

**UNIOESTE  
UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ  
CAMPUS DE CASCAVEL  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**ATRIBUTOS QUÍMICOS E FÍSICOS DO SOLO E PRODUTIVIDADE DE SOJA EM  
AGRICULTURA CONVENCIONAL E DE PRECISÃO**

**FERNANDO NAKAYAMA DE QUEIROZ**

**CASCAVEL**

**Junho - 2011**

**FERNANDO NAKAYAMA DE QUEIROZ**

**ATRIBUTOS QUÍMICOS E FÍSICOS DO SOLO E PRODUTIVIDADE DE SOJA EM  
AGRICULTURA CONVENCIONAL E DE PRECISÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, área de concentração em Engenharia de Sistemas Agroindustriais.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Godoy de Souza

**Cascavel, Junho de 2011**

Catálogo na Publicação elaborada pela Biblioteca Universitária

UNIOESTE/Campus de Toledo.

Bibliotecária: Marilene de Fátima Donadel - CRB – 9/924

***Queiroz, Fernando Nakayama de***

Q3a Atributos químicos e físicos do solo e produtividade de soja em agricultura convencional e de precisão / Fernando Nakayama de Queiroz. -- Cascavel, PR : [s. n.], 2011 xi, 60 f. : tab. ; fig.

Orientador: Dr. Eduardo Godoy de Souza

Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Campus de Cascavel. Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas.

1. Engenharia agrícola - Teses 2. Solos – Propriedades químicas 3. Soja – Produtividade 4. Agricultura de precisão 5. Manejo do solo I. Souza, Eduardo Godoy de, Orient. II. T.

**CDD 20. ed. 631.41**

631.5  
633.348

**FERNANDO NAKAYAMA DE QUEIROZ**

**ATRIBUTOS QUÍMICOS E FÍSICOS DO SOLO E PRODUTIVIDADE DE SOJA EM  
AGRICULTURA CONVENCIONAL E DE PRECISÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, área de concentração em Engenharia de Sistemas Agroindustriais, aprovada pela seguinte banca examinadora:

Orientador: Prof<sup>o</sup>. Dr. Eduardo Godoy de Souza

Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UNIOESTE

Prof<sup>o</sup>. Dr. Alberto Kazushi Nagaoka

Centro de Ciências Agrárias, UFSC

Prof<sup>a</sup>. Dr. Lucia Helena Pereira Nóbrega

Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UNIOESTE

Prof<sup>o</sup>. Dr. Erivelto Mercante

Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UNIOESTE

**Cascavel, 11 de julho de 2011.**

## BIOGRAFIA

### **Fernando Nakayama de Queiroz**

Possui graduação em Ciência da Computação - CESUFOZ - Centro de Ensino Superior de Foz do Iguaçu (2004). Especialista em Redes, graduado pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR.

Tem experiência na área de Ciência da Computação, com ênfase em Redes. Atualmente atua como Coordenador do curso de Tecnologia em Gerenciamento de Redes - no Centro de Ensino Superior de Foz do Iguaçu - CESUFOZ, no qual também é professor.

Desde 2008 participa do programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* na Universidade Estadual do Oeste do Paraná *campus* de Cascavel, instituição na qual pretende obter a titulação de mestre em Engenharia de Sistemas Agroindustriais.

Toda vez que um homem faz uma coisa nitidamente estúpida, é sempre pelos mais nobres motivos. Oscar Wilde

## DEDICATÓRIA

Aos meus Pais,  
João Machado de Queiroz e  
Misue Nakayama de Queiroz,  
e aos amigos que estiveram,  
e estão ao meu lado.

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE –, pela oportunidade de participar de seu Programa de Mestrado e utilização de suas instalações;

Ao Professor Dr. Eduardo Godoy de Souza, pela orientação, confiança, pelos conselhos, amizade e apoio para a realização deste trabalho.

Aos amigos Claudio Leones Bazzi, Diego dos Santos e Marcia Regina Siqueira Konopatzki, pelo apoio em todas as horas.

Ao Eng. Agassiz Linhares Neto pela cessão da área de onde foram levantados os dados utilizados neste trabalho.

# ATRIBUTOS QUÍMICOS E FÍSICOS DO SOLO E PRODUTIVIDADE DE SOJA EM AGRICULTURA CONVENCIONAL E DE PRECISÃO

## RESUMO

Os princípios fundamentais da agricultura de precisão (AP) são o aumento da produtividade das culturas e a manutenção da sustentabilidade agrícola, por meio do uso de aplicação de insumos a taxa variável, ao contrário do cultivo convencional, que utiliza valores médios para aplicação de insumos. O objetivo deste trabalho foi comparar o sistema de cultivo convencional (AC) e AP, levando em consideração os atributos químicos disponíveis no solo, suas características físicas e a produtividade de Soja. O experimento foi realizado em uma área de 19,63 ha, no município de Cascavel, Paraná, sendo definidas três faixas (curvas de nível) para AC e três para AP. Realizou-se coletas para análise química do solo, macro e microporosidade e densidade do solo em toda a área. Na soja foi feita a avaliação de produtividade. Para criação de mapas temáticos foi utilizada a krigagem como interpolador, sendo avaliada a dependência espacial dos dados por meio do semivariograma. A produtividade da soja teve alta correlação com o K nos dois sistemas de cultivo, mas foi pouco correlacionada linearmente com os demais atributos analisados. No sistema AC verificou-se que os atributos produtividade, argila, areia, Cu e Índice de Cone 0-20 cm apresentaram forte dependência espacial. Os demais atributos apresentaram fraca e moderada dependência espacial. Para o sistema AP, o atributo Cu apresentou forte dependência espacial e os demais atributos apresentaram baixa ou moderada dependência espacial. Com exceção do Zn, todos os atributos estudados estavam em nível de disponibilidade suficientes ao desenvolvimento da cultura, fato este que influenciou a produtividade de AP para que não fosse significativamente superior a AC. A produtividade média interpolada foi praticamente a mesma para ambos os sistemas, sendo que na maior parte da área (59,7%) AP apresentou maior produtividade que AC.

**Palavras-chave:** produtividade da soja, variabilidade espacial, sistemas de manejo.

# CHEMICAL AND PHYSICAL ATTRIBUTES OF SOIL AND CROP PRODUCTIVITY OF SOYBEANS IN CONVENTIONAL AND PRECISION FARMING SYSTEMS

## ABSTRACT

The fundamental principles of precision agriculture are to increase crop productivity and to maintain agricultural sustainability through the use of fertilizer material on a variable rate, unlike the conventional farming, which uses values based on the average use of inputs. The aim of this study was to make a comparison between conventional farming (AC) and precision farming (AP), taking into account the chemical attributes available in the soil and its physical characteristics. The experiment was conducted in an area of 19.63 ha, in Cascavel, Paraná. Three bands were defined for conventional agriculture and three for precision agriculture. To create theme maps, kriging was used as interpolator, and the spatial dependence data were evaluated through semivariograms. Soybean yield was highly correlated with K in both cropping systems, but was lightly correlated with the remaining attributes evaluated. In AC it was found that the attributes yield, clay, sand, Cu, and cone index 0-20 cm showed strong spatial dependence. The remaining attributes presented weak and moderated spatial dependence. For the AP system, Cu presented strong spatial dependence. With exception to Zn, all the evaluated attributes were in availability levels for soy development, and this fact influenced the AP yield not to be significantly higher than AC. The interpolated yield mean was virtually the same for both systems, and in most of the area (59,7%) AP showed higher productivity than AC.

**Keywords:** Soybean yield, spatial variability, management systems.

## SUMÁRIO

<b>BIOGRAFIA</b> .....	ii
<b>CITAÇÕES</b> .....	iii
<b>DEDICATÓRIA</b> .....	iv
<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	v
<b>RESUMO</b> .....	vi
<b>ABSTRACT</b> .....	vii
<b>LISTA DE TABELA</b> .....	x
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	xi
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	13
<b>2 OBJETIVO</b> .....	14
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	15
3.1 Fertilidade de solo e nutrição de plantas .....	15
3.2 Manejo do solo .....	16
3.3 Propriedades físicas dos solos.....	17
3.4 Amostragem de solos.....	19
3.5 Produção de soja .....	19
3.6 Agricultura de precisão (AP) .....	20
3.6.1 Aplicação de fertilizantes a taxas variáveis.....	21
3.7 Análise espacial da variabilidade.....	23
3.8 Variabilidade nos campos produtivos.....	24
3.9 Estatística descritiva.....	25
3.10 Interpolação.....	25
3.11 Mapas temáticos e sistemas de informação geográfica.....	26
<b>4 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	28
4.1 Localização do experimento.....	28
4.2 Descrição da área .....	28
4.3 Análise dos atributos do solo .....	29
4.4 Instalação e condução do experimento.....	30

