

*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 1

Adoção da Agricultura de Precisão

Ronaldo Pereira de Oliveira

Célia Regina Grego

1.1 A Geoestatística como Parte do Processo Decisório

A Agricultura de Precisão (AP) é uma realidade que vem se difundindo progressivamente no agronegócio brasileiro. A AP utiliza a integração de tecnologias de monitoramento intensivo com técnicas de análise espacial visando o planejamento estratégico do manejo dos fatores de produção segundo suas variações espaço-temporais. Numa visão geral, a AP consiste em um processo cíclico de etapas bem definidas, as quais requisitam uma integração multidisciplinar e abrangente de conceitos, tecnologias e conhecimentos. Este processo é composto por objetivos específicos como: viabilizar a robótica embarcada; desenvolver métodos para integração e análise de dados heterogêneos; implementar sistemas de análise espacial; e propor protocolos operacionais e recomendações agronômicas para o manejo por sítio-específico. A integração destas tecnologias busca disponibilizar aplicativos de apoio à decisão, acessíveis e eficientes, de forma a maximizar os benefícios econômicos, ambientais e sociais do manejo diferenciado (MCCOWN et al., 2006).

Em meio a uma grande variedade de tecnologias e serviços disponíveis no mercado, pode-se considerar que a adoção da AP envolve a identificação das ferramentas mais eficientes e dos métodos adequados para cada sistema de produção específico. Estas tecnologias visam facilitar e ampliar a capacidade de entender e avaliar as potencialidades do manejo diferenciado dos fatores preponderantes nas variações da produtividade (e.g.: recursos naturais, aplicação de insumos, sistemas integrados e fatores mercadológicos). Esta customização da

tecnologia busca, cada vez mais, a utilização de equipamentos que permitam a caracterização e o manejo da variabilidade espacial da lavoura com precisão agrônômica (BERNARDI et al., 2014).

A necessidade de caracterizar a autocorrelação espacial de muitas variáveis e de mapear a estrutura espacial de suas variações relaciona a geoestatística diretamente aos processos de adoção da AP, onde deve prevalecer a visão central de planejamento da lavoura. Seja o monitoramento intensivo feito de forma analógica ou semiautomática em pequenas propriedades (e.g.: cultivos maçã, uva de mesa, pêssego e vitinicultura – potencialmente até 10 ha), ou automatizado pela mecatrônica embarcada e tecnologias do monitoramento proximal em áreas extensas com produção intensiva (e.g.: grãos, algodão e cana-de-açúcar - potencialmente acima de 20 ha). Um fator inerente aos dados da AP que contempla a requisição básica da geoestatística está no registro das coordenadas individuais de cada observação. Estes dados georreferenciados podem ser obtidos por sistemas de navegação global por satélites (e.g.: GPS), mapas temáticos, imagens de satélite ou fotos aéreas cartograficamente registradas.

Na continuidade do processo cíclico de adoção da AP, torna-se primordial integrar, sintetizar e traduzir a massiva quantidade de dados monitorados em informações relevantes que promovam avanços no conhecimento agrônômico, operacional e gerencial no manejo diferenciado do sistema de produção. Nesta etapa do processo as técnicas geoestatísticas muito contribuem no apoio à decisão, quantificando as dimensões em que ocorrem variações de uma variável (i.e.: escala da correlação espacial entre valores), e mapeando a estrutura espacial destas variações (i.e.: geometria da dispersão dos valores). Os parâmetros descritos na geoestatística fornecem meios para uma postura gerencial consciente, em que o planejamento agrônômico e operacional considera o manejo por sítio-específico. Complementares à mecatrônica embarcada, ferramentas de software que viabilizam o uso destas técnicas facilitam um melhor entendimento da variação espacial da produção. Diante da realidade onde a adoção da AP envolve casos individualizados nas variações em quantidade, densidade, qualidade e incerteza dos dados monitorados, torna-se essencial o uso de aplicativos que possibilitem o acesso e a customização dos processos de predição espacial de forma específica para cada acervo de dados.

A adoção de novas tecnologias desenvolvidas para o monitoramento intensivo do campo busca correlacionar os dados mais facilmente observados com outras propriedades de difícil obtenção, visando à redução de gastos e aumento de produtividade. Isto envolve a adoção de plataformas multissensor que permitam quantificar, com alta precisão espacial, os fatores preponderantes da produção (WHELAN, 1998). Segundo Molin (2012), a prática adequada da AP impõe aceitar o fato e assumir o desafio de que manejar a variação espacial da produtividade vai muito além do que mapear um atributo de solo e intervir em taxas variadas de N, P, K, Ca e Mg. Ou seja, podem existir muitos outros fatores potencialmente influenciando na variabilidade espacial-temporal da produção.

