

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Solos
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
Secretaria de Desenvolvimento Agropecuário e Cooperativismo
Departamento de Propriedade Intelectual e Tecnologia da Agropecuária*

GEOESTATÍSTICA APLICADA NA AGRICULTURA DE PRECISÃO UTILIZANDO O VESPER

*Ronaldo Pereira de Oliveira
Célia Regina Grego
Ziany Neiva Brandão
Editores Técnicos*

*Embrapa
Brasília, DF
2015*

Capítulo 8

Exemplos das Aplicações na AP

Ronaldo Pereira de Oliveira

8.1 As Funções da Geoestatística na Adoção da AP

Este capítulo exemplifica sumariamente as possíveis funções que a geoestatística pode assumir como ferramenta de apoio decisório durante o processo de adoção da AP. Como visto na Seção 1, este processo envolve uma integração dinâmica e abrangente entre tecnologias e ações de campo (Capítulo 1) e conhecimentos específicos (Capítulos 2 e 3) na gestão operacional e estratégica da produção. Este processo é cíclico e usa o georreferenciamento como base comum para etapas que podem ser definidas como: monitoramento intensivo, geração de mapas de atributos, planejamento e intervenção diferenciada. Etapas que se tornam mais acessíveis ao tomador de decisão com a disponibilidade de protocolos operacionais bem definidos e/ou aplicativos para análises semiautomáticas, como o Vesper se propõem a ser. O uso dos procedimentos disponíveis nas interfaces do Vesper (Seção 2) atendem funções diretamente ligadas as etapas de geração de mapas e planejamento das intervenções diferenciadas na fertilidade do solo ou no controle de pragas e plantas invasoras.

Os exemplos apresentados neste capítulo ilustram aplicações com dados gerados por duas abordagens frequentemente adotadas na produção de grãos em sistemas de plantio direto na região do Cerrado, sendo: a amostragem da fertilidade do solo por grade e o monitoramento em modo contínuo com sensores de CE_a. O objetivo é orientar o usuário do Vesper sobre como os procedimentos de variografia e krigagem descritos na Seção 2 se associam com as etapas do processo de adoção do manejo por sítio-específico. Em particular, tipificando o potencial da geoestatística como ferramenta básica nas práticas de manejo da fertilidade por taxas variadas. As considerações não envol-

vem a crítica agronômica aos resultados das análises geoestatísticas, buscando apenas ressaltar aspectos de ordem operacional relacionados as incertezas nos resultados quantitativos que estão associados as diferentes densidades amostrais dos dados de entrada. Ainda sob o aspecto do delineamento amostral do solo, este capítulo concluindo a Seção 3 e complementa o tópico de o que fazer “Depois do Vesper”, sugerindo uma potencial aplicação dos sensores de CEa em apoio a um delineamento amostral mais eficiente.

Destacam-se as seguintes funções da geoestatística no processo decisório:

- Avaliar a dependência espacial de uma variável dos fatores de produção
- Estimar valores desta variável para pontos de uma grade de locais não observados.
- Gerar mapas dos diferentes fatores de produção sobre uma grade comum de interpolação, possibilitando o uso de camadas de informação para análise espacial multivariada em SIG.
- Delinear esquemas amostrais e MZs em função da variabilidade espacial estimada.

8.2 Monitoramento Intensivo na Produção de Grãos

Os dados e os mapas apresentados em toda a extensão do livro são de uma área de produção de grãos, em região de Cerrado, que se encontra em fase inicial da adoção da AP. São resultados de um estudo no qual, além das questões agronômicas centrais, foram discutidos os aspectos quantitativos da geoestatística aplicada na caracterização da variabilidade espaço-temporal dos atributos de solos para fins do manejo de insumos por taxas variadas em um sistema de produção com fertilidade construída. A área, denominada de Talhão 6 (T6), fica localizada na Fazenda Cruzeiro do Sul, no município de Castelândia, sudoeste goiano (Figura 8.1). Os dados de monitoramentos intensivos foram coletados utilizando duas abordagens típicas no processo de adoção da AP no Brasil. Os dados monitorados no período entre as safras de 2009 e 2011 faz parte de 15 experimentos da Rede AP em áreas de produção comercial de culturas anuais e perenes.

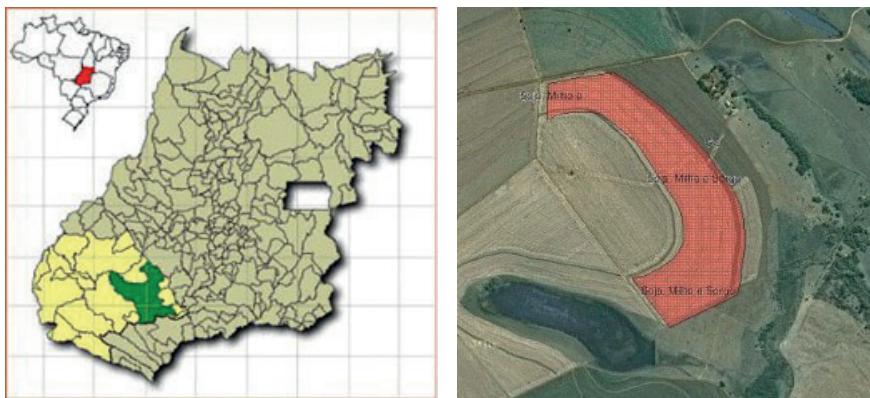


Figura 8.1. Mapa de localização do talhão de estudo, no Município de Castelândia, GO, e superposição da malha de interpolação sobre a imagem de satélite da fazenda.