4.5 Produtividade.....	32
4.6 Análise dos dados.....	33
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>36</b>
5.1 Análise exploratória.....	36
5.1.1 Sistema AC .....	36
5.1.2 Sistema AP .....	37
5.2 Análise espacial .....	39
5.2.1 Sistema AC .....	39
5.2.2 Sistema AP.....	41
5.3 Mapas temáticos.....	43
5.4 Análise de correlação .....	52
<b>6 CONCLUSÕES.....</b>	<b>54</b>
<b>7 REFERÊNCIAS.....</b>	<b>55</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 01</b>	Número de amostras levantadas em cada sistemas de cultivo.....	33
<b>Tabela 02</b>	Estatística exploratória das 45 amostras da AC.....	36
<b>Tabela 03</b>	Níveis de interpretação dos atributos químicos do solo com a porcentagem de pontos amostrais encontrada.....	37
<b>Tabela 04</b>	Estatística exploratória das 42 amostras dos dados do sistema AP.....	38
<b>Tabela 05</b>	Níveis de interpretação dos atributos químicos do solo com a porcentagem de pontos amostrais encontrada.....	39
<b>Tabela 06</b>	Seleção do melhor modelo para a AC.....	40
<b>Tabela 07</b>	Dados de análise da Dependência espacial para o AC.....	41
<b>Tabela 08</b>	Seleção do melhor modelo para o AP .....	42
<b>Tabela 09</b>	Dados da Dependência espacial para o Sistema AP.....	43
<b>Tabela 10</b>	Tabela de referência para avaliar a influência do interpolador.....	44
<b>Tabela 11</b>	Coeficiente de desvio Relativo em função do atributo.....	52
<b>Tabela 12</b>	Coeficientes de correlação linear de Pearson (R) para atributos químicos e físicos do solo e produtividade para o sistema AP.....	52
<b>Tabela 13</b>	Coeficientes de correlação linear de Pearson (R) para atributos químicos e físicos do solo e produtividade para o sistema convencional	53

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 01</b>	Localização do experimento. Fonte: Google Earth (2010).....	28
<b>Figura 02</b>	Localização dos pontos de amostragem do solo.....	29
<b>Figura 03</b>	Localização dos pontos de amostragem do solo de acordo com as faixas de tratamento (AC em vermelho e AP em preto).....	29
<b>Figura 04</b>	Tela do software apresentando o mapa de disponibilidade de $K_2O$ .....	30
<b>Figura 05</b>	Tela do software apresentando a mapa de necessidade aplicação de KCL.....	31
<b>Figura 06</b>	Imagem do Monitor de controle Stara Falcon 3500.....	31
<b>Figura 07</b>	Mapa de aplicação de KCL no monitor de controle.....	32
<b>Figura 08</b>	Localização dos pontos de referência (130) para colheita da soja.....	32
<b>Figura 09</b>	Mapas da espacialização da produtividade ( $t\ ha^{-1}$ ) da soja para o ano de 2009.....	44
<b>Figura 10</b>	Mapas da espacialização do teor de argila (%) para o ano de 2009.....	44
<b>Figura 11</b>	Mapas da espacialização do teor de areia (%) para o ano de 2009.....	45
<b>Figura 12</b>	Mapas da espacialização do teor de silte (%) para o ano de 2009.....	45
<b>Figura 13</b>	Mapas da espacialização do teor de P ( $mg\ dm^{-3}$ ) para o ano de 2009....	46
<b>Figura 14</b>	Mapas da espacialização do teor de C ( $g\ dm^{-3}$ ) para o ano de 2009.....	46
<b>Figura 15</b>	Mapas da espacialização do pH para o ano de 2009.....	47
<b>Figura 16</b>	Mapas da espacialização da $H+Al$ ( $cmolc\ dm^{-3}$ ) para o ano de 2009.....	47
<b>Figura 17</b>	Mapas da espacialização do teor de Ca ( $cmolc\ dm^{-3}$ ) para o ano de 2009.....	48
<b>Figura 18</b>	Mapas da espacialização do teor de Mg ( $cmolc\ dm^{-3}$ ) para o ano de 2009.....	48
<b>Figura 19</b>	Mapas da espacialização do teor de K ( $cmolc\ dm^{-3}$ ) para o ano de 2009.....	48
<b>Figura 20</b>	Mapas da espacialização do teor de Cu ( $mg\ dm^{-3}$ ) para o ano de 2009...	49
<b>Figura 21</b>	Mapas da espacialização do teor de Zn ( $mg\ dm^{-3}$ ) para o ano de 2009..	49
<b>Figura 22</b>	Mapas da espacialização do teor de Fe ( $mg\ dm^{-3}$ ) para o ano de 2009..	50

<b>Figura 23</b>	Mapas da espacialização do teor de Mn (mg dm <sup>-3</sup> ) para o ano de 2009..	50
<b>Figura 24</b>	Mapas da espacialização da resistência mecânica do solo a penetração IC_0_10 (kPa) para o ano de 2011.....	50
<b>Figura 25</b>	Mapas da espacialização da resistência mecânica do solo a penetração IC_10_20 (kPa) para o ano de 2011.....	51
<b>Figura 26</b>	Mapas da espacialização da resistência mecânica do solo a penetração IC_0_20 (kPa) para o ano de 2011.....	51

## 1 INTRODUÇÃO

A competitividade e a globalização da economia mundial em conjunto com a necessidade de uma melhor política de conservação ambiental demandam que o Brasil empregue a Agricultura de Precisão (AP) em alguns setores da agricultura.

As principais mudanças no setor agrícola podem ser notadas ao observarmos a utilização de equipamentos de alta tecnologia como GPS (GNSS), monitores de colheita, semeadoras a taxa variável e aplicadores de insumos a taxa variável.

Os equipamentos que outrora eram de difícil acesso, tanto por disponibilidade quanto por custo, hoje podem ser encontrados a um valor mais satisfatório.

Dentro deste contexto surge a AP, que consiste em um conjunto de tecnologias, capaz de auxiliar o produtor rural a identificar as estratégias a serem adotadas para aumentar a eficiência no gerenciamento da agricultura. Esse gerenciamento permite minimizar os insumos utilizados no sistema de produção de um local, dentro de uma visão conservacionista, e maximizar a rentabilidade das colheitas, tornando o agronegócio mais competitivo (BLACKMORE, 1994).

A AP é um método de administração cuidadoso e detalhado do solo e da cultura para adequar as diferentes condições encontradas em cada pedaço de lavoura, tendo em vista a não-uniformidade intrínseca dos solos (SCHUELLER, 1992; WEIDA e BORGELT, 1993).

## **2 OBJETIVO**

O objetivo deste trabalho foi avaliar os atributos químicos e físicos do solo e a produtividade de soja em agricultura convencional (AC) e de precisão (AP).

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Fertilidade de solo e nutrição de plantas

A fertilidade do solo está relacionada com a nutrição mineral das plantas, no que diz respeito ao poder de fornecimento de nutrientes pelo solo e a absorção dos mesmos pelas plantas em quantidades suficientes. A capacidade que o solo apresenta para que as plantas nele cultivadas possam desenvolver-se e produzir colheitas compensadoras está determinada pelas propriedades mecânicas e físicas – no que diz respeito à textura, estrutura, consistência, umidade e porosidade –; pelas suas propriedades biológicas – no que se refere à microflora e microfauna benéficas –; e pelas propriedades químicas – quanto à matéria orgânica e reserva de nutrientes assimiláveis como: Ca, Mg, K, P, S e micronutrientes (NATALE; PRADO, 2002).

Nutrientes do solo representam um dos principais fatores reguladores do crescimento das plantas, e tem um papel importante na sustentabilidade do solo. Entretanto, o excesso de nutrientes no solo pode se tornar uma fonte de poluição, caso penetrem no solo ou nos lençóis freáticos (WANG *et al.*, 2009).

As plantas alimentam-se exclusivamente de nutrientes minerais. Além disso, para crescerem, frutificarem e se reproduzirem, retiram os nutrientes do solo, da água e do ar. Carbono, hidrogênio e oxigênio, chamados de nutrientes fundamentais, são retirados do ar e da água e representam 95% do total consumido pelas plantas. Os atributos químicos nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) são chamados de macro nutrientes primários; cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre(S) são os macro nutrientes secundários, enquanto, boro (B), cloro (Cl), cobre (Cu), cobalto (Co), ferro (Fe), manganês (Mn), molibdênio (Mb), níquel (Ni), selênio (Se), silício (Si) e zinco (Zn) são os chamados micronutrientes, todos retirados apenas do solo (ANDA, 2007).

A matéria orgânica exerce papel fundamental na química do solo. Ela é gerada na decomposição de resíduos de plantas e animais, sendo formada por diversos compostos de carbono em vários graus de alteração e interação com as outras fases do solo (mineral, gasosa e solução) (SILVA *et al.*, 2004; TROECH; THOMPSON, 2007). Apesar de compor menos de 5% na maioria dos solos, apresenta alta capacidade de interagir com outros componentes, alterando assim as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo as quais afetam o crescimento e desenvolvimento das plantas (SILVA *et al.*, 2004).

