



ISSN 1518-4277

Dezembro, 2005

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

Documentos 46

Agricultura de Precisão: manejo da variabilidade espacial e temporal dos solos e culturas

Antônio Marcos Coelho

Sete Lagoas, MG
2005

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Milho e Sorgo

Rod. MG 424 Km 45
Caixa Postal 151
CEP 35701-970 Sete Lagoas, MG
Fone: (31) 3779 1000
Fax: (31) 3779 1088
Home page: www.cnpms.embrapa.br
E-mail: sac@cnpms.embrpa.br

Comitê de Publicações da Unidade

Presidente: Antônio Carlos de Oliveira
Secretário-Executivo: Paulo César Magalhães
Membros: Camilo de Lélis Teixeira de Andrade, Cláudia Teixeira
Guimarães, Carlos Roberto Casela, José Carlos Cruz e Márcio
Antônio Rezende Monteiro

Supervisor editorial: Clenio Araujo
Revisor de texto: Dilermando Lúcio de Oliveira
Normalização bibliográfica: Maria Tereza Rocha Ferreira
Editoração eletrônica: Dilermando Lúcio de Oliveira

1ª edição

1ª impressão (2005): 200 exemplares

Todos os direitos reservados.

A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei no 9.610).

Coelho, Antonio Marcos.

Agricultura de precisão: manejo da variabilidade espacial e temporal dos solos e culturas / Antônio Marcos Coelho. – Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2005.

60 p. ; 21 cm. - (Documentos / Embrapa Milho e Sorgo, ISSN 1518-4277 ; 46).

1. Agricultura de precisão. I. Coelho, Antônio Marcos. II. Série

CDD 631.3

© Embrapa 2005

Autor

Antônio Marcos Coelho

Eng. Agrônomo, Ph.D., Embrapa Milho e Sorgo,
Caixa Postal 151, CEP 35701-970 Sete Lagoas, MG
e-mail: amcoelho@cnpmc.embrapa.br

Sumário

1. Introdução	7
1.1. Histórico	7
1.2. Definição e Conceitos de Agricultura de Precisão	8
2. Componentes Básicos da Agricultura de Precisão	9
2.1. Tecnologias Propulsoras da Agricultura de Precisão	10
2.1.1. Computadores e Programas	10
2.1.2. Sistemas de Informações Geográficas - SIGs	12
2.1.3. Sistema de Posicionamento Global - GPS	14
2.1.4. Sensoriamento Remoto	17
2.1.5. Sensores	17
2.1.6. Controladores Eletrônicos de Aplicação	19
2.2. Etapas na Agricultura de Precisão	20
2.2.1. Identificação da Variabilidade Espacial e Temporal	20
2.2.1.1. Variabilidade Espacial e Temporal das Características Agronômicas das Culturas	23
2.2.1.2. Variabilidade Espacial e Temporal das Propriedades do Solo	27
2.2.2. Manejo da Variabilidade	32
2.2.3. Avaliação da Agricultura de Precisão - Aspectos Econômicos e Ambientais	41
2.2.3.1. Aspectos Econômicos	41
2.2.3.2. Aspecto Ambiental	43
3. Agricultura de Precisão no Brasil	45
3.1. Situação Atual e Potencial	45
3.2. Programas de Pesquisa e Necessidades Futuras	47
3.3. Manejo por Talhões: uma alternativa inicial	49
4. Referências Bibliográficas	50

Agricultura de Precisão: manejo da variabilidade espacial e temporal dos solos e culturas

Antônio Marcos Coelho

1. Introdução

1.1. Histórico

Agricultura de precisão é uma nova tecnologia com uma longa história. Agricultores têm, por longo tempo, procurado maximizar a produção física e econômica das culturas, variando a aplicação de insumos de acordo com os tipos de solos e performance das culturas. Agricultores dos tempos antigos já reconheciam os benefícios da aplicação diferenciada de esterco e material calcário de acordo com o tipo de solo (Kellog, 1957). Em 1929, Bauer e Linsley, citados por Goering (1993), sugeriram amostragem de solo utilizando o processo sistematizado em malhas de 100 m por 100m, para determinar, no campo, a necessidade de aplicação diferencial de calcário. Na época, alguns agricultores obtiveram reduções de até 40 % nos custos de produção com aplicação diferenciada do insumo. Já o primeiro trabalho sobre variabilidade espacial na produção das culturas, relatado por Smith (1938), na Austrália, apresentou um mapa de colheita de trigo.

Entretanto, é importante mencionar que, em tempos passados, em que predominava uma agricultura familiar, explorada em pequenas áreas, era possível aos agricultores observar a variabilidade espacial das propriedades

dos solos e seus efeitos no desenvolvimento e produção das culturas e maneja-las com base nessas diferenças. Posteriormente, com a mecanização da agricultura, somente foi possível manejar economicamente as culturas em grandes áreas com a aplicação uniforme de insumos. Um agricultor que atualmente cultiva 1.000 ha com manejo uniforme usa menos informações agronômicas da variabilidade espacial do que 10 agricultores que anteriormente cultivaram essa mesma área em lotes de 100 ha. Recentemente, com o desenvolvimento do Sistema de Posicionamento Global – GPS, associado a equipamentos capazes de medir a variabilidade (monitores de colheita) e aplicação de insumos (fertilizantes, herbicidas, sementes, etc.) a taxas variáveis, há possibilidade de se reverter essa situação, possibilitando, assim, o manejo das culturas de modo mais específico.

Este trabalho fornece uma visão geral da agricultura de precisão e avalia a situação atual e potencial para aumentar a performance das culturas e a qualidade ambiental na produção agrícola. Aqui, define-se agricultura de precisão, exploram-se as tecnologias disponíveis que a tornam praticável, avaliam-se sua agronômica facilidade, sua importância econômica e sua eficiência ambiental. O trabalho é concluído com uma análise da situação atual e potencial para as condições brasileiras, identificando as necessidades de desenvolvimento em agricultura de precisão, e fornece indicações para futuras ações.

1.2. Definições e Conceitos da Agricultura de Precisão

Desde os meados da década de 1980, um grande número de termos tem sido usado para descrever o conceito da agricultura de precisão: (i) agricultura por metro quadrado (Reichenberg & Russnogle, 1989); (ii) agricultura com base em tipos de solos (Carr et al., 1991; Larson & Robert, 1991); (iii) aplicação de insumos a taxas variáveis – VRT (Sawyer, 1994); (iv) variável espacial, precisão, prescrição, ou manejo específico de culturas

(Schueller, 1991); (v) manejo por zonas uniformes (Pierce & Sadler, 1997). Assim, o manejo de solos e culturas por zonas uniformes tem por definição a propriedade de identificar e analisar características de solo, histórico de cultivo, clima e outras variáveis do sistema de produção, em diferentes locais dentro do campo.

Agricultura de precisão ou manejo por zonas uniformes tem por princípio básico o manejo da variabilidade dos solos e culturas no espaço e no tempo. Sem essa variabilidade, o conceito de agricultura de precisão tem pouco significado e nunca teria evoluído (Mulla & Schepers, 1997). A agricultura de precisão engloba aspectos da variabilidade dos solos, clima, diversidade de culturas, performance de máquinas agrícolas e insumos (físicos, químicos e biológicos) naturais ou sintéticos, usados na produção das culturas. Com base nesses princípios, Pierce & Nowak (1999) utilizam a seguinte definição: *"Agricultura de Precisão é a aplicação de princípios e tecnologias para manejar a variabilidade espacial e temporal, associada com todos os aspectos da produção agrícola, com o objetivo de aumentar a produtividade na agricultura e a qualidade ambiental"*

2. Componentes Básicos da Agricultura de Precisão

Os principais componentes do sistema da agricultura de precisão devem associar as medidas e compreensão da variabilidade. Posteriormente, o sistema deve usar a informação para manejar a variabilidade, associando a aplicação de insumos (fertilizantes, sementes, defensivos agrícolas, etc.) usando o conceito de manejo localizado e as máquinas e equipamentos para a correta aplicação dos diferentes insumos a serem manejados. Finalmente, e mais importante, esse sistema deve recordar a eficiência das práticas, com a finalidade de avaliar o seu valor para o agricultor.

2.1. Tecnologias Propulsoras da Agricultura de Precisão

Embora o conceito de agricultura de precisão não seja novo, não há dúvidas de que importantes avanços nas tecnologias possibilitaram sua aplicação.

As tecnologias disponíveis podem ser agrupadas em seis principais categorias: **(i) Computadores e programas; (ii) GPS – Sistema de Posicionamento Global; (iii) SIG's – Sistemas de Informação Geográfica; (iv) Sensoriamento Remoto; (v) Sensores; (vi) Controladores Eletrônicos de Aplicação.** Conforme ilustrado na Tabela 1, poucas dessas tecnologias foram desenvolvidas especificamente para a agricultura e suas origens datam de mais de 20 anos. É a integração dessas tecnologias que permitiu aos pesquisadores, extensionistas, consultores e agricultores fazer coisas impossíveis no passado, com detalhes nunca antes obtidos e, quando feito corretamente, com qualidade nunca atingida (Fortin & Pierce, 1998).

2.1.1. Computadores e Programas

Muitas tecnologias sustentam o conceito de agricultura de precisão (Tabela 1), mas nenhuma delas tem sido mais importante do que os computadores e os programas. Computadores mais velozes, munidos de poderosos programas para manejo de dados e elaboração de gráficos e mapas estão entre as tecnologias que possibilitam a aplicação dos conceitos de agricultura de precisão. Atividades tais como mapeamento de colheita, levantamento de dados de culturas e amostragem sistematizada de solos fornecem dados sobre a variabilidade das culturas e solos em uma determinada área. Esses dados devem ser processados para fornecer informações que podem ser dispostas em mapas e utilizadas para a tomada de decisões.

Agricultura de precisão requer a aquisição, manejo, processamento e análise de grande quantidade de dados que variam no espaço e no tempo. Sistemas de computação móveis são necessários para trabalhos em condições de campo. Esses sistemas móveis necessitam de microprocessadores que possam operar a altas velocidades, tenham memória expansiva e possam armazenar massiva quantidade de dados e informações. Assim, pode-se esperar que os computadores direcionem o

Tabela 1. Desenvolvimento histórico nas tecnologias e eventos que tornaram possível a implementação da agricultura de precisão.

Década/ano	Tecnologias/eventos
1940	Surto de fotografia aérea tirada de balões
1960	<p>Primeiras imagens obtidas com câmeras de TV montadas em satélites, baixa resolução em preto e branco.</p> <p>Primeiro Sistema de Informação Geográfica – SIG – comercial</p> <p>Primeiro sensor de clorofila (Benedict & Swidler, 1961)</p> <p>Primeira fotografia multiespectral tirada do espaço na Missão Apollo 9</p>
1970	<p>Baumgardener et al. (1970) reportaram dados multiespectral de matéria orgânica do solo</p> <p>Processador Intel 4040 (primeiro microchip)</p> <p>Lançamento do primeiro satélite Landsat que permitiu um recobrimento contínuo da superfície da terra</p> <p>Sensor para matéria orgânica do solo (Page, 1974)</p> <p>Computador Apple comercializada (http://www.apple.com)</p> <p>Lançado o primeiro satélite NAVSTAR – GPS (NAVigation System Time And Ranging)</p>
1980	<p>Primeiro PC: IBM</p> <p>Processador Intel 80286</p> <p>Lançamento do satélite Landsat-4 com mapa temático (TM)</p> <p>Laboratório Jet produz o primeiro sensor hiperespectral e de alta altitude em plataformas, conhecido como AIRS (Airborne Imaging Spectrometer)</p> <p>GPS disponível para o uso civil</p> <p>Tecnologia de taxa variável de aplicação de fertilizantes – VRT, patenteada por SOIL TECH Inc., atualmente Ag.Chem.</p> <p>Primeiro Workshop sobre variabilidade espacial e temporal das propriedades dos solos, realizada em Las Vegas, NV, em 1984 (Nielsen & Douma, 1985)</p> <p>Lançamento do Landsat 5</p> <p>Processador Intel 286</p> <p>Monitoramento do fluxo de grãos em colheita com o monitor de colheita (DeBorjaender et al., 1986)</p> <p>França lança uma série de satélites – SPOT, o primeiro a oferecer dados multiespectral para o uso comercial</p> <p>Laboratório Jet produz o segundo sensor hiperespectral, conhecido como AVIRIS (Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer)</p> <p>Mapa de colheita no Texas (Bae et al., 1987)</p> <p>Processador Intel 40486</p>
1990	<p>Japão lança os satélites JERS-1 e JERS-2 que inclui sensores ótico e radar</p> <p>Primeira Simulação em Agricultura de Precisão (ASAE, 1991)</p> <p>Monitor de colheita em escala comercial aparece nos EUA</p> <p>Primeira Conferência Internacional em Agricultura de Precisão (Robert et al., 1992)</p> <p>Processador Pentium (Intel)</p> <p>Burrough (1993) publica uma revisão de literatura sobre os progressos nas análises e uso das informações de variabilidade espacial e temporal das propriedades dos solos</p> <p>Consolidação de 24 GPS – satélites em sistemas NAVSTAR</p> <p>Primeira Conferência Européia em Agricultura de Precisão</p> <p>Conselho Nacional de Pesquisa dos EUA publica livro sobre agricultura de precisão (NRC, 1997)</p>

Fonte: modificada de Pirsoe & Nowak (1999), complementada com as informações dos autores mencionados na tabela.

desenvolvimento tecnológico que irá permitir a implementação das tecnologias da agricultura de precisão.

Considere-se, por exemplo, somente os dados de produção de grãos de uma lavoura de milho (Tabela 2), coletados a cada segundo por um monitor de colheita instalado em uma colhedora. O processamento e a análise dessa enorme quantidade de dados é praticamente impossível sem o auxílio de computadores. Assim, programas de computadores que podem facilmente armazenar, manipular e analisar esses dados são de grande importância para o desenvolvimento da agricultura de precisão. Os programas podem variar em complexidade, de simples, para elaboração de mapas, a complexos, capazes de analisar múltiplas camadas de dados.