Apesar dos procedimentos da análise geoestatística não diferirem conceitualmente para aplicações de diversos fins, na AP a disponibilidade de dados em alta resolução espacial viabiliza não só uma maior precisão e robustez nos resultados, como também facilita o entendimento integrado das correlações espaço-temporais entre os diferentes fatores de produção. Assim, a análise quantitativa da dependência espacial de dados gerados no monitoramento intensivo dos solos, dos parâmetros de plantas e da produtividade, pode ser facilitada pela geoestatística, bem como pode facilitar o uso desta importante ferramenta na análise da estrutura espacial das variações. Segundo Grego e Vieira (2005), mesmo numa parcela experimental de 30 x 30 m existe grande variabilidade de propriedades físicas do solo e se for considerada como homogênea pode mascarar os resultados dos tratamentos aplicados no manejo por sítio-específico.

A geoestatística difere da estatística clássica por considerar que os valores de uma variável estão diretamente relacionados à sua localização. Em síntese, espera-se que observações próximas apresentem leituras mais semelhantes do que aquelas separadas por distâncias maiores. Através de suas técnicas, a geoestatística possibilita avaliar a dependência espacial das variáveis e estimar valores para locais não medidos. Isto é feito em duas etapas utilizando-se o mesmo conjunto de dados observados, primeiramente para quantificar a autocorrelação espacial entre pares de valores equidistantes em diferentes distâncias, e depois, utilizando estes parâmetros para estimar o valor da variável em locais não amostrados, segundo valores conhecidos numa dada

vizinhança. Desta maneira, estas técnicas possibilitam produzir informações para gerar mapas e para planejar a estrutura e o esquema amostral de uma variável em função da sua variabilidade espacial.

Em resumo, as técnicas geoestatísticas podem ser usadas para diferentes etapas, específicas e complementares. Estas incluem: a) descrever e modelizar quantitativamente os padrões espaciais da variação espacial (i.e.: modelagem do variograma); b) predizer valores em locais não amostrados (i.e.: interpolação por krigagem); c) dimensionar a incerteza associada a uma estimativa em locais não amostrados (i.e.: variância da krigagem); e d) auxiliar no planejamento e otimização de esquemas amostrais.

Segundo Lima (2006), as vantagens reconhecidas da geoestatística sobre outras técnicas convencionais de predição espacial são:

- O estudo da variabilidade espacial de uma variável regionalizada;
- A suavização na estimação de valores preditos na regressão;
- O desagrupamento que anula as concentrações localizadas das observações;
- A determinação do comportamento da variação em diferentes direções (anisotropia);
- A precisão sobre as áreas ou pontos, não observados, a serem estimados; e
- O dimensionamento das incertezas associadas a estimativa.

O fato de considerar a dependência espacial das variáveis e buscar descrever quantitativamente a estrutura espacial de suas variações representa um grande potencial de aplicação nas áreas de geociências, ciências ambientais e agronômicas. Em AP, a possibilidade de gerar mapas relacionados à produtividade agrícola utilizando a geoestatística, constitui um avanço no manejo localizado dos sistemas de produção agrícolas e uma maior precisão e eficiência na tomada de decisão segundo Tisseyre e McBratney (2007). Com isso, a geoestatística constitui uma peça fundamental na investigação científica e na geração de tecnologias, produtos e processos que venham estimular a adoção consciente e ponderada da AP.