O talhão tem 35 ha de extensão sob produção de grãos em sistema de plantio direto com rotação das culturas de soja, milho e sorgo. O solo predominante é um Latossolo Vermelho distroférrico desenvolvido sobre material basáltico da formação Serra Geral, as margens do Rio dos Bois e com altitude média de 455 m.

As etapas de adoção da AP neste talhão envolveram o monitoramento intensivo do solo mediante diferentes abordagens operacionais dados gerados em diferentes densidades amostrais, sendo: a) a amostragem de solos por grade em malha de uma amostra por hectare (35 observações, Figura 8.2.a); e b) o monitoramento intensivo das medidas de CE_a (7.480 observações, Figura 8.2.b). Amostras por grade foram coletas após a colheita da safrinha, na profundidade de 0 a 20 cm, com uso de um amostrador de rosca motorizado de uma polegada; sendo cada amostra formada por 10 subamostras tomadas em um raio de 20 metros a partir dos pontos da malha georeferenciada com espaçamento de 100 m. Isto resulta em valores absolutos de atributos determinados em laboratório e associados a uma observação georeferenciada e representativa para uma área de 100 X 100 m (i.e.: 1 ponto por hectare). As determinações analíticas foram realizadas nos laboratórios de solo da Universidade de Rio Verde. O monitoramento georreferenciado das medidas de CE_a foi realizado utilizando a tecnologia em rastreamento contínuo por contato nas profundidades de 30 cm e 90 cm com a tecno-

logia Veris 3100 (Veris Technologies®) segundo implementações físicas e características de operação descritas em Rabello et al. (2008).

O pré-processamento considerou a transformação de coordenadas geográficas para o sistema de projeção UTM, descrita no Item 7.4, e a análise de distribuição dos dados dos atributos de fertilidade do solo determinados em laboratório, como demostrado no Item 2.1. Os procedimentos de krigagem ordinária (itens 3.6) foram realizados para estimativas por blocos de 10 m² e raio de busca proporcional a maior distância entre as observações, gerando mapas com valores dos atributos estimados para todos os pontos da grade de interpolação com um intervalo de 5 m (em detalhe na Figura 8.2.c), derivando um mapa com a informação complementar sobre os valores do erro associado as estimativas em cada ponto da grade.

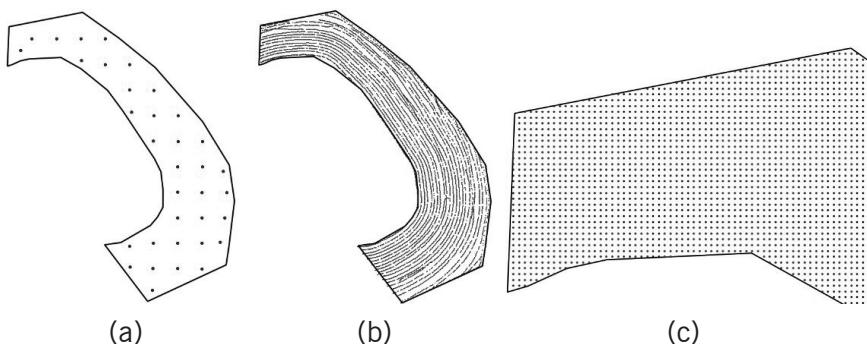


Figura 8.2. Distribuição espacial e densidade amostral dos dados monitorados e resolução das estimativas da krigagem, respectivamente: a) grade amostral com 1 ponto por hectare, b) monitoramento contínuo de CEA; e c) grade de interpolação de 5 x 5 m.

8.3 Dependência Espacial da Fertilidade do Solo

Umas das aplicações práticas dos procedimentos de variografia descritos no Capítulo 5 é a análise preliminar da dependência espacial dos diferentes atributos sendo analisados, antes mesmo dos parâmetros calculados serem usados para fins da geração de mapas por krigagem. Entre outros parâmetros indicativos no cálculo e ajuste dos variogramas, a distância a partir da qual a variância se estabiliza num

patamar (a_1) define a autocorrelação espacial de cada um dos atributos analisados. Ou seja, a distância a partir da qual espera-se que as observações feitas para um atributo específico (e.g.: macro ou micro nutriente) em dois pontos distintos deixem de ter valores correlacionados (i.e.: medidas relativamente iguais).

A Tabela 8.1 apresenta os parâmetros de ajuste dos variogramas para os diferentes atributos observados, e indica as respectivas estimativas da dependência espacial calculada em função do coeficiente de alcance relativo a função de covariância (i.e.: modelo teórico) ajustada. Nesta tabela é possível observar as diferentes dimensões de variação dos vários atributos. Estes valores por si já indicam as distâncias a partir das quais já se poderia considerar o manejo diferenciado daquele atributo específico. Como por exemplo, a aplicação de potássio por taxas variadas com dosagens visando um aumento no estoque de K em partes de um talhão sob sistema de produção intensiva com fertilidade construída. Entretanto temos que considerar que estas distâncias foram estimadas em função do espaçamento amostral dos dados utilizados no cálculo do variograma empírico, neste caso particular uma malha amostral de 100 x 100 m. Em outras palavras, não se pode esperar definir a dependência espacial de uma dada variável numa dimensão menor do que o seu espaçamento amostral. Apesar de sabermos que a dependência espacial de uma variável possa existir em diferentes escalas de correlação, dependendo dos parâmetros de referência definidos para o cálculo do variograma (descritos no “Procedimento de Ajuste em Modo Global” - Item 5.1), este pressuposto não garante porém, que se possa determinar uma menor distância de dependência espacial apenas por refinar o espaçamento amostral. O que pode ser entendido na relação entre os conceitos de estacionaridade e escala amostral ilustrada na Figura 3.7 (apresentada em “Tendência” - Item 3.4).