Tabela 2. Dados provenientes de uma colhedora automatizada, equipada com monitor de colheita e GPS, na colheita de uma lavoura de milho de 40 ha. Sete Lagoas, MG.

Parâmetros estatísticos	Coordenadas geográficas		Produção de grãos
	Longitude	Latitude	(Mg/ha)
Mínimo	-44°18'06" S	-19°40'79" W	3,22
Média	-44°17'74" S	-19°46'47" W	7,72
Máximo	-44°17'42" S	-19°46'14" W	11,31
Desvio padrão da média	159,92	158,46	1,68
Nº de dados coletados: 20.538			CV = 20 %

Fonte: Embrapa Milho e Sorgo. CV = coeficiente de variação.

2.1.2. Sistemas de Informações Geográficas – SIGs

Sistemas de Informações Geográficas são definidos como um conjunto de programas, equipamentos, metodologias, dados e de pessoas (usuários), perfeitamente integrados, de forma a tornar possível a coleta, o armazenamento, o processamento e a análise de dados georreferenciados, bem como a produção de informação derivada de sua aplicação (Tozi, 2000). São capacidades do SIG: (i) análise espacial das relações de objetos

geográficos, por meio da combinação e do processamento de dados (gráficos e alfanuméricos) de diversas fontes; (ii) produzir melhores mapas; (iii) sobrepor camadas e mapas diferentes. Através disso, os SIG's melhoram a maneira como usamos os mapas e simplificam a realização das análises.

Para exemplificar a importância dessas tecnologias na agricultura de precisão, descrevem-se, a seguir, as etapas que envolvem a utilização do SIG na geração de informações e na tomada de decisão em manejo. As atividades agrícolas podem ser descritas como uma série de eventos que se sucedem em determinada ordem, alimentada a partir dos resultados obtidos nos ciclos anteriores. Podemos descrevê-las em cinco etapas:

Etapa 1 – Mundo Real – compreende todas as atividades executadas diariamente, por exemplo, a amostragem de solo ou o plantio de determinada cultura (Figura 1);

Etapa 2 – Fontes de Dados – a partir da primeira etapa, vários tipos de informações são obtidas, como, por exemplo, características físico-químicas dos solos (Tabela 3), produtividades das culturas, etc. Essas são coletadas de diversas formas, como através do processo manual (caderneta de campo) e a utilização de equipamentos auxiliares, que poderão ser equipamentos agrícolas com capacidade de avaliar as propriedades dos produtos e do meio ambiente onde se encontram. Exemplo: Colhedoras equipadas com monitor de colheita, amostradores automatizados de solos, sistema de sensoriamento remoto, GPS, radares climático, fotogrametria aérea e por satélite, etc.

Etapa 3 – Gerenciamento de Dados – nesta etapa, todas as informações são agrupadas e organizadas de maneira a interagirem entre si, com maior transparência e objetividade possível. É fundamental a utilização de computadores e de programas dotados de capacidade e do dimensionamento ideais para cada aplicação em específico. Exemplo:



Figura 1. Exemplo de atividades do cotidiano, cultura de milho e tomada de pontos, utilizando o equipamento GPS. Fotos do auto

programas de sistemas de informações geográficas específicos para a agricultura.

Etapa 4 – Análises – as ferramentas básicas nas análises continuam sendo os computadores e os programas descritos na etapa anterior. Os resultados podem ser mapas de produtividade, mapas de características de solo, mapas de infestações de ervas daninhas, doenças e pragas, relatórios climáticos, históricos, etc.

Etapa 5 – Usuários – completa-se o ciclo com todos os profissionais envolvidos na tomada de decisão e encarregados da execução das atividades, que poderão ser topógrafos, agrônomos, proprietários de terras, operadores de equipamentos e outros.

2.1.3. Sistema de Posicionamento Global – GPS

Uma vez que o controle local é importante para a agricultura de precisão, por possibilitar acesso a variabilidade e, também, para aplicação localizada e diferencial de insumos (Schueller, 1992; Tyler et al., 1997), o desenvolvimento dessa tecnologia teve grande significado para a aplicação dos conceitos de manejo localizado. No início da aplicação dos conceitos da

Tabela 3. Representação de um arquivo pontual de dados de análises de solo, provenientes de amostra em que os locais de coleta, foram georreferenciados.

Local amostra	Coordenada UTM X	Coordenada UTM Y	Profundidade do solo (cm)	Temperatura do solo (°C)	Umidade do solo (%)	pH	Matéria orgânica (%)	Nitrogênio (mg/kg)	Fósforo (mg/kg)	Enxofre (mg/kg)	Cloro (mg/kg)	Condutividade elétrica (µmhos/cm)
1	48504189	824	0,00	18,00	0,20	5,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	48504190	824	0,00	18,00	0,20	5,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	48504191	824	0,00	18,00	0,20	5,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	48504192	824	0,00	18,00	0,20	5,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	48504193	824	0,00	18,00	0,20	5,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	48504194	824	0,00	18,00	0,20	5,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	48504195	824	0,00	18,00	0,20	5,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	48504196	824	0,00	18,00	0,20	5,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	48504197	824	0,00	18,00	0,20	5,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	48504198	824	0,00	18,00	0,20	5,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

UF - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Boletim de Geoprocessamento, 17(2007)

agricultura de precisão, a posição relativa dentro de uma cultura no campo era determinada por estimativas, utilizando-se um método simples, no qual a posição era tomada em relação a um ponto previamente fixado, medindo-se as distâncias utilizando-se radar, ultra-som, etc.

O sistema de posicionamento global – GPS é uma tecnologia que possibilita determinar a posição em qualquer parte do globo terrestre. Desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos EUA, e disponível para diversos usos civis, desde a pesca até a navegação, o GPS também tornou a agricultura de precisão uma realidade. Ele pode ser comparado a um simples rádio AM ou FM, que recebe os sinais emitidos por uma constelação de 24 satélites girando ao redor da terra, a uma altitude de aproximadamente 20.000 km. Uma típica configuração para a aplicação na agricultura inclui antena, receptor e cabos para a conexão do receptor a outros equipamentos, tais como: monitor de colheita, equipamentos para avaliar propriedades dos solos (Figura 2) e culturas e controladores para aplicação de insumos a taxas variáveis.



Figura 2. Sistema de GPS – receptor (esquerda), conectado ao equipamento (direita) para avaliar a condutividade elétrica dos solos. Fotos do autor.

2.1.4. Sensoriamento Remoto

Sensoriamento remoto é definido como a aquisição de informações a respeito de algum objeto sem estar em contato físico com ele (Moran et al., 1997). Um simples exemplo é quando nossos olhos percebem a luz refletida de um objeto e nosso cérebro interpreta a informação. Neste exemplo, nossos olhos são os detectores e nosso cérebro, o computador que faz a imagem do que foi detectado. O principal foco de sensoriamento remoto na agricultura é a interação de solos e plantas com energia eletromagnética. Os sensores utilizados podem ser agrupados em duas categorias: fotográfico ou não fotográfico. Ambos fornecem informações sobre a energia eletromagnética e como ela interage com a superfície sendo vista.

No campo da agricultura, a tecnologia de sensoriamento remoto tem sido usada para uma variedade de aplicações, que vão desde a avaliação do estado nutricional e hídrico em plantas até a detecção de plantas daninhas e insetos. O sensoriamento remoto oferece uma rápida e eficiente maneira para acessar a variabilidade espacial e temporal dentro de uma área em uma propriedade, bacia hidrográfica ou região (Schepers, 2001). Além disso, tecnologias de sensoriamento remoto têm sido desenvolvidas com o objetivo de fornecer informações sobre propriedades dos solos, diferenças entre tipos de estresses abióticos das plantas (água ou nutricional) e estimar produção relativa das culturas (Shanahan et al., 2001).

2.1.5. Sensores

Sensores (Figura 3) são instrumentos que transmitem impulsos elétricos em resposta a estímulos físicos tais como calor, luz, magnetismo, movimento, pressão e som. Utilizando computadores para armazenar o impulso emitido pelo sensor, o GPS para medir a posição e o SIG para analisar e mapear os dados, qualquer informação gerada pelo sensor pode ser detalhadamente mapeada. De acordo com Sudduth et al. (1997), dentre as tecnologias propulsoras da agricultura de precisão, esta é a que teve menos



Figura 3. Sensores para avaliação de estresses de nitrogênio e fósforo em milho, sendo testados em nível experimental, na Embrapa Milho e Sorgo, em Sete Lagoas, MG. Fotos do autor

desenvolvimento. A disponibilidade de sensores tem sido considerada como o fator mais crítico para a implementação da agricultura de precisão (Sttafford, 1996b): (i) sensores têm custos fixos, (ii) sensores podem amostrar a pequenas escalas no tempo e espaço; (iii) sensores facilitam repetidas medidas. Isto significa que o custo por amostra é determinado pelo uso intensivo do sensor; a intensidade de amostragem é determinada pela capacidade dos sensores e não o custo ou dificuldade na amostragem associada com os métodos tradicionais; a frequência de amostragem é determinada pela acessibilidade ao alvo e não devido aos custos (Pierce & Nowak, 1999).

As propriedades dos solos passíveis de serem quantificadas com o uso de sensores incluem: (i) matéria orgânica; (ii) pH; (iii) umidade; (iv) profundidade do horizonte superficial. As variáveis relacionadas para as culturas que podem ser identificadas para o manejo são: (i) tipo e intensidade de ocorrência de plantas daninhas para aplicação intermitente de herbicidas; (ii) estresses abióticos, para aplicação de fertilizantes; (iii) população de plantas e produção das culturas (Pierce & Nowak, 1999).

O valor do sensor e seu potencial para o futuro da agricultura de precisão podem ser ilustrados pelo monitor de colheita. Sistemas de monitoramento de colheitas, os quais usam sensores para medir o fluxo de grãos em colhedoras, permitem a elaboração de mapas com detalhes impossíveis de serem obtidos com outras técnicas de medidas (Pierce et al., 1997). A tecnologia de mapear a colheita no campo pode ser considerada o fator mais importante para a evolução e o crescente interesse em agricultura de precisão (Stafford, 1996b). Antes da década de 90, o principal enfoque era na tecnologia de aplicação a taxas variáveis de insumos, principalmente fertilizantes, a qual, por si só, não teria sustentado a implementação da agricultura de precisão (Pierce & Nowak, 1999). Os mapas de colheita possibilitaram a expansão da agricultura de precisão e, atualmente, são a principal tecnologia utilizada nos EUA. Entretanto, a promissora tecnologia dos sensores pode fazer com que os mapas de colheita não sejam necessários no futuro, se as técnicas de sensoriamento remoto de alta resolução permitirem prever a produtividade das culturas antes da colheita.

2.1.6. Controladores Eletrônicos de Aplicação

Fortemente baseada na tecnologia da informação, a agricultura de precisão possui, como um dos seus principais objetivos, maximizar a eficiência na utilização dos insumos agrícolas, aplicando-os diferencialmente ao longo da lavoura, de acordo com as reais necessidades de cada zona uniforme de manejo. O gerenciamento localizado poderá ser grandemente auxiliado pela utilização de programas específicos de Sistemas de Informações Geográficas, desenvolvidos para a agricultura, os quais fornecem, como produto final, um mapa de aplicação localizada de insumos. Este poderá ser lido através de equipamentos, desenvolvidos para tal finalidade, e que poderão se regular automaticamente para aplicar apenas a quantidade requerida naquele local.

Assim, controlador eletrônico de aplicação pode ser definido como o componente de um sistema automatizado (computadores de bordo) na qual

a informação armazenada é usada para influenciar o estado do sistema para aplicação localizada de insumos. (Stone, 1991). Em agricultura de precisão, o controle deve ser atingido no tempo e no espaço, para variar a aplicação de um ou mais insumos a diferentes doses, em diferentes profundidades no solo e de uma maneira uniforme e específica dentro de uma determinada área. Sistemas eletrônicos de controle, variando em graus de precisão, são disponíveis para taxa variável de distribuição de calcário, fertilizantes (sólidos e líquidos), sementes, aplicação de herbicidas e inseticidas, irrigação, aplicação de esterco e vários equipamentos de preparo do solo (Robert et al., 1996; Anderson & Humburg, 1997).

2.2. Etapas na Agricultura de Precisão

Varias tecnologias proporcionaram o desenvolvimento da agricultura de precisão; entretanto, é o conhecimento e o entendimento da variabilidade espacial e temporal dos atributos dos solos e plantas e suas relações, bem como a possibilidade de manejar essa variabilidade, que viabilizaram a aplicação dos conceitos da agricultura de precisão. Diferentes etapas compõem a agricultura de precisão: (i) identificação da variabilidade; (ii) caracterização da variabilidade; (iii) identifica o (s) principal (is) fator (es) limitante (s); (iv) desenvolve plano de ação; (v) manejo da variabilidade; (vi) avaliação econômica e ambiental.

2.2.1. Identificação da Variabilidade Espacial e Temporal

Desde que é evidente que não se pode planejar e manejar o que não se conhece, acessar a variabilidade é a primeira etapa na agricultura de precisão. Os processos e propriedades que regulam o desempenho das culturas no campo variam no espaço e no tempo. A mudança enfrentada pela agricultura de precisão é a adequada quantificação da variabilidade desses processos e propriedades e determinando quando e onde as diferentes combinações são responsáveis pela variação no desenvolvimento e produção das culturas (Mulla & Schepers, 1997). Vários métodos têm

sido recomendados e utilizados para identificar, caracterizar e entender a variabilidade espacial das culturas em uma determinada área, incluindo: monitor de colheita, mapa de solos, fotografia aérea, amostragem sistematizada de solos (malha e toposeqüência), sensores eletrônicos e sensoriamento remoto. A elaboração de um mapa de colheita define a variabilidade espacial da produção de uma cultura no campo, mas não explica a variabilidade observada. Assim, os dados de desempenho da cultura no campo devem ser associados com outras informações, para o entendimento das causas da variação observada (Figura 4).

