

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL**

**FELIPE PIANNA COSTA**

**USO DA GEOESTATÍSTICA E DA LÓGICA FUZZY NO ESTUDO DA  
VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DA PRODUTIVIDADE E  
DA FERTILIDADE DO SOLO EM CAFÉ CONILON**

**ALEGRE  
2011**

**FELIPE PIANNA COSTA**

**USO DA GEOESTATÍSTICA E DA LÓGICA FUZZY NO ESTUDO DA  
VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DA PRODUTIVIDADE E  
DA FERTILIDADE DO SOLO EM CAFÉ CONILON**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de *Magister Scientiae* em Produção Vegetal, na área de concentração de Solos e Nutrição de Plantas.

Orientador: Prof. Dr. Julião Soares de Souza Lima

**ALEGRE  
2011**

C837u Costa, Felipe Pianna, 1986-  
Uso da geoestatística e da lógica fuzzy no estudo da variabilidade espacial e temporal da produtividade e da fertilidade do solo em café conilon / Felipe Pianna Costa. – 2011.  
75 f. : il.

Orientador: Julião Soares de Souza Lima.  
Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias.

1. Agricultura de precisão. 2. Sistemas de informação geográfica. 3. Fertilidade do solo. 4. Produtividade. 5. Café conilon. I. Lima, Julião Soares de Souza. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias. III. Título.

CDU: 63

---

**FELIPE PIANNA COSTA**

**USO DA GEOESTATÍSTICA E DA LÓGICA FUZZY NO ESTUDO DA  
VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DA PRODUTIVIDADE E  
DA FERTILIDADE DO SOLO EM CAFÉ CONILON**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de *Magister Scientiae* em Produção Vegetal, na área de concentração de Solos e Nutrição de Plantas.

Aprovada em 11 de julho de 2011.

---

Prof. Dr. Julião Soares de Souza Lima  
CCA – UFES (Orientador)

---

Prof. Dr. Alexandre Cândido Xavier  
CCA – UFES (membro interno)

---

Prof. Dr. Rone Batista de Oliveira  
UNIPAR (membro externo)

À minha Mãe Florencia Pianna Costa

Ao meu Pai Geraldo Mangelo Costa

E aos meus irmãos

Ao amigo Prof. Julião e sua  
família e todos que  
participaram comigo nesta  
jornada

*DEDICO*

## AGRADECIMENTOS

A Deus.

Ao Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo (CCAUFES) e ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal do CCA-UFES (PPGPV), pela oportunidade de estudo.

À CAPES, CNPQ e FAPES pelo apoio financeiro à pesquisa.

Ao Prof. Dr. Julião Soares de Souza Lima, professor do Departamento de Engenharia Rural do CCA-UFES, pela orientação acadêmica, contribuição intelectual, paciência e companheirismo na conclusão deste projeto.

Ao Prof. Dr. Alexandre Cândido Xavier, pelos conselhos e orientação acadêmica, contribuição intelectual, sinceridade e prontidão.

Ao Prof. Dr. Rone Batista de Oliveira, pela generosa contribuição neste trabalho.

A todos que auxiliaram na coleta de parte dos dados deste trabalho na área experimental de Pacotuba.

Ao Prof. Dr. José Francisco Teixeira do Amaral pela amizade, oportunidades e conselhos durante a realização do trabalho.

Ao Prof. Dr. Edvaldo Fialho dos Reis, professor do Departamento de Engenharia Rural do CCA-UFES, pelos conselhos e amizade.

Ao Prof. Dr. José Carlos Lopes pela amizade, conselhos e oportunidades durante o desenvolvimento do trabalho.

Ao Prof. Dr. Paulo Cesar (PC), pela amizade e conselhos.

Aos professores do curso de Agronomia e do curso de Pós-Graduação em produção Vegetal, pelos ensinamentos transmitidos.

Às secretárias Therezinha, Vera e Madalena.

Ao INCAPER e a todos que ajudaram no desenvolvimento do trabalho.

Aos colegas do Programa de Mestrado em Produção Vegetal e da Graduação.

Aos amigos Lima Deleon Martins, Wagner Nunes Rodrigues, Daniel Cometti Borlini, Abrãao C. Verdin Filho e Luiz Felipe Mesquita, pela amizade, conselhos e por sempre estarem dispostos a ajudar.

A todos aqueles que direta e indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

Lições para uma vida...

Como todo o amanhecer, os momentos não são eternos, mas, independente do quanto durou, o que importa é vislumbrar novamente um raio de sol, ou poder tocar a ingênua gota de orvalho.

Para aqueles que não se dão conta da simplicidade da vida, dos gestos, do sorriso e de tantas outras virtudes que habitam nossa alma, é difícil, e talvez inatingível minhas palavras, mas é simples para aqueles que educam com o coração e se esforçam para despertar em seus semelhantes à importância da inspiração para o exercício da crítica interna de maneira a viver voluntariamente emoções, exalando humanidade, compartilhando conhecimentos e instigando a criatividade, obscura em nossas mentes.

Essas razões, quando desacreditadas, traduzem-se na morte do espanto e da indignação, do inconformismo e da rebeldia. Deixamos de optar e isso, a meu ver, já é o suficiente para não mais compreendermos nosso próprio existir. Todo o carinho, respeito e por que não, um pouquinho de inveja daqueles que são de fato mestres, em despertar a curiosidade, a ousadia, a luta, a autonomia, a espontaneidade e o que é o mais importante: a liberdade.

Antônio Luis Santi

## **BIOGRAFIA**

Felipe Pianna Costa, filho de Geraldo Mangelo Costa e Florencia Pianna Costa, nasceu em 04 de março de 1986, em Vitória, ES. Coursou o ensino fundamental e médio, entre 1992 a 2003, na Escola SCM, em Vitória, ES. Em agosto de 2009, graduou-se em Engenharia Agrônômica pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), em Alegre, ES. Em Agosto de 2009, iniciou o Curso de Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, no Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo (CCA-UFES), tendo defendido dissertação em 11 de julho de 2011.



## RESUMO

Nos últimos anos, vem aumentando a adoção das técnicas de agricultura de precisão (AP) em culturas anuais e perenes no Brasil. Porém, para a cafeicultura de montanha estão sendo realizadas pesquisas para adaptação de soluções tecnológicas viáveis na aplicação das técnicas de AP. O objetivo desta pesquisa foi utilizar os conceitos e métodos da análise espacial e temporal no estudo da produtividade e fertilidade do solo e desenvolver uma metodologia de classificação *fuzzy* para a definição de zonas de aplicação de insumos em três safras de café conilon. O trabalho foi realizado em uma área experimental cultivada com a variedade de *Coffea canephora* Pierre ex Froenher (ROBUSTA TROPICAL – ‘Emcaper 8151’). Os pontos de amostragens de produtividade (sc ha<sup>-1</sup>) e atributos químicos do solo (pH, P, K, CTC e V) foram georreferenciados, compondo uma malha irregular totalizando 109 pontos. Cada ponto amostral foi composto de cinco plantas para a colheita do café, com as amostras de solo coletadas na profundidade de 0,0 – 0,2 m na projeção da copa do cafeeiro. Foi utilizada a análise geoestatística para interpolação dos dados, recursos de geoprocessamento para determinação do índice de produtividade e fertilidade do solo entre as safras e lógica *fuzzy* para análise multicritério na definição de zonas de aplicação de insumos. Nas três safras, a produtividade e os atributos químicos do solo apresentam variabilidade espacial e temporal. A análise quantitativa por meio dos mapas possibilitou observar que os níveis de produtividade e fertilidade do solo apresentam regiões com alternância de valores entre as diferentes safras. Os índices quantitativos obtidos de produtividade de -18% e -57,1% e fertilidade de 24,3% e 12,3% entre a segunda e a primeira safra e a terceira e a segunda safra, respectivamente, representam a variabilidade temporal e a distribuição espacial da produtividade e da fertilidade do solo entre as diferentes safras. A classificação *fuzzy* auxilia na tomada de decisão para definição de zonas de aplicação de insumos na área, revelando em maior percentual da área, notas de média aplicação de insumos de 3,4 a 6,3 nas três safras.

Palavras-chave: Agricultura de precisão, zonas de aplicação, SIG.

## ABSTRACT

In recent years, the adoption of precision agriculture techniques in annual and perennial crops was increasing in Brazil. However for the coffee cultivated in mountainous regions are still being conducted research to adapt technology solutions feasible to apply these techniques. The objective of this research was to use the concepts and methods of spatial and temporal analysis in the study of soil fertility and productivity and develop a *fuzzy* classification methodology for defining areas of application of inputs in three conilon coffee crops. The work was developed an area of *Coffea canephora* Pierre ex Froenher (ROBUSTA TROPICAL – ‘Emcaper 8151’). In the selected area an irregular grid was built, including 109 points of samplings demarcated and georeferenced. Each sample point was composed of five plants to evaluate the productivity ( $\text{sc ha}^{-1}$ ) and chemical soil attributes (pH, P, K, CTC e V) in the layer of 0-20 cm of depth in canopy’s projection. The geostatistic analysis was applied to data interpolation, geoprocessing resources to determinate the productivity and soil fertility level and a multicriteria analysis was carried out applying *fuzzy* logic to definition of inputs application zones. At the three crops, the productivity and soil attributes show spatial and temporal variability. The quantitative analysis showed alternating regions of rate productivity and soil fertility values between the different crops. The quantitative levels of productivity -18% and -57.1% and fertility 24.3% and 12.3% between the second and first crop and the third and second crop, respectively, represent temporal variability and spatial distribution of the productivity and fertility between the different crops. The classification *fuzzy* subsidizing the decision-making process to define inputs application zones, showing in the mainly percentage of the area, medium marks of inputs application 3.4 to 6.3 on the three crops.

Key words: Precision agriculture, zones of inputs, GIS.

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – Descrição dos dados técnico da área e da cultura.....	22
<b>Tabela 2</b> – Recomendação de adubação de produção para o cafeeiro conilon de acordo com a produtividade esperada. ....	31
<b>Tabela 3</b> – Regras de inferência <i>fuzzy</i> .....	36
<b>Tabela 4</b> – Determinação do percentual de valores positivos e negativos dos mapas de níveis de produtividade entre as diferentes safras.....	41
<b>Tabela 5</b> – Precipitação mensal (mm) referente às três safras de café conilon.....	43
<b>Tabela 6</b> – Parâmetros dos semivariogramas ajustados para os atributos químicos (camada de 0-0,20 m) do solo. ....	46
<b>Tabela 7</b> – Determinação do percentual das áreas com valores positivos e valores negativos dos mapas de perdas e ganhos dos atributos químicos. ....	49
<b>Tabela 8</b> – Determinação das áreas referentes aos mapas de níveis de fertilidade do solo.....	52
<b>Tabela 9</b> – Equações utilizadas na recomendação das doses de nitrogênio, fósforo e potássio. ....	53
<b>Tabela 10</b> – Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas escalonados para as necessidades de aplicação de insumos nas três safras de café conilon.....	54
<b>Tabela 11</b> – Determinação do percentual das áreas com as notas de aplicação de insumos.....	63

## LISTAS DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – Disposição espacial dos pontos georreferenciados na área experimental.....	23
<b>Figura 2</b> – Esquema da metodologia de amostragem.....	25
<b>Figura 3</b> – Ponto amostral demarcado com uma estaca identificada para a coleta dos atributos químicos. ....	25
<b>Figura 4</b> – Ponto amostral demarcado com uma estaca identificada e colheita do café nas cinco plantas.....	26
<b>Figura 5</b> – Conjuntos <i>fuzzy</i> para a variável de saída necessidade de aplicação de insumos.....	34
<b>Figura 6</b> – Gráfico de caixa de valores de produtividade em $sc\ ha^{-1}$ nas três safras consecutivas.....	37
<b>Figura 7</b> – Distribuição espacial das produtividades nas três safras estudadas em $sc\ ha^{-1}$ beneficiado.. ....	39
<b>Figura 8</b> – Distribuição espacial dos níveis de produtividade entre as safras 2-1 (a) e 3-2 (b). ....	41
<b>Figura 9</b> – Gráfico de caixas dos atributos químicos do solo.....	45
<b>Figura 10</b> – Mapas dos ganhos e perdas (%) dos atributos pH, P, K, CTC e V no solo entre as safras 2-1 e 3-2.....	48
<b>Figura 11</b> – Distribuição espacial dos níveis de fertilidade do solo (NF) entre as safras 2-1(a) e 3-2(b). ....	51
<b>Figura 12</b> – Distribuição espacial das necessidades de nitrogênio nas três safras estudadas.....	55
<b>Figura 13</b> – Distribuição espacial das necessidades de fósforo nas três safras estudadas.....	56
<b>Figura 14</b> – Distribuição espacial das necessidades de potássio nas três safras estudadas.....	56
<b>Figura 15</b> – Distribuição espacial das necessidades de calagem (NC) nas três safras estudadas. ....	57
<b>Figura 16</b> – Conjuntos <i>fuzzy</i> para a variável de entrada da necessidade de aplicação de calcário e nitrogênio para as três safras.....	58

<b>Figura 17</b> – Conjuntos <i>fuzzy</i> para a variável de entrada necessidade de aplicação de fósforo. ....	60
<b>Figura 18</b> – Conjuntos <i>fuzzy</i> para a variável de entrada necessidade de aplicação de potássio. ....	61
<b>Figura 19</b> – Mapas de classificação <i>fuzzy</i> com base nas necessidades de aplicação de N,P,K e calagem nas três safras. ....	62

## LISTAS DE EQUAÇÕES

<b>Equação 1.</b> Semivariograma experimental.....	28
<b>Equação 2.</b> Equação de mapas de perdas e ganhos individuais. ....	29
<b>Equação 3.</b> Equação de mapa dos níveis de fertilidade.....	30
<b>Equação 4.</b> Equação do índice de fertilidade do solo e produtividade. ....	30
<b>Equação 5.</b> Determinação da quantidade de calcário a ser aplicada. ....	32
<b>Equação 6.</b> Função de pertinência trapezoidal utilizada para construção dos conjuntos <i>fuzzy</i> .....	33

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	13
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	14
2.1	A PRODUÇÃO DO CAFÉ CONILON .....	14
2.2	VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS DE SOLO E DE PLANTAS ....	15
<b>2.2.1</b>	<b>Variabilidade espacial e temporal do cafeeiro</b> .....	16
2.3	CALAGEM E ADUBAÇÃO NO CAFEIEIRO .....	17
2.4	SIG - SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA .....	18
2.5	LÓGICA <i>FUZZY</i> .....	19
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	22
3.1	DESCRIÇÃO DA AREA EXPERIMENTAL .....	22
3.2	HISTÓRICO DA ÁREA EXPERIMENTAL .....	23
3.3	AVALIAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO .....	24
3.4	AMOSTRAGENS E DETERMINAÇÃO DOS ATRIBUTOS DE SOLO E PLANTA .....	24
3.5	ANÁLISE QUALITATIVA DOS DADOS .....	27
3.6	ANÁLISE GEOESTATÍSTICA DOS DADOS .....	27
3.7	ANÁLISE QUANTITATIVA DOS DADOS .....	29
3.8	DEFINIÇÃO DAS NECESSIDADES DE APLICAÇÃO DE INSUMOS UTILIZANDO EQUAÇÕES DE REGRESSÃO .....	31
3.9	CLASSIFICAÇÃO <i>FUZZY</i> PARA DETERMINAÇÃO DE ZONAS DE APLICAÇÃO DE INSUMOS .....	32
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	37
4.1	VARIABILIDADE TEMPORAL E ESPACIAL DA PRODUTIVIDADE DE CAFÉ CONILON .....	37
4.2	MAPAS DOS NÍVEIS DE PRODUTIVIDADE DE CAFÉ CONILON .....	38
<b>4.2.1</b>	<b>Índices de produtividade entre as safras</b> .....	44
4.3	VARIABILIDADE TEMPORAL E ESPACIAL DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO .....	44
4.4	MAPAS DE PERDAS E GANHOS DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS .....	47
4.5	MAPAS DOS NÍVEIS DE FERTILIDADE DO SOLO NA LAVOURA DE CAFÉ CONILON .....	50
<b>4.5.1</b>	<b>Índices de fertilidade do solo</b> .....	52

4.6	ANÁLISE DE REGRESSÃO NA ORIENTAÇÃO DA APLICAÇÃO DE INSUMOS.....	53
5	<b>LÓGICA <i>FUZZY</i> NA ANÁLISE DOS DADOS.....</b>	<b>58</b>
6	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>64</b>
7	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>65</b>



## 1 INTRODUÇÃO

O Espírito Santo é o maior produtor de café conilon do Brasil e seu cultivo se encontra amplamente distribuído no Estado. Essa atividade responde em grande escala de geração de emprego e renda, quando contabilizados todos os negócios envolvendo a cultura do conilon no Estado.

Tais fatos consolidam a expressiva força econômica e a importância social desta cultura, gerando qualidade de vida e postos de trabalho no campo, e, conseqüentemente o desenvolvimento nos municípios produtores.

Sabe-se que para a sustentabilidade da cafeicultura é necessário a adoção de métodos e técnicas que contribuam para a redução dos custos de produção, impactados principalmente por sucessivas altas nos preços e uso excessivo dos insumos agrícolas.

Neste sentido, os conceitos e técnicas de agricultura de precisão favorecem a cafeicultura, pois os instrumentos relacionados dão apoio ao processo gerencial, otimizando a utilização dos insumos agrícolas na atividade cafeeira aumentando a produtividade da lavoura, refletindo na melhoria da fertilidade do solo.

Outra possibilidade para tratar de dados quantitativos é a aplicação da lógica *fuzzy*, utilizada em problemas de classificação, em que vetores de entrada são combinados por regras e atribuídos a um dos conjuntos de classes de saída especificado (BRESSAN et al., 2006).

Por meio da geração de um mapa de fertilidade *fuzzy*, pode ser observada variação gradual dos níveis de fertilidade do solo de uma determinada região, representando assim fronteiras não rígidas entre áreas férteis e não férteis, reduzindo a propagação de erros nos modelos lógicos, proporcionando resultados mais confiáveis, se comparados à utilização da classificação booleana (MEIRELLES et al., 2007).

Este trabalho teve por objetivos utilizar os conceitos e métodos da análise espacial e temporal no estudo da produtividade e fertilidade do solo e desenvolver uma metodologia de classificação *fuzzy* para a definição de zonas de aplicação de insumos em três safras de café conilon (*Coffea canephora* Pierre ex Froehner).

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 A PRODUÇÃO DO CAFÉ CONILON

O agronegócio mundial do café engloba, anualmente, recursos que chegam a 91 bilhões de dólares e envolve aproximadamente meio bilhão de pessoas, ou 8% da população mundial. É nesse mercado gigantesco que está centrado o interesse da cadeia produtiva do café brasileiro, que chegou a contribuir com mais de 30% da produção mundial (EMBRAPA, 2007).

A cafeicultura desempenha função relevante no desenvolvimento social e econômico do Brasil, gerando empregos e riquezas, contribuindo significativamente para a formação da receita brasileira e para a manutenção do homem no meio rural. Com relação à produção mundial de café para a safra de 2011, são estimadas 139,69 milhões de sacas de 60 kg, sendo 85,95 milhões provenientes do cultivo da espécie *Coffea arabica* e 53,72 milhões de *Coffea canephora* (USDA, 2010).

A cultura do café conilon está presente em 65 dos 78 municípios do Espírito Santo, em uma área aproximada de 290 mil hectares, sendo que na região sul é cultivado principalmente na bacia do rio Itapemirim, e na região norte do Estado os principais produtores são: Jaguaré, Sooretama, Vila Valério, São Mateus, Rio Bananal e Pinheiros (FASSIO; SILVA, 2007).

O Espírito Santo se destaca como o maior produtor de café conilon, sendo, estimada uma produção de 7,40 a 7,86 milhões de sacas para a safra de 2011, de café beneficiado, que correspondem a 67,8% do café robusta produzido no país (CONAB, 2011).