| Atributo do Solo | Ano | Modelo de Ajuste | C0* | C1** | a1*** | Distância de Correlação (m) |
|------------------|------|-------------------|--------|--------|-------|-----------------------------|
| Argila | 2009 | Esférico | 0,0 | 24,38 | 119,8 | 118 |
| Areia | 2009 | Duplo Exponencial | 0,0001 | 15,25 | 51,0 | 150 |
| pH | 2010 | Esférico | 0,021 | 0,01 | 536,4 | 530 |
| Potássio | 2009 | Esférico | 0,0 | 5625,6 | 286,7 | 280 |
| | 2010 | Duplo Esférico | 0,0 | 8174,9 | 352,8 | 350 |
| Fósforo | 2009 | Esférico | 0,274 | 7,095 | 183,5 | 180 |
| | 2010 | Esférico | 11,46 | 63,67 | 180,8 | 180 |
| Ca | 2009 | Esférico | 0,301 | 0,419 | 294,0 | 235 |
| | 2010 | Esférico | 0,173 | 0,554 | 339,0 | 335 |
| Mg | 2009 | Esférico | 0,007 | 0,012 | 297,0 | 295 |
| | 2010 | Esférico | 0,0006 | 0,076 | 212,3 | 200 |
| M.O. | 2009 | Esférico | 4,522 | 34,2 | 199,4 | 195 |
| CE _a | 2010 | Exponencial | 4,948 | 1,832 | 62,5 | 187 |

*C0 = efeito pepita; **C1 = variância estrutural; ***a1 = alcance.

Tabela 8.1 Parâmetros dos ajustes do variogramas de atributos de solo e a dependência espacial estimada pela distância de correlação entre pontos medidos em locais diferentes.

Por isto, antes de definir a grade amostral que vai alimentar os procedimentos da geoestatística, as características inerentes ao processo sendo analisado e a escala de dependência espacial para a qual se pretende representar as variações dos atributos devem ser observadas. Isto é, se o espaçamento definido entre os pontos observados permite caracterizar a estrutura espacial de variações do atributo sendo analisado na escala em que se pretende delinear áreas consideradas homogêneas. Estes fatores se não adequadamente ajustados comprometem diretamente a precisão e a robustez estatística do ajuste do variograma, consequentemente também afetando a qualidade dos mapas krigados.

Como os resultados das análises destas relações espaciais são fortemente influenciadas pela escala e densidade amostral das observações de campo, a relevância do uso das técnicas de geoestatística devem ser cautelosamente avaliadas nos procedimentos de ajuste do variograma (Item 5.1) sob a perspectiva de conhecimento do processo físico-químico sendo analisado. De forma geral, os processos de solos e outros relacionados as variações da produtividade (e.g.: reboleiras, nematoídes, cigarrinhas, ervas daninhas, entre outros) apresentam as seguintes características de variação espacial:

- São fenômenos que ocorrem de maneira localizada e se espalham lentamente pelo campo.

- Apresentam variáveis com distribuição log normal (i.e.: uma maioria de valores baixos com poucos valores extremamente baixos) e variogramas errôneos (i.e.: efeito pepita e variância extremamente altos)

8.4 Mapas Estimados por Krigagem

Umas das práticas mais comuns na adoção da AP no Brasil que está diretamente relacionada ao uso das técnicas de geoestatística é a abordagem de coleta de amostras de fertilidade do solo seguindo um esquema amostral de observações feitas em locais determinados por uma grade regular de pontos georreferenciados (BERNARDI; INAMASU, 2014). Nesta aplicação o uso dos procedimentos descritos no Capítulo 6 tem a função de gerar mapas por krigagem utilizando os parâmetros de ajuste do variograma obtidos na avaliação da dependência espacial de uma variável. Os mapas de atributos podem ser gerados para vários atributos dos fatores condicionantes da produção (e.g.: solo, planta e/ou infestações) bem como para fatores relativos ao impacto ambiental da atividade (e.g.: contaminação do solo por metais pesados ou lençol freático por lixiviação de insumos).

O acervo de dados gerados pelas observações por grade amostral do solo no talhão T6 possibilitou a krigagem de atributos de fertilidade. Os arquivos resultantes da krigagem contêm valores estimados a partir das observações da vizinhança dos pontos de interseção da grade de interpolação com resolução de cinco metros (i.e.: locais não observados). Após o procedimento de importação em SIG (Item 7.4), estes arquivos são convertidos no formato *raster* onde os valores estimados nos pontos de interseção são associados a quadrículas de 5 m² de uma malha contínua (Figura 8.3). Este tipo de análise individualizada da variação espacial de um atributo selecionado é o uso primário dos resultados da krigagem, sendo uma abordagem muito difundida pelos serviços de consultoria em AP para aplicação de KCI por taxas variadas. A observação destes mapas permite identificar os locais com maior ou menor concentração de um elemento dentro do talhão, viabilizando um planejamento de aplicação de insumos segundo demandas locais específicas.