Para o sucesso na aplicação dos conceitos de manejo por zonas uniformes, deve-se identificar o conjunto dos fatores mais importantes que influenciam as produtividades das culturas no campo. De acordo com Dampney &

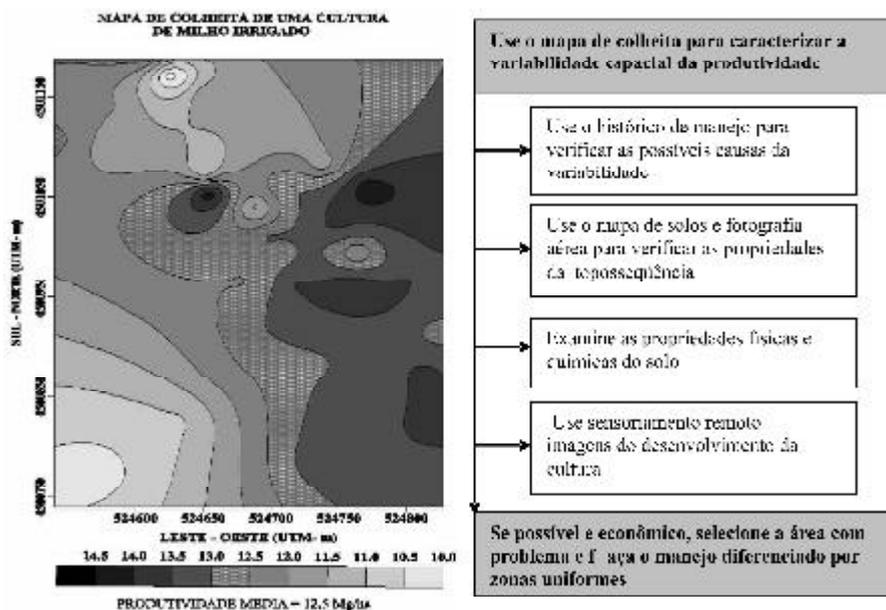


Figura 4. Esquema prático para analisar e identificar as possíveis causas e efeitos na variabilidade da produtividade de uma cultura no campo. Fonte: modificada de Coelho (2000).

Moore (1999), os principais fatores causadores da variabilidade na produção das culturas podem ser classificados em três categorias: (i) fatores fixos, difíceis de serem alterados (textura e profundidade do solo); (ii) fatores persistentes, podem ser alterados (características químicas e físicas do solo: pH, nutrientes, densidade global, etc.); (iii) fatores sazonais, alterações em curto espaço de tempo (clima e incidência de pragas e doenças).

Diversas pesquisas têm demonstrado que a posição em uma topossequência do solo tem grande efeito no desenvolvimento e na produção das culturas (Ciha, 1984; Stone et al., 1985; Milher et al., 1988; Peterson et al., 1993; Vetsh et al., 1995; Coelho, 2000). No estado do Colorado, EUA, Ortega (1997) verificou que altas produtividades de milho estavam associadas com áreas de deposição, caracterizadas por altos teores de matéria orgânica, baixos valores de pH e carbonato de cálcio. Utilizando a metodologia da análise espectral, Timlin et al. (1998), verificaram que a topografia da área e características relacionadas, tais como profundidade do solo e drenagem, tiveram grande efeito na variação da produção de milho. O consenso emergente desses estudos é que características físicas dos solos e disponibilidade de água, proveniente da precipitação ou armazenada no solo, foram as principais causas da variabilidade observada na produção das culturas. De acordo com Runge & Hons (1999), a cultura do milho, nos EUA, expandiu-se na região do Corn Belt devido às condições climáticas favoráveis (precipitação pluviométrica e temperatura) e à alta capacidade de armazenamento de água dos solos. Entretanto, muito destes solos são interceptados por solos de baixa qualidade (arenosos) e com baixa capacidade de retenção de água. A Tabela 4 ilustra a variabilidade na produção de milho em uma área de 25 ha, com diferentes tipos de solos, com relação à capacidade de armazenamento de água disponível e seu efeito na produtividade de milho, em anos com e sem déficit hídrico. Dependendo da quantidade e da distribuição das chuvas, as produtividades

relativas de milho, nos solos pobres, variaram de 27 a 68%, quando comparadas com as produtividades obtidas nos melhores solos (Tabela 4).

Tabela 4. Capacidade de armazenamento de água disponível em diferentes tipos de solos e seu efeito na produção de milho.

Tipo de solo	Água disponível (mm) ¹	Produção de grãos Mg ha ⁻¹	
		1999 ²	2000 ³
A	180	7.776	14.172
B	130	2.508	12.354
C	90	2.132	9.595

¹Água disponível até a profundidade de 120 cm; ²Ano com acentuado déficit hídrico; ³Ano sem déficit hídrico. Fonte: modificada de Alley & Roygard (2001).

2.2.1.1. Variabilidade Espacial e Temporal das Características Agronômicas das Culturas

Agricultores, pesquisadores e técnicos ligados à agricultura têm, por longo tempo, reconhecido que a produção das culturas não é uniforme no campo. Alguns locais apresentam produtividades mais baixas ou mais altas do que a média da área. Isso é verdadeiro para culturas de sequeiro, mas também aplica-se a culturas irrigadas. Tais variações reduzem a eficiência das práticas uniformes de manejo e o potencial produtivo da área.

Para ilustrar a aplicação prática dos conceitos aqui discutidos, serão utilizados os dados obtidos em condições de campo, de pesquisas conduzidas no Estado de Nebraska, EUA (Coelho et al., 1999a; Coelho et al., 1999b; Coelho, 2000; Coelho et al., 2001). Foi utilizada para o estudo uma área de 50 ha, cultivada com milho (Figura 5). Informações sobre o histórico de uso da área indicaram que ela vem sendo cultivada intensivamente nos últimos 20 anos, sob manejo convencional (aração e gradagem) de solo e, mais recentemente (5 anos), cultivo mínimo, com milho (*Zea mays* L.) contínuo e, em alguns anos, rotação com a soja [*Glycine max* Merr. (L)] e irrigada com pivô central. A área apresenta

topografia ondulada, com declividade de até 10% (Figura 5), uma característica geral dos solos da região. Os solos são na sua maioria Molisolos, desenvolvidos de material calcário. O clima é semi-árido, com precipitação média anual de 595 mm.



Figura 5. Vista geral da área experimental utilizada para a caracterização da variabilidade espacial e temporal das propriedades do solo e cultura do milho e aplicação dos conceitos de agricultura de precisão (Fotos do autor).

Os mapas de colheita, gerados nas safras de 1997 e 1998, indicaram grande variabilidade espacial na produtividade de grãos de milho (Tabela 5), com distribuição espacial da variabilidade semelhante em ambos os anos e altamente correlacionadas ($r = 0,75$), sem diferenças significativas ($Pr > F = 0,79$) do efeito de ano na produção de grãos. Essa informação é importante, pois, em agricultura de precisão, a variabilidade espacial no desenvolvimento e produção das culturas deve apresentar estabilidade temporal. População de plantas, avaliada por amostragens antes da colheita, apresentou variação espacial e temporal, com significativa diferença ($Pr > F = 0,0001$) dentro e entre anos. Entretanto, não apresentou correlação significativa (ao nível de 5%) com a produção de grãos ($r < 0,30$), provavelmente, devido ao fato de que o número mínimo

de plantas/ha (Tabela 5) estava acima do mínimo ótimo para a máxima produção de grãos. De acordo com Doerge (1997), para as condições do cinturão do milho, nos EUA, o estande ideal para a cultura varia de 64.000 a 74.000 plantas por hectare.

Devido à grande variabilidade observada na produção de grãos, é importante, para a aplicação das tecnologias da agricultura de precisão, quantificar a espacial estrutura dessa variabilidade e, também, identificar no campo onde as baixas e altas produtividades estão localizadas. Se a variabilidade não apresenta espacial estrutura, ou seja, ela ocorre ao acaso em áreas muito pequenas, impossível de ser manejada, a melhor estimativa de qualquer parâmetro obtido dessa área é o valor médio ou a mediana e a melhor maneira de se manejá-la é utilizando os conceitos da agricultura convencional, através do manejo uniforme. Utilizando-se análise geostatística, foi gerado um mapa da produtividade média de grãos dos anos de 1997 e 1998 e sobreposto no mapa topográfico (Figura 6).

Análises geostatísticas revelaram uma dependência espacial da variabilidade da produção de grãos no campo. Através da análise comparativa entre os vários modelos e parâmetros, verificou-se que o

Tabela 5. Estatística descritiva dos dados de produção de grãos e população de plantas coletados na área experimental nas safras de 1997 e 1998.

Variáveis	Parâmetros estatísticos						
	Mín.	Máx.	Mediana	Média	Desvio padrão	CV (%)	Wilks-Shapiro ^a
Produção de grãos, Mg ha ⁻¹ (97)	8,44	13,82	11,32	11,29	1,37	12,2	0,97 ^{ns}
Produção de grãos, Mg ha ⁻¹ (98)	9,73	12,82	11,35	11,33	0,83	7,3	0,96 ^{ns}
População de plantas, 1000 ha ⁻¹ (97)	69,62	77,08	73,61	73,48	1,52	2,0	0,98 ^{ns}
População de plantas, 1000 ha ⁻¹ (98)	71,88	88,56	78,13	78,91	3,65	4,6	0,97 ^{ns}

^a Teste de Wilks-Shapiro para normalidade, ns = indica que a hipótese de distribuição normal dos dados é aceita. CV = coeficiente de variação. Fonte: modificada de Coelho (2000).

modelo esférico, com efeito pepita (C_0) de 0,076, componente estrutural (C_1) de 1,28 e alcance de 120 m, apresentou melhor ajuste aos dados do semivariograma experimental. Desde que a variabilidade espacial da produção de milho é estruturada e mostrou-se estável por dois anos, é possível definir zonas uniformes de manejo para a área em estudo. Neste contexto, Doerge (1999) define zonas uniformes de manejo como: “uma subárea do campo que expressa a combinação de fatores limitante da produção e para a qual a aplicação de uma simples dose de um determinado insumo seria apropriada”. Assim, a delimitação de zonas uniformes é simplesmente uma maneira de classificar a variabilidade espacial dentro de uma determinada área agrícola.

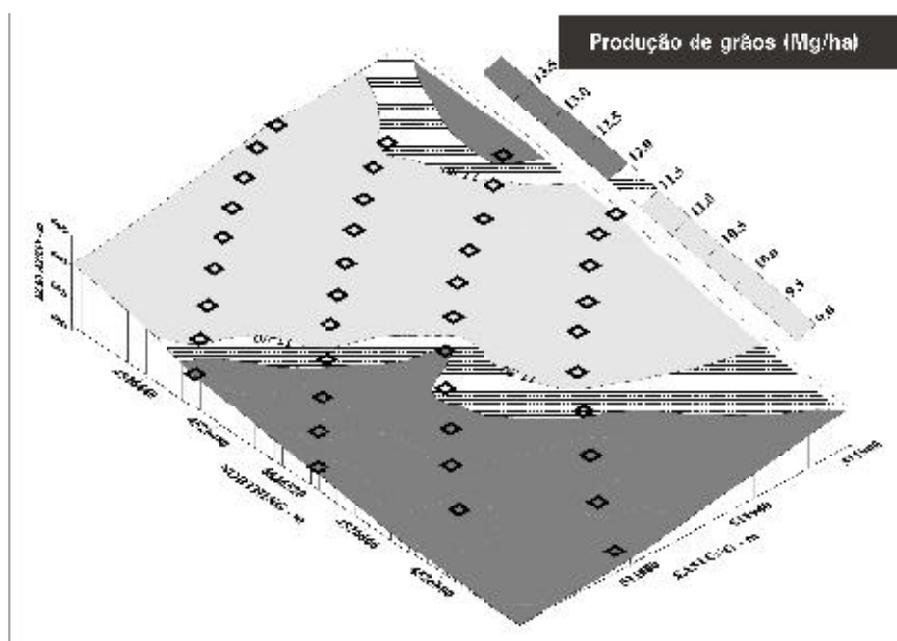


Figura 6. Mapa da produtividade média de grãos de milho sobreposta em mapa topográfico. Pequenos quadrados no mapa representam o sistema de amostragem de solo. Fonte: Coelho (2000).

Baseando-se no mapa de colheita (Figura 6) e utilizando-se a produtividade média de grãos como ponto de referência, a área foi dividida em duas zonas potenciais de manejo, uma com produção abaixo da média (11,31 Mg/ha), área A, e outra com produção acima da média, área B (Figura 6).

Entretanto, para ter sucesso, a estratégia de separação em zonas deve ser baseada nas relações de causa e efeito entre características do solo e a produção da cultura (Coelho et al., 2001).

2.2.1.2 – Variabilidade Espacial e Temporal das Propriedades do Solo

As relações entre o material de origem, a topografia, o tempo e as resultantes propriedades induzem uma variabilidade natural dos solos na paisagem. A intensidade dessa variação espacial depende dos processos de formação dos solos e seu balanço no tempo e no espaço. Diferenças no material de origem, drenagem e atividade biológica (incluindo humana) podem causar grandes diferenças nos solos a curtas distâncias (Beckett & Webster, 1971; Burrough, 1993). Algumas diferenças em termos do grau da variabilidade entre as propriedades dos solos, normalmente avaliadas em agricultura de precisão, são listadas na Tabela 6.