1.2 Tecnologias de Monitoramento Intensivo

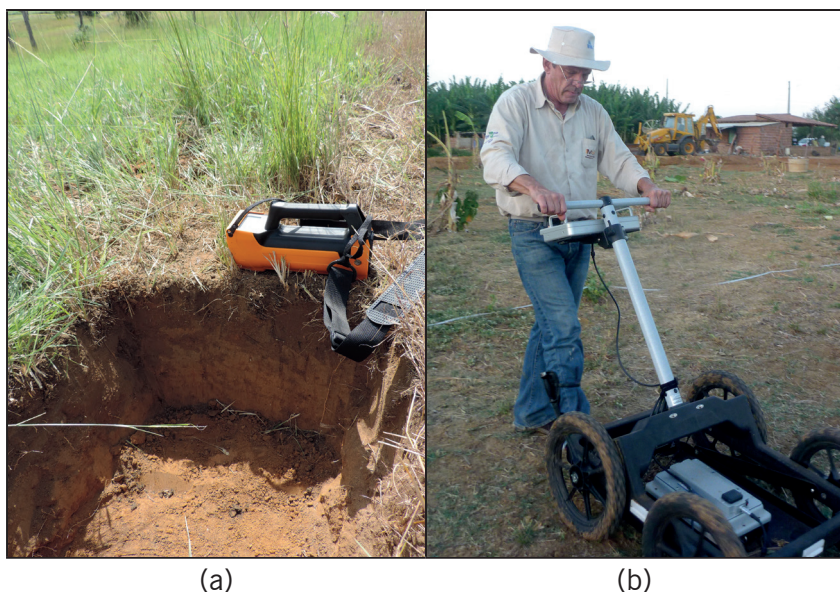
Recursos avançados da eletrônica, robótica embarcada e tecnologia da informação estão cada vez mais presentes no campo através da AP (CÂMARA; MEDEIROS, 1998; MOLIN, 1997; VIEIRA, 2000). Exemplos do uso destas tecnologias aplicadas se caracterizam em funções específicas nas intervenções do monitoramento intensivo, em geral de modo contínuo e não invasivo, sendo: a auto navegação, os sensores de produtividade, os sensores óticos (i.e.: visível e infravermelho próximo) e os sensores de atributos de solo. Estes compõem o conjunto de ferramentas facilitadoras e geradoras de densos acervos de dados, paradigma referido na literatura internacional como a tecnologia de sensores “*on the go*”. Com a utilização destes sensores é possível gerar informações em tempo real, de forma complementar as tecnologias de campo que visam a automação da aplicação de insumos por taxas variadas.

O grande número de observações realizadas no monitoramento contínuo com sensores de produtividade, condutividade elétrica, emissões gama e outros atributos de solo possibilita gera volumosos bancos de dados espaço-temporais de um único talhão. Muito frequentemente, com densidades amostrais maiores que 100 pontos por hectare em cada variável observada. Nas etapas posteriores ao monitoramento, dentro do processo de adoção da AP, ferramentas de software tornam-se necessárias para gerenciar, analisar e espacializar os dados observados. Estas tecnologias complementares atendem aos processos de decisão do manejo diferenciado, onde a crítica, a integração e a interpretação das informações dependem de métodos e procedimentos analíticos como: filtragem de valores discrepantes em arquivos gerados pela tecnologia de campo (i.e.: dados brutos em arquivos de formatos proprietários gerados pelas diferentes tecnologias) e a geração de mapas. Nestas, incluem-se os aplicativos ilustrados neste livro como o Vesper para geoestatística e o sistema de informação geográfica QGIS.

Amplamente difundido em suas diversas aplicações, o sensoramento remoto vem sendo complementado por novas tecnologias de sensores proximais, os quais também geraram acervos de dados com alta resolução espacial. Estes realizam medições por contato direto com o solo (RABELLO et al., 2008) e a planta, ou em distancias de

até 3 metros em relação ao terreno, dependendo do tipo de sensor. A frequência de leitura é sincronizada com a atualização de coordenadas dos sensores de posicionamento (i.e.: um ponto por segundo), variando o número total de observações por área em função da velocidade de operação. Uma síntese dos tipos de sensores mais utilizados e as diferentes tecnologias disponíveis no mercado inclui:

- Sensores de Posicionamento de Campo - permitem determinar a localização precisa dentro do talhão e a altimetria, possibilitando a modelagem topográfica (e.g.: declividade, aspecto, área de contribuição e índice de encharcamento). São sensores de navegação global por satélites (BERALDO; SOARES, 1995), denominados de *Global Navigation Satellite System* (i.e.: GNSS) e disponíveis em diferentes escalas de precisão (e.g.: GPS, DGPS e RTK);
- Sensores de Produtividade - permitem quantificar parâmetros da produção em função da área colhida (e.g. massa, umidade, conteúdo de açúcar, óleo e proteínas). Existem vários aspectos de operação, arquitetura e precisão no desenvolvimento desses sensores (MOLIN, 2000). Atualmente os sensores de produtividade, dependendo da cultura à qual se destina, são desenvolvidos usando sistemas com transdutores piezoelétricos para pressão, sistemas ópticos, mecânicos ou que usam sensores de fluxo por infravermelho localizados no tubo pneumático ou placa de impacto instalada no elevador da colheitadeira (REYNS et al., 2002); e
- Sensores Proxiais de Solo - permitem quantificar atributos do solo por medição direta (e.g.: condutividade elétrica do solo) ou indireta (e.g.: atributos correlacionados por funções de pedotransferência). Outras medidas diretas valoram atributos como: conteúdo de matéria orgânica, pH, capacidade de troca catiônica, textura, umidade, nutrientes e contaminações por metais pesados. Incluem diferentes tipos de tecnologias em sensores proximais para observação de diferentes atributos de solo (Tabela 1.1), sendo: espectrômetros de campo (i.e.: visível e infravermelho), condutívimetros por indução elétrica e eletromagnética, espectrômetros de Raios X, penetrógrafos digitais, gamarradiômetros (e.g.: RS-230 BGO da Radiation Solution - Figura 1.1.a) e radares de penetração por permitividade elétrica (e.g.: Ground Explorer HDR da Mala Geoscience - Figura 1.1.b)



Fotos: Gustavo Vasques.