Um subproduto viável com estes resultados é a geração de mapas de predição de custo destas intervenções, calculando o custo da

aplicação por taxas variadas e/ou a economia potencial em relação ao manejo clássico⁸ para cada área diferenciada dentro do talhão. Estes mapas permitem calcular com precisão as áreas definidas pela classificação dos valores krigados em diferentes faixas de recomendação agronômica. Entretanto, esta abordagem foca em soluções mais imediatistas e sem o entendimento aprofundado das possíveis interpretações dos resultados. Neste sentido, deve-se observar que o conhecimento praticado por associações de produtores de AP⁹ em avançado estágio de adoção da tecnologia (i.e.: mais de 10 anos de monitoramento intensivo de diversos fatores de produção) descarta este tipo de análise individualizada nas fases iniciais da adoção, sugerindo um acervo de dados de no mínimo três safras antes formar uma opinião conclusiva sobre um planejamento amplo e integrado e do manejo das variações da produtividade.

Estes procedimentos não são exclusivamente aplicados a dados observados por grade amostral, e obviamente podem gerar krigagens mais precisas quando alimentados com dados do monitoramento em modo contínuo utilizando sensores proximais de atributos de solo. Os quais podem ser também utilizados para melhorar as estimativas através da técnica de co-krigagem para atributos fortemente correlacionados em seus valores observados.

8 Recomendações de calagem e adubação com taxa de aplicação uniforme que é calculada pelo teor médio de nutrientes observados em um número limitado de amostras compostas.

9 Por exemplo a Society of Precision Agriculture Australia - SPAA (<http://www.spaa.com.au/>)

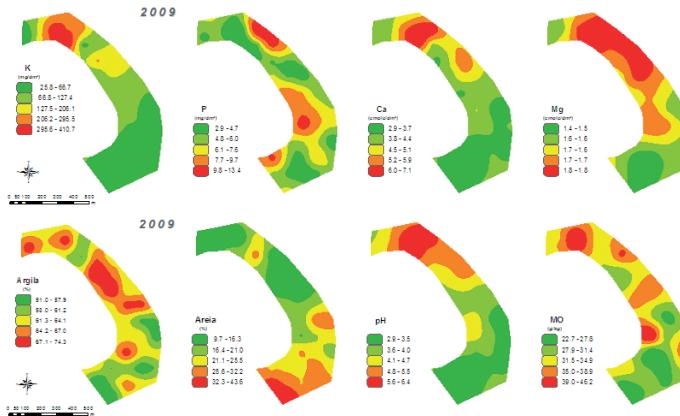


Figura 8.3. Exemplos da variabilidade espacial de diferentes atributos de fertilidade do solo na safra de 2009, com mapas obtidos pela krigagem da grade amostral de 1 ponto por hectare.

Ainda considerando o monitoramento por grade amostral, os atributos indicados como de maior influência nas variações da produtividade de uma safra podem ser repetidos em safras subsequentes, preferencialmente, obedecendo as mesmas malhas de entrada (i.e.: grade amostral) e saída (i.e. grade de interpolação). Os mapas estimados para safras subsequentes mostram as variações espaço-temporais dos atributos considerados (Figura 8.4).

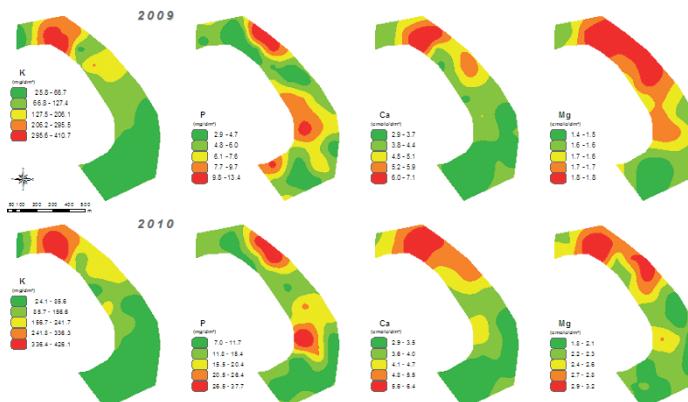


Figura 8.4. Mapas krigados possibilitando a análise da variabilidade espaço-temporal de atributos de fertilidade considerados na definição do manejo diferenciado de insumos.

Outra abordagem a ser explorada com os resultados da krigagem é a análise multivariada dos dados para determinação dos fatores que mais influenciaram nas variações observadas no mapa de produtividade de uma safra específica. Esta vale-se do fato em que todas as propriedades monitoradas na safra são usualmente estimadas para todos os pontos de uma grade de predição única cobrindo toda a extensão do talhão (Figura 8.2.c). Este denso conjunto de dados em alta densidade viabiliza o uso de regressões multivariadas que podem indicar a forte correlação dos fatores de produção que potencialmente estão influenciando positivamente, considerando as áreas dentro do talhão com maior produtividade, ou negativamente nas áreas de menor produtividade. Adicionalmente, outras técnicas de análise multivariada permitem a integração das contribuições das variações individuais dos mapas de atributos em um único plano de informação que serve para alimentar algoritmos de segmentação de imagens capazes de simular o delineamento de MZs para o manejo por sítio-específico (OLIVEIRA, 2009).

8.5 Monitoramento da Condutividade Elétrica

Informações geradas a partir de plataformas multissensores para o monitoramento intensivo na AP podem indicar com mais precisão uma intervenção de campo mais eficiente. Estas são mais facilmente sintetizadas por parâmetros do variograma devido a massiva disponibilidade de pontos observados em modo contínuo, ou como referido mundialmente “on the go” (i.e.: “durante o caminhamento” ou “em tempo real”). Para esta abordagem, equipamentos de vários formatos, já estão acessíveis no mercado e disponíveis como parte da consultoria agronômica especializada. No Vesper, tanto os procedimentos de ajuste automático do variograma em modo local (Item 5.1) quanto as opções de krigagem ordinária por blocos (Item 6.4) são orientados e disponibilizados para estes tipos de dados de entrada. Desta forma simplificando bastante algumas etapas durante o processo de adoção da AP, em particular no que tange ao apoio em decisões operacionais (i.e.: definição do esquema amostral, geração de mapas de atributos e indicação dos fatores de produção que apresentam as estruturas de variação espacial mais correlacionadas com as variações observadas nos mapas de produtividade).