A produtividade do café Conilon vem aumentando excepcionalmente no Espírito Santo. No período de 1993 a 2010, a produtividade média do Estado teve um acréscimo de 211%, período este, quando os produtores começaram efetivamente a empregar as novas tecnologias desenvolvidas pelos programas de pesquisa, provocando um aumento de 9,20 sacas (60 kg) beneficiadas por hectare praticadas em 1993 até uma média de 28,07 sacas obtidas em 2010 (FERRÃO et al., 2008; CONAB, 2010). Em condições ótimas, a cafeicultura no Estado pode atingir um potencial produtivo de 214 sc ha<sup>-1</sup> (MELLO, 2010).

## 2.2 VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS DE SOLO E DE PLANTAS

A aplicação de insumos na agricultura vem sendo tradicionalmente manejada de acordo com uma amostragem média, não considerando assim as necessidades específicas de cada área. Silva e Chaves (2001) comentaram que os atributos químicos apresentam maior variação que os físicos em uma área cultivada e, devido a esse fato, o uso de amostragens aleatórias, empregando a média para caracterizar determinado atributo no solo, pode resultar em avaliações inexatas.

Um atributo do solo é considerado como uma variável com continuidade espacial, uma vez que sua variabilidade espacial não pode ser apresentada aleatoriamente, ela tende a diminuir conforme a distância entre pontos no espaço diminuem (CETIN; KIRDA, 2003).

Segundo Salviano (1996), poucos trabalhos têm sido conduzidos sobre as relações entre a variabilidade dos atributos do solo e a variabilidade da produtividade das culturas. De acordo com Mulla et al. (1990), a variabilidade dos atributos do solo influencia a eficiência do manejo e o desenvolvimento de uma cultura e causa rendimento desuniforme, mesmo em pequenas áreas.

Para Miranda et al. (2005), a variabilidade de uma área influencia fatores de produção ligados à disponibilidade de nutrientes. Se for constatada a variabilidade espacial destes fatores e da produtividade das culturas, a localização das regiões de alto e baixo potencial produtivo pode trazer benefício pela adoção de estratégias de manejo localizado.

A aplicação de corretivos e fertilizantes em taxas variadas está intimamente relacionada aos conceitos de agricultura de precisão, que preconiza o tratamento localizado baseado nas diferenças existentes na planta, entre plantas e dos atributos do solo em uma determinada lavoura (MOLIN; MENEGATTI, 2005).

O emprego de técnicas de agricultura de precisão no cafeeiro pode auxiliar na identificação de áreas com potencial para produção de frutos com melhor qualidade, e auxiliar no entendimento dos fatores relacionado à planta, elevando a produtividade (QUEIROZ et al., 2004).

### **2.2.1 Variabilidade espacial e temporal do cafeeiro**

A variabilidade espacial e temporal da produtividade e dos atributos de solo no cafeeiro tem sido abordada por vários autores, sendo essa variabilidade atribuída a diversos fatores, os quais não atuam pontualmente, mas sim, segundo um determinado padrão.

Balastreire et al. (2001) realizaram o mapeamento da produtividade da cultura do café no município de Pinhal-SP e verificaram que houve variabilidade da produtividade do café com valores de no mínimo 1,4 Mg/ha e no máximo 18,4 Mg/ha o que corresponde a uma variação de 12,9 Mg/ha.

Oliveira (2003) estudou, por meio de coleta manual, a variabilidade espacial da produção do café de montanha. Em ambos os trabalhos foi verificada a variabilidade espacial da produtividade, fortalecendo o conceito de agricultura de precisão para o gerenciamento localizado da cultura.

Oliveira (2007) estudou a produtividade de café conilon durante duas safras agrícolas, e verificou um coeficiente de variação de 33,0% e 25,4%, respectivamente. Isso mostrou inicialmente, neste caso, que a utilização da média mascara os sítios com valores relativamente altos na área da primeira safra.

Silva et al. (2010a), estudando a variabilidade espacial de atributos químicos de um solo cultivado com café arábica sob diferentes sistemas de manejos (convencional e orgânico), verificaram que os atributos químicos do solo apresentaram dependência espacial nos dois sistemas. No entanto, o sistema de manejo orgânico apresentou menor variabilidade espacial.

Silva et al. (2010b), estudando a variabilidade espacial do estoque de carbono em um Latossolo Vermelho-amarelo húmico cultivado com duas variedades de café arábica catuaí e catucaí, verificaram por meio de análises utilizando estatística descritiva e geoestatística que os atributos apresentaram dependência espacial, sendo que os valores de estoque de carbono foram menores na área sob cultivo da variedade catuaí.

### 2.3 CALAGEM E ADUBAÇÃO NO CAFEIEIRO

A produção do café é regulada por diversos fatores como o clima (temperatura, precipitação, umidade etc.), tratamentos culturais (calagem, adubação, controle de ervas daninhas, podas, etc.), variedades, tipos de solos, irrigação, controle de pragas e doenças, entre outros (MATIELLO et al., 2005).

Dentre esses fatores, a calagem e a adubação são de elevada importância. Prezotti et al. (2007) citaram que os solos do Estado do Espírito Santo apresentam potencial de produção, todavia é necessária a utilização de práticas adequadas de correção e adubação do solo para convivência com suas limitações, devido à baixa fertilidade natural.

A prática da calagem se torna essencial para uma sustentabilidade da cafeicultura. A calagem bem feita neutraliza o Al do solo e fornece Ca e Mg como nutrientes. Promove o aumento da CTC efetiva, reduzindo a lixiviação de bases. Além disso, possibilita maior crescimento do sistema radicular das plantas, facilitando a absorção e a utilização dos nutrientes e da água (SOUSA et al., 2007).

De acordo com Pierce e Novak (1999), no cálculo da exigência de calcário, além de se considerar a capacidade tampão do solo e a tolerância das culturas à acidez do solo, é também necessário ter em conta a variabilidade espacial dos atributos responsáveis pela acidez do solo.

Caso contrário, é grande a chance de ter excesso de calagem em algumas partes e *deficit* de calagem em outras partes do campo. A aplicação de doses de calcário abaixo do recomendado de calcário limita a expressão do potencial de rendimento das culturas, por não corrigir a acidez do solo de acordo com as necessidades das culturas (HURTADO et al., 2009).

No entanto, a aplicação em excesso de calcário pode levar a diversos problemas de natureza química causando deficiência de micronutrientes, eletroquímica causando dispersão de argila, e de natureza física, influenciando na agregação das partículas do (LACERDA et al., 2006).

Outro problema constatado nas regiões produtoras de café refere-se à variabilidade

espacial e temporal da produtividade das plantas, sendo muito comum nas lavouras cafeeiras plantas sem produção ao lado de plantas produtivas, bem como a bienalidade da produção, caracterizada pela variação de anos com alta e baixa produção (CARVALHO et al., 2004).

Esse fato pode estar relacionado à produção vegetal intensiva requerer fornecimento regular e balanceado de nutrientes. Desequilíbrios extremos no fornecimento de nutrientes levam a planta a sofrer estresses metabólicos danosos ao seu desenvolvimento, chegando até ao ponto de surgirem sintomas de deficiência ou de excesso que, certamente, determinam perda de produção e qualidade. A análise química de plantas com critérios ajustados de amostragem é uma ferramenta essencial para a avaliação desse balanceamento de nutrientes (BATAGLIA, 2004).

A agricultura de precisão apresenta-se como uma moderna ferramenta para auxiliar o produtor na definição das melhores estratégias de manejo a serem adotadas visando a aumentar a eficiência da atividade agrícola. Especificamente no manejo do solo, a agricultura de precisão tem como principal conceito aplicar, no local correto e no momento adequado, as quantidades de insumos necessários à produção agrícola, para áreas cada vez menores e mais homogêneas, tanto quanto a tecnologia e os custos envolvidos o permitam (DOBERMANN; PING, 2004).

## 2.4 SIG - SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA

A análise de dados obtidos em condições de campo tem apresentado dificuldades nas diversas áreas da ciência, devido à variabilidade espacial apresentada. Com os recursos de sistema de informação geográfica (SIG) disponíveis, essa realidade está mudando rapidamente, facilitando a interpretação de várias feições em uma escala maior, com maior agilidade no auxílio da interpretação dos resultados e na tomada de decisão (BUENO, 2001).

O SIG é uma ferramenta que possibilita realizar análises espaciais e complexas, pois permite integração de dados de diversas fontes, manipulação de grande volume de dados e recuperação rápida de informações armazenadas, tornando-se uma ferramenta essencial para a manipulação das informações geográficas (MS, 2006).

Com o desenvolvimento da agricultura de precisão (AP) a partir da modernização dos métodos para gerenciamento dos sistemas de produção agrícola, houve uma nova demanda de dados espaciais no campo. Dessa forma, o SIG se apresentou como uma opção aos métodos tradicionais de gerenciamento através dos mapas georreferenciados, pois, é uma ferramenta poderosa que permite transformar dados em informações, e se tomar decisões a partir do conhecimento (AVELLAR et al., 2002).

O emprego do SIG no gerenciamento de unidades de produção agrícola possibilita a geração de um banco de dados, no formato vetorial ou *raster*, georreferenciados, o que permite efetuar avaliações, análises espaciais e simulações em função de variáveis, como pedologia, altitude, fertilidade, irrigação e produtividade, subsidiando tomadas de decisões técnicas e administrativas, de viabilidade, implantação, manejo e colheita a serem implementadas (ORTIZ, 2003).

## 2.5 LÓGICA FUZZY

Ferreira et al. (2004) definem os conjuntos (ou classes) *fuzzy* como representações sem fronteiras (transições) abruptas, isto é, a transição entre a pertença (pertinência) e a não pertença (não pertinência) de uma localização num conjunto é gradual.

A característica especial de lógica *fuzzy* é a de representar uma forma inovadora no manuseio de informações imprecisas, de forma muito distinta da teoria de probabilidades. A lógica *fuzzy* provê um método de traduzir expressões verbais vagas, imprecisas e qualitativas, comuns na comunicação humana em valores numéricos (MARÇAL; SUSIN, 2005).

Dessa forma, a Teoria de Conjuntos Difusos tem como objetivo fornecer um ferramental matemático para o tratamento de informações de caráter impreciso ou vago. Em contraposição à lógica booleana (lógica clássica) que trata o mundo real como tendo apenas duas classes, verdadeiro ou falso, a lógica *fuzzy* atribui às variáveis reais, classes de conjuntos associados a termos linguísticos, como por exemplo, rápido, alto, distante, quente, lento, baixo, próximo, frio, etc. Assim, um elemento pode pertencer com certo grau a um dado conjunto, originando-se o que

se costuma chamar de Grau de Pertinência (SOUSA, 2007).

Um classificador *fuzzy* possui quatro componentes: um processador de entrada (ou fuzzificador), um conjunto de regras lingüísticas, um método de inferência *fuzzy* e um processador de saída (ou defuzzificador), gerando um número real como saída (PEDRYCZ; GOMIDE, 1998).

A lógica *fuzzy* vem sendo aplicada em áreas diversas das ciências exatas e humanas. Kavdir e Guyer (2003) utilizaram essa metodologia como suporte a tomada de decisão para classificar maçãs com respeito a sua qualidade. Peixoto et al. (2004) elaboraram um modelo do tipo presa-predador que descreve a interação de pulgões (presas) e joaninhas (predador) na citricultura, em que os pulgões são considerados agentes transmissores da morte súbita de citros (doença causada por vírus). Yang et al. (2003) utilizaram a lógica *fuzzy* para associar dados de cobertura foliar, obtidos por imagens fotografadas em campo, em três níveis de aplicação localizada de herbicida. Bressan et al. (2006) propuseram um sistema de classificação utilizando a lógica *fuzzy* para inferir o risco de infestação por plantas daninhas, usando krigagem e análise de imagens.

Vargens et al. (2003), na previsão da produção de cacau, visaram a desenvolver um sistema mais simples e preciso, por meio de informações sobre fatores que podem afetá-la, como distribuição de chuva, adubação e calagem, sendo o sistema avaliado favoravelmente por especialistas. Bonisch et al. (2004) também aplicaram a lógica *fuzzy* na representação acompanhada de medida espacial de incerteza de atributos do solo.

A aplicação de técnicas como a lógica *fuzzy* é bastante promissora em casos de fertilidade do solo, nos quais, apenas o limite inferior ou o superior de uma classe é um limitador de importância prática podendo inviabilizar os cultivos, sendo as classes intermediárias de limitação secundária (ZADEH, 1965). Em particular, as fronteiras entre classes não são claramente definidas, e os sistemas de classificação *fuzzy* podem tratar dessa questão (CHIANG; HSU, 2002).

Silva et al. (2009a), através de uma avaliação da fertilidade do solo utilizando a lógica *fuzzy*, demarcaram áreas com baixa possibilidade de produção da cultura do



café, na qual espera-se uma produtividade reduzida, não inviabilizando assim a prática da cafeicultura nesta área, apesar da baixa fertilidade.

Dessa forma, por meio da geração de um mapa de fertilidade utilizando a lógica *fuzzy*, pode ser observada variação gradual dos níveis de fertilidade de uma determinada região, representando assim fronteiras não rígidas entre áreas férteis e não férteis (MEIRELLES et al., 2007).

De acordo com Souza et al. (2009), a utilização da lógica *fuzzy* na classificação dos atributos químicos possibilita uma suavização dos limites de variação dos teores desses no solo, ao invés de classificar as informações em classes definidas de forma rígida, conforme obtido na classificação booleana, tornando-os mais representativos do comportamento real, que naturalmente apresenta uma variação gradativa ao longo do terreno.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL

A pesquisa foi conduzida em uma área experimental localizada no município de Cachoeiro de Itapemirim-ES, cultivada com a espécie (*Coffea canephora* Pierre ex Froehner), demarcada por Oliveira (2007) em seu trabalho, no qual se aplicou conceitos e técnicas de agricultura de precisão para o mapeamento da variabilidade espacial na cultura do café. A área experimental está localizada nas coordenadas geográficas: 20° 45' 17,31" de Latitude Sul e 41° 17'8,86" de Longitude Oeste de Greenwich e os dados da área estão apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1** – Descrição dos dados técnico da área e da cultura

Variedade	Altitude média (m)	Superfície (ha)	Espaçamento da cultura (m)
Robusta tropical – “Emcaper 8151”	113	1,0 ha	2,9 x 0,9

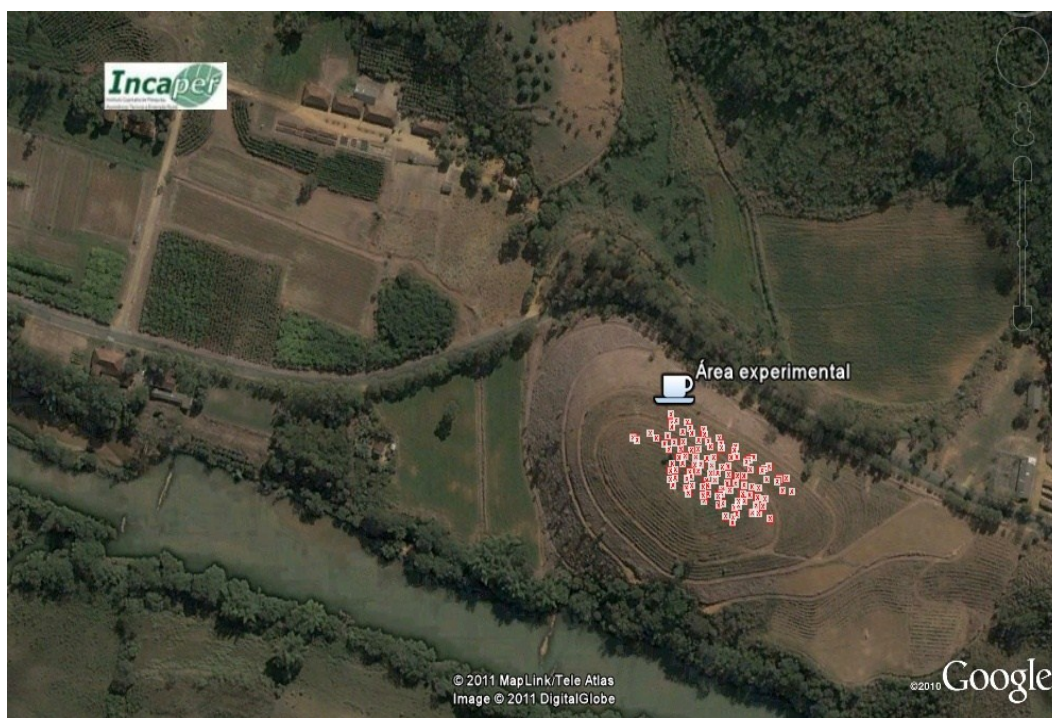
Segundo a classificação de Köppen, o clima da região é classificado como Cwa, apresentando chuva mal distribuída ao longo do ano, com inverno seco e verão quente chuvoso. A temperatura média do mês mais frio é inferior 20° C e do mês mais quente superior a 27° C.

O relevo regional caracteriza-se como uma região com feições do tipo “Mar de Morros”, com relevo ondulado a fortemente ondulado e cobertura vegetal natural de Floresta Estacional Semidecidual Submontana, em cotas que variam de 100 a 150 m de altitude. O material de origem é do tipo granito-gnáissico de origem pré-cambriana (IBGE, 1997).

O solo na área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho-amarelo distrófico com a textura argilosa, com as frações granulométricas médias de argila = 414,7 g kg<sup>-1</sup>, silte = 190,5 g kg<sup>-1</sup> e areia total = 393,9 g kg<sup>-1</sup> na profundidade de 0-0,20 m.

Na Figura 1 está representada a lavoura de café com os pontos georreferenciados

na área experimental.



**Figura 1** – Disposição espacial dos pontos georreferenciados na área experimental.

### 3.2 HISTÓRICO DA ÁREA EXPERIMENTAL

No ano de 1999 foi realizada a limpeza da área, para a remoção da pastagem que era constituída de braquiária e leucena por meio de uma roçagem e, posteriormente, uma destoca. Em seguida, foi realizada a abertura das covas por meio de um trado acionado pela TDP do trator.

O plantio das mudas ocorreu no ano de 2000, sendo executada uma adubação por cova composta por 250 gramas de esterco de galinha, 250 gramas de super simples, 150 gramas de calcário dolomítico e 50 gramas de cloreto de potássio. A variedade de café conilon (*Coffea canephora* Pierre ex Froehner) utilizada foi a ROBUSTA TROPICAL – ‘Emcaper 8151’, oriunda da recombinação de 53 clones elites do programa de melhoramento de café conilon do INCAPER.

Anualmente os tratos culturais de manutenção da área têm sido por métodos

químicos e manuais para o controle das plantas daninhas, para o controle fitossanitário do cafezal e colheita. Também foi realizada a desbrota do cafeeiro nas demais safras, evitando que ramos não produtivos competissem por água e nutrientes com os demais ramos produtivos.

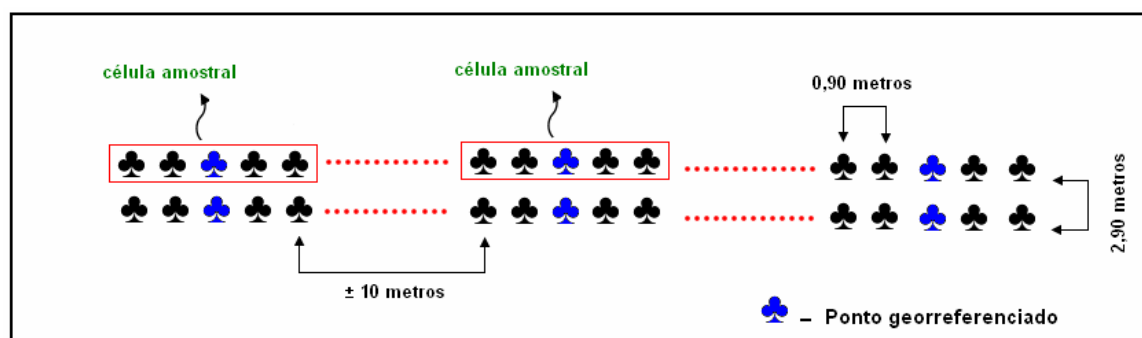
Após a implantação da lavoura, foi realizado o manejo da adubação nas demais safras, com 130 gramas por plantas do formulado 20-00-20 e uma aplicação de 80 gramas por plantas de super simples (SS) com as doses variando conforme a análise de solo.