As propriedades mais comumente avaliadas referem-se àquelas para caracterização da fertilidade dos solos. Valores de pH normalmente exibem pouca variação espacial, com coeficientes de variação (CV) ao redor de 10 % (Pierce et al., 1995). Entretanto, o pH é medido em escala logarítmica e seu CV não pode ser comparado com o das outras propriedades. Tem sido relatado que nitrogênio inorgânico (NO_3 e NH_4), matéria orgânica e potássio disponível exibem altos valores de CV (Ferguson et al., 1995; Gotway et al., 1996; Wollenhaupt et al., 1994). P - disponível freqüentemente exhibe valores extremamente altos de CV, particularmente em áreas tratadas com esterco animal (Ferguson et al., 1995; Wollenhaupt et al., 1994).

Micronutrientes (Zn, Mn, Fe, Cu) também têm mostrado alta variabilidade espacial e sua distribuição depende da textura do solo, da matéria orgânica e da capacidade de troca de cátions (CTC) e pH (Paz et al., 1996).

Tabela 6. Grau relativo da variabilidade das propriedades dos solos que ocorrem em áreas naturais e cultivadas.

Variabilidade da propriedade	Propriedade
Daixa (CV's < 15 %) Relativamente pouco ou não afetadas pelo manejo	Cor, pl I, espessura do horizonte A, densidade global, água disponível, silte
Moderada (CV's 15 a 35 %)	Textura (argila, areia), CTC, saturação de bases, estrutura (grau e classe), carbonato de cálcio
Alta (CV's > 35 %) Relativamente mais afetadas pelo manejo	Cátions trocáveis (H, Al, Ca, Mg, K), condutividade elétrica, matéria orgânica, sais solúveis, condutividade hidráulica, conteúdo de água, N-inorgânico, P-disponível, micronutrientes (Zn, Mn, Cu, Fe, B)

Fonte: modificada de Wilding, (1985) e Dahiya et al. (1984)

Embora a amplitude de variação, medida pelo CV, venha sendo utilizada como um indicativo da variabilidade relativa das propriedades dos solos, sua importância para a aplicação dos conceitos de manejo por zonas uniformes ou variável taxa de aplicação de insumos (fertilizantes) pode não ter significado prático. Como verificado por Wright et al. (1990), Pierce et al. (1995) e Timilin et al. (1998), embora as propriedades do solo, indicadoras da fertilidade, tenham apresentado grande variabilidade, elas tiveram pouca relação com a variabilidade nas produções de milho, devido, principalmente, aos altos níveis (acima da faixa de suficiência) de nutrientes no solo. Assim, uma propriedade do solo pode apresentar alto grau de variabilidade, mas não apresentar desvio suficiente em relação ao valor médio ou os valores estão em níveis considerados adequados e/ou não estão dentro da faixa de manejo requerida para a aplicação da agricultura de precisão.

Para um melhor entendimento da variabilidade espacial nas propriedades dos solos e sua aplicação em agricultura de precisão, serão apresentados e

discutidos aqui resultados das pesquisas mencionadas anteriormente, quando foram enfocados aspectos da variabilidade das características agronômicas da cultura do milho. Utilizando, na área experimental, um esquema sistematizado de amostragem (Figura 6), amostras de solo foram coletadas e analisadas para as principais características físicas e químicas, cujos resultados são sumariados na Tabela 7, pela qual pode-se verificar substancial variabilidade na maioria das propriedades do solo. Por exemplo, o valor máximo de fósforo é 62 kg ha^{-1} ($\sim 31 \text{ mg kg}^{-1}$), mais do que quatro vezes o mínimo observado, 15 kg ha^{-1} ($\sim 7 \text{ mg kg}^{-1}$). O valor mínimo está abaixo do nível crítico estabelecido para a cultura do milho (16 mg kg^{-1}). Assim, a metodologia convencional para análise de solo, baseada no valor médio, é inadequada para caracterizar a variabilidade espacial das propriedades do solo. A clássica estatística apresentada na Tabela 7 não fornece uma completa descrição da variabilidade, devido à falta de informação da variância calculada e à distância entre observações. De acordo com Dahiya et al. (1984), somente o conhecimento da distribuição dos valores de um atributo pela mínima, máxima, média e desvio-padrão não fornece informações sobre a variabilidade com relação às coordenadas da área que está sendo amostrada.

Devido ao fato de que, normalmente, as propriedades do solo são espacialmente correlacionadas (Borrough, 1993), isto é, locais mais próximos apresentam propriedades mais similares do que locais mais distantes, a análise espacial deve ser utilizada quando o enfoque é quantificar essa variabilidade. Geostatística fornece um meio eficiente de incorporar a dependência espacial na variabilidade das propriedades dos solos. A semivariância fornece uma medida quantitativa da variação espacial das propriedades dos solos, a qual é chamada de dissimilaridade. Quanto maior a semivariância, mais dissimilar são as propriedades dos solos em dois locais. Na Tabela 8, são sumariados os resultados das análises geostatísticas aplicadas às propriedades do solo, medidas na área experimental (Tabela 7).

Como indicado pela relação do efeito pepita e patamar [$C_1/(C_0 + C_1)$], todas as propriedades do solo, na área experimental, exceto o $N-NH_4$, apresentaram, de acordo com as classes de dependência espacial mencionadas no rodapé da Tabela 8, moderada a forte dependência espacial (Cambardella et. al., 1994). O alcance, distância na qual o patamar é atingido, é o marco de separação, acima da qual as propriedades não mais estão correlacionadas, e é um parâmetro importante para estabelecer estratégias de amostragens. Embora o alcance dessa dependência tenha variado de 41 a 199 m (média de 122 ± 34 m), a maioria das propriedades do solo apresentaram correlação espacial a distâncias superiores a 100 m (Tabela 8).

Tabela 7. Estatística descritiva das propriedades químicas e físicas do solo, avaliadas a uma profundidade de 0 a 15 cm.

Propriedades	Parâmetros estatísticos					
	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão	CV (%)	Wilk-Shapiro
pH - água 1:1	5,84	7,41	6,49	0,44	7	0,91 ^{ns}
CE - água 1:1, mmhos cm ⁻¹	0,21	0,78	0,51	0,12	25	0,94 ^{ns}
N - NO ₃ , kg ha ⁻¹	13,81	58,35	30,03	9,72	32	0,92 ^{**}
N - NH ₄ , kg ha ⁻¹	16,87	121,18	53,84	26,37	49	0,91 ^{**}
P - Bray1, kg ha ⁻¹	15,67	62,27	27,53	9,30	34	0,86 ^{ns}
K, Mg ha ⁻¹	0,54	1,02	0,75	0,11	15	0,97 ^{ns}
Ca, Mg ha ⁻¹	3,62	8,60	5,39	1,17	22	0,95 ^{ns}
Mg, Mg ha ⁻¹	0,59	1,23	0,89	0,18	20	0,95 ^{ns}
Na, kg ha ⁻¹	21,78	47,85	31,96	6,01	19	0,95 ^{ns}
Zn - DPTA, kg ha ⁻¹	1,28	3,02	1,99	0,40	20	0,96 ^{ns}
Mn - DPTA, kg ha ⁻¹	17,40	93,96	53,59	17,28	32	0,98 ^{ns}
Cu - DPTA, kg ha ⁻¹	1,47	2,94	2,18	0,42	19	0,95 ^{ns}
Fe - DPTA, kg ha ⁻¹	8,86	66,53	25,19	12,17	48	0,97 ^{ns}
CTC, cmol kg ⁻¹	13,42	25,13	18,19	2,87	16	0,96 ^{ns}
MO, Mg ha ⁻¹	39,83	93,88	58,24	11,68	20	0,84 ^{ns}
MO - particulada, Mg ha ⁻¹	1,28	12,21	8,87	1,13	16	0,87 ^{ns}
N - total, Mg ha ⁻¹	1,65	2,85	2,23	0,28	13	0,96 ^{ns}
Arcia, %	10,00	16,00	13,00	1,40	11	0,82 ^{ns}
Silte, %	62,00	62,00	68,00	2,72	6	0,92 ^{ns}
Argila, %	24,00	36,00	30,00	3,17	11	0,93 ^{ns}
Densidade global, g cm ⁻³	1,32	1,58	1,43	0,05	3	0,97 ^{ns}
Água disponível, cm ³ cm ⁻³	0,10	0,16	0,13	0,01	9	0,98 ^{ns}

¹ Teste de Wilk-Shapiro para distribuição normal, significativo aos níveis de ^{**}P<0,001 e ^{*}P<0,05, ns = não significativo, respectivamente. Significativo indica que a hipótese para distribuição normal é rejeitada. Fonte: modificada de Coelho (2000)

A variabilidade na produtividade de milho apresentou dependência espacial à distância de 120 m. Do ponto de vista de manejo por zonas uniformes, essas informações são importantes, pois permitem visualizar que, em princípio, tanto a variabilidade espacial das propriedades do solo como da cultura são estruturadas, uma condição essencial para a aplicação dos conceitos das tecnologias da agricultura de precisão. Outra informação importante que pode ser tirada da Tabela 8 é que um novo sistema de amostragem de solo, com relativa precisão, pode ser feito utilizando malha igualmente espaçada de 100 m x 100m.

Pesquisas sobre a variabilidade dos parâmetros de fertilidade do solo têm indicado a necessidade de amostragens, utilizando malhas com espaços

Tabela 8. Resultados das análises geostatísticas das propriedades químicas e físicas do solo avaliadas a uma profundidade de 0 a 15 cm.

Propriedades	Parâmetros geostatísticos					
	Pepita† Ca	Patamar† Ca + C	Alcance† m	Relaçã† C ₁ /(Ca + C ₁)	Model†	R ²
pH - água 1:1	0,001	1,216	115	0,99	ESF	0,95
CF - água 1:1, mmhos cm ⁻¹	0,062	1,418	137	0,95	ESF	0,88
N - NO ₃ , kg ha ⁻¹	0,136	0,872	43	0,74	EXP	0,73
N - NH ₄ , kg ha ⁻¹	0,833	1,127	144	0,21	LIN	0,26
P - Bray1, kg ha ⁻¹	0,240	1,267	120	0,81	ESF	0,83
K, kg ha ⁻¹	0,732	1,220	145	0,40	LIN	0,66
Ca, kg ha ⁻¹	0,128	1,858	145	0,92	LIN	0,97
Mg, kg ha ⁻¹	0,293	1,402	198	0,78	EXP	0,92
Na, kg ha ⁻¹	0,805	1,182	125	0,32	LIN	0,66
Zn - DPTA, kg ha ⁻¹	0,359	1,204	114	0,70	EXP	0,78
Mn - DPTA, kg ha ⁻¹	0,001	1,396	156	0,99	ESF	0,80
Cu - DPTA, kg ha ⁻¹	0,440	1,218	125	0,64	ESF	0,96
Fe - DPTA, kg ha ⁻¹	0,214	0,934	41	0,77	EXP	0,31
CTC, cmol- kg	0,223	1,583	145	0,86	LIN	0,95
MÓ, Mg ha ⁻¹	0,001	1,118	125	0,99	LIN	0,98
MÓ - particulada, Mg ha ⁻¹	0,389	1,210	125	0,68	LIN	0,83
N - total, kg ha ⁻¹	0,152	1,167	132	0,87	ESF	0,92
Areia, %	0,499	1,204	125	0,58	LIN	0,96
Silte, %	0,249	1,027	87	0,75	ESF	0,95
Argila, %	0,083	1,136	119	0,92	ESF	0,97
Densidade global, g cm ⁻³	0,674	1,123	124	0,40	LIN	0,74
Água disponível, cm ³ cm ⁻³	0,733	1,878	85	0,61	ESF	0,93

† Pepita: semivariância a espaço zero; Patamar: semivariância a um espaço maior do que a distância; Alcance: distância após a qual os valores das propriedades não são espacialmente correlacionadas; Relação: espacial dependência (Fraca < 0,25; Moderada 0,25 a 0,75; Forte > 0,75); Modelos ajustados ao semivariogramas experimentais: ESF = esférico, EXP = exponencial, LIN = linear. Fonte: modificada de Coelho (2000)

variando de 30 m a 100 m (Sadler et al, 1998). Mulla & Hammond (1988) utilizaram malhas de amostragens espaçadas de 30, 60 e 120 m e concluíram que a última (120 m) apresentou baixa resolução para a elaboração de mapas de fertilidade de solo. Posteriormente, Wollenhaupt et al. (1994) examinaram o tamanho de malhas de amostragens variando de 32 m a 97 m e concluíram que malhas espaçadas de 97 m foram o máximo permitido para a aplicação de tecnologias de agricultura de precisão. De acordo com Han et al. (1992), as recomendações do espaçamento das malhas para amostragens de solos têm variado de 60 m x 60 m, 100 m x 100 m, 135 m x 135 m, em função da resolução desejada (precisão) e dos custos.

2.2.2. Manejo da Variabilidade

As tecnologias da agricultura de precisão e as práticas relacionadas possibilitam a coleta de uma grande quantidade de informações e dados das áreas dos agricultores. Propriedades físicas e químicas dos solos, dados climáticos, incidência de pragas, doenças, ervas daninhas e produção das culturas são as variáveis normalmente levantadas utilizando essas tecnologias. Os dados normalmente são georreferenciados e organizados em múltiplas camadas de informações que frequentemente são processadas em mapas, por meio de uma variedade de técnicas geostatísticas e de interpolação. Futura análise desses dados é necessária para o entendimento das relações de causa e efeito entre as variáveis e a produção das culturas.