O uso de sistemas conservacionistas que englobam adubação verde, rotação de culturas e plantio direto é capaz de elevar ou pelo menos manter os teores de matéria orgânica nas camadas superficiais do solo, reduzir as perdas de nutrientes via imobilização

por microorganismos e liberar gradualmente os nutrientes (BARRETO; FERNANDES, 2001; SOUZA; MELO, 2003).

### 3.2 Manejo do solo

Dentre os componentes do manejo do solo, o preparo do mesmo, talvez, seja a atividade que mais influi no seu comportamento físico, pois atua diretamente na estrutura do solo (OLIVEIRA *et al.*, 2003). De modo geral, o solo mantido em estado natural, sob vegetação nativa, apresenta características físicas tais como: permeabilidade, estrutura, densidade do solo e porosidade, adequadas ao desenvolvimento normal de plantas (ANDREOLA; COSTA; OLSZEWSKI, 2000).

O uso de sistemas conservacionistas que englobam adubação verde, rotação de culturas e plantio direto é capaz de elevar ou pelo menos manter os teores de matéria orgânica nas camadas superficiais do solo, reduzir as perdas de nutrientes via imobilização por microorganismos e liberar gradualmente os nutrientes (BARRETO; FERNANDES, 2001; SOUZA; MELO, 2003).

O plantio direto é o processo de semeadura em solo não revolvido, no qual a semente é colocada em sulcos ou covas, com largura e profundidade suficientes para a adequada cobertura e contato das sementes com a terra. É entendido como um sistema que elimina ou reduz as operações de preparo do solo, que utiliza herbicidas para o controle de plantas daninhas e preconiza a formação e manutenção da cobertura morta (EMBRAPA, 2008).

O sistema de plantio direto (SPD) é considerado um sistema por excelência quanto ao manejo do solo e da água, e engloba a diversificação das culturas, incluindo sequências racionais (rotação de culturas) com diferentes espécies de plantas de cobertura. Estas devem ser adaptadas regionalmente, tanto na melhoria do solo como para forrageira na alimentação animal, contribuindo para uma maior biodiversidade no meio ambiente e conseqüentemente um maior equilíbrio no sistema como um todo (CALEGARI, 2010).

Uma nova estratégia para manejo de áreas agrícola que vem sendo utilizada é a Integração Lavoura Pecuária (ILP). A expressão ILP é utilizada para designar a alternância do cultivo de grãos e pastejo pelos animais em pastagens de gramíneas e/ou leguminosas, sempre que ambas as atividades sejam desenvolvidas sob uma mesma área ou que tenham um mínimo de interface. Essa alternância aumenta a produtividade em função de melhoria na estrutura e fertilidade do solo, melhor controle de plantas daninhas, quebra de ciclo de doenças e pragas e aumento na disponibilidade de forragem para os rebanhos durante o período de pastejo (MC KENZIE *et al.*, 1999, LANDERS, 2007).

Entre as principais vantagens biológicas que o sistema ILP pode proporcionar, ressalta-se a elevada velocidade de ciclagem de nutrientes. Os animais em pastejo

representam agentes aceleradores da ciclagem de nutrientes. Grande parte dos nutrientes ingeridos retorna ao solo via fezes e urina, os quais são liberados à solução do solo em curto intervalo de tempo, estando disponíveis para novamente serem absorvidos pelas raízes das plantas (BALBINOT JUNIOR *et al.*, 2009). Isso ocorre porque a mastigação e a digestão aceleram a mineralização dos nutrientes contidos na massa vegetal.

O sistema ILP pode aumentar as concentrações de carbono orgânico no solo ao longo do tempo, devido ao crescimento contínuo de plantas na área, seja pastagem ou culturas para exploração vegetal, rotação de culturas, incremento da massa produzida por tempo em decorrência do pastejo e maior ciclagem de nutrientes (TRACY e ZHANG, 2008).

O aproveitamento de um mesmo nutriente para produção animal e vegetal reduz as perdas e a contaminação ambiental. Além disso, nestes sistemas integrados o retorno de nutrientes, via excrementos, dá-se diretamente sobre a área cultivada, eliminando, dessa forma, a necessidade de transporte deste material (ASSMANN *et al.*, 2002).

### **3.3 Propriedades físicas dos solos**

A física de solos estuda e define, qualitativa e quantitativamente, as propriedades físicas, bem como sua medição, predição e controle, com o objetivo principal de entender os mecanismos que governam a funcionalidade dos solos e seu papel na biosfera. A importância prática de se entender o comportamento físico do solo está associada ao seu uso e manejo apropriado, ou seja, orientar a irrigação, drenagem, preparo e conservação (REINERT; REINERT, 2006).

As propriedades físicas do solo contêm uma ampla variação no decorrer de uma área. O complexo geológico e pedológico como a formação do solo, o clima e a topografia são as principais causas da variabilidade natural do solo (SOUZA *et al.*, 2009).

As propriedades físicas do solo dizem respeito à capacidade de absorver e reter água, de circular o ar e à facilidade que oferece para a penetração das raízes das plantas (PENTEADO, 2007). A qualificação de atributos como a densidade e a porosidade do solo são fundamentais para as questões relacionadas ao seu manejo agrícola, indicando se o solo apresenta condições adequadas para o desenvolvimento e exploração das raízes e se há problemas de compactação (RAMIREZ-LOPEZ *et al.*, 2008; STRUDLEY *et al.*, 2008).

Uma das principais alterações do solo está relacionada à sua estrutura, uma vez que o seu equilíbrio é dependente do processo de agregação (SILVA *et al.*, 2000). Segundo Resende *et al.* (2002), a estrutura do solo é dada pela agregação das partículas primárias – argila, silte e areia, juntamente com a matéria orgânica – em unidades maiores – agregados, que no geral, pode fornecer ao solo seis tipos de estrutura: grânulos, grumos, blocos, prismas, colunas e laminar. Do ponto de vista agrícola, a manutenção da boa estabilidade

de agregados, conseqüentemente, a formação de boa estrutura de solo, é condição primordial para garantir altas produtividades (PERIN *et al.*, 2002).

A compactação afeta adversamente o solo, particularmente como fonte e armazenamento de água e nutrientes, por meio do aumento crescente da densidade, diminuição da porosidade, aumento da impermeabilidade, diminuição da infiltração de água e da capacidade de retenção de água pelo solo. Estes efeitos adversos reduzem a eficiência dos fertilizantes, retardam a germinação das sementes e, conseqüentemente, diminuem a produtividade das culturas, aumentam o escoamento e a erosão do solo, trazendo problemas ambientais indesejáveis (GOEDERT *et al.*, 2002; KILIÇ *et al.*, 2004; HAMZA; ANDERSON, 2005; MEGDA *et al.*, 2008). Mas conforme Suzuki *et al.* (2007), respostas diferenciadas da produtividade das culturas com grau de compactação do solo podem ser observadas. Os valores de grau de compactação para obtenção das maiores produtividades dependem das culturas, das condições climáticas e do tipo de solo.

No sistema plantio direto, o solo é submetido à menor tráfego, porém, não é revolvido, tendendo ao adensamento superficial do solo. O adensamento tem sido verificado pelo aumento da densidade do solo e da microporosidade, da diminuição da porosidade total e, principalmente, da macroporosidade. Assim, esses atributos podem ser utilizados como indicadores da qualidade do solo de acordo com o manejo a que o solo está sendo submetido. Uma contínua avaliação, no tempo, destes atributos físicos do solo permite monitorar a eficiência ou não destes sistemas de manejo do solo quando se objetiva estabilidade estrutural (SECCO *et al.*, 2004).

Secco *et al.* (2004), estudando a produtividade de soja e propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distroférico, concluíram que a compactação do solo influenciou negativamente nos valores de densidade do solo, espaço poroso e resistência à penetração do solo na camada de 0-0,10 m de profundidade. E, quando os valores da densidade do solo foram de até  $1,51 \text{ kg dm}^{-3}$  e volume de macroporos superiores a  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , em condições de lavoura, não houve comprometimento do produtividade de grãos de soja.

Conforme Souza *et al.* (2004), os atributos físicos do solo variam entre pontos relativamente próximos em área de mesma unidade taxonômica, muitas vezes de forma significativa. Desta forma a pouca eficácia das respostas encontradas somente com as ferramentas clássicas da estatística fez com que a geoestatística tivesse grande aplicação nessa área. Para Schaffrath *et al.* (2008), essa não uniformidade provavelmente está associada ao sistema de manejo de solo e de culturas adotadas bem como das características intrínsecas do solo, relacionadas com os fatores e processos de formação.