### 3.3 AVALIAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO

Com o propósito de caracterizar a variação da precipitação durante o período correspondente às três safras, foram coletados os dados de precipitação da estação climatológica pertencente ao INMET, localizada na Fazenda Experimental a 1 km da área experimental estudada. Os dados de precipitação foram coletados com o intuito de avaliar a distribuição da precipitação mensal de acordo com as fases fenológicas da cultura.

### 3.4 AMOSTRAGENS E DETERMINAÇÃO DOS ATRIBUTOS DE SOLO E PLANTA

Na área selecionada uma malha irregular foi construída, sendo georreferenciados 109 pontos amostrais espaçados em aproximadamente 10 m na linha do cafeeiro, no qual foi estabelecida uma célula amostral composta de cinco plantas de café compondo uma área de 13,05 m<sup>2</sup> (Figura 2).



**Figura 2** – Esquema da metodologia de amostragem.

**Fonte:** Oliveira (2007).

A coleta dos atributos de solo foi realizada na projeção da copa do cafeeiro utilizando uma sonda inoxidável na profundidade de 0-0,20 m, sendo o georreferenciamento do ponto amostral realizado com auxílio de um GPS topográfico, modelo GTR-1 no centro de cada célula amostral que foi posteriormente identificada com uma estaca de madeira (Figura 3). O sistema de coordenadas utilizado foi o UTM (Universal transverso de Mercator) com Datum WGS-84.



**Figura 3** – Ponto amostral demarcado com uma estaca identificada para a coleta dos atributos químicos.

O período de coleta dos dados na área compreendeu as três safras agrícolas, de 2004/05 até 2006/07. Nesta pesquisa foram utilizados os atributos pH, P, K, CTC e V das três safras consecutivas. As amostras de solo foram encaminhadas para o Laboratório de Química e Física do solo do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo (CCA-UFES), onde foram determinado o pH em água (relação 1:2,5); acidez potencial (H+Al) - extração com  $\text{Ca}(\text{OAc})_2$  0,5 mol  $\text{L}^{-1}$ , pH 7,0; cálcio trocável ( $\text{Ca}^{+2}$ ), magnésio trocável ( $\text{Mg}^{2+}$ ) e acidez trocável ( $\text{Al}^{3+}$ ) - extração com  $\text{KCl}$  1 mol  $\text{L}^{-1}$ ; fósforo (P), potássio ( $\text{K}^+$ ), de acordo com as metodologias propostas pela Embrapa (1997).

Com base nas análises químicas de rotina foram calculados os valores da soma de bases (SB), obtida pela soma dos valores de  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ ; T - capacidade de troca de cátions (CTC) a pH 7 com a soma dos valores de H+Al e SB; e V% (porcentagem de saturação por bases) com a equação  $\text{SB} \cdot 100 / \text{T}$ . A colheita das três safras agrícolas na área foi realizada por derrça manual em peneiras, com acompanhamento e registros dos dados (Figura 4).



**Figura 4** – Ponto amostral demarcado com uma estaca identificada e colheita do café nas cinco plantas.

O café colhido de cinco plantas em cada ponto foi armazenado em sacos com identificação e em seguida foi encaminhado ao laboratório do INCAPER para retirada de amostras e determinação da umidade em estufa, segundo Brasil (1992), a fim de corrigir a produtividade para a umidade padrão de 12%, obtendo-se então, a produtividade do café em coco (seco).

Os valores de produtividade do café em coco (seco) de cada ano foram transformados para café beneficiado de acordo com valores referentes aos cálculos de quebra de safra, segundo o INCAPER. A relação de café em coco para café beneficiado foi de 1,46:1 , 1,95:1 e 1,94:1, para cada uma das safras, respectivamente, possibilitando assim obter a produtividade de café beneficiado para as três safras.

### 3.5 ANÁLISE QUALITATIVA DOS DADOS

A análise qualitativa dos dados envolveu as três safras estudadas. Na análise qualitativa foi realizada a construção dos gráficos de caixa “Boxplots” com o intuito de mostrar as principais características do conjunto de dados por meio de medidas de posição e dispersão, e ainda comparar os dados, colocando cada variável categórica lado a lado no mesmo gráfico com a finalidade de se ter uma idéia da variabilidade temporal dos dados durante as safras estudadas.

Para qualificar a variação de cada atributo em função do seu coeficiente de variação (CV), adotou-se a classificação proposta por Warrick e Nielsen (1980) que considera os valores de  $CV < 12\%$ , como baixa variação;  $12\% < CV < 60\%$ , como média variação e  $CV > 60\%$  como alta variação.

### 3.6 ANÁLISE GEOESTATÍSTICA DOS DADOS

Os mapas da distribuição espacial dos atributos estudados foram obtidos utilizando técnicas de geoestatística, que permitiram quantificar o grau de dependência espacial entre as amostras. Foi adotada a hipótese da estacionaridade intrínseca, que segundo David (1977), é a mais frequente em geoestatística, por ser menos

restritiva quanto à existência de variância finita. O ajuste dos semivariogramas foi realizado conforme as pressuposições de estacionaridade da hipótese intrínseca, e estimado, conforme descrito por Vieira (2000), utilizando-se do semivariograma clássico de Matheron, que é dado pela Equação 1.

**Equação 1.** Semivariograma experimental

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

em que:  $\gamma^*(h)$  é a semivariância estimada e  $N(h)$  é o número de pares de valores medidos  $Z(x_i)$  e  $Z(x_i+h)$ , separados por um vetor de distância  $h$ .

A fim de se obter maior precisão na estimativa dos dados, foram testados os modelos teóricos esférico, exponencial e gaussiano para definição dos parâmetros: efeito pepita ( $C_0$ ), patamar ( $C_0+C$ ) e alcance da dependência espacial ( $a$ ).

O efeito pepita revela a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras. O patamar é o valor no qual a variância dos dados se estabiliza, ou seja, a soma do efeito pepita  $C_0$  com a contribuição  $C$ . O patamar ( $C + C_0$ ) é aproximadamente igual à variância da variável  $Z$  em estudo. A distância na qual  $\gamma^*(h)$  atinge o patamar é chamada de alcance, recebe o símbolo de ( $a$ ), e corresponde à distância limite de dependência espacial (VIEIRA et al., 1997).

O índice de dependência espacial (IDE) foi calculado, conforme Cambardella et al. (1994), com o objetivo de determinar o grau de dependência espacial, através da relação  $[C_0/(C+C_0)] \times 100$ . Segundo os autores, valores de IDE de até 25%, de 25% a 75% e acima de 75% representam, respectivamente, forte, moderada e fraca dependência espacial.

Como critério para a escolha do modelo foi adotado o maior coeficiente de determinação do semivariograma ( $R^2$ ) e a menor soma de quadrados dos resíduos (SQR). No entanto, como critério definitivo, escolheu-se os modelos com correlação



significativa entre os valores observados e os estimados da validação cruzada.

Constatada a presença de dependência espacial dos atributos, realizou-se a interpolação pelo método da krigagem ordinária para estimar valores em locais não medidos. Segundo Grego e Vieira (2005), essa técnica de interpolação estima valores sem tendenciosidade e com desvios mínimos em relação aos valores conhecidos.

A análise geoestatística e a elaboração dos mapas de atributos obtidos por interpolação via krigagem, utilizando os modelos ajustados aos semivariogramas, foram realizadas nos programas GS<sup>+</sup> (ROBERTSON, 2008) e Surfer (GOLDEN SOFTWARE, 2002).

### 3.7 ANÁLISE QUANTITATIVA DOS DADOS

O diagnóstico quantitativo dos atributos da área foi realizado utilizando recursos de geoprocessamento (SIG), possibilitando determinar o grau e a extensão das alterações ocorridas nos diferentes atributos de solo e de plantas durante as três safras estudadas.

A partir dos mapas de distribuição espacial dos atributos de solo e da produtividade nas diferentes safras avaliadas, foram gerados os mapas de perdas ou ganhos (MPG) para cada atributo químico e os mapas dos níveis de produtividade entre as safras, conforme equação descrita por (AZEVEDO, 2004; SOUZA, 2009).

**Equação 2.** Equação de mapas de perdas e ganhos individuais

$$MPG = \frac{Mp_{(n)} - Mp_{(n-1)}}{Mp_{(n-1)}} * 100$$

em que: MPG é o mapa de perdas e ganhos de um determinado atributo estudado;  $Mp_{(n)}$  é o mapa de variabilidade espacial de um determinado atributo na safra n; e  $Mp_{(n-1)}$  é o mapa de variabilidade espacial do mesmo atributo na safra (n-1).

Posteriormente, as informações dos atributos selecionados (pH, P, K, CTC e V) foram reunidas em um único mapa, utilizando operações algébricas, entre os mapas de perdas e ganhos (MPG), para determinar os níveis químicos de fertilidade do solo, segundo equação 3.

**Equação 3.** Equação de mapa dos níveis de fertilidade

$$NF = \frac{\sum MPG}{n}$$

em que: NF é o mapa dos níveis químicos de fertilidade do solo;  $\sum MPG$  é a somatória dos mapas de perdas e ganhos dos atributos químicos do solo (pH, P, K, CTC e V); é n e o numero de mapas utilizados na análise.

Utilizando a extensão de área dos respectivos níveis dos mapas de NF e NP, obteve-se um valor para representar o índice de fertilidade do solo (IFS) e o índice de produtividade (IP) entre as diferentes safras estudadas, obtidos a partir de operações algébricas, de acordo com a equação (AZEVEDO, 2004; SOUZA, 2009).

**Equação 4.** Equação do índice de fertilidade do solo e produtividade

$$IFS/IP = \frac{\sum_i^n IC_i * A_i + \dots + IC_n * A_n}{\sum_i^n A_i + \dots + A_n}$$

em que: IFS é o índice de fertilidade do solo; IP é o índice de produtividade;  $IC_i$  é o Intervalo de classe do nível de fertilidade ou produtividade dos mapas; e  $A_i$  é a área da classe do determinado nível de fertilidade ou produtividade.

O índice de fertilidade representa o resumo da intensidade com que o conjunto dos valores dos atributos químicos variaram entre as safras estudadas. A comparação e a quantificação da variação da produtividade entre as diferentes safras foi realizada pelo índice de produtividade. Os índices de fertilidade (IFS) e produtividade (IP)

representam a variabilidade temporal e a distribuição espacial da produtividade e da fertilidade entre as diferentes safras.

### 3.8 DEFINIÇÃO DAS NECESSIDADES DE APLICAÇÃO DE INSUMOS UTILIZANDO EQUAÇÕES DE REGRESSÃO

Visando encontrar as quantidades de N, P e K a serem aplicados para valores intermediários de cada faixa de produtividade e teor do nutriente em cada ponto amostral, foram estabelecidas regressões lineares em função dos valores das tabelas para cada classe de produção e de nutrientes no solo (Tabela 2) para o café conilon. Com isso, uma equação foi gerada, para cada necessidade de nutriente em função da produtividade esperada, e usada para os cálculos de adubações.

**Tabela 2** – Recomendação de adubação de produção para o cafeeiro conilon de acordo com a produtividade esperada

Prod sc.benef/ha	Dose de N (kg/ha/ano)	Teor de P no solo				Teor de K no solo			
		<5	5 -10	11-20	> 20	< 60	60 -120	120-200	> 200
		Dose de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg/ha/ano)				Dose de K <sub>2</sub> O (kg/ha/ano)			
<20	200	0	0	0	0	170	100	30	0
21-30	260	45	35	0	0	230	160	90	0
31-50	320	60	45	0	0	290	220	150	0
51-70	380	75	60	20	0	350	280	210	80
71-100	440	90	75	35	0	410	340	270	140
101-130	500	105	90	50	20	470	400	330	200
131-170	560	120	105	65	40	530	460	390	260
>170	620	140	120	80	60	600	520	450	320

Fonte: Prezotti et al. (2007).

Definidas as equações de regressões para a necessidade de nitrogênio (NN), necessidade de fósforo (NP) e necessidade de potássio (NK), utilizou-se os valores em cada um dos 109 pontos amostrais de produtividade, teor de P e K no solo para calcular as doses de nitrogênio, fósforo e potássio.

Ressalta-se que a interpretação da análise de regressão deverá ser realizada de forma criteriosa, pois em determinados limites de P e K no solo e produtividade a

estimativa da quantidade de insumos será de valores negativos. Estes valores foram substituídos por zero nos mapas de recomendações.

Para testar a significância dos coeficientes das regressões e o ajuste das equações de regressão foram analisados os resultados do teste t *Student* e do R<sup>2</sup>. Em geral esse teste é usado para confirmar se a variável que está sendo usada na regressão está realmente contribuindo para a estimativa.

A necessidade de calcário na área foi calculada considerando a saturação de bases adequada para a cultura do café conilon (V2) de 60% e com os valores de cada ponto amostral de V e T e um PRNT de 80 %, conforme equação abaixo.

**Equação 5.** Determinação da quantidade de calcário a ser aplicada

$$NC = \frac{T * (V2 - V1) * p}{PRNT}$$

em que: NC é a quantidade de calcário em t/ha; T é a CTC a pH 7 em cmol<sub>d</sub>/dm<sup>3</sup>; V2 é saturação de bases adequada a cultura em %; V1 é a saturação de bases em cada ponto amostral em %; p = 0,5 para uma aplicação superficial e PRNT que significa Poder Relativo de Neutralização Total e é avaliado pelo Poder de Neutralização (PN) e pelo tamanho das partículas ou Reatividade (RE), ou seja, indica a % deste corretivo que reagirá com os ácidos do solo durante 1 a 3 anos.

Em seguida foi aplicada a análise geoestatística e a krigagem ordinária nesses pontos amostrais, gerando os mapas de necessidade de aplicação de nitrogênio, fósforo, potássio e calcário.

### 3.9 CLASSIFICAÇÃO FUZZY PARA DETERMINAÇÃO DE ZONAS DE APLICAÇÃO DE INSUMOS

Para o desenvolvimento da classificação fuzzy foi utilizado o programa Matlab (MATLAB 7.1, 2010). O sistema foi alimentado com os mapas das necessidades de

aplicação de N, P, K e calcário das três safras, determinados com o auxílio das equações de regressão baseada na Tabela 3 e necessidade de calcário com base na equação 5.

A função *fuzzy* utilizada neste trabalho para a modelagem da incerteza dos subconjuntos *fuzzy* de entrada e saída foi do tipo trapezoidal (HINES, 1997) conforme mostrado na equação 6.

**Equação 6.** Função de pertinência trapezoidal utilizada para construção dos conjuntos *fuzzy*

$$f(x; a, b, c, d) = \left\{ \begin{array}{ll} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x < b \\ 1, & b \leq x < c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x < d \\ 0, & d \leq x \end{array} \right\}$$

A caracterização da função de pertinência trapezoidal é realizada por um conjunto de quatro parâmetros de  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$ , onde  $a$  e  $d$  determinam o intervalo dentro do qual a função de pertinência assume valores diferentes de zero, e  $b$  e  $c$  determinam o intervalo dentro do qual a função de pertinência é máxima e igual a 1.

Os subconjuntos *fuzzy* de entradas foram estabelecidos tendo como base as recomendações de N, P e K e a necessidade de calagem. Estes foram divididos em três categorias de necessidade de aplicação de insumos na área sendo: baixa, média e alta.

Na construção do conjunto *fuzzy* de entrada para a necessidade de aplicação de nitrogênio, utilizou-se os dados das recomendações de nitrogênio (Tabela 3). As necessidades de baixa, média e alta aplicação de nitrogênio foram estabelecidas considerando-se o primeiro, segundo e terceiro quartil das recomendações de nitrogênio.

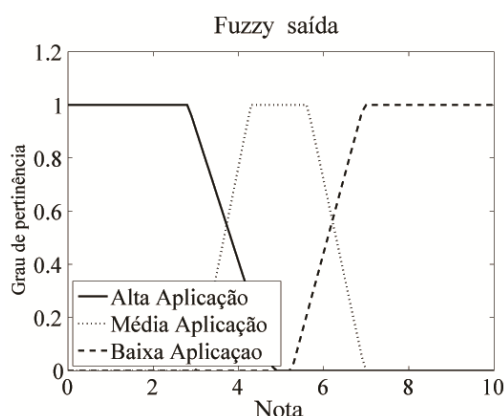
Quanto à necessidade de fósforo, primeiramente verificou-se pontualmente a

produtividade e assim para cada nível de produtividade definiu-se em função do teor de P no solo: baixa aplicação ( $P < 5 \text{ mg dm}^{-3}$ ), média aplicação (média de P de  $5 - 20 \text{ mg dm}^{-3}$ ) e alta aplicação, ( $P > 20 \text{ mg dm}^{-3}$ ), de acordo com a Tabela 3.

O mesmo procedimento foi utilizado para o potássio tendo: baixa aplicação ( $K < 60 \text{ mg dm}^{-3}$ ), média aplicação (média de K de  $60-200 \text{ mg dm}^{-3}$ ) e alta aplicação ( $K > 200 \text{ mg dm}^{-3}$ ), conforme Tabela 2.

Para a necessidade de calagem os subconjuntos *fuzzy* foram obtidos a partir de uma classificação em quartis da necessidade de calagem para cada uma das três safras estudadas, estabelecendo valores para uma baixa, média e alta aplicação.

A saída do sistema “*Fuzzy Saída*” é um diagnóstico da necessidade de aplicação de insumo na área (Figura 5). A essa variável é associada três níveis de aplicação: alta aplicação de insumos na área (ao menos duas variáveis de entrada pertencem à categoria de alta aplicação); média aplicação de insumos na área (ao menos duas variáveis de entrada pertencem à categoria de baixa aplicação); e baixa aplicação de insumos na área (ao menos três variáveis de entrada pertencem à categoria de baixa aplicação).



**Figura 5** – Conjuntos *fuzzy* para a variável de saída necessidade de aplicação de insumos.

Os três níveis de aplicação de insumos descritos receberam notas de 0 a 10. As notas de 6,4 a 10 indicam uma aplicação baixa, de 3,4 a 6,3 uma aplicação média enquanto que as de 0 a 3,3 indicam uma aplicação alta de insumos.

Uma vez definidos os conjuntos *fuzzy* de entrada e de saída, resta definir as regras de inferência a serem utilizadas pelo conjunto *fuzzy* de saída. A combinação das regras no presente trabalho foi de acordo com o modelo de Mamdani (DRIANKOV et al., 1993; HINES 1997). Tais regras de inferência obedecem ao seguinte formato:

$r_i$ : **SE** (*NN* é alto) **E** (*NP* é alto) **E** (*NK* é alto) **E** (*NC* é alto) **ENTÃO** (*APLICAÇÃO* é alta)

em que: a classificação alto das necessidades são conjuntos *fuzzy* de entrada e *APLICAÇÃO* alta é o conjunto *fuzzy* de saída, associado a uma dada regra *fuzzy*. As premissas (*NN* é alta), (*NP* é alta), (*NK* é alta) e (*NC* é alta) compõem o antecedente da regra. Cada premissa produz um valor numérico extraído da função de pertinência correspondente, ou seja,  $\mu_{NN}(\text{alto})$ ,  $\mu_{NP}(\text{alto})$ ,  $\mu_{NK}(\text{alto})$  e  $\mu_{NC}(\text{alto})$ .