Com base no histórico de uso de área, observações em campo (Figura 5), mediante mapa de solo e fotografia aérea (Figura 7), pode-se fazer algumas inferências das possíveis causas da variabilidade espacial da produção de milho. A topografia ondulada da área, com declividade de até 10%, e o manejo intensivo do solo e de culturas, sem emprego de práticas conservacionistas (terraços e plantio em nível), ocasionou um processo

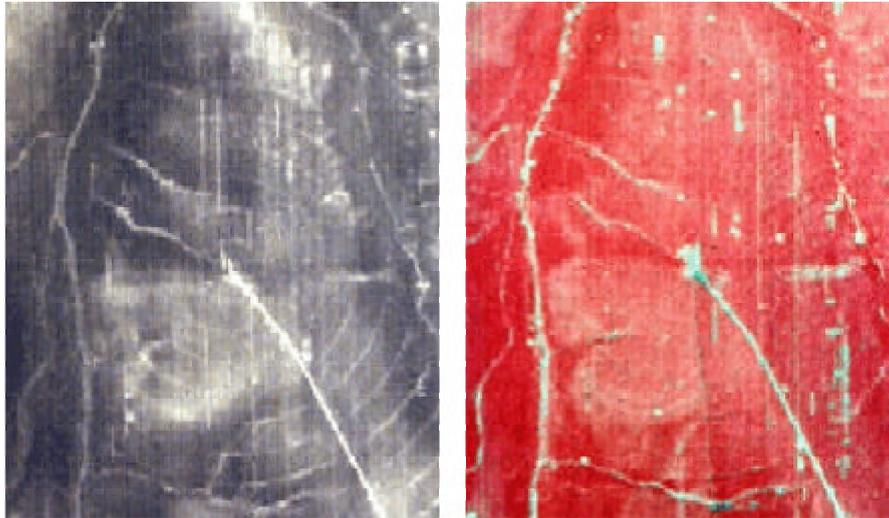


Figura 7. Fotografia aérea (esquerda) tirada da área experimental, em maio/97, após a semeadura do milho e fotografia em infravermelho (direita) tirada em julho/97, mostrando o padrão de distribuição da biomassa similar à daquele solo sem cobertura (Fonte: Coelho, 2000; Schepers, 2001).

erosivo na parte mais alta da área, com a deposição do solo na parte baixa. Isto pode ser observado pela coloração clara e escura na fotografia aérea (Figura 7), indicativa das diferenças na distribuição espacial da matéria orgânica, resultante do processo erosivo. Comparando-se os resultados das análises do perfil do solo realizadas em 1967 com aquelas feitas em 1997, verificou-se que, na parte mais alta da área, houve uma perda de aproximadamente 30 cm da camada superficial do solo (Coelho, 2000).

Do ponto de vista prático, para a aplicação do conceito de manejo por zonas uniformes, a questão importante aqui é procurar identificar quais os principais fatores causadores dessa variabilidade e possíveis de serem manejados pelo agriculto. Com base nas informações disponíveis e discutidas anteriormente, pode-se dizer que variação nas propriedades físicas e químicas do solo, decorrente do processo erosivo, é a principal causa da variabilidade observada na produtividade do milho. Assim, o passo

seguinte é identificar e priorizar quais dessas propriedades têm maior contribuição nessa variabilidade. Diversos procedimentos estatísticos (simples correlação, análise fatorial: análise dos componentes principais e análise dos fatores, análise multivariada), têm sido utilizados para estudar tais relações (Doberman, 1994; Ortega, 1997; Mallarino et al., 1999; Coelho, 2000).

Por meio da técnica estatística da análise dos fatores, uma técnica utilizada para resumir dados e investigar as relações entre propriedades do solo, as 22 variáveis originais (Tabela 7) foram agrupadas em quatro fatores de solo ou novas variáveis, representando as diversas propriedades do solo da área experimental (Tabela 9). A idéia foi desenvolver “índices de solo” (IS) que poderiam ser utilizados na análise de regressão para estimar a produção de milho. A etapa final é desenvolver um modelo para explicar a variabilidade na produção de milho baseada nos índices de solo.

A interpretação de cada fator (Tabela 9) é um importante aspecto da análise de fatores. Neste caso, são envolvidos o conhecimento agrônomo e julgamentos subjetivos das razões potenciais para a observada variação. Por exemplo, o primeiro índice de solo (IS_1), o qual explica 39% da variabilidade do solo da área experimental, é constituído pelas propriedades: pH, condutividade elétrica (CE), cálcio (Ca), magnésio (Mg), capacidade de troca de cátions (CTC) e argila, com escores positivos e altamente significativos, e também por manganês (Mn), ferro (Fe), matéria orgânica (M.O.) e N – total, porém, com escores negativos. Pode-se dizer que esse fator expressa as propriedades organo-mineralógicas e físico-químicas, relacionadas ao material de origem do solo. Por outro lado, pode-se inferir que os escores negativos, principalmente para M.O, caracterizam o processo erosivo que vem ocorrendo em parte da área, ao longo dos anos. O segundo índice de solo (IS_2), o qual explica 11 % da variabilidade do solo (Tabela 9) é positivamente e altamente correlacionado com fósforo (P), potássio (K), zinco (Zn), manganês (Mn) e moderadamente correlacionado

com matéria orgânica, silte e argila. A positiva correlação entre P, Zn, Mn e M.O sugere a contribuição da M.O. como fontes desses nutrientes no solo. A contribuição positiva da fração silte e negativa da fração argila sugere o efeito da textura na disponibilidade de fósforo, zinco e manganês. Por outro lado, sob condições naturais, o solo em estudo apresenta baixos teores de P e Zn disponíveis; assim, os altos valores observados para esses nutrientes são devido à aplicação de fertilizantes.

O terceiro índice de solo (IS_3), explicando 9% da variabilidade do solo (Tabela 9), é altamente e positivamente relacionado ao magnésio (Mg), sódio (Na) cobre (Cu), capacidade de troca de cátions (CTC) e negativamente correlacionada com matéria orgânica (M.O), silte e água disponível. A interpretação desse índice é mais difícil, necessitando informações adicionais. De acordo com Ellis & Cardweell (1935), citados por Cox et al. (1999), o Mg^{2+} , ao contrário do Ca^{2+} , pode promover a dispersão da fração argila do solo, reduzindo a infiltração e o armazenamento de água no solo. A correlação negativa observada entre o Mg e Na e a disponibilidade de água no solo podem estar associadas a esse efeito. Assim, é provável que a combinação do Mg e Na afete adversamente as propriedades do solo e, conseqüentemente, a produção das culturas.

O quarto índice de solo (IS_4), o qual explica 8 % da variabilidade do solo (Tabela 9), está relacionado à disponibilidade de nitrogênio mineral. Normalmente, tem-se verificado uma alta correlação entre M.O, N – total e N – mineral. A falta de correlação observada aqui deve-se ao fato de que as amostras de solo foram coletadas imediatamente após a aplicação de fertilizante nitrogenado (amônia anidra), como pode ser observado pelos altos valores de $N-NO_3$ e $N-NH_4$ obtidos das análises (Tabela 7).

Após ter definido e interpretado os principais grupos de correlacionadas variáveis (aqui definidos como índices de solo) que poderiam explicar a

variabilidade observada nas propriedades do solo (Tabela 9), o passo seguinte consiste em priorizar qual ou quais índices de solo tiveram maior influência na variabilidade observada na produção de milho. A Tabela 10 mostra as equações de regressão descrevendo a influência dos índices de

Tabela 9. Resultados da análise dos fatores, após aplicação do método de rotação não ortogonal (“promax”) para as propriedades do solo (0 – 15 cm) da área experimental.

Componentes da variância	Índices de Solo			
	IS ₁	IS ₂	IS ₃	IS ₄
Autovalores	12,07	3,35	2,98	2,54
Proporção (%)	38,93	11,39	9,62	8,19
Proporção acumulada (%)	38,93	50,33	59,95	68,14
Variáveis	Carga fatorial ou escores †			
pH - água 1:1	0,93 †	-0,32	0,18	0,28
CE - água 1:1	0,81	-0,20	0,22	0,43
N - NO ₃	0,36	-0,02	-0,04	0,83
N - NH ₄	0,23	-0,11	0,08	0,90
P - Bray1	-0,27	0,76	-0,24	0,13
K	0,08	0,78	0,26	0,08
Ca	0,89	-0,22	0,45	0,34
Mg	0,60	-0,14	0,89	-0,03
Na	0,16	0,14	0,73	0,27
Zn	-0,36	0,59	-0,42	0,10
Mn	-0,86	0,59	-0,10	-0,21
Cu	0,74	-0,11	0,64	0,10
Fe	-0,56	0,04	-0,29	0,23
CTC	0,87	-0,19	0,55	0,29
M.O	-0,87	0,47	-0,53	-0,09
M.U - particulada	-0,44	0,45	-0,26	-0,46
N - total	-0,85	0,48	-0,45	-0,05
Areia	-0,62	0,10	-0,36	-0,06
Silte	-0,39	0,57	-0,72	0,04
Argila	0,61	-0,54	0,78	0,00
Densidade global	-0,08	0,27	0,34	-0,13
Água disponível	0,10	0,18	0,61	0,09

† Números em negrito indica as variáveis com maior carga fatorial (escores) selecionadas dentro de cada fator para compor as novas variáveis ou índice de solo. ‡ Critério para classificação: valor absoluto de 0,30 é considerado significativo, 0,40 mediamente significativo e, ? 0,50 altamente significativo. Fonte: modificada de Coelho (2000).

solo na produtividade do milho. Uma completa equação com todos os índices como variáveis independentes é apresentada (Tabela 10 – Modelo 1), assim como uma otimizada equação contendo somente os índices cujos coeficiente são significativos ($P = 0,10$) (Tabela 10 – Modelo 2). Os componentes das equações de regressão (Tabela 10) podem ser utilizados para quantificar o impacto dos funcionais fatores para a variação da variável dependente (produção de grãos).

A relativa contribuição dos índices para a variação da variável dependente (produção de grãos) pode ser quantificada utilizando o coeficiente padronizado (pesos β) e o coeficiente parcial de correlação (r_p) (Tabela 10). Para as propriedades do solo medidas de 0 a 15 cm de profundidade, quatro índices ou novas variáveis, extraídas pela análise fatorial (análise de fatores), foram interpretadas como representando, respectivamente: IS_1 = fertilidade potencial; IS_2 = disponibilidade de P, Zn e Mn; IS_3 = indireta deterioração das propriedades do solo; IS_4 = disponibilidade de nitrogênio. De acordo com o modelo da análise de regressão, 73 % (R^2 aj. = 0,73) da variabilidade na produção de milho observada na área experimental poderia ser explicada como função dos índices de solo: IS_1 -fertilidade potencial e IS_2 - disponibilidade de P, Mn e Zn (Tabela 10 - Modelo 2).

Se considerarmos que a produção de uma cultura é função de muitos fatores, o valor do R^2 de 73 % pode ser considerado alto. Com base nos índices de solo, pode-se usar a seguinte equação como um modelo para explicar a variabilidade na produção de milho: $Y = 11,28 - 0,036 IS_1 + 0,270 IS_2$, em que Y é a produção de milho, em Mg/ha e, IS_1 e IS_2 os índices de solo definidos na Tabela 9. O sinal negativo do coeficiente de regressão para o IS_1 ($r_p = -0,347$) é derivado dos fatores de carga negativos para algumas propriedades do solo, tais como M.O, Mn, areia e silte (Tabela 9) e essas variáveis foram positivamente correlacionadas com a produção do milho. Por outro lado, propriedades do solo tais como pH, CE, Ca, Mg e Cu, com fatores de cargas positivos (Tabela 9), foram

negativamente correlacionadas com a produção de milho (Coelho, 2000).

O índice de solo (IS_2), que apresentou uma positiva e alta correlação ($r_p = 0,63$) com a variabilidade na produção do milho (Tabela 10), inclui as seguintes propriedades do solo, medidas na área experimental: P, K, Zn, Mn, M.O, MOP, silte e argila (Tabela 9). Para priorizar a importância dessas variáveis na variabilidade da produtividade do milho, regressão do tipo Stepwise (Backward) (SAS Inst., 1996) foi aplicada utilizando-se os valores originais das propriedades do solo mencionadas acima como variáveis independentes e a produção de grãos como variável dependente. Os modelos resultantes das regressões são sumariados na Tabela 11. De acordo com esses modelos, a variabilidade nos teores de P-Bray1, Mn – DTPA e argila explicaram 73% (R^2 aj. = 0,73) da variabilidade na produção de milho (Tabela 11 - Modelo 5). A relativa contribuição dessas variáveis, medidas pelo coeficiente parcial de correlação (r_p), na variabilidade da produção de milho (variável dependente) foram, respectivamente, de 0,30; 0,54 e -0,61 (Tabela 11 - Modelo 5).

Entretanto, chama à atenção o fato de que a relação de causa e efeito não pode ser tirada diretamente desses modelos. Os índices de solo que são significativamente relacionados com a produção podem ser úteis para entender as razões da variabilidade e seu entendimento poderá ser utilizado

Tabela 10. Modelos de regressão da contribuição dos índices de solo (IS) na variabilidade da produção de milho.

Modelos	Coeficientes	Índices de Solo				Intercepto	Erro padrão	R^2 aj.
		IS_1	IS_2	IS_3	IS_4			
01	B	-0,034 ^b	0,272 ^a	0,018	-0,053	11,28	0,55	0,71
	β	-0,269	0,632	0,008	-0,008			
	r_p	0,246	0,614	0,008	0,158			
02	R	-0,036 ^b	0,270 ^a	****	****	11,28	0,54	0,73
	β	-0,280	0,627	****	****			
	r_p	-0,347	0,632	****	****			

B = coeficiente da regressão; β = padronizado coeficiente da regressão; r_p = parcial coeficiente de correlação. Níveis de significância: *P < 0,0001, ^bP < 0,05. Fonte: modificada de Coelho (2000).

para estabelecer melhores estratégias de manejo para as diferentes zonas. Assim, embora o modelo tenha evidenciado que a variabilidade nas disponibilidades de P e Mn seriam, em parte ($r_p = 0,30$ e $0,54$), responsáveis pela observada variação na produtividade do milho (Tabela 11), a aplicação adicional de fertilizantes contendo esses nutrientes na área degradada pela processo erosivo (área A) não possibilitou a recuperação da produção de milho no mesmo patamar observado na área B, caracterizada como área de deposição (Figura 8). Isso poderia ser explicado pelo fato de a erosão expor um subsolo rico em carbonato com altos valores de pH (7 a 8), o que limitaria a resposta a esses nutrientes.

