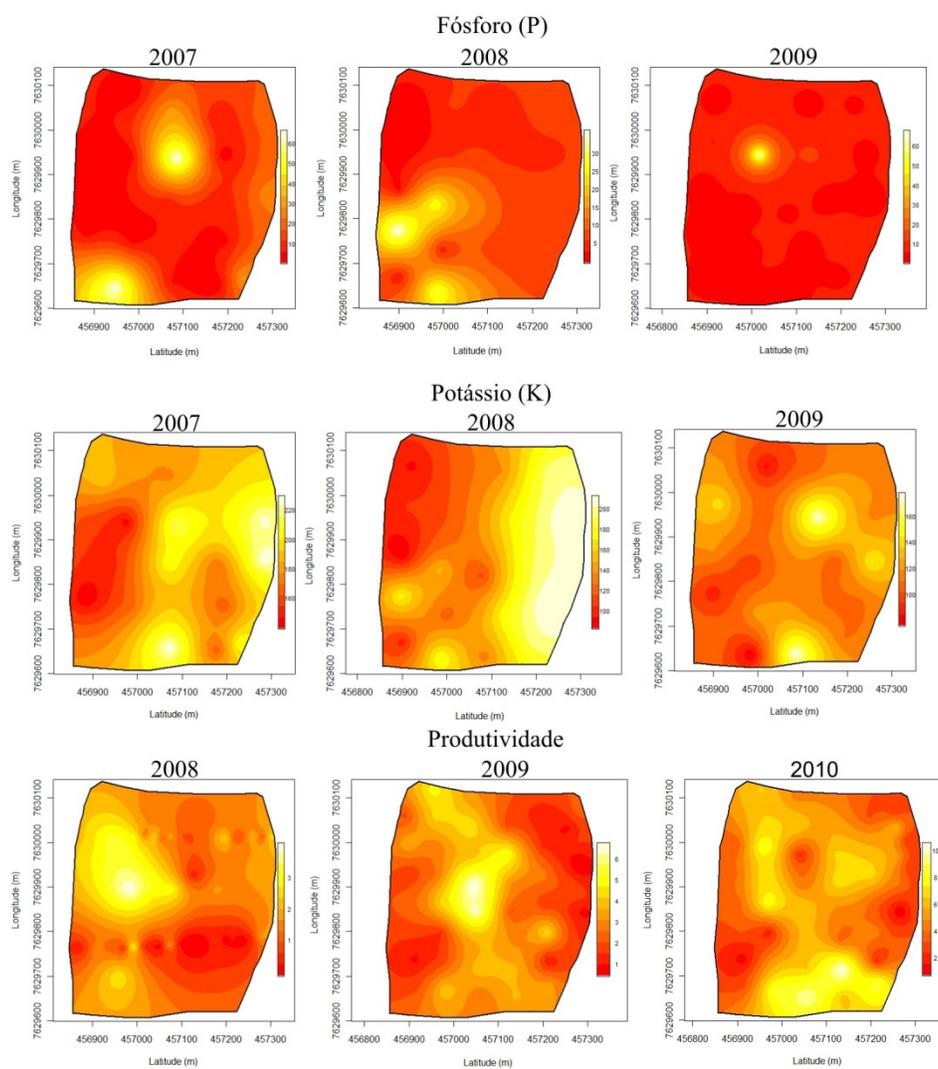


Gráfico 4 Distribuição espacial do fósforo (mg dm^{-3}) e potássio (mg dm^{-3}) em 2007, 2008 e 2009 e da produtividade (L planta^{-1}) nos anos de 2008, 2009 e 2010

4 CONCLUSÕES

Foi possível caracterizar a magnitude da variabilidade espacial dos atributos químicos do solo fósforo e potássio, e também da produção da cultura do cafeeiro. Observou-se que as variáveis em estudo apresentaram estrutura de dependência espacial, o que permitiu o mapeamento através do uso da krigagem. Desta forma, o uso da geoestatística pode ser aplicado na agricultura de precisão em lavouras cafeeiras.

Com base no critério de seleção dos modelos de semivariograma do presente estudo, o método dos Mínimos Quadrados Ponderados ajustou-se para o fósforo em todos os anos, para o potássio a Máxima verossimilhança foi ajustada para dois dos três anos em estudo, e para a produtividade os métodos baseados na máxima verossimilhança (ML e REML) se ajustaram para duas das três colheitas.