O conectivo lógico **E**, simbolizando a operação de interseção *fuzzy*, é implementado pela operação de mínimo, dada por:

$\mu_{NN} \cap \mu_{NP} \cap \mu_{NK} \cap \mu_{NC} (A,A,A,A) = \min \{ \mu_{NN}(\text{alto}), \mu_{NP}(\text{alto}), \mu_{NK}(\text{alto}), \mu_{NC}(\text{alto}) \}$

em que:  $\mu_{NN} \cap \mu_{NP} \cap \mu_{NK} \cap \mu_{NC} (\text{alta}, \text{alta}, \text{alta}, \text{alta})$  é o valor da função de pertinência conjunta das variáveis *a* e *b*. O conjunto *fuzzy* de saída da regra  $r_i$  é modificado em função do valor de  $\mu_{NN} \cap \mu_{NP} \cap \mu_{NK} \cap \mu_{NC} (\text{alta}, \text{alta}, \text{alta}, \text{alta})$  gerando o conjunto *Fuzzy* de Saída dado por:

*Fuzzy* de Saída'(r<sub>i</sub>) = *Fuzzy* de Saída ×  $\mu_{NN} \cap \mu_{NP} \cap \mu_{NK} \cap \mu_{NC} (\text{alta}, \text{alta}, \text{alta}, \text{alta})$ .

O número de regras *fuzzy* a ser utilizado depende do problema. Os conjuntos *fuzzy*

foram agregados através do operador de união (máximo). A Tabela 3 mostra o conjunto das regras de inferências utilizadas.

**Tabela 3** – Regras de inferência *fuzzy*

- 
- **SE** o NN é baixo **E** NP é baixo **E** NK é baixo **E** NC é baixo **ENTÃO** a aplicação é baixa.
  - **SE** o NN é médio **E** NP é médio **E** NK é médio **E** NC é médio **ENTÃO** a aplicação é média.
  - **SE** o NN é alto **E** NP é alto **E** NK é alto **E** NC é alto **ENTÃO** a aplicação é alta.
  - **SE** o NN é baixo **E** NP é baixo **E** NK é baixo **E** NC é médio **ENTÃO** a aplicação é baixa.
  - **SE** o NN é médio **E** NP é baixo **E** NK é baixo **E** NC é baixo **ENTÃO** a aplicação é baixa.
  - **SE** o NN é baixo **E** NP é médio **E** NK é baixo **E** NC é baixo **ENTÃO** a aplicação é baixa.
  - **SE** o NN é baixo **E** NP é baixo **E** NK é médio **E** NC é baixo **ENTÃO** a aplicação é baixa.
  - **SE** o NN é médio **E** NP é médio **E** NK é baixo **E** NC é baixo **ENTÃO** a aplicação é média.
  - **SE** o NN é baixo **E** NP é baixo **E** NK é médio **E** NC é médio **ENTÃO** a aplicação é média.
  - **SE** o NN é baixo **E** NP é médio **E** NK é médio **E** NC é baixo **ENTÃO** a aplicação é média.
  - **SE** o NN é médio **E** NP é baixo **E** NK é baixo **E** NC é médio **ENTÃO** a aplicação é média.
  - **SE** o NN é médio **E** NP é baixo **E** NK é médio **E** NC é baixo **ENTÃO** a aplicação é média.
  - **SE** o NN é médio **E** NP é médio **E** NK é baixo **E** NC é médio **ENTÃO** a aplicação é média.
  - **SE** o NN é baixo **E** NP é médio **E** NK é baixo **E** NC é médio **ENTÃO** a aplicação é média.
  - **SE** o NN é alto **E** NP é alto **E** NK é alto **E** NC é baixo **ENTÃO** a aplicação é alta.
  - **SE** o NN é alto **E** NP é alto **E** NK é alto **E** NC é médio **ENTÃO** a aplicação é alta.
  - **SE** o NN é alto **E** NP é alto **E** NK é baixo **E** NC é alto **ENTÃO** a aplicação é alta.
  - **SE** o NN é alto **E** NP é alto **E** NK é médio **E** NC é alto **ENTÃO** a aplicação é alta.
  - **SE** o NN é alto **E** NP é baixo **E** NK é alto **E** NC é alto **ENTÃO** a aplicação é alta.
  - **SE** o NN é alto **E** NP é médio **E** NK é alto **E** NC é alto **ENTÃO** a aplicação é alta.
  - **SE** o NN é baixo **E** NP é alto **E** NK é alto **E** NC é alto **ENTÃO** a aplicação é alta.
  - **SE** o NN é médio **E** NP é alto **E** NK é médio **E** NC é alto **ENTÃO** a aplicação é alta.
- 

De posse dos conjuntos *fuzzy* de entrada e saída, regras de inferência e os operadores lógicos a classificação *fuzzy* foi realizada.

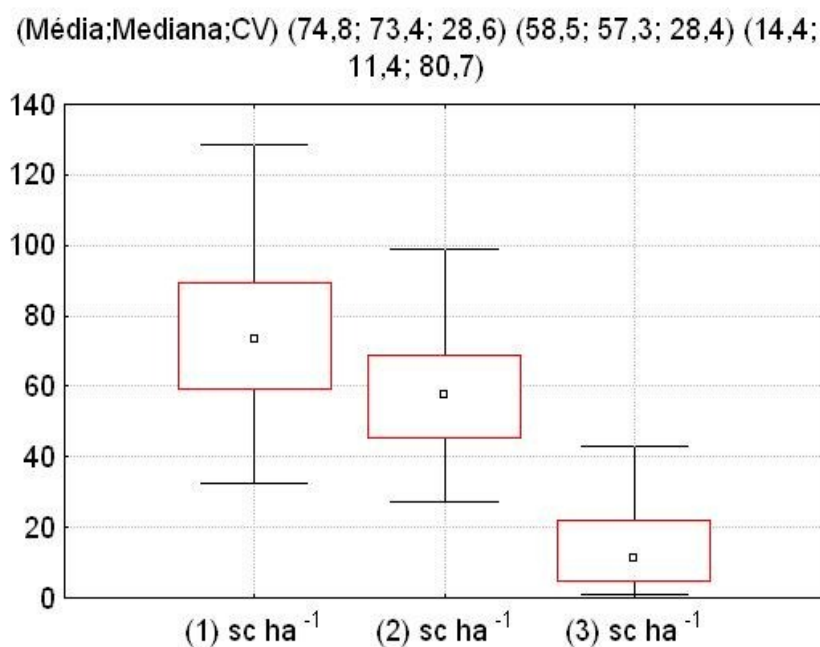
Nessa classificação obtiveram-se os mapas de notas de aplicação de insumos nas três safras consecutivas através do método de defuzzificação do centróide (DRIANKOV et al., 1993).



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 VARIABILIDADE TEMPORAL E ESPACIAL DA PRODUTIVIDADE DE CAFÉ CONILON

No gráfico de caixa (Figura 6), observa-se a posição central dos dados e a variabilidade temporal da produtividade da lavoura de café conilon nas três safras consecutivas mostrando as medidas de posição (média e mediana) e dispersão (Coeficiente de variação).



**Figura 6** – Gráfico de caixa de valores de produtividade em  $sc\ ha^{-1}$  nas três safras consecutivas.

Os valores calculados da produtividade de café beneficiado ( $sc\ ha^{-1}$ ) possui uma alta variabilidade para as três safras, variando de 32 a 128  $sc\ ha^{-1}$ , 27 a 98  $sc\ ha^{-1}$  e 1 a 48  $sc\ ha^{-1}$  para a primeira, segunda e terceira safra, respectivamente.

Para todas as safras as produtividades apresentam valores de medidas de tendência central (média e mediana) bem próximas, sendo constatada assimetria à direita ou positiva, demonstrando tendência de concentração dos dados à direita, com valores de média superiores à mediana. As produtividades nas diferentes safras

apresentam distribuição normal dos dados, conforme teste de Kolmogorov-Smirnov (KS) a ( $p < 0,05$ ).

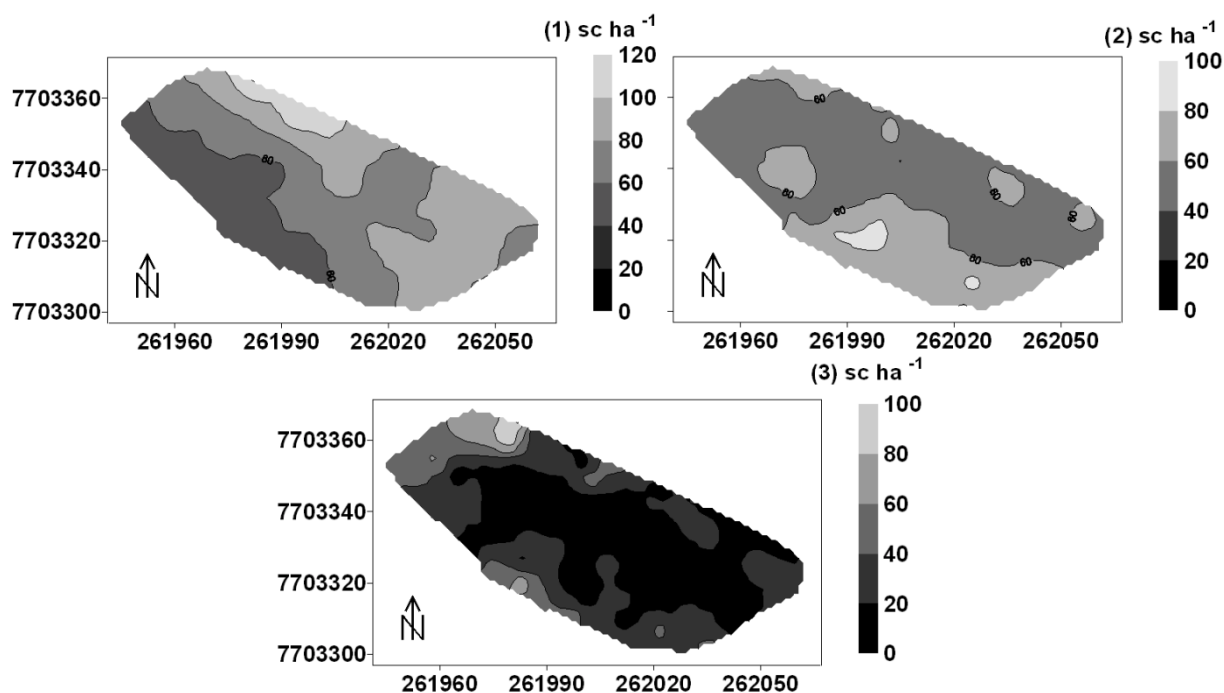
Com base nos resultados do teste t de *Student* ( $p < 0,05$ ), verifica-se que as produtividades apresentam diferença significativa de uma safra para outra. Esse fato pode ter sido consequência de vários fatores que atuaram de forma isolada ou em conjunto reduzindo a produtividade entre as safras, como as condições climáticas, fertilidade do solo e os tratos culturais.

Analisando o coeficiente de variação (CV) proposto por Warrick e Nielsen (1980), verifica-se que as duas primeiras safras apresentam média variação ( $12\% < CV < 60\%$ ) e a terceira safra apresenta uma alta variação ( $CV > 60\%$ ). Valor de CV com média variação foi encontrado por Faulin et al. (2010) e com alta variação por Balastreire et al. (2001) e Silva et al. (2008) no estudo da produtividade na cultura do café arábica.

## 4.2 MAPAS DOS NÍVEIS DE PRODUTIVIDADE DE CAFÉ CONILON

Na análise espacial, definiu-se para as safras 1, 2 e 3 os semivariogramas teóricos, escalonados pela variância dos dados, com o ajuste do modelo exponencial aos dados e definindo os parâmetros:  $C_0$  (0,40; 0,31; 0,04),  $C_0+C$  (1,47; 1,02; 0,91), alcance (a) (131,7 m; 20,7 m; 26,3 m), IDE (29%; 30%; 11%) e  $R^2$  (90%; 98%; 97%), respectivamente. O maior alcance foi obtido na safra 1, indicando maior continuidade espacial, com moderada dependência espacial ( $25\% < IDE < 75\%$ ).

Os mapas temáticos das produtividades nas três safras estão apresentados na figura 7.



**Figura 7** – Distribuição espacial das produtividades nas três safras estudadas em  $sc\ ha^{-1}$  beneficiado.

Nos mapas de produtividades apresentados, verifica-se que nas duas primeiras safras os mapas mostram-se eficientes na identificação de zonas de maiores produtividades. Na primeira e na segunda safra observam-se maiores produtividades na parte superior e inferior dos mapas, respectivamente.

Para a terceira safra é notada uma menor produtividade em toda a área estudada, principalmente na parte central da área, se comparada às safras anteriores. A produtividade nesta safra de um modo geral mostra-se baixa em relação ao potencial de produção da cultura.

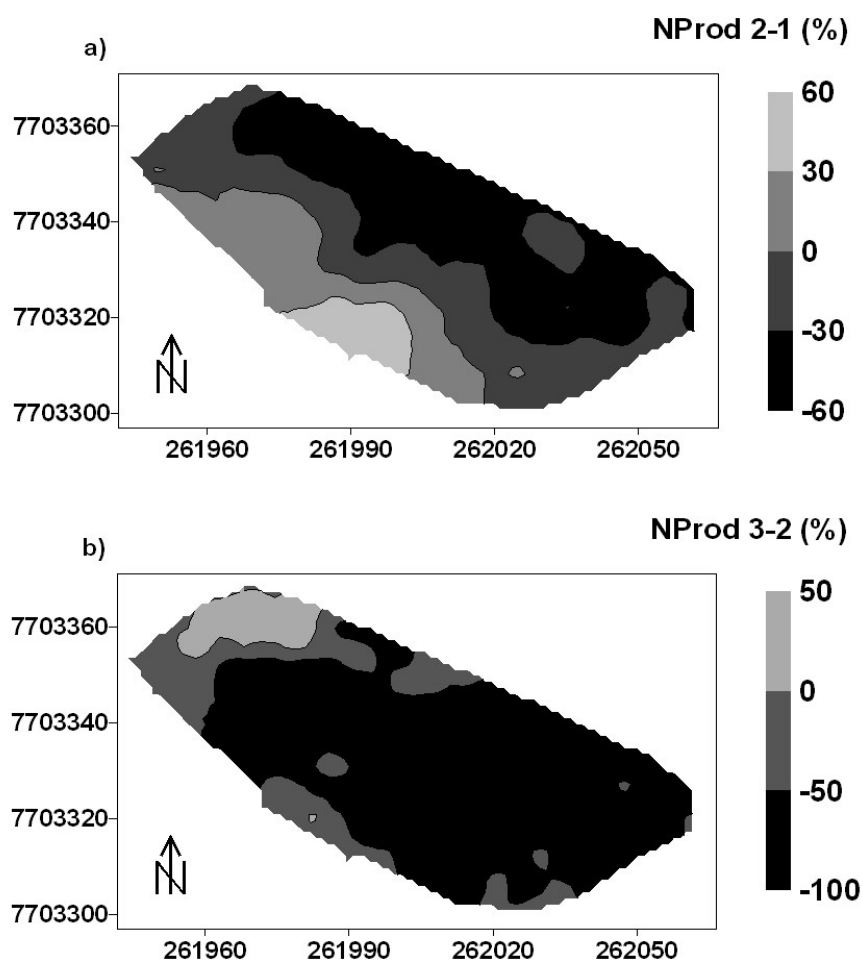
Com relação à esta variabilidade temporal da produtividade verifica-se que esta variável não apresenta a mesma tendência de distribuição durante as safras na área, e sim com certa alternância de zonas de produtividade na área no decorrer das safras. Assim pode ter ocorrido ao longo do período referente às safras em estudo, vários fatores bióticos e abióticos que interferiram na produtividade.

De acordo com Capelli (2004), o mapa de produtividade é apenas uma etapa de todo o processo que envolve a agricultura de precisão e representa o efeito combinado de diversas fontes de variabilidade espacial e temporal. Uma parte dessa

variabilidade pode ser atribuída a fatores que são constantes ou variam lentamente, enquanto outros fatores são transitórios, mudando em sua importância e distribuição espacial e temporal de uma safra para outra.

No caso do café, sabe-se que a produtividade da cultura sofre oscilações decorrentes de fatores climáticos (CARVALHO et al., 2004), ocorrência de problemas fitossanitários (CHALFOUN et al., 1978), característica fisiológica da cultura (RENA et al., 1996), sistema de plantio adotado, dentre outros fatores ainda não bem elucidados (CARVALHO et al., 2004), acarretando na complexidade de previsão dessa variável e na redução do custo-benefício do produtor rural, pelo manejo da lavoura de forma homogênea.

Uma alternativa para um estudo mais detalhado da variação da produtividade em nível local na área é a operação de álgebra de mapas entre as safras de café conilon, determinando-se os níveis de produtividade (Nprod) entre as diferentes safras, como mostrados na Figura 8.



**Figura 8** – Distribuição espacial dos níveis de produtividade entre as safras 2-1 (a) e 3-2 (b).

Para melhor visualização e descrição dos resultados, foram quantificadas em porcentagem (%) as áreas com valores positivos e negativos nos mapas cujos resultados encontram-se na Tabela 4.

**Tabela 4** – Determinação do percentual de valores positivos e negativos dos mapas de níveis de produtividade entre as diferentes safras

Atributo	Safra 2-1 (%)		Safra 3-2 (%)	
	Valores (+)	Valores (-)	Valores (+)	Valores (-)
Nprod	23,3	76,7	6,5	93,5

Maior porcentagem da área com valores negativos é encontrada para o Nprod<sub>2-1</sub> (Figura 8a), indicando uma inversão da produtividade na área entre essas safras, ou seja, na safra 1 as regiões de menores altitudes apresentam maiores produtividades. No Nprod<sub>3-2</sub> (Figura 8b) verifica-se também na maior parte da área valores negativos, concentrados em intervalos de -50 até -100 % de redução da produtividade em relação ao ano anterior, na região central da área.

Os mapas apresentados mostram a variabilidade da produtividade positiva e negativa em diferentes regiões e entre as diferentes safras, que indica uma maior e uma menor produtividade em relação à safra anterior. Essa análise permite visualizar regiões que não mantiveram as mesmas tendências de produtividade nas diferentes safras.

Ao interpretar um mapa de colheita com a finalidade de futuro gerenciamento localizado, deve ser levado em consideração as causas consistentes de variação, já que para as que não persistem ao longo do tempo pode-se ter pouco ou nenhum controle (QUEIROZ et al., 2000). A variabilidade de produtividade do cafeeiro em um mesmo talhão pode ser atribuída a um número bastante grande de fatores.

Sabe-se que em anos de carga elevada, alta produção, há o esgotamento da planta para a próxima safra (BRAGANÇA, 2005). Esse fato está relacionado com a planta não conseguir equilibrar as fases de desenvolvimento dos frutos e do crescimento vegetativo no seu ciclo fenológico podendo assim provocar redução de produtividade.

Outro fator que pode estar relacionado com a redução da produtividade é a precipitação influenciando nas fases do ciclo fenológico do cafeeiro. Segundo Damatta et al. (2007), em trabalho com aspectos do crescimento e desenvolvimento do cafeeiro, constataram que dois estádios reprodutivos do café podem ser prejudicados com a ocorrência de estiagens: desenvolvimento do botão floral e a granação dos frutos.

A precipitação pluviométrica mensal nas diferentes safras está apresentada na Tabela 5.

**Tabela 5** – Precipitação mensal (mm) referente às três safras de café conilon

Safras	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul
						254	264	256	89	28*	35*	71*
1	45*	61	90	126	361	174	291	397	33	126**	68**	33**
2	22**	101	37	241	218	44	134	287	125	14***	13***	4***
3	10***	78	67	267	198	237	100	62	46	25	19	7

\*, \*\*, \*\*\* desenvolvimento do botão floral da primeira, segunda e terceira safra, respectivamente.