Um exemplo desse tipo de serviço que é muito difundido no mercado da AP usa o monitoramento da CE_a em alta resolução espacial, utilizando condutivímetros conectados a um GNSS (Item 1.2). Esta tecnologia vem se mostrando bastante eficaz no processo de adoção da AP, servindo como uma camada de informação básica, que traz em sua autocorrelação espacial uma indicação significativa da estrutura da variação de propriedades físicas e químicas correlacionadas a este atributo e que influenciam diretamente a variação da produtividade (MCBRATNEY et al., 2005; SUDDUTH et al., 2003). A Figura 8.5 ilustra a alta correlação espacial observada por sensores de monitoramento intensivo em modo contínuo no talhão T6. Estes dados demonstram também o potencial desses sensores em indicar efeitos sazonais durante uma safra, seja na viabilidade de intervenções recursivas, como no caso dos sensores não invasivos, ou na caracterização das condições de referência da safra, isto é da condição da fertilidade do solo pré-plantio e o resultado da safra na colheita. Entre os sensores não invasivos podemos destacar os sensores ópticos de cultivo por infravermelho, que indicam as requisições de aplicação de nitrogênio e podem ser usados em diferentes momentos durante a safra (e.g.: Crop Circle). Um exemplo de como os mapas de CE_a gerados em duas profundidades no início da safra (i.e.: 30 e 90 cm) podem apresentar uma boa correlação com a estrutura de variação espacial observadas no mapa de colheita (i.e.: $r^2 = 0,53$ e $0,65$ respectivamente) é apresentado na Figura 8.5. É possível observar que áreas com formatos relativamente similares em locais de baixa CE_a correspondem aos locais de baixa produtividade, principalmente na ponta a noroeste e na área centro-sul do talhão. Vale ressaltar que na experiência com a modelagem multivariada em AP, as correlações espaciais entre mapas de atributos não indicam em geral valores significativos se relativizados a correlações puramente numéricas, raramente correlacionando mais de 75% da informação (i.e.: em geral $r^2 \leq 0,75$). Fato possivelmente explicado pela diferente natureza das fontes de dados e da estrutura e intensidade da variabilidade espacial dos processos que elas representam.

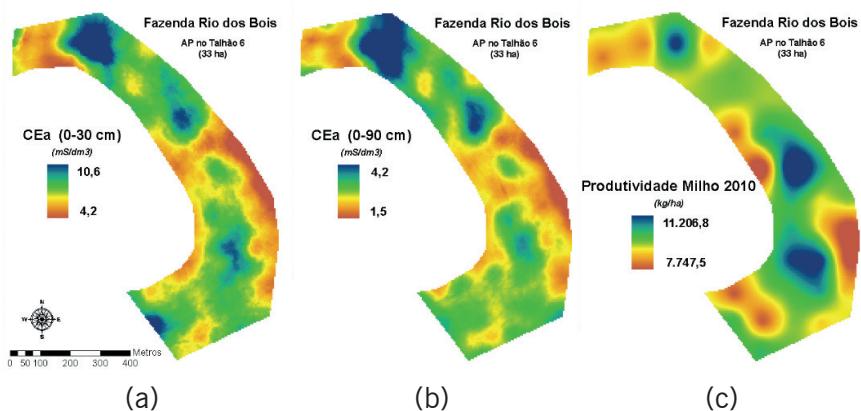


Figura 8.5. Correlação entre as estruturas de variação espacial dos dados de CE_a , observados no início da safra em duas profundidades (a e b), e da produtividade na colheita (c).

8.6 Estimativas com Diferentes Densidades Amostrais

A natureza do Vesper coloca a questão do erro nas estimativas da interpolação, apresentando um mapa de erro derivado da krigagem. Fato que é reiterado no nome do aplicativo (i.e.: “with Error”) e na sub-janela dos resultados da krigagem, que inclui o mapa com os valores do desvio padrão na estimativa de cada ponto da grade de interpolação (Figura 8.6). Este aspecto foi concebido, enquanto aplicativo de produção, com o intuito de agilizar e facilitar o processamento de dados observados em alta densidade amostral, em geral coletados em modo contínuo. Assim se propondo a ter uma função intermediária, na automação do fluxo de dados, e facilitadora em estágios iniciais na adoção da AP; quando o domínio dos conceitos e das técnicas da estatística espacial ainda é limitado.

Não que o Vesper coloque restrições na análise com dados em baixa densidade amostral, o que é facilmente possível com a opção de ajuste do variograma em modo global na sub-janela “**Variogram Model**” (Figura 5.3), mas sua interface visa facilitar os procedimentos da krigagem com ajuste de variogramas em modo local (Item 5.1). De uma maneira interativa, o ajuste em modo global (i.e.: menu de opções “**Fitting Control Panel**”) também facilita o refinamento manual

dos parâmetros de ajuste automáticos dos nove modelos teóricos pre-definidos e indica coeficientes do erro do ajuste, porém não disponibiliza recursos necessários ao ajuste manual generalizado (e.g.: definição ou acesso a outros modelos teóricos) ou mesmo acesso a métodos de validação mais robustos (e.g.: “Jack-knifing”).