### 3.4 Amostragem de solo

Quando um volume de solo precisa ser caracterizado, normalmente não existe a possibilidade de que todo ele seja examinado, sendo necessário que amostras do mesmo sejam coletadas. Essas amostras devem ser as mais representativas possíveis do material original ou área a ser caracterizada.

Para que os resultados de uma análise química de solo tenham validade e representatividade, é indispensável o máximo cuidado e critério na coleta de amostras que deverão ser enviadas ao laboratório. Nenhuma análise é melhor que uma boa coleta de amostras, pois elas é que irão representar toda a área da propriedade onde deverão ser aplicados os corretivos e fertilizantes. Os esquemas de amostragem podem ser divididos em duas categorias: ao acaso e sistematizada. A amostragem ao acaso refere-se ao método que tem sido recomendado para a agricultura convencional. A amostragem sistematizada é o sistema recomendado para aplicação das tecnologias da AP, sendo o método mais adequado para estudar a variabilidade espacial das propriedades do solo de uma área, pois a variabilidade em todas as direções é levada em consideração (EMBRAPA, 2009).

Na AP, diferente da amostragem tradicional (na qual uma amostra de solo representa uma gleba inteira), tem-se um nível de detalhamento muito maior porque também o número de amostras coletado é bem maior e representa pequenas glebas. Amostragem de solo dentro desse enfoque requer cuidados que vão desde o número de sub-amostras, profundidade de amostragem, formas de amostragem e tamanho do grid amostral. Isso porque próprio sistema convencional impôs limites de interferência estatística e alguns pressupostos matemáticos devem ser respeitados quando se quer, a partir dos resultados das análises, gerar mapas espacializando os resultados e as recomendações (SANTI; ROSSATO, 2010).

### **3.5 Produção de soja**

A soja é uma planta de ciclo anual, ereta, de crescimento determinado ou indeterminado (PENTEADO, 2007). É a cultura de maior expressão econômica em nosso país. O primeiro registro de cultivo de soja no Brasil data de 1914, no município de Santa Rosa, RS. Mas foi somente a partir dos anos 40 que ela adquiriu alguma importância econômica, merecendo o primeiro registro estatístico nacional em 1941, no Anuário Agrícola do RS: área cultivada de 640 ha, produção de 450 t e produtividade de 700 kg ha<sup>-1</sup>. Mas foi a partir da década de 1960, impulsionada pela política de subsídios ao trigo, visando autossuficiência, que a soja se estabeleceu como cultura economicamente importante para o Brasil. Nessa década, a sua produção multiplicou-se por cinco (passou de 206 mil toneladas, em 1960, para 1,056 milhão de toneladas, em 1969) e 98% desse volume era produzido nos três estados da Região Sul, onde prevaleceu a dobradinha, trigo no inverno e soja no verão.

A soja, como lavoura comercial, chegou ao Estado do Paraná em meados dos anos 50. Até então, a cultura era uma quase curiosidade. Sua produção era irrisória e as poucas e pequenas lavouras de soja existentes na região destinavam-se ao consumo doméstico - alimentação de suínos, principalmente. O total da produção não passava de 60 toneladas. No sudoeste e oeste do Estado, a cultura desenvolveu-se com a migração de colonos vindos do RS, onde a soja já era cultivada há mais tempo, principalmente em pequenas explorações familiares para uso na alimentação de suínos e havia bom conhecimento sobre as tecnologias de sua produção. O desenvolvimento ocorreu paralelamente com as demais regiões do Estado, com início em meados dos anos 50.

Segundo a CONAB (2010), na safra de 2009/2010, houve um acréscimo de área plantada de 6,8%, o que significa 1,48 milhões de ha, totalizando 23.225 milhões de ha. A produção estimada para o mesmo período foi de 67,4 milhões de toneladas, obtendo um acréscimo de 17,9% em relação à safra anterior de 2008/2009. As exportações de soja, o principal produto da pauta de exportação agrícola do Brasil, devem somar um recorde de 29 milhões de toneladas neste ano, segundo a ABIOVE (Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais), contra 28,5 milhões de toneladas em 2009.

O Paraná, o segundo produtor de soja do Brasil atrás de Mato Grosso, deve intensificar os trabalhos de plantio da nova safra apenas em outubro. A nova safra de soja do Paraná (2010/11) poderá atingir 13,72 milhões de toneladas, com uma queda de 1,3% em relação ao recorde de 13,91 milhões de toneladas registrado na temporada 2009/10, segundo o Departamento de Economia Rural (Deral), órgão do governo do Estado. A redução, apesar de um aumento na área plantada de 3% ante 09/10, para um recorde de 4,5 milhões de hectares, deverá ocorrer por conta de uma menor produtividade esperada, segundo o Deral (SAMORA, 2010).

### **3.6 Agricultura de precisão (AP)**

Os fundamentos da AP moderna, segundo a literatura, surgiram em 1929, nos Estados Unidos da América, e foram descritos por Linsley e Bauer na circular número 346 da Estação Experimental Agrícola da Universidade de Illinois (GOERING, 1993). Nessa época, os autores haviam constatado a existência de grandes variações quanto à necessidade de calagem em determinada área e que a aplicação de calcário deveria respeitar essa variabilidade. Essa filosofia, entretanto, foi preterida em virtude do desenvolvimento de equipamentos de tração mecânica que facilitaram a aplicação de insumos em taxas uniformes. O ressurgimento e disseminação da AP, na forma em que hoje é conhecida, ocorreu somente na década de 80, quando microcomputadores, sensores e sistemas de rastreamento terrestres ou via satélite foram disponibilizados e possibilitaram a difusão das técnicas (BALASTREIRE, 1998).

No Brasil, as primeiras ações de pesquisa na área foram realizadas na Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", da Universidade de São Paulo (ESALQ-USP), em 1997, onde um trabalho pioneiro com a cultura de milho resultou no primeiro mapa de variabilidade de colheita do Brasil (BALASTREIRE *et al.*, 1994). Também foram disponibilizadas, por várias empresas tradicionais do setor de máquinas e implementos agrícolas, ferramentas como monitores de colheita, amostradores de solo e equipamentos para a aplicação de insumos em taxa variada, que foram divulgadas e disponibilizadas ao produtor. Houve também crescimento nas iniciativas de pesquisa/extensão em AP, com envolvimento de instituições como ESALQ-USP, UNICAMP, EMBRAPA, Fundação ABC, IAPAR, UFSM, além de numerosas empresas privadas do setor agrícola e tecnológico e de cooperativas de produtores, bem como de produtores de forma isolada. São, também, cada vez mais numerosos os relatos e a divulgação de iniciativas na área, envolvendo várias culturas em diferentes estados brasileiros (PIRES *et al.*, 2004).

Segundo Molin (2002), uma definição mais atual de AP com visão sistêmica do conjunto de ações que a compõe pode ser adotada: a AP seria, acima de tudo, um sistema de gestão ou de gerenciamento da produção agrícola que emprega um conjunto de tecnologias e procedimentos para que as lavouras e sistemas de produção sejam otimizados, tendo como elemento-chave o manejo da variabilidade da produção e dos fatores envolvidos.

O ciclo completo da AP prevê, além das determinações de campo, o processamento de dados e a elaboração de mapas de disponibilidade e prescrição dos atributos para a correção de rumos. Para isso, existem numerosos aplicativos computacionais, desenvolvidos por entidades de pesquisa e empresas privadas, capazes de proporcionar o aproveitamento máximo dos dados coletados e a obtenção de informações relevantes para o sistema. Cada ferramenta disponível apresenta princípios próprios de funcionamento. Por exemplo, sensores de matéria orgânica são baseados em propriedades ópticas do solo, sensores de nutrientes trabalham com eletrodos de íons específicos, as análises de salinidade e de umidade do solo são efetuadas por meio da condutividade elétrica, e a de textura do solo, pelo estudo das propriedades acústicas do solo. Assim, merecem revisão à parte, para discussão mais detalhada (PIRES, *et al.*, 2004).

### **3.6.1 Aplicação de fertilizantes a taxas variáveis**

O alto dinamismo do sistema agrícola no espaço e no tempo, influenciado por fatores inerentes à planta, ao solo, ao clima e às ações antrópicas e a globalização da economia têm levado a uma necessidade de otimização deste sistema. Uma destas otimizações, associada ao conceito de AP, está relacionada à aplicação de agrotóxicos e fertilizantes

que, quando aplicados de maneira ineficiente, geram problemas ambientais e aumento do custo de produção (DODERMANN; PING, 2004).

O uso dessa abordagem possibilita ao produtor manejar ou variar as taxas de aplicação de fertilizantes num talhão, de acordo com as diferenças de produtividade da cultura ou dos parâmetros de fertilidade ao longo das paisagens. A agricultura moderna exige o uso de corretivos e fertilizantes em quantidades adequadas, de forma a atender ao critério econômico e ao mesmo tempo conservar a fertilidade do solo, mantendo ou elevando a produtividade das culturas. Um dos fatores que influencia a obtenção de melhores produtividades está baseado na adequada distribuição de nutrientes em função da necessidade das cultivares e da variabilidade espacial existente nos solos (PERIN, 2008).