Nas duas primeiras safras, os valores de precipitação foram superiores e mais distribuídos nos meses de desenvolvimento do botão floral no cafeeiro (maio a setembro das safras 1 e 2), quando comparados para a terceira safra (maio a setembro da safra 3). Isso indica que, na terceira safra, esse fato, pode ter influenciado no desenvolvimento do botão floral e, conseqüentemente, na produtividade. Segundo Berlato et al. (2005), a instabilidade climática influencia acentuadamente na variabilidade temporal da produtividade das culturas.

No cafeeiro, a formação de gemas florais tem sido relacionada com déficit hídrico interno moderado e também por fatores climáticos, como temperatura, fotoperíodo e disponibilidade de água, que estão diretamente ligados a indução floral (THOMAZIELLO et al., 1997).

A relação entre o café seco em coco e o beneficiado influenciou na variabilidade temporal com diminuição da produtividade. Essa quebra pode estar relacionada com a baixa precipitação observada em janeiro na safra 2, período no qual está ocorrendo o estágio de granação do café e, conforme Oliveira (2007) em estudo nesta área, uma elevada evapotranspiração.

A variabilidade temporal verificada entre as safras pode estar relacionada com vários fatores como alguns já mencionados, porém, Ferrão et al. (2007) afirmam que os ramos produtivos (ortotrópicos e plagiotrópicos) após determinado número de colheitas tornam-se envelhecidos (esgotados) e com baixa produção, podendo, também, contribuir para a obstrução da passagem da luz solar para o interior da planta, refletindo na diminuição da produção.

Entre as práticas atualmente empregadas no manejo da lavoura de conilon para evitar tal fato a poda ocupa lugar de destaque, eliminando ramos (ortotrópicos e

plagiotrópicos) velhos e pouco produtivos e restabelecendo o equilíbrio entre área foliar e massa seca total da planta (BRAGANÇA, 2005; RONCHI; DAMATTA, 2007).

#### **4.2.1 Índices de produtividade entre as safras**

Após a determinação dos Nprod entre as safras 2-1 e 3-2 fez-se uma ponderação dos diferentes níveis em função das respectivas áreas e foram determinados os índices de produtividade (IP), obtendo-se um  $IP_{2-1}$  de -18,0 % e  $IP_{3-2}$  de -57,1 %, mostrando a partir da metodologia de análise espacial uma redução da produtividade na lavoura.

A presença de menores níveis de produtividade no mapa Nprod 3-2 (-50 a -100%) explica o menor índice de produtividade ( $IP_{3-2}$ ). Isto demonstrou uma redução da produtividade para a safra 3 de forma mais intensa se comparado para a safra 2.

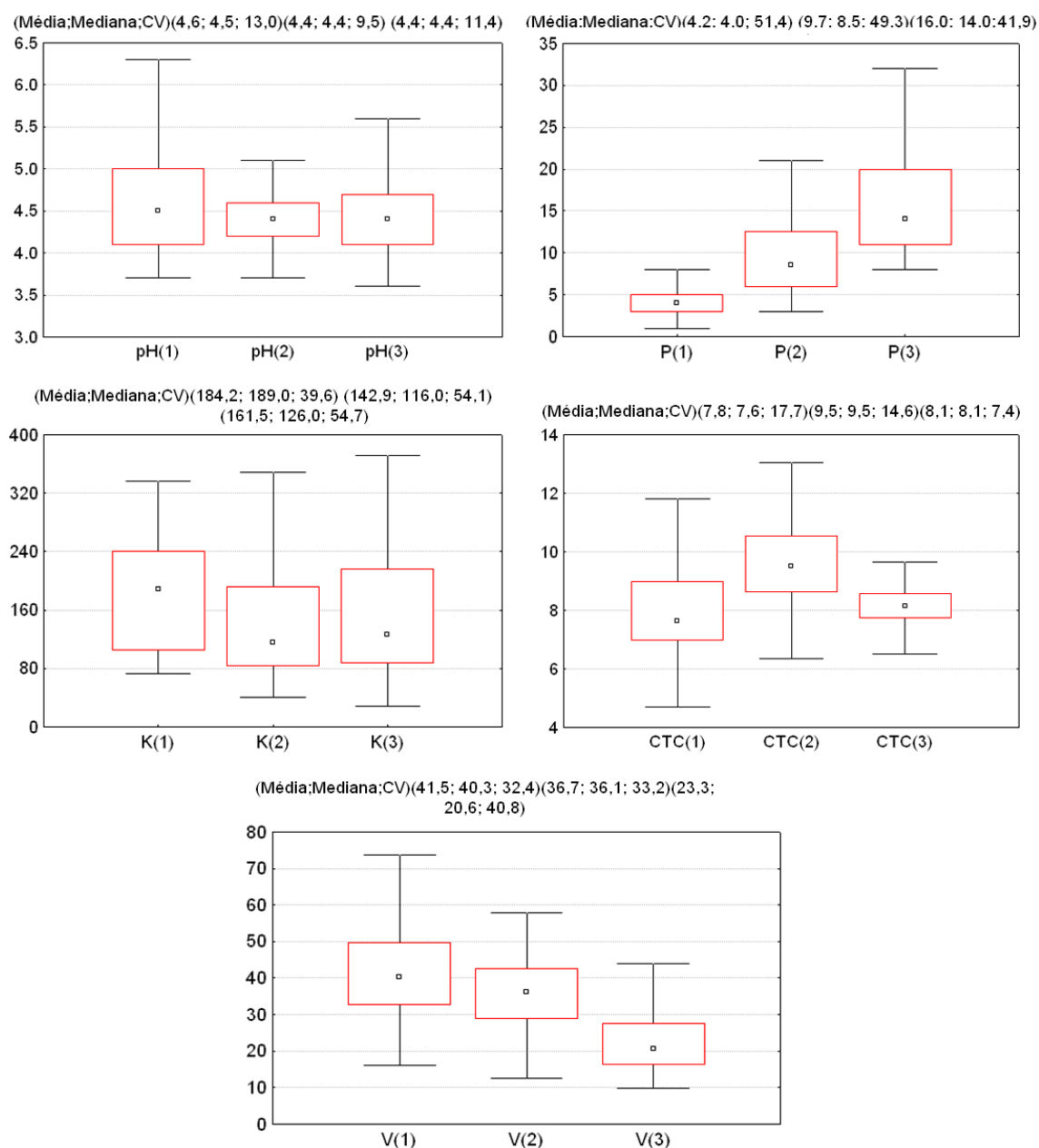
LARK et al. (1997) destacam alguns problemas possíveis de ocorrer quando da interpretação dos mapas de colheita. O primeiro é distinguir múltiplas causas de variação. Outro problema é a fraca consistência entre mapas de produtividade de safras sucessivas: mapas de produtividade serão úteis somente na medida em que as informações a respeito de fatores intrínsecos do campo puderem ser correlacionadas.

Assim em alguns casos, principalmente na cultura do café, não é tão simples estabelecer comparações de produtividade entre as safras, já que ela depende da bienalidade, cultivar, tratos culturais, fertilidade do solo, densidade de plantio e condições climáticas que variam de ano para ano (SILVA et al., 2008).

### **4.3 VARIABILIDADE TEMPORAL E ESPACIAL DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO**

Na Figura 9 estão apresentados os gráficos de caixa mostrando a variação temporal dos atributos químicos para as safras de café conilon.





**Figura 9** – Gráfico de caixas dos atributos químicos do solo.

Analisando esses gráficos que sumarizam o conjunto dos atributos químicos estudados, pode-se visualizar a variabilidade temporal destes nas safras estudadas.

Verifica-se assimetria à direita com média maior que a mediana para todos os atributos químicos, com exceção do K na safra 1. A CTC nas safras 2 e 3 apresenta uma distribuição simétrica com a média igual mediana.

Os coeficientes de variação (CV) dos atributos químicos apresentam valores baixos

para o pH na safra 2 e 3 e CTC na safra 3 ( $CV < 12\%$ ), assim, todos os outros atributos nas diferentes safras estão classificados com médio CV ( $12\% < CV < 60\%$ ).

De acordo com os limites estabelecidos para os níveis de fertilidade do solo, para a cultura do café conilon no Estado do Espírito Santo (PREZOTTI et al., 2007), os valores médios dos atributos químicos apresentam-se baixos para pH nas três safras ( $pH < 4,5$ ), muito baixo para P na primeira safra ( $P < 5,0 \text{ mg dm}^{-3}$ ), baixo para a segunda safra ( $5,0 < P < 10,0 \text{ mg dm}^{-3}$ ) e médio para a terceira safra ( $11,0 < P < 20,0 \text{ mg dm}^{-3}$ ), médio para o K na segunda safra ( $60,0 < K < 120 \text{ mg dm}^{-3}$ ) e alto para a primeira e terceira safra ( $K > 120 \text{ mg dm}^{-3}$ ), médio para a CTC nas três safras ( $4,5 < CTC < 10 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) e baixo para a saturação de bases nas três safras ( $V < 50\%$ ).

Posteriormente, na análise espacial definiu-se para as safras 1, 2 e 3 os parâmetros estimados dos semivariogramas experimentais utilizados para avaliar a dependência espacial dos atributos químicos, e também para a realização da krigagem ordinária, que estão apresentados na Tabela 6.

**Tabela 6** – Parâmetros dos semivariogramas ajustados para os atributos químicos (camada de 0-0,20 m) do solo

Atributo	Modelo	a (m)	$C_0$	$C_0+C$	IDE (%)	$R^2$ (%)
pH <sub>1</sub>	ESF	9,8	0,08	0,37	23,0	83,5
pH <sub>2</sub>	ESF	7,5	0,01	0,15	4,0	89,5
pH <sub>3</sub>	ESF	8,8	0,01	0,25	4,0	90,7
P <sub>1</sub>	ESF	7,7	0,08	0,99	27,6	92,0
P <sub>2</sub>	ESF	6,8	0,01	0,92	30,0	92,6
P <sub>3</sub>	ESF	9,0	0,01	1,04	6,0	90,9
K <sub>1</sub>	EXP	8,9	0,36	0,92	8,0	72,0
K <sub>2</sub>	ESF	8,1	0,10	1,04	13,0	90,5
K <sub>3</sub>	ESF	8,8	0,03	0,94	4,0	91,9
CTC <sub>1</sub>	EXP	17,4	0,01	0,97	32,0	61,0
CTC <sub>2</sub>	EXP	8,2	0,01	0,84	37,0	90,0
CTC <sub>3</sub>	EXP	8,5	0,01	0,94	3,0	85,0
V <sub>1</sub>	ESF	9,2	0,08	0,99	12,0	85,8
V <sub>2</sub>	ESF	8,0	0,01	0,92	4,0	80,9
V <sub>3</sub>	ESF	7,0	0,01	1,04	4,0	87,9

1 – primeira safra; 2 – segunda safra; 3 – terceira safra; EXP – modelo exponencial; ESF – modelo esférico; a – alcance (m);  $C_0$  – efeito pepita;  $C_0 + C$  – patamar; IDE – índice de dependência espacial [ $C_0/(C_0 + C)$ ] e  $R^2$  – coeficiente de determinação do modelo do semivariograma.

O modelo que apresenta melhor ajuste aos semivariogramas experimentais dos atributos químicos em estudo é o esférico, com exceção apenas para o  $K_1$ ,  $CTC_1$ ,  $CTC_2$  e  $CTC_3$  onde o modelo escolhido foi o exponencial. De acordo com Bertolani e Vieira (2001) e Grego e Vieira (2005), o modelo esférico é o que predomina nos trabalhos em ciência do solo.

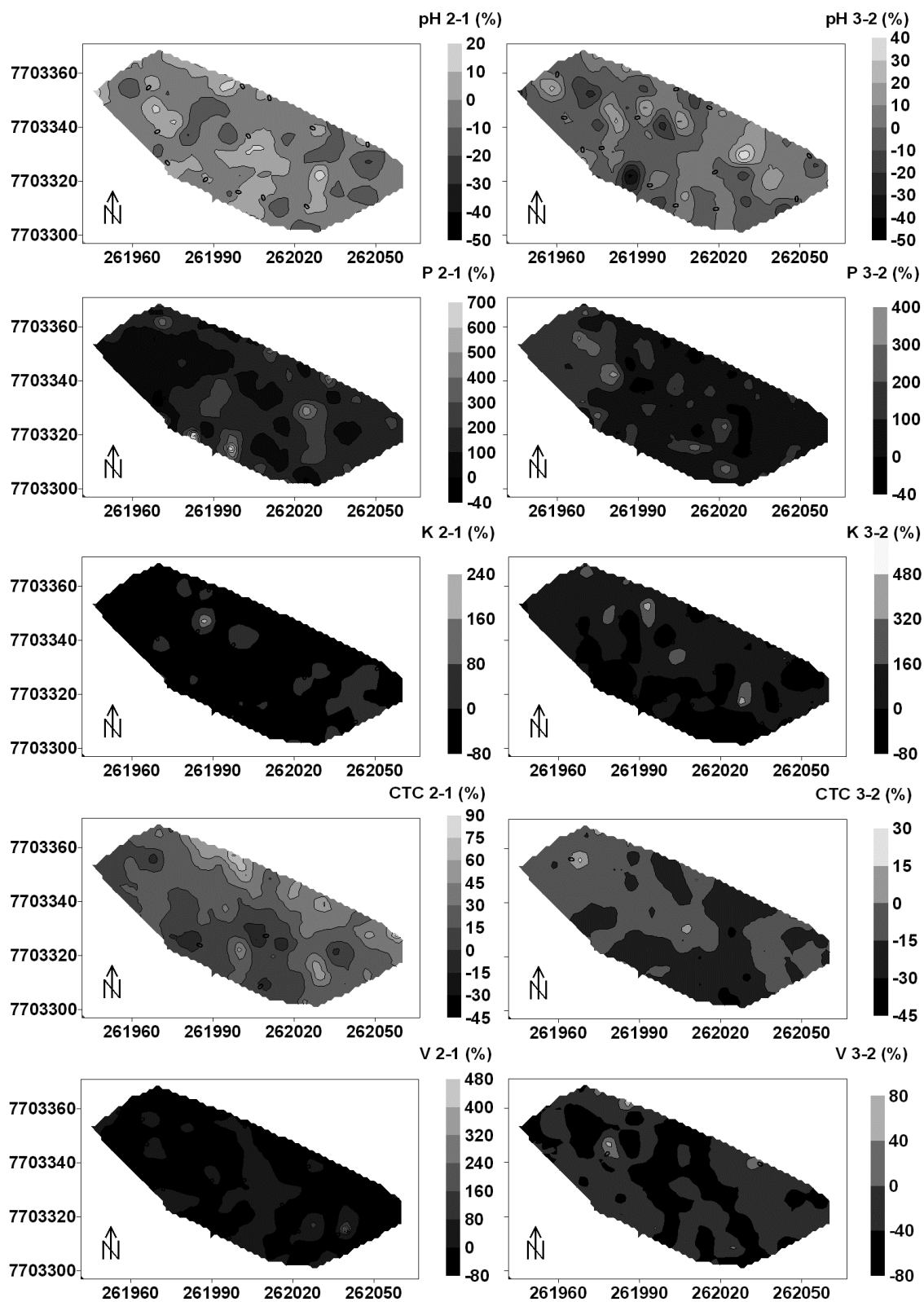
Observa-se, no ajuste do modelo teórico ao semivariograma experimental um valor de  $R^2$  superior a 80% para os atributos químicos do solo, com exceção do  $K_1$  e  $CTC_1$ , que apresentam  $R^2$  igual 72 % e 61 %.

Nos atributos  $pH_1$ ,  $pH_2$ ,  $pH_3$ ,  $P_3$ ,  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ ,  $CTC_3$ ,  $V_1$ ,  $V_2$  e  $V_3$  é constatada a forte dependência espacial ( $IDE < 25\%$ ) e nos outros a moderada dependência espacial ( $25\% < IDE < 75\%$ ), conforme classificação proposta por Cambardella et al. (1994).

Com o mesmo padrão espacial, ou seja, com alcances próximos ajustado ao modelo esférico, estão os atributos  $pH_1$ ,  $pH_2$ ,  $pH_3$ ,  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ ,  $V_1$ ,  $V_2$  e  $V_3$  e ao modelo exponencial, estão os atributos  $K_1$ ,  $CTC_2$  e  $CTC_3$ . O atributo  $CTC_1$  se ajusta também ao modelo exponencial, todavia apresenta um alcance mais elevado (17 m).

#### 4.4 MAPAS DE PERDAS E GANHOS DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS

Considerando os dados da análise espacial conforme a Tabela 6, construíram-se os mapas temáticos para a determinação dos mapas de perdas e ganhos (MPG) dos atributos nas diferentes safras (Figura 10) e para o cálculo do índice de fertilidade do solo (IFS), segundo metodologia descrita.



**Figura 10** – Mapas dos ganhos e perdas (%) dos atributos pH, P, K, CTC e V no solo entre as safras 2-1 e 3-2.

Nos mapas observa-se a presença de regiões com valores percentuais negativos e positivos, em função da alternância do nível de concentração do atributo (nutriente) entre as safras. Este estudo possibilitou localizar áreas com maiores e menores perdas, auxiliando na detecção dos locais que necessitam de maiores cuidados e assim estar realizando um manejo localizado dos nutrientes.

A utilização dessa metodologia se justificou no estudo de Azevedo (2004) e Souza (2009), que comentam um ganho na análise das informações, ou seja, a análise espacial permitiu detectar sítios com maiores e menores valores de perdas, permitindo que possam ser realizados maiores cuidados para os locais mais problemáticos, fato que não foi possível quando se trabalhou com a estatística clássica.

Na Tabela 7 está apresentada para cada atributo a porcentagem (%) das áreas referentes aos valores positivos (ganhos) e os valores negativos (perdas) entre as safras.

**Tabela 7** – Determinação do percentual das áreas com valores positivos e valores negativos dos mapas de perdas e ganhos dos atributos químicos

Atributos	Saфра 2-1 (%)		Saфра 3-2 (%)	
	Valores (+)	Valores (-)	Valores (+)	Valores (-)
pH	26,5	73,5	49,5	50,5
P	99,0	1,0	94,7	5,3
K	15,8	84,2	64,7	35,3
CTC	96,5	3,5	1,5	98,5
V	27,7	72,3	2,4	97,6

Na safra 2 em relação a safra 1 verifica-se que para os atributos pH, K e V em maior parte da área apresenta valores negativos e o P e a CTC positivos. Baixos valores de K na safra 2 possivelmente estão relacionados com a maior produtividade na primeira safra que pode ter sido responsável por uma acentuada absorção dos cátions básicos (Ca, K, Mg), reduzindo assim a soma de bases e conseqüentemente a V(%).

Com relação as safras 3 e 2, encontrou-se valores negativos de porcentagem de áreas de 98,5% e 97,6% para CTC e V, respectivamente, indicando aumento da

acidez do solo.

Cabe ressaltar que a adubação na área foi realizada nas diferentes safras pela análise química de uma amostra composta, o que considera igual à necessidade de calagem e adubação em toda a área. Assim, percebe-se que a avaliação apenas pela média do atributo pode mascarar algumas informações da variabilidade desses atributos químicos no solo entre as safras.

A média do pH não apresenta diferença significativa pelo teste t de *student* ( $p < 0,05$ ) entre as safras 3 e 2. O K apresenta diferença significativa da safra 2 para a 1, enquanto que o P, CTC e V entre as safras 2 e 1 e 3 e 2. Entretanto, a partir da análise espacial é possível visualizar áreas representativas de redução e ganho do atributo na lavoura do café em diferentes regiões.