De acordo com Burnett et al. (1985), embora a deficiência de nutrientes em solos erodidos possa ser corrigida pela aplicação de fertilizantes químicos, em geral, não é suficiente para restaurar seu potencial produtivo. Por exemplo, Carter et al. (1985) verificaram que a aplicação de fertilizantes contendo N, P, K e Zn não proporcionou aumentos significativos na produção de sete culturas em solos erodidos

Tabela 11. Modelos de regressão para as propriedades do solo da área experimental, que apresentaram maior contribuição para a variabilidade na produção de milho, como evidenciado pela análise de fatores.

Modelo		P Bray1	Zn	Mn	MO	MOP	Silte	Argila	Intercepto	Erro padrão	R ² -aj.
01	B	0,018	0,110	0,020	0,009	0,110	0,013	-0,115	10,86	0,55	0,72
	β	0,160	0,043	0,330	0,060	0,130	0,035	-0,350			
	r_p	0,260	0,067	0,390	0,060	0,260	0,029	-0,530			
02	B	0,017	0,123	0,019	0,008	0,129	****	-0,127	12,00	0,54	0,73
	β	0,160	0,018	0,330	0,051	0,130	****	-0,380			
	r_p	0,260	0,078	0,390	0,057	0,260	****	-0,440			
03	B	0,017	0,136	0,022	****	0,111	****	0,135	12,43	0,53	0,73
	β	0,153	0,053	0,360	****	0,133	****	-0,410			
	r_p	0,250	0,087	0,500	****	0,270	****	-0,530			
04	B	0,019	****	0,022	****	0,108	****	-0,141	12,86	0,52	0,74
	β	0,170	****	0,360	****	0,130	****	-0,430			
	r_p	0,285	****	0,512	****	0,260	****	-0,570			
05	B	0,019	****	0,023	****	****	****	-0,155	14,10	0,54	0,73
	β	0,178	****	0,385	****	****	****	-0,476			
	r_p	0,288	****	0,610	****	****	****	0,611			

B = coeficiente da regressão; β = padronizado coeficiente da regressão; r_p = coeficiente parcial da regressão; MO = matéria orgânica; MOP = matéria orgânica particulada; Níveis de significância: *P < 0,01, **P < 0,05, ***P < 0,10. Fonte: modif cada de Coelho (2000).

artificialmente. Resultados similares foram observados por Larney et al. (1995) e Ortega (1997), em que a aplicação de fertilizante fosfatado não foi suficiente para recuperar a produtividade das culturas em solos erodidos. De acordo com esses autores, isso é devido à precipitação do P pelos altos teores de carbonato de cálcio, tornando-o indisponível para as plantas, em solos com altos valores de pH. Nessas condições, a aplicação de adubo orgânico (estercos e resíduos de culturas) é a principal alternativa encontrada para a restauração da produtividade de solos erodidos, pela

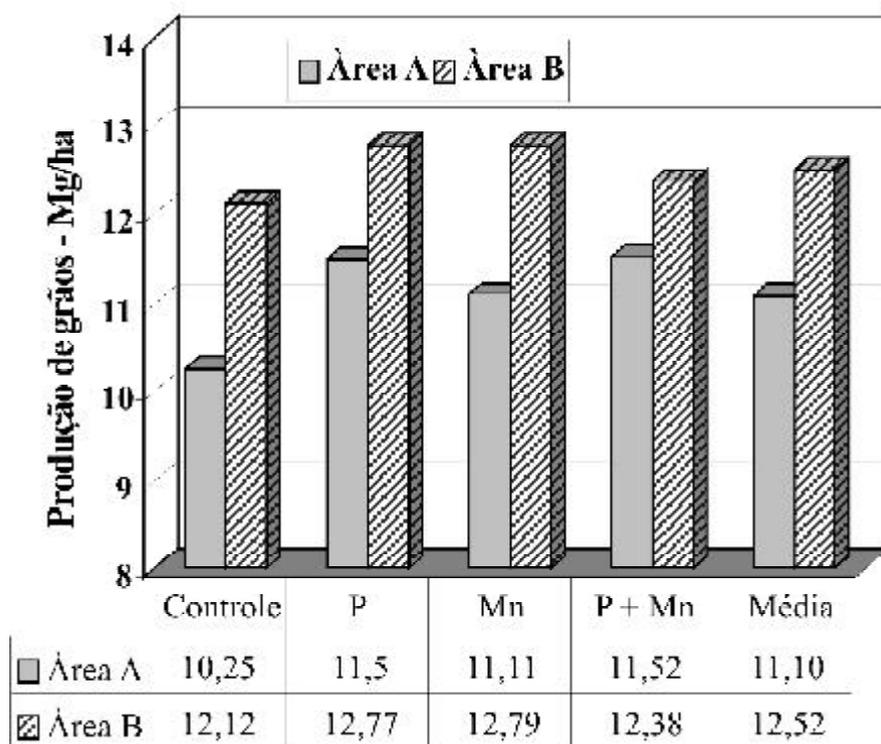


Figura 8. Efeito da aplicação única ou combinada de fósforo e manganês na produção de milho em duas área de manejo. Aplicação extra de 90 kg de P_2O_5 /ha, em sulcos, após a semeadura do milho. Aplicação de 1,1 kg de Mn/ha, em pulverizações, nos estádios de 4 e 8 folhas. Fonte: modificada de Coelho (2000).

substituição da perda da matéria orgânica da camada superficial (Larney & Janzen, 1996; Robbins et al., 1997).

2.2.3. Avaliação da Agricultura de Precisão - Aspectos Econômicos e Ambientais

Nos tópicos precedentes, foram apresentadas e discutidas as capacidades técnicas e as facilidades agronômicas da agricultura de precisão, isto é, as tecnologias e técnicas para acessar e manejar a variabilidade espacial e temporal dos solos e culturas. Essencialmente, foi enfatizado que esse sistema de agricultura é tecnologicamente possível e baseado nos princípios agronômicos conhecidos. Entretanto, embora tecnologicamente possível e baseado em princípios científicos, não necessariamente foi estabelecida a utilidade e/ou o valor do processo. Assim, necessário se faz proceder a uma avaliação da agricultura de precisão. Dois parâmetros importantes são considerados: o econômico e o ambiental. A avaliação econômica focaliza o benefício agronômico, expresso em termos do valor da produção em relação aos custos técnicos e serviços. A avaliação ambiental focaliza se a agricultura de precisão pode aumentar a qualidade dos solos, da água e a sustentabilidade dos sistemas agrícolas de produção.

2.2.3.1. Aspectos Econômicos

Deve ser enfatizado que o aspecto mais importante relacionado à avaliação econômica da agricultura de precisão é que o valor é proveniente das informações (dados) coletadas no campo e não do uso em si das tecnologias. Assim, as tecnologias disponíveis, discutidas anteriormente, irão possibilitar a geração de dados que devem ser analisados e transformados em informações práticas, que poderão influenciar as decisões no manejo dos solos e culturas. Assim, os ganhos provenientes da agricultura de precisão são resultantes das decisões de manejo e não do uso das tecnologias disponíveis. Esse é o aspecto contrastante com as inovações na agricultura tradicional, na qual o valor é proveniente do uso da

nova tecnologia, como por exemplo, uma nova cultivar que aumenta a produção ou um novo herbicida que reduz as perdas na produção. Essa é uma distinção crítica que necessita ser enfatizada, porque estabelece dois conceitos importantes que devem ser considerados nas análises econômicas da agricultura de precisão.

O primeiro conceito estabelece que o retorno econômico da agricultura de precisão está diretamente relacionado com a natureza e a extensão da variabilidade do meio biofísico na qual ela é aplicada. Se o meio biofísico é uniforme, então não haverá diferenças no retorno econômico entre a agricultura de precisão e a convencional. Entretanto, na medida em que há um aumento na heterogeneidade do meio biofísico, evidenciado pelos princípios agrônômicos, o retorno econômico tende a aumentar. O segundo conceito é que o retorno econômico é altamente dependente na capacidade humana de manejar a variabilidade espacial e temporal. Por exemplo, pode-se estimar os custos das tecnologias disponíveis e, com base nos princípios agrônômicos, prever as diferenças na eficiência da produção (aumento na produção por unidade de insumo). Entretanto, o retorno econômico pode não ser satisfatório se a decisão agrônômica não foi correta ou se o equipamento não foi adequadamente calibrado.

As principais questões a serem levantadas quando da avaliação dos benefícios da agricultura de precisão são de como as informações e os conhecimentos poderão ser usados para aumentar a rentabilidade do agricultor e qual a oportunidade para se estabelecer novas práticas de manejo ou sistemas de produção. É importante não considerar apenas os custos criados pela agricultura de precisão, como faz a maioria dos agricultores, mas também os benefícios. Em outras palavras, fazer a análise de custo – benefício. Assim, a primeira etapa é identificar os custos e benefícios e, posteriormente quantificá-los, como, por exemplo: qual é o valor por hectare, quantos hectares envolvidos e de quantos anos será o custo – benefício e, finalmente, se o benefício cobrirá os custos.

De acordo com Robert (2002), os custos mais freqüentemente mencionados envolvem: (i) aquisição e operação de máquinas e equipamentos (GPS, sensores – monitor de colheita, computadores e programas); (ii) amostragem de solos e análises; (iii) treinamento de pessoal; (iv) outros: incompatibilidade de equipamentos, equipamentos tornam-se rapidamente obsoletos, maior tempo gasto no manejo. Os benefícios mencionados são: (i) ganhos em produtividade; (ii) uso mais eficiente dos insumos; (iii) tomada de decisão com bases em informações mais precisas; (iv) redução de riscos.

Recentemente, com o objetivo de levantar e organizar informações sobre a freqüência com que a adoção das tecnologias da agricultura de precisão tem proporcionado retornos econômicos, Lambert & Lowenberg-Deboer (2000) realizaram uma extensiva revisão de trabalhos publicados em periódicos científicos (86%) e revistas especializadas (14%). Esses autores verificaram que, em 63% dos casos, a aplicação de tecnologias da agricultura de precisão apresentou retornos positivos, em 11% os retornos foram negativos e em 26% não houve ganhos ou perdas (Tabela 12).

2.2.3.2. Aspecto Ambiental

O potencial para aumentar a qualidade ambiental é freqüentemente citado como uma razão para o uso da agricultura de precisão (NRC, 1997).

Redução no uso de agroquímicos, maior eficiência de uso dos nutrientes, aumento na eficiência dos insumos aplicados e melhor proteção dos solos contra a degradação (erosão) são freqüentemente citados como benefícios potenciais para reduzir o impacto da agricultura ao meio ambiente (Engel & Gaultney, 1990; Larson et al., 1997).

O impacto ambiental da agricultura de precisão provavelmente será difícil e de alto custo para ser quantificado, particularmente se o componente da variabilidade temporal aumenta. Entretanto, de acordo com Pierce & Nowak (1999), podem ser mencionadas algumas áreas nas quais a

Tabela 12. Resumo dos benefícios do uso de tecnologias, isoladas ou combinadas, da agricultura de precisão, relatados na literatura.

Tecnologias	Publi- cações In ⁶	Benefícios (%)		
		Positivo	Neutro	Negativo
Taxa variável de aplicação de N	27	63	22	15
Taxa variável de aplicação de P e K	07	71	00	29
Taxa variável de aplicação de herbicidas e inseticidas	07	86	00	14
Taxa variável de aplicação de calcário com base no pH do solo	04	75	25	00
Taxa variável com sistema de GPS	03	100	00	00
Taxa variável de irrigação	02	50	50	00
Variação de densidade semeadura	06	83	00	17
Taxa variável com sistema de monitor de colheita ¹	07	43	43	14
Taxa variável de aplicação de N, P, K	24	75	16	08
Aplicação a taxa variável de insumos com base em sensores de solo	05	20	40	40
Outras tecnologias da agricultura de precisão	14	77	23	00
Total – Agricultura de precisão combinada com aplicação a taxas variáveis de insumos	106	63	27	11

¹ Benefícios estimados do monitor de colheita em combinação com aplicação a taxas variáveis de insumos. Fonte: modificada de Lambert & Lowenberg-Deboer (2000).

agricultura de precisão poderá contribuir para minimizar o impacto da agricultura ao meio ambiente:

- a) Redução na aplicação de fertilizantes em áreas cuja capacidade de suprimento de nutrientes dos solos encontra-se em níveis suficientes para o requerimento nutricional das culturas. Isso pode ter efeito a curto prazo em áreas nas quais o nitrato residual pode ser utilizado pela cultura, reduzindo a lixiviação ou, a longo prazo, no caso do P, que pode levar vários anos para reduzir os altos níveis desse nutriente no solo. Assim, com a aplicação de doses variáveis de fertilizantes, pode-se ter uma melhor distribuição na área e minimizar o impacto ao meio ambiente;
- b) Redução no uso de agroquímicos (inseticidas, fungicidas e herbicidas), com a aplicação de doses variáveis. Isso pode ser de grande valor se a maior parte da área não necessitar de aplicação de agroquímicos;

- c) Minimizar ou mesmo eliminar a aplicação de agroquímicos onde existe potencial para grandes perdas. Isso pode ser conseguido variando a aplicação dos agroquímicos quanto ao tipo, dose e formulação, de acordo com as condições do solo para lixiviação, erosão e volatilização;
- d) Redução da aplicação de água, em áreas sujeitas a lixiviação, utilizando taxa variável de irrigação;
- e) Melhorar o controle da erosão, com redução do escoamento superficial da água. Os solos, em determinada área, podem apresentar diferentes graus de suscetibilidade à erosão, fazendo com que a aplicação do manejo específico dos solos e de resíduos de culturas seja desejável.