A aplicação de fertilizantes em taxa variável, baseada na variabilidade do solo dentro de um campo, tem um potencial para reduzir sub e super fertilizações, e, assim, melhorar a eficiência de uso de fertilizantes, a produtividade das culturas e o lucro líquido da propriedade (FIEZ *et al.*, 1994).

A aplicação localizada de insumos é possível pela demarcação de unidades de gerenciamento que representem uma combinação homogênea de fatores limitantes da produtividade (FRIDGEN *et al.*, 2000). As unidades de gerenciamento podem ser delineadas por amostragens e técnicas estatísticas (STEWART; MCBRATNEY, 2000), ou por modelos considerando aspectos pedológicos, geomorfológicos, hidrológicos e ecológicos, descrevendo processos contínuos entre o sistema solo e os ambientes circunvizinhos (SÁ, 2001).

A utilização de mapas de aplicação de insumos com doses diferenciadas a partir de amostragem intensa e georreferenciada de solo é outra opção dinâmica temporalmente. Existe a possibilidade da simplificação da informação, representada pelo mapa de doses variadas, demarcando-se regiões que receberão doses uniformes, as quais podem ser referidas como unidades de aplicação para não se confundir com as unidades permanentes de gerenciamento. O controle da aplicação dos insumos é feito por dispositivos responsáveis pela variação da vazão, montados em equipamentos especializados para aplicação, principalmente de produtos sólidos, ou mesmo em semeadoras-adubadoras, e normalmente acionados por potência hidráulica. Para o caso de mapas com base em unidades de gerenciamento ou mesmo unidades de aplicação, a presença do controle automatizado não é obrigatória, pois as vazões de insumo serão alteradas apenas na transição entre unidades (MOLIN *et al.*, 2006).

### **3.7 Análise espacial da variabilidade**

Análise espacial é o estudo das propriedades e relacionamentos de um ou mais fenômenos, levando em consideração a localização espacial. Por meio da análise espacial é possível estimar propriedades e relacionamentos em locais não amostrados, de tal forma que os fenômenos possam ser expressos na forma de mapas. A análise espacial possibilita tanto uma visão holística do fenômeno, como uma visão específica mais detalhada de local em particular. Usualmente, em AP, a análise espacial é praticada a partir de um conjunto de amostras georreferenciadas submetidas a tratamentos estatísticos e geoestatísticos, com a finalidade de se avaliar a grau de dependência espacial dos atributos medidos (BIFFI, 2006).

A variabilidade dos fatores de produção está associada a múltiplas causas, desde a variabilidade climática até a representada pelo ambiente em torno de uma única semente (solo, oxigênio, disponibilidade de água e nutrientes etc.) que é depositada no solo. Entretanto, as formas de variabilidade que estão sendo estudadas e manejadas em AP podem ser classificadas em “Variabilidade Espacial” (aquela que ocorre com um atributo na área, por exemplo: variação da concentração de fósforo no solo em uma área de 20 ha), “Variabilidade Temporal” (aquela que ocorre ao longo do tempo, por exemplo: disponibilidade de água no solo em função da sazonalidade da precipitação pluvial) e uma terceira (que representa a ação do homem nas duas primeiras), chamada “Variabilidade Induzida pelo Manejo” (aquela criada pelas decisões de manejo tomadas nas áreas de cultivo, por exemplo: alocação de culturas e regulagem de máquinas). Esta última ocorre, por exemplo, quando há máquinas desgastadas e desreguladas, sistemas de cultivo diferenciados, partes da lavoura deixadas em pousio por vários anos e deficiência no controle de plantas daninhas (FARNHAM, 2000).

Conforme Carvalho *et al.* (2003), numa paisagem natural, o solo apresenta variabilidade espacial e temporal de seus atributos, resultante da interação de processos que comandam os fatores responsáveis por sua formação. A variabilidade espacial dos atributos do solo pode ser influenciada pelos seus fatores intrínsecos (fatores de formação, que são o material de origem, relevo, clima, organismos e tempo), e pelos fatores extrínsecos, normalmente empreendidos pelas práticas de manejo do solo (adubação, calagem, dentre outros). Além disso, o solo cultivado revela fontes adicionais de heterogeneidade originadas, exclusivamente, pelo efeito antrópico da agricultura.

Segundo Pires *et al.* (2004), em AP existem dois enfoques para manejar a variabilidade por meio da aplicação variável de insumos: o manejo baseado em mapas e o manejo baseado em sensores (“*sense and apply*” ou “*sense and control*”). O primeiro deles emprega a tecnologia do GPS e se baseia em amostragem e mapeamento dos fatores de produção a serem manejados de forma diferenciada (fertilidade do solo, doenças, produtividade de grãos etc.) e posterior elaboração de mapas de prescrição para a aplicação variável dos insumos (fertilizantes, herbicidas etc.). O segundo enfoque, baseado em sensores, é o sensoriamento direto do solo e/ou cultura para a aplicação imediata dos

insumos de forma variável. Neste método, os insumos são aplicados com base em informações obtidas, em tempo real, por meio de sensores, e usadas para controlar, eletronicamente, as operações de campo. O uso de uma técnica ou de outra dependerá do nível tecnológico disponível e do custo operacional envolvido (ZHANG *et al.*, 2002).

### **3.8 Variabilidade nos campos produtivos**

A variabilidade do solo é causada por variações no clima, topografia, material de origem, vegetação, processos geológicos e pedológicos complexos e práticas de manejo do solo. Esses fatores influenciam a variabilidade em diferentes escalas: 1) em escala regional, fatores climáticos, sistemas de uso do solo, cobertura vegetativa e características da superfície do solo são os principais fatores que afetam a variação; 2) Em escala de campo, os principais fatores que influenciam a variabilidade são o tipo de solo, a topografia, a cultura anterior e as práticas de manejo do solo; 3) Em menor escala, a orientação da linha da cultura, o método de aplicação de nutrientes, o cultivo e a compactação podem predominar como as causas de variabilidade (DELLAMEA, 2008).

A adoção da AP tem sido feita com critério realizando primeiramente um levantamento da variabilidade presente nos campos produtivos, refletida pela variabilidade espacial da produção. Por este motivo é que o mapeamento da produtividade tem sido o primeiro passo adotado. Com a variabilidade expressa nos mapas de produtividade tem sido possível buscar os fatores responsáveis pelas diferenças de produtividade no campo produtivo por meio de visitas e amostragens dos fatores "suspeitos", tais como solo, compactação e plantas daninhas que tenham permanecido após a colheita. As informações do mapa de produtividade e dos mapas gerados a partir das amostragens realizadas permitem a interpretação e a realização de correlações entre os fatores e a produtividade para verificar a importância de cada um deles. Uma vez identificados os responsáveis pela variabilidade da produção, pode-se partir para a fase seguinte que é a da interferência, corrigindo os fatores que podem ser manejados como, por exemplo: material genético, fertilizantes, defensivos e outro (JORGE; TORRE-NETO, 2005).

Para minimizar a variabilidade é necessário, primeiramente, que se conheça sua magnitude, identificando-a e quantificando-a, por meio de parâmetros de solo, de planta e de clima, mapeando "áreas problemas" (com níveis abaixo dos considerados adequados) e, posteriormente, empregando práticas de manejo capazes de minimizá-las. Para ajudar a entender as razões da variabilidade e manejá-la corretamente, vários métodos têm sido desenvolvidos, incluindo muitos aplicativos computacionais.

Após identificar a variação de atributos, considerando-se inclusive a variação temporal, o passo mais importante seria encontrar as relações de causa e efeito entre os atributos do solo e os dados de produtividade. Após apontar as causas e efeitos que

determinam a variabilidade na produtividade das culturas, faz-se necessário intervir de maneira localizada, a fim de eliminar ou amenizar tais limitantes (DELLAMEA *et al.*, 2007; JORGE; TORRE-NETO, 2005; PIRES, *et al.*, 2004).

### 3.9 Estatística descritiva

A análise estatística exploratória dos dados é uma etapa fundamental que antecede a análise geoestatística. Deve-se verificar a normalidade dos dados e se há candidatos a dados discrepantes (“*outliers*”) ou a necessidade de transformação dos dados para sua normalização (LEAL, 2002).

Para que os dados sejam organizados e descritos formalmente, de modo que possam ser explorados, procurando possíveis tendências ou mesmo para o relato e exposição de suas características, utilizam-se técnicas chamadas descritivas ou exploratórias. O maior interesse, depois de obtidos os dados, é saber como os dados estão se comportando. Uma descrição dos mesmos com suas propriedades deve dar uma ideia global sobre o conjunto de dados, como os valores das variáveis observadas estão se distribuindo entre os indivíduos, e se houver, indicar quais as tendências (SILVA *et al.*, 2007).