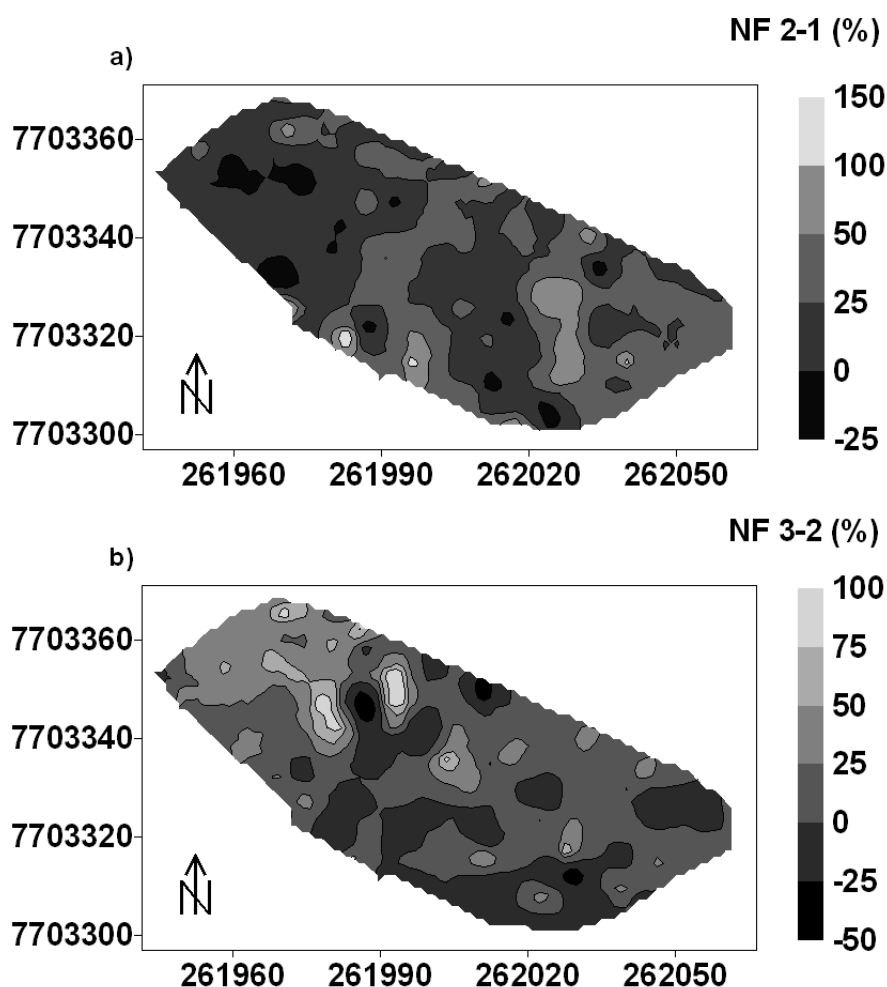
Em trabalho realizado por Bragança (2005), a sequência de acumulo de nutrientes nos principais órgãos do cafeeiro conilon (raiz, tronco + ramos ortotrópicos, ramos plagiotrópicos, folhas e frutos) foi  $N > Ca > K > Mg > S > P > Fe > Mn > Zn > Cu$ , fato que mostra um indicativo dos valores positivos do P em ambos os mapas, possivelmente devido a uma baixa extração desse do solo pelo cafeeiro.

O ganho de K no ano 3 em relação ao ano 2, apesar dos valores médios não apresentarem diferença significativa pelo teste t de *Student* ( $p < 0,05$ ), não refletiu no aumento de produtividade. A diminuição da produtividade possivelmente não está relacionada com a disponibilidade desse nutriente no solo, mas sim com valores baixos de pH, V, condições climáticas em cada estágio do ciclo fenológico e tratos culturais.

#### 4.5 MAPAS DOS NÍVEIS DE FERTILIDADE DO SOLO NA LAVOURA DE CAFÉ CONILON

Na tentativa de se obter níveis que representam a variação da fertilidade do solo entre as safras estudadas, foram realizados por meio de operações algébricas os mapas dos níveis de fertilidade do solo. Desta forma, foram utilizados os cinco atributos químicos estudados com o intuito de representar da melhor forma possível a variação da fertilidade do solo entre as safras.

Conforme mostra a Figura 11, os mapas com os níveis de fertilidade do solo (NF) apresentam valores entre -25 a 150 % para NF<sub>2-1</sub> e -50 a 100 % para NF<sub>3-2</sub>.



**Figura 11** – Distribuição espacial dos níveis de fertilidade do solo (NF) entre as safras 2-1(a) e 3-2(b).

Os mapas apresentados são a síntese da tendência média ocorrida com os atributos químicos, ou seja, são as perdas ou ganhos médios dos atributos utilizados na sua obtenção, representando a variação da fertilidade do solo entre as safras.

As áreas referentes a cada NF estão apresentadas na Tabela 8. Nota-se para o NF<sub>2-1</sub> que maior porcentagem de área (88,9 %) está concentrada nos níveis de fertilidade do solo entre 0 a 50%. Todavia, para a NF<sub>3-2</sub> maior porcentagem (%) da área está distribuída na parte negativa e positiva, -25 a 0 e 0 a 25, respectivamente.

**Tabela 8** – Determinação das áreas referentes aos mapas de níveis de fertilidade do solo

NFS	Safra 2-1 (%)	Safra 3-2 (%)
-50 ↯ -25	-	0,9
-25 ↯ 0	4,6	27,1
0 ↯ 25	51,0	49,1
25 ↯ 50	37,9	18,0
50 ↯ 75	5,5	3,6
75 ↯ 100	0,8	1,3
100 ↯ 150	0,2	-

A maior porcentagem de área negativa no  $NF_{3-2}$  demonstra uma redução da fertilidade do solo para a terceira safra, e tendo em vista que a produtividade do cafeeiro está correlacionada com a fertilidade do solo esta análise é importante para detecção de zonas com diferentes potenciais produtivos em função da fertilidade química do solo e também para realização de um programa de calagem e adubação, visando à manutenção da produtividade do cafeeiro.

#### 4.5.1 Índices de fertilidade do solo

Ponderando-se os níveis de fertilidade do solo em função de suas respectivas áreas, são obtidos os índices de fertilidade do solo (IFS) de 24,3% e 12,3 % para  $IFS_{2-1}$  e  $IFS_{3-2}$ , respectivamente. O menor  $IFS_{3-2}$  ocorre principalmente pela redução da CTC, pH e do V entre as safras, comprometendo assim o crescimento, o desenvolvimento e a produção do cafeeiro.

A avaliação a partir do IFS permitiu caracterizar a tendência da variação da fertilidade do solo na lavoura entre as diferentes safras. Esse índice representa uma visão espacial, o que torna mais fácil flexibilizar a tomada de decisão, em termos de manejo econômico e ambiental, pois o elevado preço dos insumos e a grande exportação de nutrientes do solo pelo cafeeiro exigem que os insumos sejam usados de forma eficiente para se obter maior produtividade, o que pode ser obtido com a identificação espacial e temporal dos atributos químicos do solo que limitam a produção.

De acordo com Azevedo (2004), essa metodologia traz como vantagem análise



conjunta das informações, utilizando os procedimentos clássicos e técnicas modernas, como a geoestatística e outros recursos de geoprocessamento. Apesar dos resultados serem específicos da área de estudo, eles podem, juntamente com as recomendações gerais, ser utilizados para outros locais da região que apresentam condições similares de paisagem, cobertura vegetal e solo, contribuindo para identificação de processos de degradação.

#### 4.6 ANÁLISE DE REGRESSÃO NA ORIENTAÇÃO DA APLICAÇÃO DE INSUMOS

Para a recomendação de aplicação dos insumos estabeleceu-se regressões lineares para cada nutriente de forma que atendessem as faixas recomendadas e a produtividade esperada determinando-se assim doses variáveis em função do valor do nutriente e da produtividade. Na Tabela 9 estão organizadas as equações de regressões para cada nutriente visando a recomendação em doses variadas, segundo o proposto por Prezotti et al. (2007).

**Tabela 9** – Equações utilizadas na recomendação das doses de nitrogênio, fósforo e potássio

	<b>Equações de regressão</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
<b>NN</b>	$224,83 + 2,33*Prod$	98,0
<b>NP</b>	$84,02 + 0,53*Prod - 8,99*P + 0,17*P^2$	94,0
<b>NK</b>	$181,704 + 3,12*Prod - 0,47*K - 0,0036* K^2 - 0,0041*Prod^2$	98,0

NN – necessidade de nitrogênio; NP – necessidade de fósforo; NK – necessidade de potássio; Prod – a produtividade em  $sc\ ha^{-1}$  (café beneficiado); P – teor de fósforo encontrado no solo ( $mg\ dm^{-3}$ ); K – o teor de potássio encontrado no solo ( $mg\ dm^{-3}$ ); R<sup>2</sup> – coeficiente de determinação da equação de regressão.

O cálculo das doses a serem aplicadas de NPK foi realizado pelas equações de regressão (Tabela 9), com todos os coeficientes estimadores significativos ( $p < 0,05$ ) e, também, foi determinada a necessidade de calagem (NC) conforme equação 5, para as três safras.

Após determinada a necessidade de aplicação a taxa variável de N, P, K e calcário para os 109 pontos amostrais foram realizadas as análises de dependência espacial,

definindo os semivariogramas teóricos escalonados pela variância dos dados (Tabela 10).

**Tabela 10** – Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas escalonados para as necessidades de aplicação de insumos nas três safras de café conilon

Atributo	Modelo	a (m)	C <sub>0</sub>	C <sub>0</sub> +C	IDE (%)	R <sup>2</sup> (%)
NN <sub>1</sub>	ESF	45,0	0,37	1,10	34,0	92,0
NN <sub>2</sub>	EXP	20,0	0,10	1,20	4,0	85,0
NN <sub>3</sub>	EXP	41,0	0,16	1,05	15,0	94,0
NP <sub>1</sub>	EXP	57,0	0,50	1,18	45,0	84,0
NP <sub>2</sub>	EXP	12,0	0,35	1,07	33,0	86,0
NP <sub>3</sub>	EXP	14,0	0,20	0,98	20,0	60,0
NK <sub>1</sub>	ESF	37,0	0,52	1,07	49,0	95,0
NK <sub>2</sub>	ESF	10,0	0,26	0,96	27,0	61,0
NK <sub>3</sub>	EXP	15,0	0,13	1,03	12,0	76,0
NC <sub>1</sub>	EXP	18,0	0,27	0,99	27,0	70,0
NC <sub>2</sub>	EXP	14,0	0,21	0,90	23,0	63,0
NC <sub>3</sub>	EXP	15,0	0,20	1,04	18,0	70,0

NN – necessidade de nitrogênio; NP – necessidade de fósforo; NK – necessidade de potássio; NC – necessidade de calcário; 1 – primeira safra; 2 – segunda safra; 3 – terceira safra; EXP – modelo exponencial; ESF- modelo esférico; a – alcance (m); C<sub>0</sub> – efeito pepita; C<sub>0</sub>+ C – patamar; IDE – índice de dependência espacial  $[C_0/(C_0 + C)]$  e R<sup>2</sup> – coeficiente de determinação do modelo do semivariograma.

Os dados dos semivariogramas experimentais de todas as necessidades de aplicação de insumos apresentam ajuste do modelo exponencial, com exceção do NN<sub>1</sub>, NK<sub>1</sub> e NK<sub>2</sub> com ajuste ao modelo esférico.

Os valores do alcance podem ser separados em dois grupos distintos: o primeiro grupo representado pelas necessidades com alcance menor que 30 m, sendo eles NN<sub>2</sub>, NP<sub>2</sub>, NP<sub>3</sub>, NK<sub>2</sub>, NK<sub>3</sub>, NC<sub>1</sub>, NC<sub>2</sub> e NC<sub>3</sub>; e o segundo grupo foi composto pelas necessidades com alcance maior que 30 m, sendo eles NN<sub>1</sub>, NN<sub>3</sub>, NP<sub>1</sub> e NK<sub>1</sub>. Isso indica o limite da distância que os pontos estão correlacionados entre si, sendo que pontos coletados com distâncias maiores que o alcance são independentes, e sua análise deve ser pela estatística clássica (VIEIRA et al., 1983; VIEIRA, 2000).

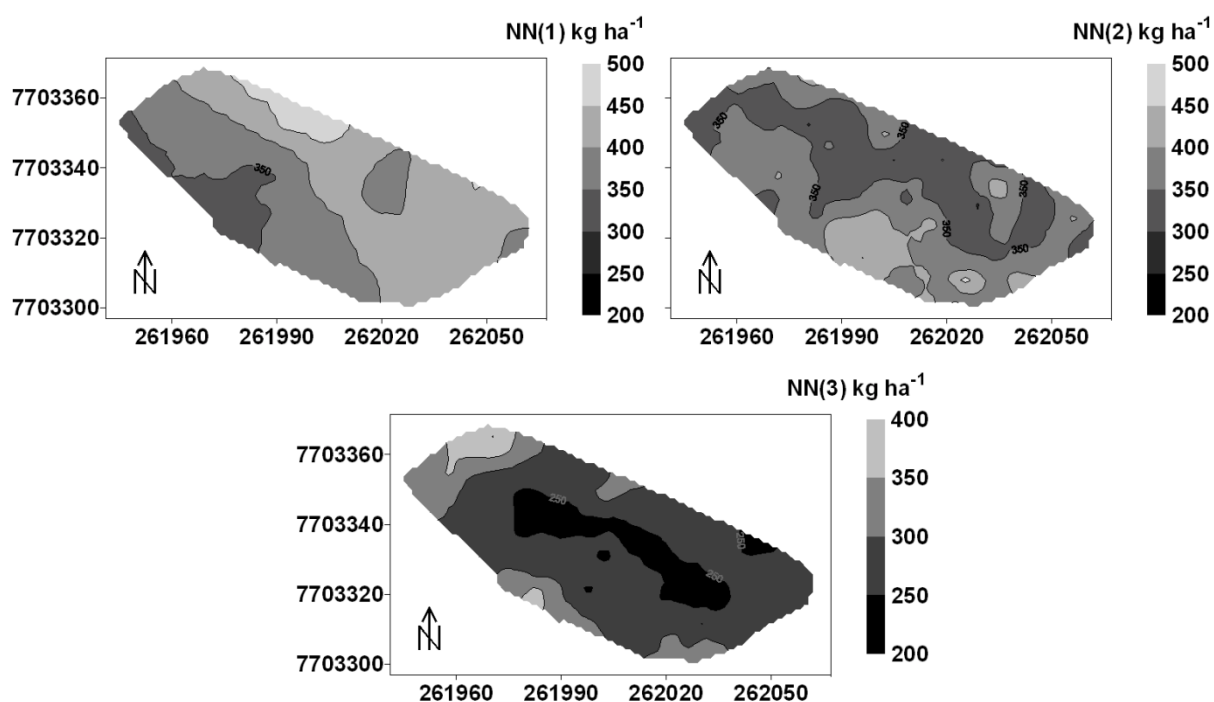
Nos atributos NN<sub>2</sub>, NN<sub>3</sub>, NP<sub>3</sub>, NK<sub>3</sub>, NC<sub>2</sub> e NC<sub>3</sub> é constatada a forte dependência espacial (IDE < 25 %) e nos demais moderada dependência espacial (25% < IDE < 75%), conforme classificação proposta por Cambardella et al. (1994). Também, foi

determinada a qualidade do ajuste do semivariograma teórico segundo os valores do coeficiente de determinação.

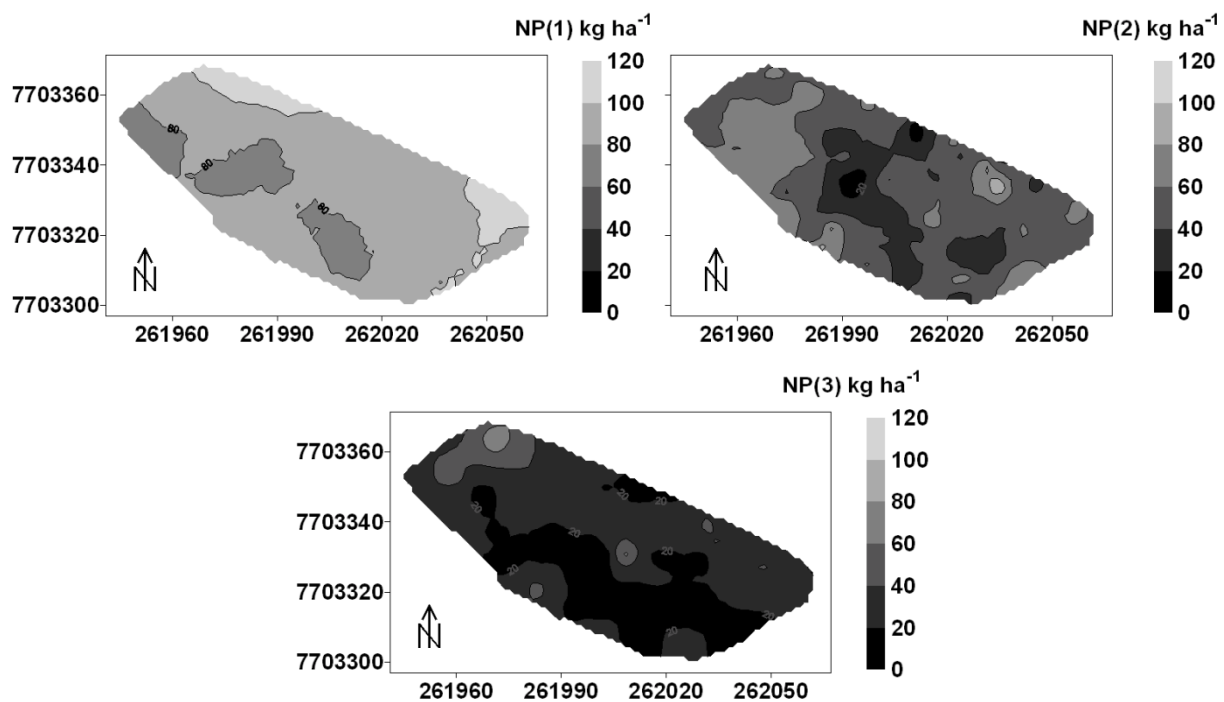
Desta forma, em todas as necessidades de insumos, a precisão para as estimativas de krigagem ordinária foram elevadas, constatadas por um bom desempenho do coeficiente de determinação ( $R^2 > 60\%$ ). Na análise da validação cruzada, os valores observados e os estimados apresentaram correlação significativa ( $p < 0,05$ ).

Com os parâmetros obtidos pelo ajuste do modelo ao semivariograma experimental e com a krigagem ordinária, foram obtidos os mapas de contorno que descreve a variabilidade na área das necessidades de aplicação de nitrogênio (Figura 12), fósforo (Figura 13), potássio (Figura 14) e calcário (Figura 15) para todas as safras.