Figura 1.1. Sensores proximais para o monitoramento intensivo e não invasivo de atributos do solo em AP: a) Gamaradiômetro (RS-230 BGO); b) Radar de Penetração (Ground Explorer).

No monitoramento intensivo de atributos de solo, estas tecnologias visam auxiliar nas questões de custo/benefício da laboriosa malha amostral de fertilidade do solo diante do número mínimo de observações requisitadas pelos métodos da geoestatística. Pois um grande número de pontos inviabiliza o custo da operação (BOLFE; GOMES, 2005). Em contrapartida, as observações devem ser suficientemente próximas e bem distribuídas para conseguir caracterizar as possíveis escalas de variabilidade do atributo monitorado. Assim como as imagens de satélite ou fotografias aéreas estão para a localização do perfil modal no mapeamento de solos clássico, os mapas produzidos pelos sensores de solo podem ajudar na determinação de um número adequado de amostras (VIEIRA et al., 2008), identificando regiões com diferentes respostas e, a partir desta informação, concentrando-se a amostragem nas regiões onde existir maior variabilidade e diminuindo-se a densidade nos locais mais uniformes (GREGO et al., 2014).

Nesse contexto, a alta densidade amostral obtida pelos sensores de atributos de solos traz duas vantagens distintas. A primeira, tam-

bém comum a outros parâmetros da produção, está na robustez estatística que se obtém com o grande número de observações, facilitando e possibilitando a automação na geração de mapas de atributos interpolados por Krigagem. A segunda, sendo esta específica nas questões de grade amostral, é buscar na integração das variabilidades expressas pelos diferentes sensores os meios para delinear áreas homogêneas do solo, comumente denominadas na AP de “Zonas de Manejo” (“*Management Zones*” - MZs), a partir das quais o esquema amostral pode ser planejado segundo a estrutura de variação das MZs, reduzindo ou otimizando o número de observações em relação às práticas de grade amostral de solos.

O conhecimento sobre os atributos de solos caracterizados pelas diferentes tecnologias de sensores proximais (Tabela 1.1) não é recente (ADAMCHUK et al., 2004) e as abordagens para o delineamento das MZs variam segundo o tipo de manejo do solo ou da produção que se pretende implementar. É nesta fase de integração da informação que as etapas de variografia e de predição espacial por Krigagem permitem quantificar e representar cartograficamente as variações dos parâmetros que potencialmente influenciam nas variações da produtividade, permitindo gerar mapas de atributos em alta resolução sobre uma grade de predição comum.

Outras classificações para um arsenal mais abrangente de sensores são apresentadas por Gebbers (2014), categorizando os equipamentos segundo estratégias de monitoramento como: princípio de medição (e.g.: mecânicos, químicos, eletromagnéticos, óticos, radioativos, acústicos e pneumáticos); plataforma de operação (e.g.: orbitais, suborbitais, proximais por contato ou indução, drones e smartphones); modo de operação (e.g.: contínua, pontual e estacionário); e parâmetros de aplicação (e.g.: atributos do solo, produtividade, estágio de desenvolvimento, pragas, deficiência de nutrientes, estresse hídrico e identificação de plantas invasoras). Para um maior aprofundamento e atualização sobre os tipos de sensores e suas aplicações específicas, Gebbers (2014) apresenta uma generosa lista de referências bibliográficas e links atualizados.

Em boa parte ainda incipientes, a integração destas tecnologias oferece uma nova perspectiva com plataformas multissensores para o monitoramento intensivo dos fatores de produção. Entretanto, no

atual estágio de desenvolvimento, esta visão integrada depende das técnicas da geoestatística para viabilizar uma análise multivariada que considere as características das distintas distribuições espaciais e suas incertezas amostrais.

Tabela 1.1. Diferentes tipos de tecnologias em sensores proximais e suas aplicações típicas no monitoramento de atributos de solo.

Tipo de Sensor	Atributos do Solo								
	Textura	Matéria Orgânica e Carbono Total	Umidade	Salinidade e Sodicidade	Compactação	Profundidade	pH	Nitratos e Nitrogênio	CTC
Elétrico e Eletromagnético	X	X	X	X		X		X	X
Ótico e Rediométrico	X	X	X				X	X	X
Mecânico					X	X			
Acústico e Pneumático	X				X	X			
Eletroquímico				X			X	X	

Fonte: adaptado de Adamchuk et al. (2004).