### 3.10 Interpolação

Interpolação é um procedimento de estimação de um atributo em locais não amostrados a partir de pontos amostrados na mesma área ou região. Uma interpolação espacial converte dados de observações pontuais em campos contínuos, produzindo padrões espaciais que podem ser comparados com outras entidades espaciais contínuas. O raciocínio que está na base da interpolação é que, em média, valores do atributo tendem a ser similar em locais mais próximos do que em locais mais afastados.

Inúmeros métodos de interpolação, com diversos níveis de complexidade, estão disponíveis na literatura. Os métodos de interpolação mais comuns e de uso em conjuntos de dados relacionados à AP são: vizinho próximo, média local, inverso da distância a uma potência, e krigagem (MOLIN, 2001). A krigagem, um dos métodos geoestatísticos de interpolação, apresenta propriedades ótimas de estimação em dados esparsos, pois leva em consideração as características espaciais de autocorrelação de variáveis regionalizadas, utiliza distâncias ponderadas e estimação por médias móveis (ORTIZ, 2005).

Para Yasrebi *et al.* (2009) krigagem e inverso da distância elevado a uma potência são os dois métodos comumente usados na caracterização da variabilidade espacial e na interpolação de pontos amostrais. Os resultados obtidos na comparação desses dois métodos indicaram a krigagem como o método de interpolação mais adequado. Estudos

feitos por Kravchenko e Bullock (1999) demonstram que a ponderação do inverso da distância é mais fácil de realizar, enquanto a Krigagem consome mais tempo e é mais complicada de se aplicar.

O método do inverso da distância de uma potência ou método da média ponderada pode ser exato ou aproximado, dependendo da configuração fornecida pelo usuário. Os dados são ponderados durante a interpolação, tal que a influência de um ponto relativo ao outro declina com o seu afastamento do nó da grade. O peso é assumido para os dados através do uso de uma potência de peso que controla de que maneira os fatores de ponderação vão diminuir à medida que a distância do nó da grade aumenta. Quanto maior a potência de peso menor o efeito que os pontos têm na grade de nós durante a interpolação (SOARES, 2006).

Normalmente, o método do inverso da distância de uma potência comporta-se como um interpolador exato. Quando se calcula o nó da grade, os pesos atribuídos para os pontos dados são frações e a soma de todos os pesos é igual a um. Quando uma determinada observação é coincidente com o nó da grade, a distância entre esta observação e o nó da grade é zero, e a esta observação é dado peso um, enquanto a todas as outras são dados peso zero (SOARES, 2006).

### **3.11 Mapas temáticos e sistemas de informação geográfica**

A coleta de informações sobre a distribuição geográfica de recursos minerais, propriedades, animais e plantas sempre foi uma parte importante das atividades das sociedades organizadas. Até recentemente, no entanto, isto era feito apenas em documentos e mapas em papel. Sendo assim, as informações eram geralmente de fácil acesso e manipulação, mas dificultavam uma análise que combinasse diversos mapas e dados. Os SIG são um conjunto de programas, equipamentos, metodologias, dados e 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. Em outras palavras, trata-se de ferramentas e recursos tecnológicos capazes de interferir na administração do ciclo produtivo da agricultura, propiciando um alto grau de detalhamento e tornando a tomada de decisão segura e garantida (TOSI, 2000).

Conforme Miranda (2005), o SIG permite muitas análises espaciais e assim cria a possibilidade de gerar muitos mapas. À medida que aumenta o conjunto de dados disponíveis, cresce também a capacidade de novas análises e novos mapas, sendo possível reclassificá-los e fazer comparações entre mapas. No processo de reclassificação, o SIG reagrupa as classes do mapa original, geralmente por meio de um processo de fusão, em

novas classes, gerando um novo mapa. No processo de reclassificação, novos padrões espaciais são criados.

O mapeamento da produtividade ou de atributos do solo compreende a aquisição de informações para a representação, na forma de um mapa, da variabilidade espacial da lavoura (GIMENEZ; MOLIN, 2004).

Quando uma grande quantidade de dados é coletada, como é o caso do mapeamento de colheita, em que são coletados pontos amostrais a cada um ou dois segundos, técnicas de suavização podem ser utilizadas para evidenciar as tendências no mapa. Porém, quando os dados são esparsos, como nas amostragens de solo, são necessárias técnicas de interpolação para produzir mapas dos componentes da fertilidade ou da textura, por exemplo (MOLIN, 2001).

Landis e Koch (1977) consideraram que um método eficiente de comparação entre mapas é fazer uma sobreposição e uma avaliação *pixel-a-pixel*, de modo a identificar as áreas de concordância entre os dois mapas. Para expressar o grau de concordância entre os mapas classificados num único valor utilizaram o índice Kappa. Este índice assume um valor máximo igual a um, no qual os valores mais elevados representam maior correspondência entre as classes dos dois mapas considerados.

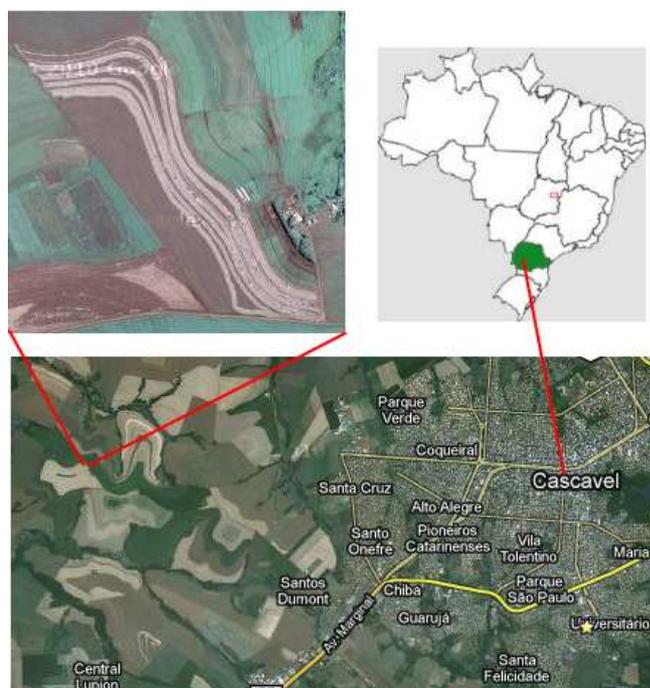
Ainda, visando a comparação de mapas temáticos, Coelho *et al.* (2009) propuseram o coeficiente de desvio relativo (CDR). Ele expressa a diferença média, em módulo, dos valores interpolados em um mapa temático quando comparado com um mapa assumido como referência. Os pesquisadores concluíram que o CDR mostrou-se eficiente na comparação de mapas.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Caracterização da área experimental

O experimento foi iniciado em abril de 2009 e conduzido até janeiro de 2011, em uma área agrícola localizada no município de Cascavel, situado na região oeste do Paraná, com coordenadas geográficas de 24° 57' 30 S e 53° 34' 03" (Figura 1), a uma altitude média de 785 metros. O clima é subtropical úmido e mesotérmico, com média anual de precipitação de 1971 mm e média anual de temperatura entre 11 e 19°C. O solo foi caracterizado como Latossolo vermelho distroférico típico (EMBRAPA, 2010).

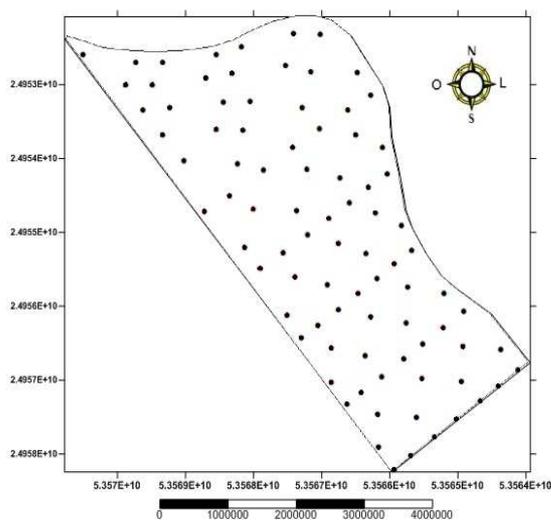
A área experimental possui 19,63 ha, sendo manejada sob sistema de plantio direto há 10 anos, com sucessão das culturas de soja, milho e aveia, com periódicas correções de calcário e adubação com nitrogênio, fósforo e potássio, com base nas análises químicas do solo e recomendações técnicas. Anteriormente à instalação do experimento, a área havia sido cultivada com milho, havendo restos vegetais remanescentes da colheita sobre o solo. No georreferenciamento da área foi usado o receptor GPS Trimble Geo Explorer XT 2005, com correção pós-processada.