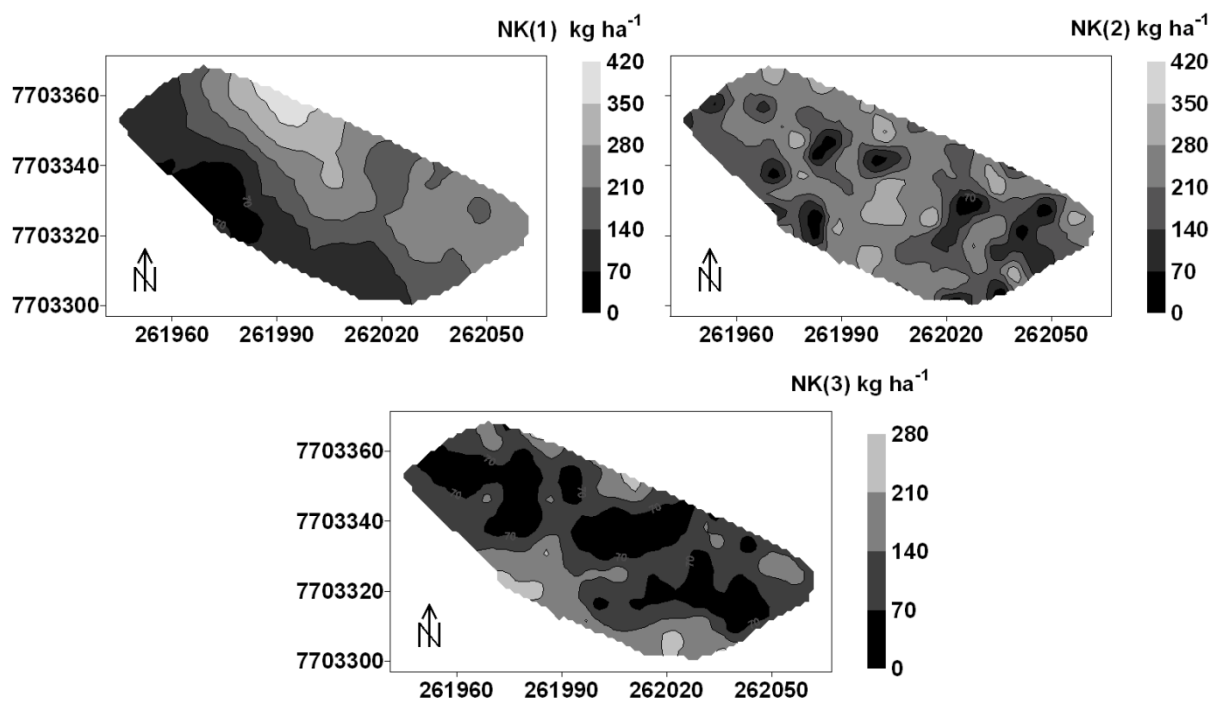
Essas Figuras facilitam a visualização da variabilidade espacial e ilustram o comportamento e a distribuição espacial das aplicações de insumos na área.



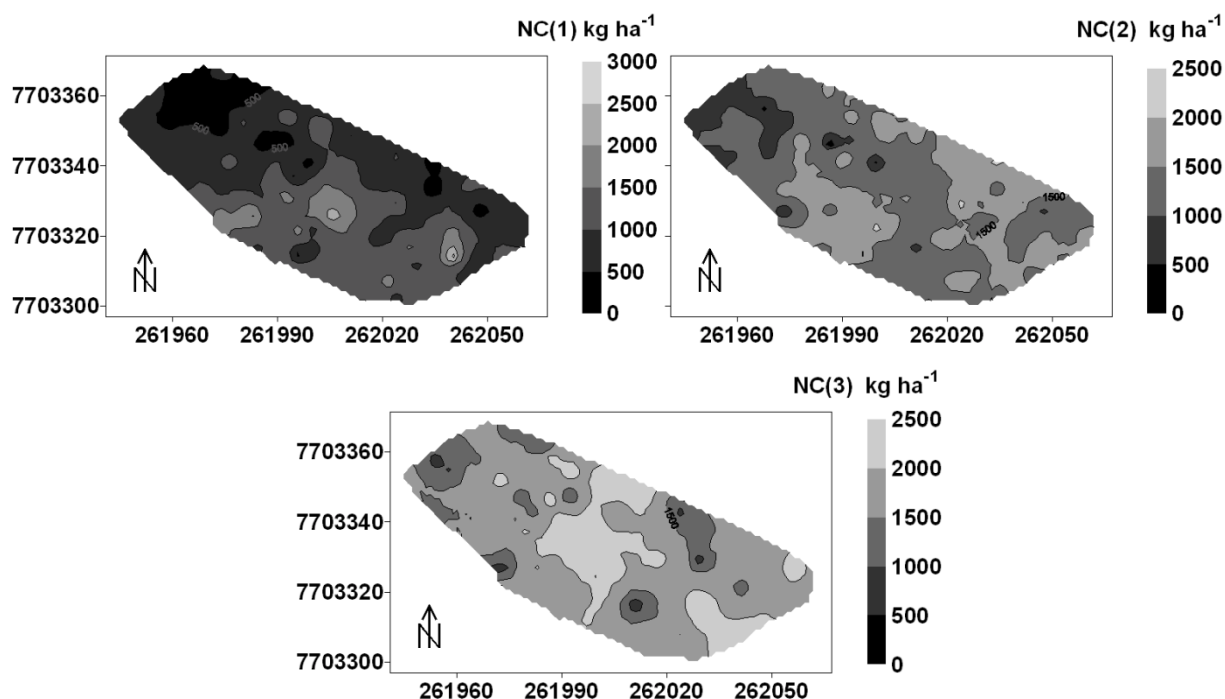
**Figura 12** – Distribuição espacial das necessidades de nitrogênio nas três safras estudadas.



**Figura 13** – Distribuição espacial das necessidades de fósforo nas três safras estudadas.



**Figura 14** – Distribuição espacial das necessidades de potássio nas três safras estudadas.



**Figura 15** – Distribuição espacial das necessidades de calagem (NC) nas três safras estudadas.

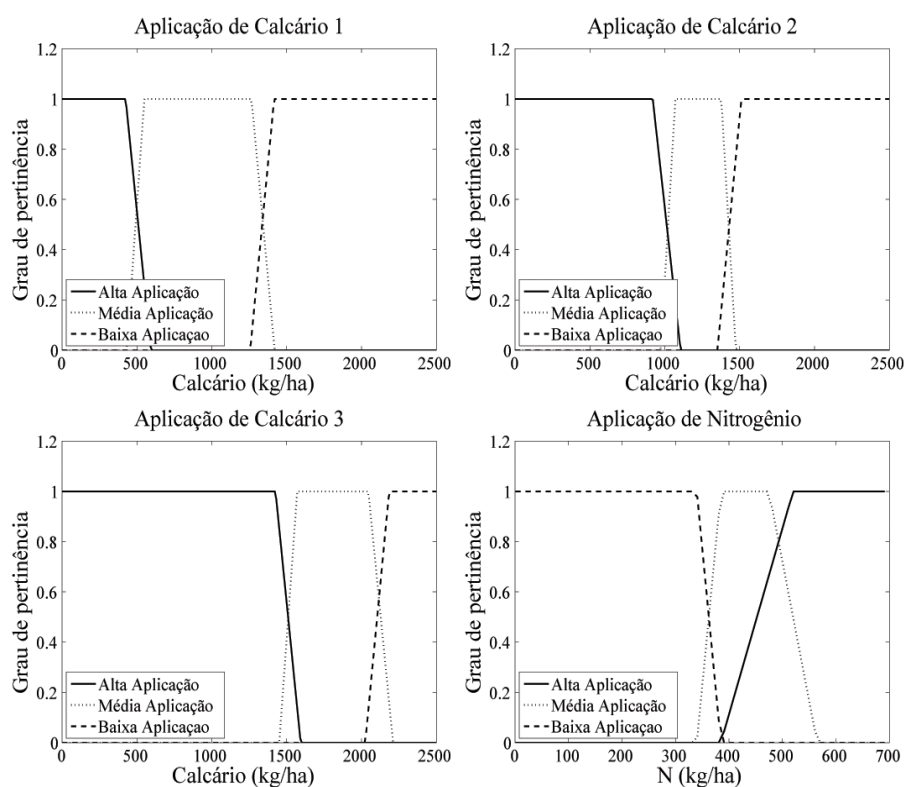
Em função da variabilidade espacial das necessidades de aplicação de insumos nas diferentes safras, nota-se que se a aplicação dos fertilizantes e corretivo for realizada pela média, apenas as necessidades médias serão atendidas, não considerando, desta forma, as necessidades específicas de cada parte do campo.

Segundo Ortiz (2003), a análise da distribuição espacial das variáveis envolvidas na produção possibilita a distinção de regiões com menor e maior variabilidade e a geração de mapas de aplicação diferenciada dos insumos agrícolas. Para isso, se leva em conta a quantidade de nutrientes necessária ao ótimo desenvolvimento do cultivo e a quantidade disponível em diferentes áreas do talhão (variabilidade espacial), promovendo a otimização do sistema de produção.

Ressalta-se também que o uso das equações de regressão para a determinação das aplicações de N, P e K possibilita a construção de mapas que atendem valores intermediários dentro de cada faixa de produtividade e teor de nutriente no solo.

## 5. LÓGICA FUZZY NA ANÁLISE DOS DADOS

Na Figura 16 são apresentados os conjuntos *fuzzy* de entrada para as necessidades de calagem para as três safras e N.



**Figura 16** – Conjuntos *fuzzy* para a variável de entrada da necessidade de aplicação de calcário e nitrogênio para as três safras.

Para os demais conjuntos *fuzzy* apresentados, nota-se momentos de incerteza (valores de pertinência de 0,5) entre as definições de baixa e média, e média e alta aplicação. Essa característica já era esperada, pois é esse fato que diferencia a lógica *fuzzy* da clássica. Tal fato significa que esse valor pode pertencer a dois subconjuntos simultaneamente.

De acordo com Zadeh (1965), existem situações em que um conjunto A, definido sobre um universo X, não apresenta seus limites bem definidos. Assim, para aqueles elementos que não se pode afirmar com certeza se pertencem ou não pertencem ao conjunto A, é atribuído um valor intermediário.

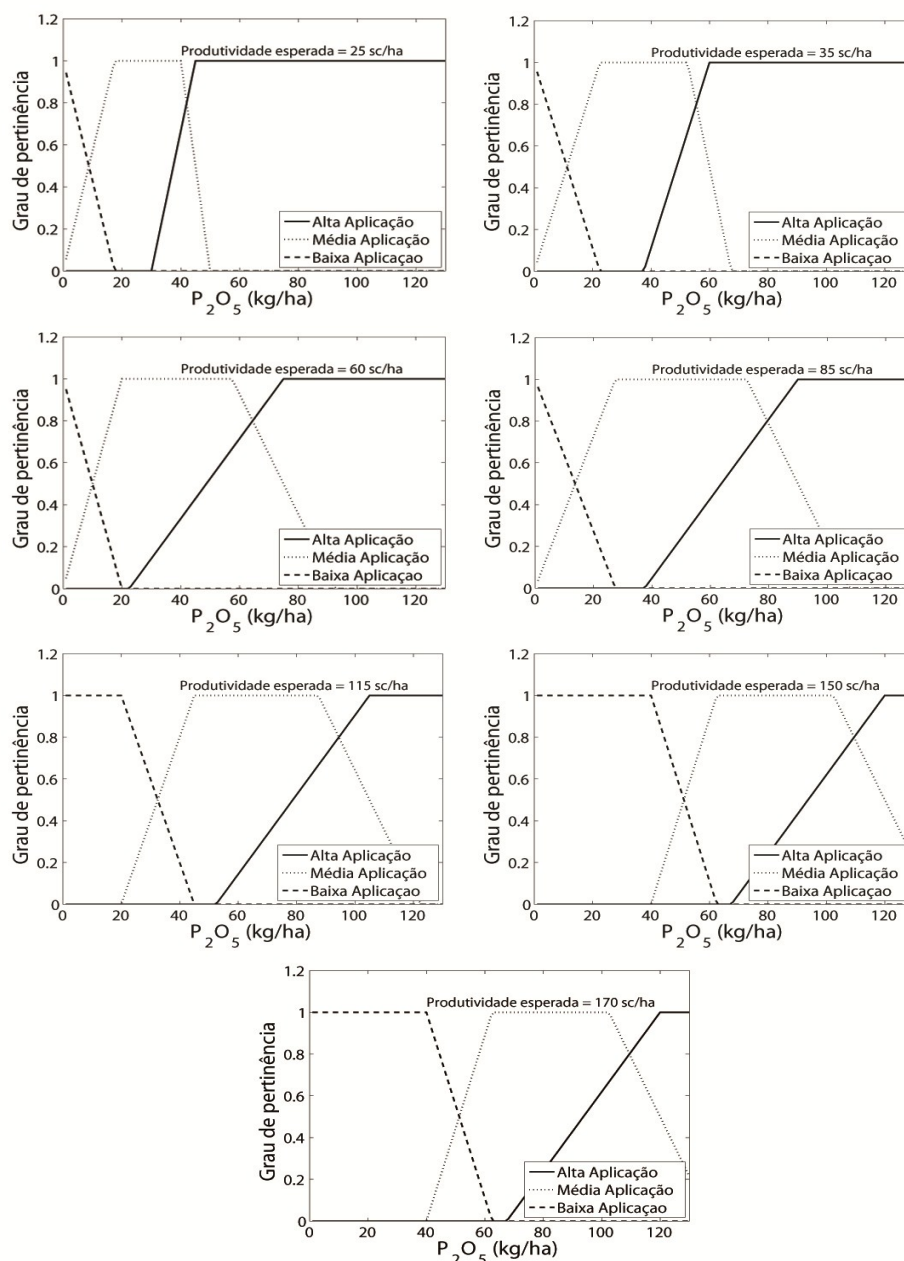
No caso da calagem (Figura 16), os valores que expressam este grau de incerteza

elevado se situam entre 600 e 1400, 1000 e 1400 e 1400 e 2200 kg/ha de calcário para a primeira, segunda e terceira safra, respectivamente. Porém, pode-se afirmar que com certeza um valor de 0 a 200 e 1200 kg/ha pertence a um conjunto de baixa e média aplicação de insumo para a primeira e segunda safra e de 0 a 1200 e 1700 kg/ha pertencem a um conjunto de baixa e média aplicação de insumo para a terceira safra.

Observando o conjunto de entrada para o Nitrogênio (Figura 16), também pode se inferir que a aplicação de 350 kg/ha e 500 kg/ha de N, apresenta um grau de incerteza, no qual pertence a dois conjuntos simultaneamente. Todavia, para valores de 200 e 700 kg/ha de aplicação de N, pode-se afirmar que sem dúvidas pertencem ao conjunto de baixa e alta aplicação de insumos, respectivamente.

Os conjuntos *fuzzy* de entrada para a necessidade de fósforo são mostrados na Figura 17.

Nota-se que o intervalo de grau de pertinência igual a 1 dos subconjuntos *fuzzy* de baixa, média e alta aplicação de  $P_2O_5$  variam em função da produtividade esperada. Isso significa que a produtividade esperada indicará em qual conjunto será realizada a classificação *fuzzy*.

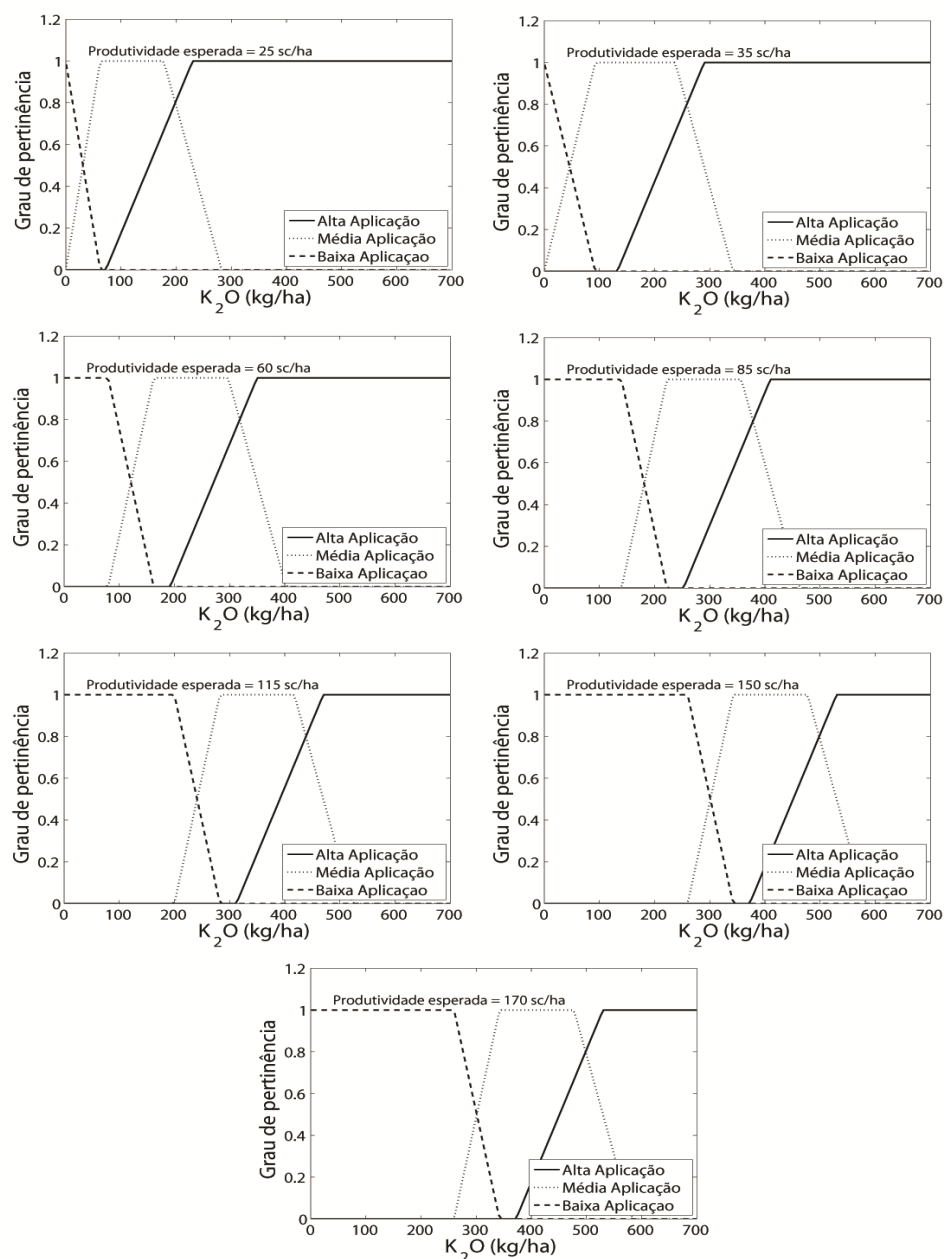


**Figura 17** – Conjuntos *fuzzy* para a variável de entrada necessidade de aplicação de fósforo.

Adicionalmente, o aumento da produtividade influencia na quantidade de aplicação de fósforo dos subconjuntos *fuzzy* (baixa, média e alta aplicação), como também nos de aplicação do potássio (Figura 18).

Os mesmos fatos relacionados à produtividade nos conjuntos *fuzzy* de aplicação de fósforo (Figura 17) podem ser observados para os de potássio (Figura 18).