3. Agricultura de Precisão no Brasil

3.1. Situação Atual e Potencial

A agricultura de precisão, como uma ferramenta para melhor gerenciar o processo produtivo, vem sendo desenvolvida nos últimos 20 anos, em países da América do Norte e da Europa. Se analisarmos o grande desenvolvimento que a utilização dos conceitos da agricultura de precisão tem tido no exterior, principalmente em países com uma estrutura fundiária semelhante à do Brasil, pode-se esperar que esses conceitos também sejam mais intensivamente divulgados e utilizados no país. Assim, começa a ser despertada, no Brasil, a expectativa pelo potencial que essa tecnologia possa vir a apresentar.

As técnicas da agricultura de precisão começaram a ser disponibilizadas no Brasil a partir de 1997, através das empresas multinacionais aqui estabelecidas, que comercializam os seus produtos para a agricultura. De acordo com dados da Cargill Agrícola, em 1999, aproximadamente 60 colhedoras em uso no Brasil já estavam equipadas com monitor de colheita (Figura 9). Na Argentina, esse número atingia 340, sendo 30% equipadas com GPS. Esses valores são ainda muito pequenos se comparados aos EUA,

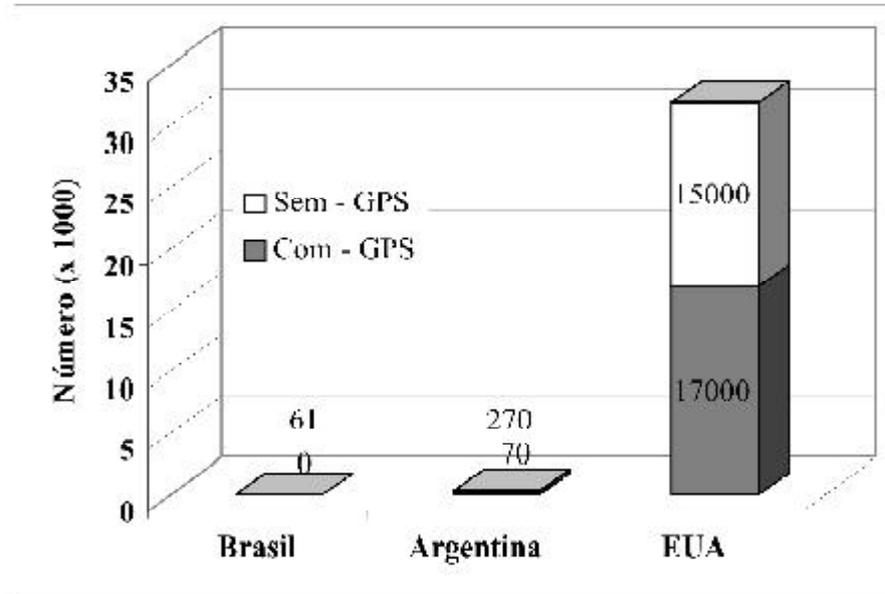


Figura 9. Número de colheitadeiras equipadas com monitor de colheita como um indicador da intenção de uso pelos agricultores de alguma tecnologia da agricultura de precisão. Fonte: modificada de Cargill Agrícola (2000).

onde no mesmo período, 32 mil colheitadeiras estavam equipadas com monitor de colheita, sendo que mais de 50% tinham também o GPS (Figura 9).

Como resultado desse processo de transferência, está ocorrendo, em curto espaço de tempo, uma modificação tecnológica nos equipamentos e metodologias que estão sendo disponibilizadas aos agricultores, o que tem demandado uma ação rápida e integrada para a adaptação e a correta recomendação de uso da tecnologia. Assim, espera-se que, nos próximos anos, o tema agricultura de precisão se torne de grande importância para uma parcela significativa dos agricultores brasileiros. A demanda por informações práticas deverá impor-se como uma necessidade e a disponibilização de informações confiáveis será um dos fatores decisivos para o maior ou menor sucesso da adoção dessa tecnologia.

São freqüentes os questionamentos, principalmente por parte de pesquisadores, professores, extensionistas e produtores, sobre a possibilidade de utilização dessa tecnologia na agricultura brasileira. Os questionamentos são geralmente em função de sua alta sofisticação e o atual nível educacional do agricultor brasileiro, quando comparado com os de países desenvolvidos, onde a agricultura de precisão já vem sendo praticada. Pode-se dizer que muitas das tecnologias da agricultura de precisão podem ser perfeitamente adaptadas para as condições da agricultura brasileira.

As seguintes razões podem ser citadas: (i) muito investimento foi feito até hoje, no sentido de atender as indagações dos fatores limitantes da produtividade. Com a agricultura de precisão, podem-se encontrar respostas que até então não estavam presentes nos nossos questionamentos; (ii) por mais que o conhecimento no manejo das principais culturas venha ocorrendo de forma organizada e esteja ocorrendo uma incorporação rápida das inovações tecnológicas, ainda faltam ferramentas que auxiliem no entendimento dos fatores que comprometem a produtividade. O banco de dados necessários na agricultura de precisão pode fornecer essas informações. Podemos citar, como exemplo, a ausência de mapas de solo que caracterizam glebas dentro de cada propriedade. Sabe-se que diferentes classes de solos permitem manejo diferenciado. Outro fator crucial está relacionado ao clima. Precisamos expandir nosso conhecimento sobre balanço hídrico das principais regiões e isso exige conhecimento e instrumentação, os quais são disponíveis na agricultura de precisão.

3.2. Programas de Pesquisas e Necessidades Futuras

Para que possamos caracterizar o que se entende por agricultura de precisão, poderíamos iniciar pela necessidade de ampliar nossa visão do conceito de sistemas de produção. Para tanto, temos de atacar o modelo de conhecimento estanque, fazendo com que os diferentes especialistas por

área possam colocar seus conhecimentos de forma integrada. Devemos valorizar o desenvolvimento de projetos que enxerguem a propriedade como um todo, mantendo a especialização e as áreas de conhecimento. Devemos valorizar, cada vez mais, as relações entre produtores, extensionistas e pesquisadores, fazendo com que os produtores sejam os atores principais do processo. Dessa forma, sempre que possível, é interessante levar projetos de pesquisa para as áreas de produção, em parceria com os extensionistas e os produtores, para melhor capacitação.

As ferramentas para se atingir a precisão na agricultura são: (i) a capacidade de mobilização entre os pesquisadores, extensionistas e produtores, dada a cultura histórica de interdependência; (ii) a participação dos produtores no estabelecimento de prioridades e no desenvolvimento conjunto dos trabalhos de pesquisa, com modelo experimental, que permita o apoio logístico das propriedades e os equipamentos necessários na experimentação; (iii) a importância do levantamento de dados para fins de análise comparativa de resultados de pesquisa regional e o efetivo resultado de produção dos produtores em suas glebas e seus fatores; (iv) as prioridades de pesquisa baseadas na inter-relação de produtores, extensionistas e pesquisadores. O uso da agricultura de precisão é uma das mais importantes ferramentas para o estabelecimento dessas prioridades.

No Brasil, a implementação das tecnologias da agricultura de precisão poderá ser feita com substancial economia de recursos financeiros, tempo e esforço humano, se utilizarmos as experiências vividas em outros países, principalmente os Estados Unidos, onde, há mais de 20 anos vêm-se desenvolvendo e testando, nas condições dos agricultores, as tecnologias da agricultura de precisão. Isso se deve ao fato de que, hoje, já se dispõe, para as condições da agricultura brasileira, de conhecimentos bastante elevados dos aspectos agronômicos dos diferentes sistemas de produção, possibilitando um ajuste mais rápido das tecnologias potenciais da agricultura de precisão. Nesse caso, haveria necessidade urgente de

treinamento de pessoas no manuseio das máquinas e equipamentos. Nos últimos anos, alguns eventos foram realizados, no Brasil, com o objetivo de divulgar o uso das tecnologias da agricultura de precisão, podendo ser citados: o Simpósio sobre Agricultura de Precisão, já em sua 2ª edição, realizados em Piracicaba, SP (Balastreire, 2000) e o Simpósio de Agricultura de Precisão, realizado em Viçosa, MG (Borem et. al., 2000).

3.3. Manejo por Talhões: uma alternativa inicial

Uma alternativa simples e sem muito investimento inicial para os agricultores brasileiros terem uma idéia clara do potencial das tecnologias da agricultura de precisão é iniciar o manejo dos solos e culturas por zonas uniformes, dividindo-se as áreas cultivadas em talhões, para avaliação da variabilidade dos solos e produtividades das culturas. Utilizando-se esse procedimento, pode-se obter informações importantes para ajustes dos sistemas de produção.

Para ilustrar, será utilizado o procedimento utilizado na Fazenda da Prata, situada no município de Ipuã, SP. Nessa propriedade, anualmente, uma área total de 567 ha vem sendo cultivada com milho, já no terceiro ano, em sistema de plantio direto. Para a colheita da safra 2001/2002, a área foi dividida em talhões, para avaliação do potencial da variabilidade na produção de milho. Essa divisão foi baseada em informações sobre o histórico de uso e a posição das glebas na paisagem. A colheita foi realizada com uma colhedora automotriz, não equipada com monitor de fluxo de grãos e GPS. A produtividade de grãos variou de 4,52 a 7,08 Mg/ha, com média geral de 6,22 Mg/ha (Tabela 13).

As produtividades nos diferentes talhões, exceto nos de número 13, 14 e 15, situaram-se ao redor da média geral de 6,22 Mg/ha (Tabela 13), indicando pouca variabilidade. Assim, esses resultados sugerem a necessidade do aprimoramento integrado de todas as técnicas culturais (escolha de cultivar, adubação, manejo da cultura, etc.) e de administração,

Tabela 13. Produtividade média de milho por talhões na safra 2001/02. Fazenda da Prata, Ipuá, SP.

Talhão {número}	Área (ha)	Produção total de grãos (t)	Produção de grãos (Mg/ha)
1 e 3	105,25	661,80	6,28
2 e 4	45,50	286,73	6,30
14	69,21	351,72	5,08
13	8,14	368,20	4,52
11 e 12	58,12	390,92	6,72
7 e 8	15,57	110,36	7,08
9	149,09	902,69	6,05
10	107,62	734,47	6,82
15	5,46	360,80	6,60
16	3,36	188,60	5,61
Total	567,32	3.530,45	Média 6,22

para suplantar os atuais tetos de 6 a 7 Mg/ha, antes de se pensar em utilizar o manejo diferenciado. Por outro lado, as menores produtividades observadas, principalmente, nos talhões 13 e 14, indicam áreas com problemas mais acentuados, que necessitam investigação mais detalhada.

Referências Bibliográficas

AUTOMATED AGRICULTURE FOR THE 21ST CENTURY SYMPOSIUM, 1991, Chicago. **Proceedings...** St. Joseph: ASAE, 1991. (ASAE. Publication, 11-91).

ALLEY, M. M.; ROYGARD, J. K. F. Intensifying agronomic crop production systems. In: INFORMATION AGRICULTURE CONFERENCE, 2001, Indianapolis. **InfoAg 2001**: proceedings. Norcross: Potash & Phosphate Institute, 2001. CD-ROM

ANDERSON, N. W.; HUMBURG, D. S. Application equipment for site-specific management. In:

PIERCE, F. J.; SADLER, E. J. (Ed.). **The State of Site-Specific Management for Agriculture**. Madison: ASA: CSSA: SSSA, 1997. p. 245-281. (ASA. Micellaneous Publication)

BAE, Y. M.; BORGELT, S. C.; SEARCY, S. W.; SCHUELLER, L. K.; STOUT, B. A. **Determination of spatially variable yield maps**. St. Joseph: ASAE, 1987 (ASAE Paper n. 87-1533).

BALASTREIRE, L. A. **O estado - da - arte da agricultura de precisão no Brasil**. Piracicaba: L.A. Balastreire, 2000. 224 p.

BECKETT, P. H. T.; WEBSTER, R. Soil variability: a review. **Soils and Fertilizers**, Wallingford, v. 34, p. 1-15, 1971.

BOREM, A.; DEL GIUDICE, M. P.; QUEIROZ, D .M.; MONTOVANI, E. C.; FERREIRA, L. R.; VALLE, F. X. R.; GOMIDE, R. L. (Ed.). **Agricultura de precisão**. Viçosa: UFV, 2000. 467 p.

BURNETT, E.; STEWART, B. A.; BLACK, A. L. Regional effect of soil erosion on corn productivity- Great Plains. In: FOLLET, R. F.; STEWART, B. A. (Ed.). **Soil erosion and roproductivity**. Madison: ASA: CSSA: SSSA, 1985. p. 335-356.

BURROUGH, P. A. Soil variability: a late 20th century view. **Soils and Fertilizers**, Wallingford, v. 56, p. 529-562, 1993.

CAMBADELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.;

TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, p.1501-1511, 1994.

CARR, P. M.; CARLSON, G. R.; JACOBSON, J. S.; NIELSON, G. A.; SKOGLEY, E. O. Farming fields, not soils: A strategy

for increasing fertilizer profitability. **Journal of Production Agriculture**, Madison, v. 4, p. 57-61, 1991.

CARTER, D. L.; BERG, R. D.; SANDERS, B. J. The effect of furrow irrigation erosion on crop productivity. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 49, p. 207-211, 1985.

CIHA, A. J. Slope position and grain yield of soft white winter. **Agronomy Journal**, Madison, v. 76, p. 193-196, 1984.

COELHO, A. M.; DORAN, J. W.; SCHEPERS, J. S. Irrigated corn yield as related to spatial variability of selected soil properties.

ROBERT, P. C.; RUST, R. H.; LARSON, W. E (Ed.). **Site-specific management for agriculture systems**. Madison: ASA: CSSA: SSSA, 1999a. p. 441-452.

COELHO, A. M.; DORAN, J. W.; SCHEPERS, J. S. Spatial and temporal variability of sandy soils properties as related to irrigated corn management. In: ANNUAL MEETING ABSTRACTS, 1999, Salt Lake City. **Proceedings...** Salt Lake City: ASA; CSSA: SSSA, 1999b. p. 289.