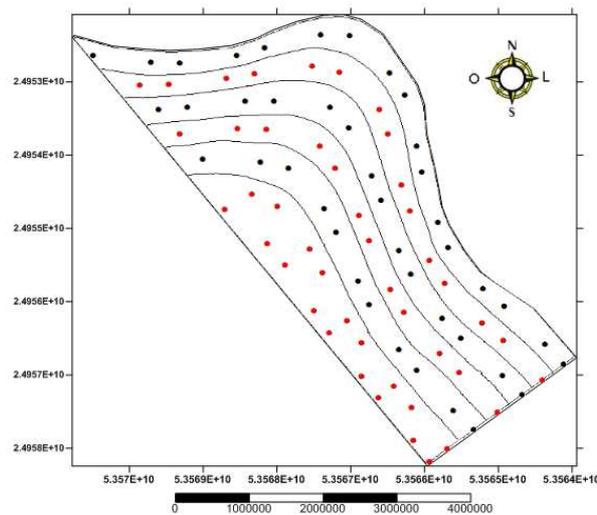
**Figura 1** Localização do experimento.  
Fonte: Google Earth (2010).

## 4.2 Amostragem de solo e análises

Utilizando o software Trimble GPS Pathfinder Office versão 4.0, foi gerada uma grade de espaçamento irregular com distâncias variando em 40 e 80 metros, sendo demarcados os pontos amostrais que foram direcionados nas respectivas faixas (curvas de nível) destinadas para os sistemas de cultivo convencional (pontos em vermelho) e AP (pontos em cor preta). Com base nas distâncias observadas foram georreferenciados 87 pontos (Figura 2 e 3 ). A grade irregular e com distâncias variadas, permitiu uma melhor distribuição dos pontos ao longo da área do experimento.



**Figura 2** Localização dos pontos de amostragem do solo (distância em metros).



**Figura 3** Localização dos pontos de amostragem do solo de acordo com as faixas de tratamento (Convencional em vermelho e AP em preto) (distância em metros).

Em cada um dos pontos foram coletadas amostra de solo para análise química e física. Para realizar a localização dos pontos amostrais, foi utilizado o receptor GPS com os pontos previamente georreferenciados. Em cada ponto, com auxílio de um trado elétrico, foram coletadas quatro amostras a profundidade de 0-0,20 m e em um raio de 3 m do ponto determinado pela grade e calculada a média para representar cada ponto amostral (adaptado de WOLLENHAUPT *et al.*, 1994). Foram feitas ainda quatro medições da resistência mecânica do solo à penetração, na camada de 0-0,20 m, em cada ponto amostral, utilizando-se um medidor eletrônico de compactação do solo Falker PGL 1020.

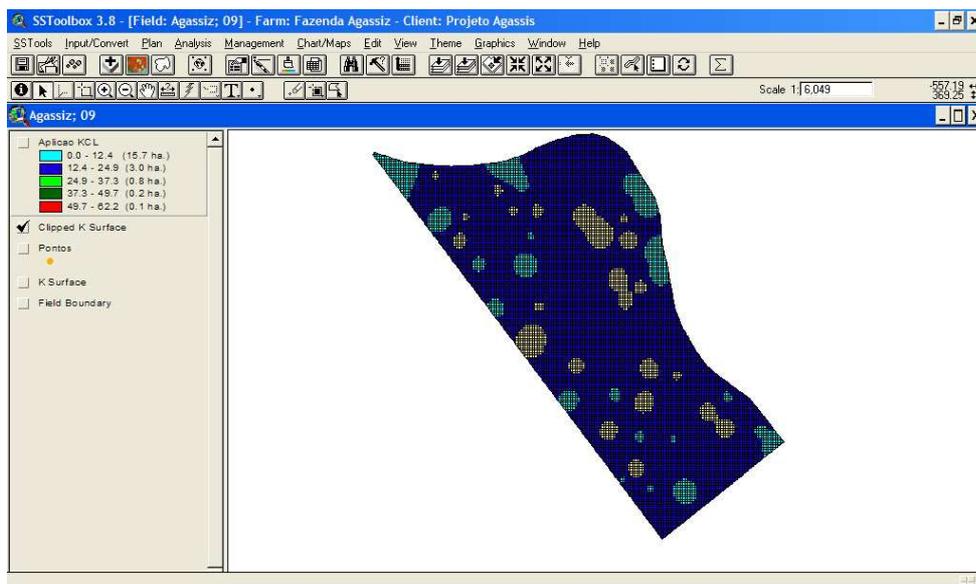
Utilizando anel volumétrico, foi determinada a porosidade total, macroporosidade e microporosidade do solo, sendo as amostras saturadas por 24 h em bandeja com água até dois terços da altura do anel. Após o período de saturação, as amostras foram drenadas no potencial equivalente a -0,006 Mpa, utilizando-se uma mesa de tensão. Por meio do método do volume conhecido e teor de água do solo obtido na determinação da porosidade do solo determinou-se a densidade aparente do solo (EMBRAPA, 1997).

Também foi determinada a textura do solo em cada local amostral.

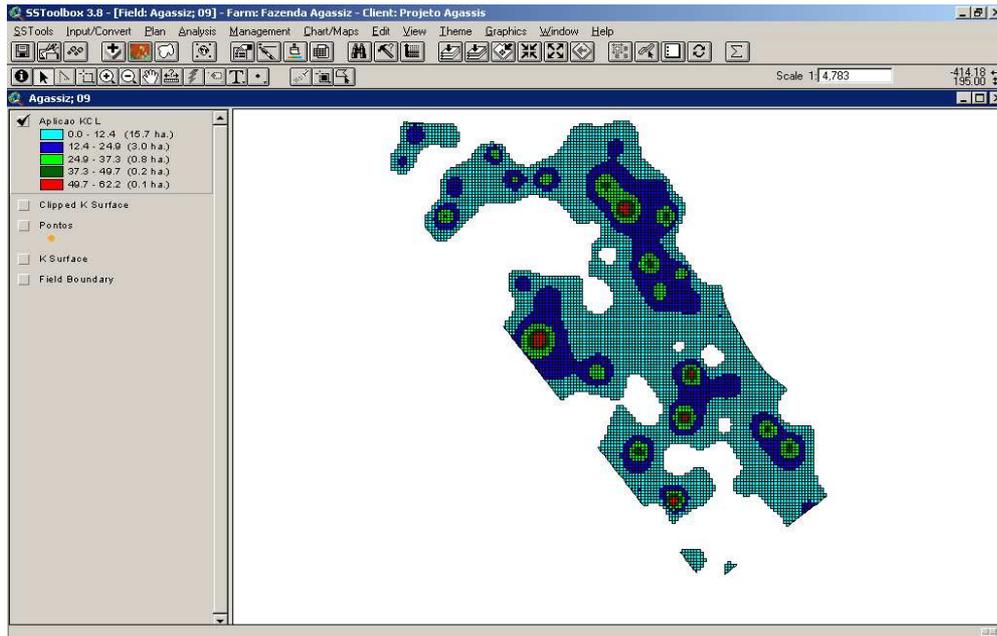
### 4.3 Instalação e condução do experimento

A semeadura da soja foi realizada em solo coberto com restos vegetais da colheita de milho, sem revolvimento ou preparo do solo (plantio direto). A densidade de semeadura foi de 14 plantas  $m^{-1}$ , em espaçamento de 0,45 m, seguindo recomendação para a cultivar utilizada, Syngenta Vmax RR. A semeadura e adubação na área AP foram feitas em duas passagens: a primeira utilizando-se uma semeadora *Stara Victoria Light* (com 7 linhas) com módulo para AP, aplicando 225  $kg\ ha^{-1}$  da formulação 0-20-20 em taxa variável. A segunda, aplicando 55  $kg\ ha^{-1}$  de  $P_2O_5$  a taxa constante e semeando soja, com uma semeadora Planti Center Terraçu's 11000, com 11 linhas. Para a semeadura da soja e a aplicação de insumos na área de AC, isto é, adubação convencional, foram aplicados 225  $kg\ ha^{-1}$  da formulação 0-20-20, utilizando-se uma semeadora Planti Center Terraçu's 11000, com 11 linhas.

Com base nas análises químicas do solo, foi gerado um mapa de disponibilidade de nutrientes (P, K) do solo (Figura 4). Baseado no mapa de disponibilidade e com as quantidades de insumos sugeridas para este solo e esta cultura (COSTA e OLIVEIRA, 2001) foi possível a construção de um mapa de aplicação localizada para os atributos fósforo e cloreto de potássio, utilizando o software SSToolbox 3.8 (Figura 5). Como a semeadora *Stara Victoria Light* possui somente uma caixa de sementes por linha, foi necessário passar a semeadora duas vezes no mesmo local. Na primeira vez ela aplicou 225  $kg\ ha^{-1}$  da formulação 0-20-20, e na segunda vez o  $K_2O$  foi aplicado em taxa variável. A escolha de aplicar somente o K em taxa variável foi que ele foi o único macro nutriente que foi encontrado em valores abaixo da média, segundo classificação dos nutrientes, conforme COSTA e OLIVEIRA (2001).