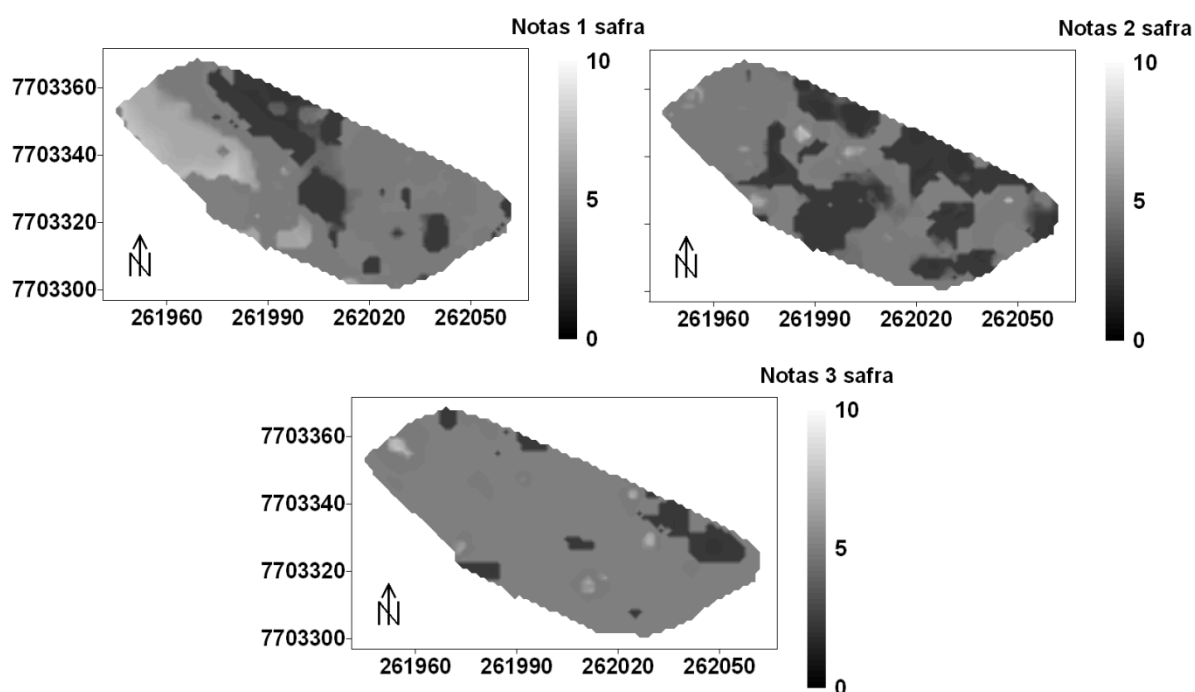
**Figura 18** – Conjuntos *fuzzy* para a variável de entrada necessidade de aplicação de potássio.

Além disso, também pode se observar que quando determinado valor possui um grau de pertinência igual a 1 classificado dentro de um determinado subconjunto, significa que este valor não provoca dúvidas para especificar que uma aplicação de insumos pertence a uma baixa, média ou alta aplicação.

Outro fato a ser observado para todos os conjuntos *fuzzy* apresentados é a geração de conflitos de entrelaçamento entre os subconjuntos, como por exemplo, é

esperado que uma determinada aplicação de potássio pertença a um subconjunto de baixa e média aplicação simultaneamente, entretanto não é esperado que uma determinada aplicação de potássio pertença a um subconjunto de baixa e alta aplicação simultaneamente.

Após a construção dos conjuntos *fuzzy* de entrada e saída, criação das regras de inferência e determinação dos operadores lógicos a ser utilizados foi realizada a classificação *fuzzy* da área nas três safras em notas (Figura 19) para um diagnóstico da necessidade de aplicação de insumo na área.



**Figura 19** – Mapas de classificação *fuzzy* com base nas necessidades de aplicação de N,P,K e calagem nas três safras.

A classificação da área utilizando a lógica *fuzzy* apresentou uma variabilidade espacial das notas entre as diferentes safras na área estudada. Na Tabela 11 está apresentada a porcentagem (%) das áreas referente às notas de aplicação de insumos entre as safras.

**Tabela 11** – Determinação do percentual das áreas com as notas de aplicação de insumos

Notas	Aplicação	Safra 1 %	Safra 2 %	Safra 3 %
0 - 3,3	Alta	18,8	35,1	9,0
3,4 - 6,3	Média	66,7	63,8	90,1
6,4 - 10	Baixa	14,5	1,1	0,9

A espacialização das notas da classificação *fuzzy*, demonstrou que mais da metade da área apresenta valores entre 3,4 e 6,3, nas safras 1,2 e 3, mostrando que ao menos dois insumos a serem aplicados pertencem à categoria de baixa aplicação. Entretanto, na segunda safra, em relação à terceira observa-se que maior percentual da área apresenta notas entre 0 e 3,3, isto significa que ao menos três insumos a serem aplicados nesta área pertencem à categoria de alta aplicação.

Entre as três safras estudadas foi observada apenas para a primeira safra uma extensão de área representativa com notas de 6,4 a 10. Esse fato permite afirmar que nestes locais há necessidade de uma baixa aplicação de três insumos simultaneamente.

Ressalta-se que a utilização da lógica *fuzzy* neste trabalho indica lugares com maiores necessidades de aplicação de insumos, sendo que a identificação da quantidade e o insumo a ser aplicado dependem da avaliação dos mapas de necessidade individual de cada insumo.

## 6. CONCLUSÕES

1. Nas três safras a produtividade e os atributos químicos do solo apresentam variabilidade espacial e temporal.
2. A análise quantitativa por meio dos mapas possibilitou observar que os níveis de produtividade e fertilidade do solo apresentam regiões com alternância de valores entre as diferentes safras.
3. Os índices quantitativos obtidos de produtividade de -18% e -57,1% e fertilidade de 24,3% e 12,3% entre a segunda e a primeira safra e a terceira e a segunda safra, respectivamente, representam a variabilidade temporal e a distribuição espacial da produtividade e da fertilidade do solo entre as diferentes safras.
4. A metodologia de classificação *fuzzy* auxilia na tomada de decisão para definição de zonas de aplicação de insumos na área, revelando em maior porcentagem de área, notas de média aplicação de insumos de 3,4 a 6,3 nas três safras.
5. A metodologia utilizada neste estudo auxilia na prática da adubação e correção do solo a partir de uma visão geral das limitações da área. Os mapas demonstram uma classificação global, destacando a distribuição de áreas com maiores problemas, dando suporte para a correção destas deficiências.

## 7. REFERÊNCIAS

AVELLAR, G. et al. Uso de SIG's no Delineamento de Zonas de Manejo para Uso Agrícola. In: 2o SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, Viçosa, MG, Brasil, **Anais...**, 2002. 1 CD.

AZEVEDO, E. C. **Uso da geoestatística e de recursos de geoprocessamento no diagnóstico da degradação de um solo argiloso sob pastagem no estado de Mato Grosso**. 2004. 141 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

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

BATAGLIA, O.C. **Resposta à adubação fosfatada na cultura do café**. In: YAMADA, T; ABDALLA, S.R.S. (Ed.). Fósforo na agricultura brasileira. Piracicaba: Potafos/Anda, 2004. p. 307-328.

BERLATO, M.A.; FARENZENA, H.; FONTANA, D.C. Associação entre El Nino Oscilação Sul e a produtividade do milho no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, vol.39, p. 423-432, 2005.

BERTOLANI, F. C.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial da taxa de infiltração de água e da espessura do horizonte A, em um Argissolo Vermelho-Amarelo, sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol. 25, n. 4, p. 987-995, 2001.

BONISCH, S. et al. Representação e propagação de incertezas em dados de solos, 2- Atributos numéricos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol. 28, n. 01, p. 21-32, 2004.

BRAGANÇA, S.M. **Crescimento e acúmulo de nutrientes pelo cafeeiro conilon (*Coffea canephora*)**. 2005. 99 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. **Regras para análises de sementes**. Brasília: CLAV/DNDV/SNAD/MA, 1992. 365 p.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância e Saúde. Fundação Oswaldo Cruz. **Abordagens espaciais na saúde pública: série capacitação e atualização em geoprocessamento em saúde: série B: textos básicos de saúde**. vol. 1. Brasília: Ministério da Saúde, 2006.

BRESSAN, G. M. et al. Sistema de classificação fuzzy para o risco de infestação por plantas daninhas considerando a sua variabilidade espacial. **Planta Daninha**, vol. 24, n. 2, p. 229-238, 2006.

BUENO, B. F. **Aplicação de técnicas multivariadas em mapeamento e interpretação de parâmetros do solo**. 2001. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

CAMBARDELLA, C.A. et al. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa Soils. **Soil Science Society American Journal**, vol. 58, p. 1501-1511, 1994.

CAPELLI, N.L. **Agricultura de precisão – Novas tecnologias para o processo produtivo**. 2004. Disponível em: <<http://www.bases.cnptia.embrapa.br>>. Acesso em: 10 junho. 2011.

CARVALHO, L.G.; SEDIYAMA, G.C.; CECON, P.R.; ALVES, H.M.R. A regression model to predict coffee productivity in Southern Minas Gerais, Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, vol.8, n.2/3, p.204-211, 2004.

CETIN, M.; KIRDA, C. Spatial and temporal changes of soil salinity in a cotton field irrigated with low-quality water. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, vol.272, n.1/4, p.238-249, 2003.

CHALFOUN, S.M.; SILVA, C.M.; PEREIRA, A.A.; PAIVA, F.A. 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 CAFEIRAS, 6., 1978, Ribeirão Preto. **Resumos...** Rio de Janeiro, 1978. p.392- 394.

CHIANG, J.; HSU, J. Fuzzy classification trees for data analysis. **Fuzzy Sets and Systems**, vol. 130, n. 1, p. 87-99, 2002.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira. Café**: Primeira estimativa da safra brasileira de café Janeiro/2011. Brasília, 2011. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conabweb/download/safra/4cafe08.pdf>>. Acesso em: 10 junho. 2011.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Estimativa da safra brasileira de café 2010**. Brasília, 2010. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conabweb/download/safra/4cafe08.pdf>>. Acesso em: 10 junho. 2011.

DAMATTA, F. M. et al. Ecophysiology of coffee growth and production. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Londrina, vol.19, n.4, p. 485-510. 2007.

DAVID, M. **Geostatistical ore reserve estimation**. Developments in Geomathematics 2. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1977. 364 p.

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

DRIANKOV, D. et al. **An Introduction to Fuzzy Control**. Germany: Springer-Verlag, 1993. 316 p.

EMBRAPA – Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 1997. 212 p.

EMBRAPA CAFÉ: **Histórico**. Disponível em: < <http://www.embrapa.br/cafe/> > Acesso em: 10 junho. 2011.

FASSIO, L. H.; SILVA, A. E. S. Importância econômica e social do café Conilon. In: FERRÃO, R. G.; FONSECA, A. F. A. da; BRAGANÇA. S. M.; FERRÃO, M. A. G.; MUNER, L. H. (Eds.). **Café Conilon**. Vitória: Incaper, 2007. p.35-49.

FAULIN, G. C. **Influência da adubação em doses variadas na produtividade e no estado nutricional da cultura do café (*Coffea arabica* L.)**. 2010. 103 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP, 2010.

FERRÃO, R. G. et al. **Café Conilon**. Vitória: Incaper, 2007. 702p.

FERRÃO, R. G. et al. Estado da arte da cafeicultura no Espírito Santo. In: TOMAZ, M. A.; AMARAL, J. F. T.; JESUS JUNIOR, W. C.; PEZZOPANE, J. R. M. **Seminário para a sustentabilidade da cafeicultura**. Alegre: UFES, Centro de Ciências Agrárias, 2008. p.29-48.

FERREIRA, J. C. et al. Ensaio de Delimitação de Corredores Verdes na Área Metropolitana de Lisboa: Integração de dados fuzzy através da análise multi-critério. In: ENCONTRO DE UTILIZADORES DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA, VIII., 2004. Oeiras. **Anais...** Oeiras - Portugal, 2004.

GOLDEN SOFTWARE Surfer version 8.00 - Feb 11 2002. **Surface mapping system**. Colorado: Golden Software, Inc, 1993-2002. 1 CD-ROM.

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

HINES, J. W., **Fuzzy and Neural Approaches in Engineering: Matlab Supplement**, John Wiley and Sons, Inc, 1997. 224p.

HURTADO, S. M. C. et al. Spatial variability of soil acidity attributes and the spatialization of liming requirement for corn. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, vol. 33, n. 5, p. 1351-1359, 2009.

IBGE. **Projeto RADAM**. v. 34. Folha SE 24 Rio Doce. Rio de Janeiro, 1997. 540 p.

KAVDIR, I.; GUYER, D. E. Apple grading using fuzzy logic. **Turkish Journal of Agriculture and Forestry**, vol. 27, n. 06, p. 375-382, 2003.

LACERDA, R. D de; MENDES, J. S.; CHAVES, L. H. Manejo de solos ácidos: comparação de métodos para avaliar a necessidade de calcário dos solos do Estado da Paraíba. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**. vol.6, n. 1, 2006.

LARK, R.M.; STAFFORD, J.V. Classification as a first step in the interpretation of temporal and spatial variation of crop yield. **Annals of Applied Biology**. n.130, p.111-121, 1997.

MARÇAL, R. F. M., SUSIN, A. A. O emprego de inteligência artificial como ferramenta de apoio à tomada de decisão na manutenção industrial. In: III **Seminário Catarinense – ABRAMAN 2005**. Joinville/SC.

MATIELLO, J. B. et al. **Cultura de café no Brasil**: novo manual de recomendações. Rio de Janeiro: MAPA/PROCAFÉ, 2005. 438 p.

MATLAB - **The language of Technical Computing**. Matlab 7.1.0 (R10), 2010.

MEIRELLES, M.S.P.; MOREIRA, F.R.; CAMARA, G. Técnicas de inferência espacial, 2007. In: Meirelles, M.S.P.; CAMARA, G.; ALMEIDA, C.M. (Eds.), **Geomática: Modelos e aplicação Tecnológica**, 2007, 593 p.

MELLO, E. **A cafeicultura no Estado do Espírito Santo**, 2010. Disponível em: <<http://www.slideshare.net/cafeicultura/a-cafeicultura-no-esprito-santo-por-evairmello>>. Acesso em: 20 jun. 2011.

MIRANDA, N. O. et al. Variabilidade espacial da qualidade de frutos de melão em áreas fertirrigadas. **Horticultura Brasileira**, Brasília, vol. 23, n. 2, p. 242-249, 2005.

MOLIN, J. P.; MENEGATTI, L. A. A. Aplicação com taxa variável: tratamento localizado. **Cultivar máquinas**, vol. 3, n. 44, p. 22-26, 2005.

MULLA, D. J. Methods for removing spatial variability from field research trials. **Advances in Soil Sciences**, New York, v. 13, p. 201-213, 1990.

OLIVEIRA, A. S. C. **Mapeamento da variabilidade espacial da produção da cafeicultura de montanha**. 2003. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 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 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, 2007.



ORTIZ, J.L. **Emprego do geoprocessamento no estudo da relação entre potencial produtivo de um povoamento de eucalipto e atributos do solo e relevo.** 2003, 205 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - ESALQ, Piracicaba, 2003.

PEIXOTO M. S.; BARROS, L. C.; BASSANEZI, R. C. Um modelo Fuzzy Presa-Predador em citros: pulgoes e joaninhas. **Biomatemática**, vol. 14, p. 29-38, 2004.

PEDRYCZ, W. ; GOMIDE, F. (1998). **An Introduction to Fuzzy Sets: Analysis and Design.** Massachusetts Institute of Technology.

PIERCE, F.J.; WARNCKE, D.D.; EVERETT, M.W. Yield and nutrient availability in glacial soil of Michigan. In: ROBERT, P.C.; RUST, R.H.; LARSON, W.E. (Eds.). **Proceedings of the Second International Conference on Site Specific Management for Agricultural Systems.** Minneapolis, Madison, ASA/CSSA/SSSA, 1995. p.133-151.

PREZOTTL L. C. et al. **Manual de recomendação de calagem e adubação para o estado do Espírito Santo** - 5a aproximação. Vitória, ES.SEEA/INCAPER/CEDAGRO. 2007. 305p.

QUEIROZ, D. M. et al. Uso de Técnicas de Agricultura de Precisão para a Cafeicultura de Montanha. In: ZAMBOLIM. (Ed.) **Efeitos da Irrigação sobre a Qualidade e Produtividade do Café.** Viçosa, MG. p. 77-108,2004.

QUEIROZ, D.M.; DIAS, G.P.; MANTOVANI, E.C. Agricultura de precisão na produção de grãos. In: Borém, A.B.; Giúdice, M.P.; Queiroz, D.M.; Mantovani, E.C.; Ferreira, L.R.; Valle, F.X.R; Gomide, R.T. (eds) Agricultura de precisão. Viçosa: UFV, p.1-42, 2000.

RENA, A.B.; NACIF, A.P.; GONTIJO, P.T.; PEREIRA, A.A. Fisiologia do cafeeiro em plantios adensados. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE CAFÉ ADENSADO, 1994, Londrina. **Anais...** Londrina: Instituto Agrônômico do Paraná, 1996. p.73-85.

ROBERTSON, G.P. GS<sup>+</sup>: geostatistics for the environmental sciences. Plainwell: **Gamma Design Software**, 2008.

RONCHI, C. P.; DAMATTA, F. M. Aspectos fisiológicos do café conilon. In: Ferrão, R.G.; Fonseca, A.F.A.; Bragança, S.M.; Ferão, M.A.G.; De Muner, L. H. (Eds.). **Café Conilon.** Vitória: Incaper, 2007. p. 95-115.

SALVIANO, A. A. C. **Variabilidade de atributos de solo e de crotalaria juncea L. em solos degradado do município de Piracicaba-SP.** 83p. Tese de Doutorado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1996.

SILVA, C. A. da; TEODORO, R. E. F.; MELO, B. de. Produtividade e rendimento do cafeeiro submetido a lâminas de irrigação. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**,

Brasília, vol. 43, n. 3, 2008.

SILVA, P.C.M.; CHAVES, L.H.G. Avaliação e variabilidade espacial de fósforo, potássio e matéria orgânica em solos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, vol.5, n.3, p.431-436, 2001.

SILVA, S. A.; LIMA, J.S.S.; Lógica fuzzy no mapeamento de variáveis indicadoras de fertilidade do solo. **Idesia (Chile)**. vol. 27, n.3. p. 41 – 46, 2009a.

SILVA, A. S.; LIMA, J. S. S.; SOUZA, G. S.; OLIVEIRA, R. B.; Variabilidade espacial de atributos químicos do solo cultivado com café arábica (*Coffea arabica*) sob diferentes manejos. **Coffee Science**, Lavras, vol. 5, n. 2. p. 173 - 182, 2010a.

SILVA, S. A. et al. Variabilidade espacial do estoque de carbono em um Latossolo vermelho-amarelo húmico sob cultivo de variedades de café arábica. **Engenharia na agricultura**, Viçosa, vol.18 n.2. p.104-110, 2010b.

SOUSA, R.V. **Robô Agrícola Móvel (RAM): uma arquitetura baseada em comportamentos hierárquicos e difusos para sistemas autônomos de guiagem e navegação**. 195 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

SOUSA, D. M. G. de; MIRANDA, L. N. de; OLIVEIRA, S. A. Acidez do solo e sua correção. In: NOVAIS, R. F. et al. **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. cap. 5, p. 205-274.

SOUZA, G. S. 2009. **Uso de indicadores de fertilidade do solo da análise da degradação de uma área sob pastagem utilizando geoestatística**. 100f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, 2009.

SOUZA, G. S. et al. Aplicação de lógica fuzzy e geoestatística na análise da fertilidade de um solo sob pastagem. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, vol. 40, n. 03, p. 323-330, 2009.

THOMAZIELLO, R. A. et al. **Cultura do café**. 3. ed. Campinas: Instituto Agronômico, 1997. 75p.

USDA – United States Department of Agriculture. **Production, Supply and Distribution Online Database**. Disponível em: <<http://www.fas.usda.gov/psdonline>>. Acesso em: 20 jul.2010.

VARGENS, J. M.; TANSCHKEIT, R.; VELLASCO, M. M. B. R. Previsão de produção agrícola baseada em regras lingüísticas e lógica fuzzy. **Revista Controle & Automação**, vol. 14, n. 02, p. 114-120, 2003.

VIEIRA, S. R. et al. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia, Berkeley**, vol. 51, n. 3, p. 1-75, 1983.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F. et al. (Eds). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. vol. 1, p. 1-53.

VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de argila, silte e atributos químicos em uma parcela experimental de um Latossolo roxo de Campinas(SP). **Bragantia**, vol. 56, n. 1, p. 1-13, 1997.

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

YANG, C. C. et al. Development of a herbicide application map using artificial neural networks and fuzzy logic. **Agricultural System**, vol. 76, n. 02, p. 561-574, 2003.

ZADEH, L. A. Fuzzy Sets. **Information and Control**. vol. 8, p. 338-353, 1965.