COELHO, A. M. **Irrigated corn yield as related to spatial variability of selected soil properties in a silty clay loam and sandy soils**. 2000. 175 f. Dissertation (Philosophy Doctor) - University of Nebraska, Lincoln.

COELHO, A. M.; DORAN, J. W.; SCHEPERS, J. S. Exploring cause and effect relationships of soil fertility on corn yield variability. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 28., 2001, Londrina. **Ciência do Solo**: fator de produtividade competitiva

com sustentabilidade: Resumos... Londrina: SBCS, 2001.p. 113.

COX, G.; HARRIS, H.; COX, D. Application of precision agriculture to sugar cane. In: CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURA, 4., 1998. **Proceedings...** Madison: ASA: CSSA: SSSA, 1999.

DAMPNEY, P. M. R. ; MOORE, M. Precision agriculture in England: Current practice and research-based advice to farmers. In: CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURA, 4., 1998. **Proceedings...** Madison: ASA: CSSA: SSSA, 1999. p. 661-674.

De BAERDEMAEKER, J.; DELEROIX, R.; LINDEMANS, P. Monitoring the grain flow in combines. In: AGRI-MATION, 1., 1985, Chicago. **Agri-Mation 1**: proceedings of the Agri-Mation 1 conference & exposition. St. Joseph: ASAE; Dearborn: SME, 1985. p. 329-338

DAHIYA, I. S.; RICHTER, J.; MALIK, R. S. Soil spatial variability: a review. **International Journal of Tropical Agriculture**, Haryana, v. 2, p. 1-102, 1984.

DOBERMANN, A. Factors causing field variation of direct-seeded flooded rice. **Geoderma**, Amsterdam, v. 62, p. 125-150, 1994.

DOERGE, T. A. Management zones concepts. In: POTASH & PHOSPHATE INSTITUTE. **Site-Specific Management Guidelines**: SSMG-2. 1999. 4 p.

DOERGE, T. A. **Variable rate seeding of corn**. Crop Insights. Pioneer Hib-Bred Int, 1997. Disponível em: < <http://www.Pioneer.com>. >

ENGEL, B. A.; GAULTNEY, L. D. **Environmentally sound agriculture production systems through site-specific farming**. St. Joseph: ASAE, 1990. (ASAE Paper n. 90-2566).

FERGUSON, R. B.; CAHOON, J. E.; HERGERT, G. W.;
PETERSON, T. A.; GOTWAY, C. A.;

HARTFORD, A. H. Managing spatial variability with furrow irrigation to increase nitrogen use efficiency. In: ROBERT, P. C.; RUST, R. H.; LARSON, W. E (Ed.). **Site-specific management for agriculture systems**. Madison: ASA: CSSA: SSSA, 1995. p. 443-464.

FORTIN, M. C.; PIERCE, F. J. Toward an agriculture information system to maximize value in agriculture data. In: WOLF, S. A. (Ed.). **Privatization of information and agriculture industrialization**. Boca Raton: CRC Press, 1998. p. 95-104.

GOERING, C. E. Recycling a concept. **Agricultura Engineering Magazine**. St. Joseph, . Nov. 1993.

GOTWAY, C. A.; FERGUSON, R. B.; HERGERT, G. W.;
PETERSON, T. A. Comparison of kriging and inverse-distance methods for mapping soil parameters. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 60, p. 1237-1247, 1996.

HAN, S.; GORING, C. E.; HUMMEL, J. W.; CAHAN, M. D.
Selection of cell size for site-specific crop management. Charlotte: American Society of Agriculture Engineers. 1992. (ASAE Paper n. 927007).

KELLOGG, C. E. We seek; we learn. In: STEFFERUD, A. (Ed.). **The yearbook of Agricultura: Soil**. Washington, D.C.: USDA, 1957. p. 1-11.

LAMBERT, D.; LOWENBERG-DeBOER, J. Precision agriculture profitability review. Disponível em:

< <http://mollisol.agry.purdue.edu/SSMC/publications.html>. >

Acesso em:

LARNEY, F. J.; JANSEN, H. H.; OLSON, B. M. Efficacy of inorganic fertilizers in restoring wheat yields on an artificially eroded soil. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 75, p. 369-377, 1995.

LARNEY F. J.; JANSEN, H. H. Restoring of productivity to a desurfaced soil with livestock manure, crop residue, and fertilizer amendments. **Agronomy Journal**, Madison, v. 88, p. 921-927, 1996.

LARSON, W. E.; ROBERT, P. C. Farming by soil. In: LAL, R.; PIERCE, F. J. (Ed.). **Soil management for sustainability**. Ankeny: Soil and Water Conservation Society, 1991. p. 103-112.

LARSON, W. E.; LAMB, J. A.; KHAKURAL, B. R.; FERGESON, R. B.; REHM, G. W. Potential of site-specific management for nonpoint environmental protection. In: PIERCE, F. J.; SADLER, E. J. (Ed.). **The state of site-specific management for agriculture**. Madison: ASA: CSSA: SSSA, 1997. p. 337-367.

MALLARINO, A. P.; OYARZABAL, E. S.; HINZ, P. N. Interpreting within-field relationships between crops yields and soil and plant variables using factor analysis. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 1, p. 15-25, 1999.

MILLER, P. M.; MICHAEL, J. S.; DONALD, R. N. Spatial variability of wheat yield and soil properties on complex hills. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 52, p.1133-1141, 1988.

MORAN, M. S.; INOUE, Y.; BARNES, E. M. Opportunities and limitations for image-based remote sensing in precision crop management. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 61, p. 319-346, 1997.

MULLA, D. J.; HAMMOND, M. Mapping of soil test results from large irrigation circles. In: FAR WEST REGIONAL FERTILIZER CONFERENCE, 1988, Bozeman. **Proceedings...** Pasco: Far West Fert. AgChem Assoc., 1988.

MULLA, D. J.; SCHEPERS, J. S. Key process and properties for site-specific soil and crop management. In: PIERCE, F. J.; SADLER, E. J. (Ed.) **The state of site-specific management for agriculture**. Madison: ASA: CSSA: SSSA, 1997. p. 1-18.

NACIONAL RESEARCH COUNCIL. **Precision agriculture in the 21st century**: geospatial and information technologies in crop Management. Washington, DC: National Academy of Science, 1997. 149 p.

NIELSON, D. R.; BOUMA, J. **Soil spatial variability**. Wageningen: Pudoc 1985.

PETERSON, G.A.; WESTFALL, D.G. & COLE, C.V. Agroecosystem approach to soil and crop management research. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v. 57, p. 1354-1360, 1993.

PIERCE, F. J.; ANDERSON, N.; COLVIN, T. S.; SCHUELLER, J. K.; HUMBURG, D.; McLAUGHLIN, N. In: ROBERT, P. C.; RUST, R. H.; LARSON, W. E (Ed.). **Site-specific management for agriculture systems**. Madison: ASA: CSSA: SSSA, 1995. p. 203-236.

ORTEGA, R .A. **Spatial variability of soil properties and dryland crops yields over typical ladforms of**

Easter Colorado. 1997. Dissertation (Philosophy of Doctor) - Colorado State University, Fort Collins.

PAZ, A.; TABOADA, M. T.; GOMES, M. J. Spatial variability in topsoil micronutrient contents in one-hectare cropland plot. **Communications on Soil Plant Analysis**, New York, v. 27, p. 479-503, 1996.

PIERCE, F. J.; NOWAK, P. Aspects of precision agriculture. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 67, p. 1-85, 1999.

PIERCE, F. J.; SADLER, E. J. (Ed.). **The state of site-specific management for agriculture**. Madison: ASA: CSSA: SSSA, 1997.

PIERCE, F. J.; WARNCKE, D. D.; EVERETT, M. W. Yield and nutrient variability in glacial soils of Michigan. In: ROBERT, P. C.; RUST, R. H.; LARSON, W. E (Ed.). **Site-specific management for agriculture systems**. Madison: ASA: CSSA: SSSA, 1995. p. 135-154.

REICHENBERG, I.; RUSSNOGLE, J. Farming by foot. **Farmer's Journal**, v. 113, p.11-15, 1989.

ROBBINS, C. W.; MACKEY, B. E.; FREEBORN, L. L. Improving exposed subsoil with fertilizers and crop rotation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, p. 1221-1225, 1997.

ROBERT, P. C.; RUST, R. H.; LARSON, W. E (Ed.). **Site-specific management for agriculture systems**. Madison: ASA: CSSA: SSSA, 1993.

ROBERT, P. C.; RUST, R. H.; LARSON, W. E (Ed.). **Site-specific management for agriculture systems**. Madison: ASA: CSSA: SSSA, 1996

ROBERT, P. C. The economic feasibility of precision agriculture. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 2., 2002, Viçosa. **Anais...** Viçosa: UFV, 2002. CD-ROM.

RUNGE, E. C. A.; HONS, F. M. Precision Agriculture – development of a hierarchy of variables influencing crop yields. In: CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4., 1998, Minneapolis. **Proceedings...** Madison: ASA: CSSA: SSSA, 1999. p. 143-158. Edited by P. C. Robert, R. H. Rust e W. E. Larson.

SADLER, E. J.; BUSSCHER, W. J.; BAUER, P. J.; KARLEN, D. L. Spatial scale requirement for precision farming: a case study in the southeastern USA. **Agronomy Journal**, Madison, v. 90, p. 191-197, 1998.

SAWYER, J. F. Concepts of variable rate technology with considerations for fertilizer application. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 7, p. 195-201, 1994.

SAS Institute Inc (Cary, NC). **SAS/STAT guide for personal computers**. Version 6.07 ed. Cary, 1996.

SHANAHAN, J. F.; SCHEPERS, J. S.; FRANCIS, D. D.; VARVEL, G. E.; WILHELM, W. W.; TRINGE, J. S.; SCHLEMMER, M. R.; MAJOR, D. J. Use of remote sensing imagery to estimate corn yield. **Agronomy Journal**, Madison, v. 93, p. 583-589, 2001.

SCHEPERS, J. S. Practical applications of remote sensing. In: INFORMATION AGRICULTURE CONFERENCE, 2001, Indianapolis. **InfoAg 2001: proceedings**. Norcross: Potash & Phosphate Institute, 2001. CD-ROM

SCHUELLER, J. K. In-field site-specific crop production. In: AUTOMATED AGRICULTURE FOR THE 21ST CENTURY SYMPOSIUM, 1991, Chicago. **Proceedings...** St. Joseph: ASAE, 1991. p. 291-292. (ASAE. Publication, 11-91).

SCHUELLER, J. K. A review and integrating analysis of spatially-variable control of crop production. **Fertilizer Research**, The Hague, v. 33, p. 1-34, 1992.

SMITH, H. F. An empirical law describing heterogeneity in fields of agriculture crops. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 28, p. 1-23, 1938.

STONE, M. Control system applications. In: AUTOMATED AGRICULTURE FOR THE 21ST CENTURY SYMPOSIUM, 1991, Chicago. **Proceedings...** St. Joseph: ASAE, 1991. p. 163-165. (ASAE. Publication, 11-91).

STONE, J. R.; GILLIAN, J. W.; CASSEL, D. K.; DANIEL, R. B.; NELSON, I. A.; KLEISS, H. J. Effect of erosion and landscape position on the productivity of piedmont soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 49, p. 987-991, 1985.

SUDDUTH, K. A.; HUMMEL, J. W.; BIRRELL, S. J. Sensors for site-specific management. In: PIERCE, F. J.; SADLER, E.J. (Ed.). **The state of site-specific management for agriculture**. Madison: ASA: CSSA: SSSA, 1997. p. 69-79.

STAFFORD, J. V. Essential technology for precision agriculture. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 3., 1996, Mineapolis. **Proceedings...** Madison: ASA: CSSA: SSSA, 1996. p. 595-604. Edited by P. C. Robert, R. H. Rust e W. E. Larson.

TIMLIN, D. J.; PACHEPSKY, Y. A.; SNYDER, V. A.; BRYANT, R. B. Spatial and temporal variability of corn grain yield on a hillslope. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 62, p. 764-773, 1998.

TOZI, F. A. de. Sistemas de informação geográfica na agricultura. In: BALASTREIRE, L. A. (Ed.). **O Estado da arte da agricultura de precisão no Brasil**. Ed. do Autor: Piracicaba, 2000. p. 187-192.

TYLER, D. A.; ROBERTS, D. W.; NIELSEN, G. A. Location and guidance for site-specific management. In: PIERCE, F. J.; SADLER, E. J (Ed.). **The state of site-specific management for agriculture**. Madison: ASA: CSSA: SSSA, 1997. p. 161-181.

VETSCH, J. A.; MALZER, G. L.; ROBERT, P. C.; HUGGINS, D. R. Nitrogen specific management by soil conditions: Managing fertilizer nitrogen in corn. In: ROBERT, P. C.; RUST, R. H.; LARSON, W. E (Ed.). **Site-specific management for agriculture systems**. Madison: ASA: CSSA: SSSA, 1995. p. 465-473.

WILDING, L. P. Spatial variability: its documentation, accomodation and implication to soil surveys. In: WORKSHOP OF THE ISSS AND THE SSSA, 1984, Las Vegas. **Soil spatial variability**- proceeding. Wageningen: PUDOC, 1985. p. 166-194. Edited by NIELSON, D. R., BOUMA, J. WOLLENHAUPT, N. C.; WOLKOWSKI, R. P.; CLAYTON, M. K. Mapping soil test phosphorus and potassium for variable-rate fertilizer application. **Journal of Production Agriculture**, Madison, v. 7, p. 441-448, 1994.

WRIGHT, R. J.; BOYER, D. G.; WINANT, M. M.; PERRY, H. D. The influence of soil factors on yield differences among landscape position in an Appalachian cornfield. **Soil Science**, Baltimore, v.149, p. 375-382, 1990.