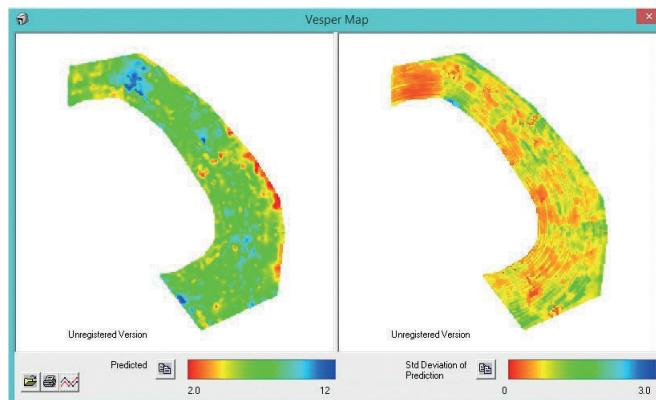


Figura 8.6. Sub-janela de resultados da krigagem, ilustrando o mapa estimado e o mapa do erro associado a predição.

Dentro deste foco, torna-se ainda mais importante para os usuários do Vesper executando o ajuste do variograma com número limitado de pontos a cuidadosa verificação da estatística descritiva na análise exploratória dos dados de entrada (Capítulo 2) e a crítica aos resultados da variografia e da krigagem. Por este motivo, apresentamos resultados típicos para dados de entrada em baixa e alta densidade amostral orientando a crítica aos mapas resultantes da krigagem. Esta explanação vai de contraposto a práticas comuns do mercado de serviços em AP, onde o monitoramento do solo incide em geral na exaustiva e custosa abordagem de grades amostrais. Abordagem que naturalmente induz a uma questão que se tornou latente, talvez mais do que relevante, na adoção de AP no Brasil, sendo: “*Quantos pontos eu preciso coletar para gerar um mapa de atributos de solo por krigagem?*”. Esta pergunta posta como uma “*receita de bolo*” se assemelha ao clássico exemplo da questão “*Com quantos paus se faz uma canoa*”, onde talvez seja mais relevante perguntar primeiro: qual o tamanho (i.e.: o que vou transportar), o propósito (i.e.: atravessar um rio ou um oceano) e a robustez (i.e.: os requisitos mínimos de se-

gurança) da canoa que se pretende construir. De maneira similar a esta analogia e sob os conceitos discutidos no Item 8.3, a amostragem por grade orientada aos procedimentos de krigagem para AP precisam ser dimensionadas segundo: as características intrínsecas ao fenômeno sendo modelado; as dimensões das MZs nas quais que se pretende trabalhar; e o grau de incerteza aceito. Será a definição destes preceitos de amostragem por grade é que vão determinar o limite mínimo de pontos a ser considerado, abaixo do qual o ajuste do variogram, quando possível, terá base numa estatística pouco significativa, promovendo um alto grau de incerteza no consequente resultado da krigagem.

Os resultados das krigagens com dados em alta (i.e.: CE_a) e baixa densidade (i.e.: atributos de fertilidade do solo) são apresentados como forma de ilustrar a interpretação dos mapas de erro obtidos com diferentes densidades amostrais. Para os dados coletados por grade amostral foi possível gerar mapas por krigagem para os atributos chave do estudo agronômico, apesar de requisitar ajustes manuais laboriosos, em modo global, ou mesmo impossibilitar a caracterização da dependência espacial de alguns atributos. Estes resultados indicam que não só um limitado número de pontos, mas principalmente a distribuição espacial regular das observações em relação ao formato radial do talhão T6, não favoreceram a representação da estrutura de variação espacial do solo. Este comprometimento entre a densidade amostral desejada e uma melhor distribuição dos pontos (i.e.: melhor cobertura junto as bordas irregulares do talhão) é um fato consagrado na geração automática de grades amostrais em AP (SPEKKEN; MOLIN, 2012). A análise dos variogramas indicaram que a quantidade (i.e.: 35 pontos) e a distribuição (i.e.: grade regular) do esquema amostral praticado ficou no limite mínimo do aceitável para permitir uma representação significativa das variações da maioria dos atributos, requisitando ajustes manuais difíceis e condicionados (e.g.: Potássio, pH, Fósforo, Cálcio e Magnésio), ou mesmo insuficiente para alguns ajustes (e.g.: Zinco, Nitrogênio, Cobre e Manganês) e inviabilizando o procedimento de krigagem.

A Figura 8.7 ilustra alguns resultados das simulações com ajustes manuais condicionados pelo espaçamento e a distribuição espacial da grade amostral praticada. O espaçamento de 100 X 100 m parece

não ter atendido a escala de variação para todas variáveis. Isto pode ser observado em analogia com as estruturas de variação espacial como apresentadas em Camargo et al. (2004), como apresentado no Item 3.4 (Figura 3.8). Estes comportamentos foram observados para pH (Figura 8.7.a) e Potássio (Figura 8.7.b) apresentando componentes aleatórios espacialmente correlacionados em diferentes distâncias máximas entre os pares e com diferentes qualidades dos ajustes, respectivamente, baixa variância em até 600 m e alta variância em até 420 m. Apesar da convergência no ajuste destes dois atributos (i.e.: mensagem “**Solution converged**” na interface), suas krigagens irão produzir mapas com diferentes níveis de erro nas estimativas, consequentemente gerando um mapa de Potássio muito mais incerto que o mapa de pH. Apesar da regressão ter收敛ido para um patamar no ajuste automático do Potássio, é possível observar valores muito altos para o efeito pepita e a amplitude da variância, além dos valores extremos dos coeficientes de validação e um limitado número de pares no cálculo do variograma (i.e.: entre 13 e 78 pares). Já no caso do Zinco, a regressão alcança um valor máximo sem definir um patamar de ajuste (i.e.: mensagem “**Interaction has reached maximum**” na interface) na escala da grade amostral (Figura 8.7.c), o que pode indicar um processo não estacionário, ou converge para um ruído aleatório em distâncias menores (Figura 8.7.d).