O modelo gaussiano ajustou-se para a variável produtividade em todos os anos estudados, e para o potássio em 2007 e 2008. O modelo exponencial se ajustou para o fósforo em 2007 e 2009, e o modelo esférico ajustou-se para o fósforo em 2008, e para o potássio em 2009.

Foi visto que os atributos apresentaram grande variação no tempo, sendo que, para o nutriente fósforo, houve uma maior uniformização ao longo das três safras estudadas; para o potássio e a produtividade, houve grandes diferenças de um ano para o outro.

A partir de observações dos mapas, pode-se constatar que, além de reduzir erros de interpretações, é possível definir zonas de manejo as quais forneçam subsídios para um manejo mais eficiente e econômico da cultura, podendo-se, desta forma, definir planos de adubação mais eficientes, e melhor planejamento da colheita dos frutos do cafeeiro.

REFERÊNCIAS

ALVES, M. C. et al. Geostatistical analysis of the spatial variation of the berry borer and leaf miner in a coffee agroecosystem. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 10, n. 12, p. 1-14, Dec. 2009.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Produção de grãos**. Brasília, 2009. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/>>. Acesso em: 29 nov. 2009.

CARVALHO, G. R. et al. Avaliação de produtividade de progênies de cafeeiro em dois sistemas de plantio. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 30, n. 5, p. 838-843, set./out. 2006.

CARVALHO, L. G. et al. A regression model to predict coffee productivity in Southern Minas Gerais, Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 8, n. 2/3, p. 204-211, maio/dez. 2004.

CHALFOUN, S. M. et al. Relação entre diferentes níveis de infecção de ferrugem (*Hemileia vastatrix* Berk. & Br.) e produção dos cafeeiros (*Coffea arabica* L.) em algumas localidades de Minas Gerais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 6., 1978, Ribeirão Preto. **Resumos...** Rio de Janeiro: UFRJ, 1978. p. 392-394.

CRESSIE, N. **Statistics for spatial data**. New York: J. Wiley, 1993. 900 p.

CRESSIE, N.; HAWKINS, D. M. Robust estimation of the variogram. **Mathematical Geology**, New York, v. 12, n. 2, p. 115-125, 1980.

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

FROGBROOK, Z. L. et al. Exploring the spatial relations between cereal yield and soil chemical properties and the implications for sampling. **Soil Use and Management**, Avenue, v. 18, n. 1, p. 1-9, Feb. 2002.

GOMES, F. P.; GARCIA, C. H. **Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais**. Piracicaba: FEALQ, 2002. 305 p.

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

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

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

RENA, A. B. et al. Fisiologia do cafeeiro em plantios adensados. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE CAFÉ ADENSADO, 1., 1994, Londrina. **Anais...** Londrina: Instituto Agrônômico do Paraná, 1996. p. 73-85.

RIBEIRO JUNIOR, P. J.; DIGGLE, P. J. GeoR: a package for geostatistical analysis. **R-News**, New York, v. 1, n. 2, p. 14-18, June 2001.

SILVA, F. M. et al. Efeitos da colheita manual na bienalidade do cafeeiro em Ijaci, Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, n. 3, p. 625-632, maio/jun. 2010.

_____. Variabilidade espacial de atributos químicos e produtividade da cultura do café em duas safras agrícolas. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 1, p. 231-241, jan./fev. 2008.

SILVA, V. R. et al. Variabilidade espacial das características químicas do solo e produtividade de milho em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 27, n. 6, p. 1001-1012, dez. 2003.

SOUZA, Z. M. et al. Variabilidade espacial do pH, Ca, Mg e V% do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 6, p. 1763-1771, nov./dez. 2004.

TOLEDO, S. V. de; BARROS, I. de. Influência da densidade de plantio e sistema de podas na produção de café. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 8, p. 1379-1384, ago. 1999.

TRANGMAR, B. B. Applications of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 38, n. 1, p. 45-94, Jan. 1985.

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

VIEIRA, S. R. et al. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, Berkeley, v. 51, n. 3, p. 1-7, 1983.

WEBSTER, R. Is soil variation random? **Geoderma**, Amsterdam, v. 97, n. 1/2, p. 149-163, Feb. 2000.