Podemos observar como a limitada disponibilidade de pontos observados dificulta, ou mesmo impossibilita, uma variografia bem ajustada conforme discutido nos itens 3.3 e 3.4. A baixa disponibilidade de observações limita o número de pares, principalmente em “**lags**” de menores distâncias, gerando parâmetros menos precisos da dependência espacial. Isto afeta diretamente os resultados da interpolação, sendo possível observar nestes casos que a krigagem só apresenta bom desempenho na vizinhança imediata dos pontos observados (Figura 8.8). No Vesper, este erro pode ser observado por intermédio do mapa apresentado na janela de visualização dos resultados da krigagem, onde em cada ponto da grade de interpolação as estimativas mais precisas são representadas em tons do vermelho ao amarelo e as menos precisas em tons do verde ao azul. Esta informação possibilita uma visualização das partes do talhão onde as estimativas estão tendo maior ou menor confiabilidade.

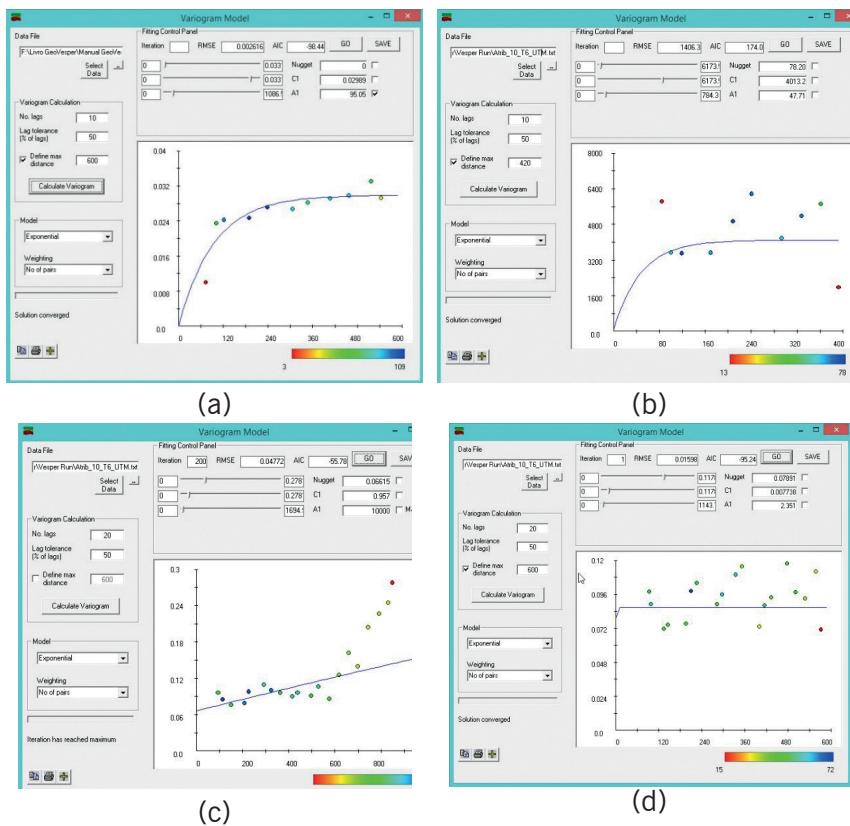


Figura 8.7. Resultados típicos de ajustes manuais condicionados, indicando em diferentes escalas de variação: componentes espacialmente correlacionados para pH (em a) e Potássio (em b); e um componente correlacionado com tendência (em c) ou aleatório (em d) para diferentes escalas da dependência espacial do Zinco.

Estas observações reiteram a importância do esquema amostral nas análises geoestatísticas. Questão esta que pode ser considerada dentro de dois critérios básicos nas aplicações da AP, sendo:

- Uma amostragem adequada ao tamanho das áreas que se pretende caracterizar. Isto é, uma estimativa que considere as dimensões das áreas homogêneas para um determinado processo de fertilidade do solo ou para um planejamento operacional segundo a disponibilidade de implementos agrícolas. Nestes casos, o espaçamento entre amostras deverá ser menor do que as “manchas” sendo consideradas; ou

- Uma amostragem inteligente, onde se faz uso da variabilidade de variáveis indicativas para avaliar e estimar a densidade amostral adequada.

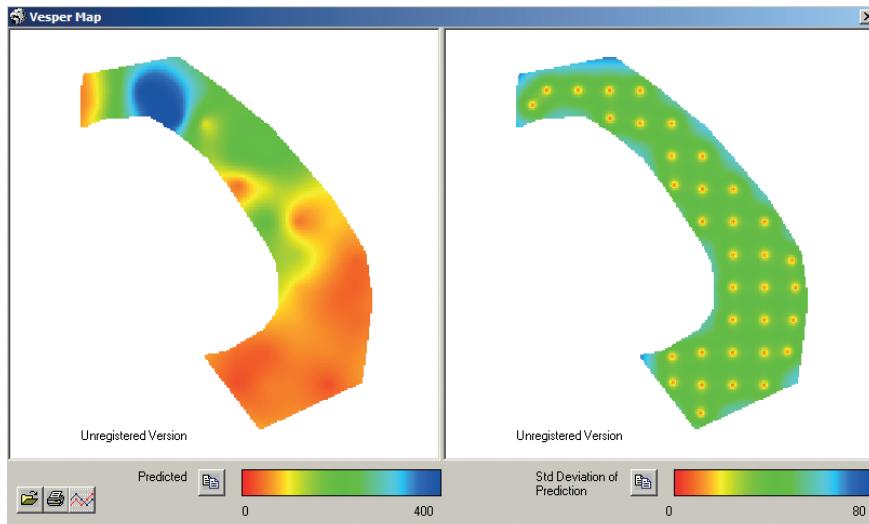


Figura 8.8. Mapa do erro das estimativas ilustrando a influência do limitado número de observações na precisão dos resultados do ajuste do variograma.

8.7 Modelos Parametrizados na Variografia

A busca por ferramentas mais efetivas para as etapas iniciais do processo de adoção da AP justifica-se na complexidade operacional e o alto custo das intervenções atualmente disponíveis para o manejo diferenciado. Decisões que requisitam modelos mais simples e acessíveis (MCBRATNEY et al., 2005) em contraste ao histórico das significativas contribuições em modelos quantitativos parametrizados pelo variograma (DIGGLE; RIBEIRO JUNIOR, 2007, HAMLETT et al., 1986). Entretanto, estes modelos são frutos de investigações científicas que envolvem o conhecimento específico e uma elaborada formulação matemática, sendo em sua maioria pouco ou nada acessíveis aos agricultores e técnicos agrícolas. É preciso integrar os conceitos agronômicos, os métodos quantitativos e a tecnologia avançada de for-

ma mais gradativa aos processos já estabelecidos para gerenciamento operacional do campo.

Alguns modelos matematicamente simples com base nos parâmetros de ajuste do variograma sugerem a razão de aleatoriedade (Cambardella et al., 1994) ou a razão de dependência (ZIMBACK, 2001). Estes podem ser facilmente calculados, gerando indicadores categóricos semi-quantitativos que indicam o grau da estrutura espacial da variação (i.e.: fraca, média e forte). Outra opção de referência da dependência espacial de atributos de solo, propõe a estimativa de variogramas médios e proporcionais que orientam na definição de fluxos decisórios na adoção da AP (MCBRATNEY; Pringle, 1999). Um exemplo de modelagem voltada para extrair informações de acervos de dados em alta densidade propõe um índice de oportunidade na adoção da AP, o qual considera dois componentes parametrizados pelo variograma e pelas dimensões operacionais. Este considera a magnitude e a estrutura espacial da variação (OLIVEIRA, 2009), ajustando a formulação original (PRINGLE et al., 2003) para o cultivo de grãos. Este modelo também teve os fatores de caráter operacional ajustados para compensar obstáculos morfológicos nas intervenções em talhões de vitivinicultura (TISSEYRE; MCBRATNEY, 2007). Este índice considera a covariância média de todo o talhão, o efeito pepita do variograma e um coeficiente de variação por unidade de área para quantificação da magnitude da variação. A estrutura espacial da variação considera a maior distância de autocorrelação da variável e um comprimento operacional estabelecido segundo as dimensões da plataforma e a velocidade de operação do implemento agrícola. A Tabela 8.2 apresenta os resultados de alguns destes indicadores para atributos de solo selecionados do talhão T6.

Tabela 8.2 Caracterização de índices parametrizados pelo variograma para quantificação da dependência espacial e da oportunidade na adoção da AP.

| Atributo do Solo | Ano | Parâmetros Médios e Proporcionais ¹ | | | índice de Cambardella ² | | $S_r^3 = \sqrt{M_r \cdot S_r}$ | Oportuno MCSE? |
|------------------|------|--|--------------------------|----------------|------------------------------------|----------------------|--------------------------------|----------------|
| | | Maior C1** | Menor C0* ou Maior a1*** | Oportuno MCSE? | C0/C0+ C1 (%) | Dependência Espacial | | |
| Argila | 2009 | Sim | Sim | Sim | 0 | Forte | - | - |
| Areia | 2009 | Não | Sim | Não | 0 | Forte | - | - |
| pH | 2010 | Não | Sim | Não | 66 | Média | - | - |
| Potássio | 2009 | Sim | Sim | Sim | 0 | Forte | - | - |
| | 2010 | Sim | Sim | Sim | 0 | Forte | - | - |
| Fósforo | 2009 | Sim | Sim | Sim | 4 | Forte | - | - |
| | 2010 | Sim | Sim | Sim | 15 | Forte | - | - |
| Ca | 2009 | - | - | - | 42 | Média | - | - |
| | 2010 | - | - | - | 24 | Forte | - | - |
| Mg | 2009 | - | - | - | 38 | Média | - | - |
| | 2010 | - | - | - | 1 | Forte | - | - |
| M.O. | 2009 | - | - | - | 12 | Forte | - | - |
| | 2010 | - | - | - | 71 | Média | 5,8 | Sim |

*C0 = efeito pepita; **C1 = variância estrutural; ***a1 = alcance.

¹McBratney & Pringle, 1999; ²Cambardella et al., 1994; ³(Oliveira et al., 2007).

(-) Indica que a análise não se aplica ao atributo; seja pela inexistência de variogramas médios ou proporcionais de referência, ou pelo limitado número de amostras que impossibilita o uso do S_r .

Por fim, um ponto inovador a ser observado nesta abordagem quantitativa é que os modelos baseiam-se na ideia de analisar e dimensionar a variação dos fatores de produção diretamente sobre os valores observados em alta densidade.