**Figura 4** Tela do software apresentando o mapa de disponibilidade de  $K_2O$ .



**Figura 5** Tela do software apresentando a mapa de necessidade aplicação de KCI.

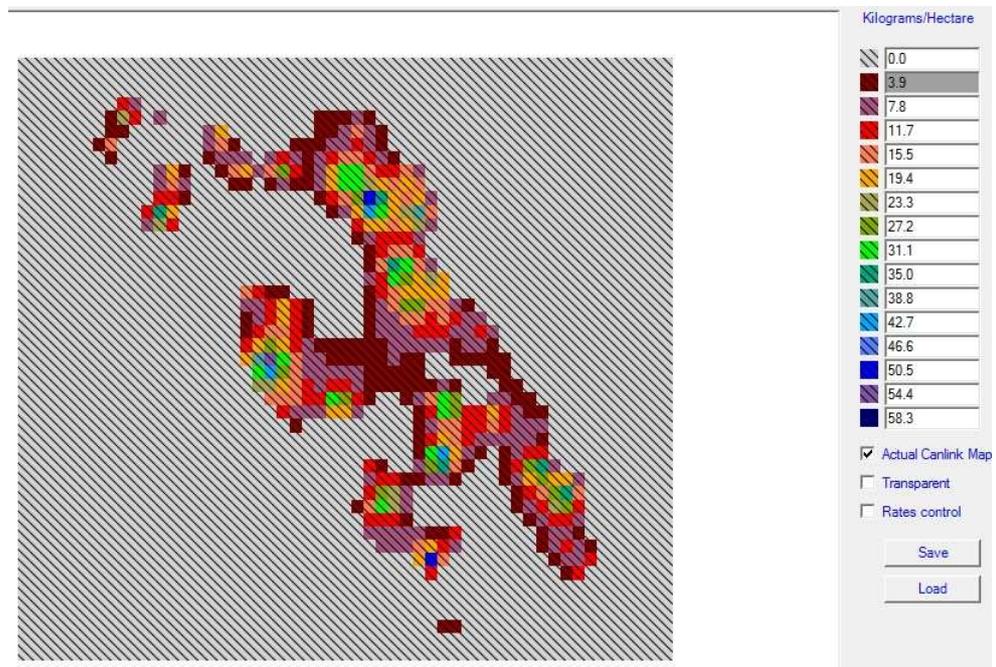
Após a construção dos mapas de aplicação, os mesmos foram convertidos para uma extensão específica (.shp), para que pudessem ser interpretados pelo monitor controlador da máquina. Esta conversão foi feita através do software SSToolbox e posteriormente importada ao controlador PE monitor Stara Falcon 3500 (Figura 6).



**Figura 6** Imagem do monitor de controle Stara Falcon 3500.

Após a conversão dos dados para leitura no monitor, foi feita a alimentação manual do equipamento, através de um cartão de memória. O mapa convertido para leitura no

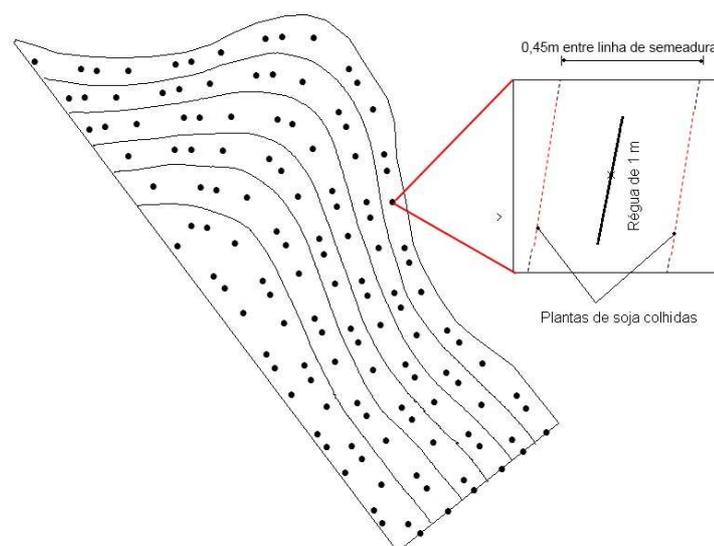
equipamento de monitoração tem uma aparência diferenciada (Figura 7), isto ocorre pela incapacidade mecânica da máquina de trabalhar em taxas muito baixas.



**Figura 7** Imagem da aplicação de KCL no monitor de controle.

#### 4.5 Produtividade

A amostragem para qualificar a produtividade da soja foi realizada de forma manual e separadamente, em 130 pontos amostrais (Figura 8).



**Figura 8** Localização dos pontos de referência (130) para colheita da soja.

Esta amostragem foi de 130 pontos e não de 80 pontos como na amostragem do solo, porque os dados de produtividade foram divididos, aproximadamente, pela metade ao se separar a produtividade AC da AP. Foi feita uma grade de espaçamento irregular com distâncias variando em 20, 40 e 80 metros. Cada amostra foi composta por plantas de duas linhas de semeadura, em um percurso de 1 metro, representando uma área amostrada de 0,90 m<sup>2</sup>. Após coletada a amostra, as plantas foram acondicionadas em sacos (tipo rafia), trilhadas e medidas a massa total da amostra e o teor de água dos grãos, visando corrigi-los para um nível de teor de água de 12%.

#### 4.6 Análise dos dados

Visando a comparação entre os sistemas de plantio convencional e AP, os dados foram analisados separadamente. Para isso, selecionaram-se, para cada sistema de plantio, os pontos amostrais os quais representam cada tratamento. Desta forma, AC e AP foram representados pelas amostras conforme Tabela 1. Foi ainda realizada uma análise com a junção dos dois conjuntos de dados, sendo chamado Sistema Misto.

**Tabela 1** Número de amostras levantadas em cada sistemas de cultivo

Sistema	Número de pontos amostrais		
	Produtividade	Químicos/Físicos/ RMP/Densidade	Textura
AP	62	42	21
AC	68	45	24
Misto	130	87	45

RMP – Resistência Mecânica à Penetração

Os dados de cada conjunto foram analisados por meio da análise exploratória, sendo calculadas as medidas de posição (média e mediana), de dispersão (desvio-padrão e coeficiente de variação) e de forma da distribuição (coeficiente de assimetria e coeficiente de curtose). A hipótese de normalidade dos dados foi testada pelos testes de Anderson-Darling e Kolmogorov-Smirnov, ao nível de 5% de probabilidade, utilizando o software Minitab 14. O coeficiente de variação (CV) foi considerado baixo, quando  $CV \leq 10\%$  (homocedasticidade); médio, quando  $10\% < CV \leq 20\%$ ; alto, quando  $20\% < CV \leq 30\%$ ; e muito alto, quando  $CV > 30\%$  (heterocedasticidade) (PIMENTEL-GOMES e GARCIA, 2002).

Os dados referentes a cada atributo foram interpolados pelo método da krigagem ordinária, considerando os parâmetros de efeito pepita, patamar e alcance definidos no semivariograma experimental. O software ArcView 9.2 foi utilizado para elaboração dos semivariogramas, sendo o ajuste para cada modelo (exponencial, gaussiano e esférico)

realizado por meio do método de estimação de parâmetros OLS (*Ordinary Last Square*) (padrão do software).

Para cada modelo, foram coletadas as estatísticas de Erro Médio (ER, equação 1), Erro Médio Reduzido ( $\overline{ER}$ , equação 2), o Desvio-Padrão dos Erros Médios (SE, equação 3) e desvio-padrão dos Erros Médios Reduzidos (SER, equação 4), fornecidas pela validação cruzada.

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

$$\overline{ER} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{Z(s_i) - \hat{Z}(s_{(i)})}{\sigma(\hat{Z}(s_{(i)}))} \quad (2)$$

$$SE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z(s_i) - \hat{Z}(s_{(i)})} \quad (3)$$

$$S_{ER} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Z(s_i) - \hat{Z}(s_{(i)})|}{\sigma(\hat{Z}(s_{(i)}))}} \quad (4)$$

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

Como a seleção do melhor modelo é realizado normalmente de forma subjetiva, utilizou-se o índice de comparação de erros (ICE, equação 5, BAZZI *et al.*, 2009), que na seleção de  $i$  modelos proporciona um valor tão menor, quanto mais próximo de zero for o  $\overline{ER}$  (erro médio reduzido) e mais perto de 1 for o  $SER$  (desvio padrão do erro médio reduzido). Portanto na escolha entre diversos modelos, aquele que tiver menor ICE foi considerado o melhor modelo.

$$ICE_i = A + B \quad (5)$$

em que:

$$A = \begin{cases} \frac{ABS(\overline{ER})_i}{MAX(ABS(\overline{ER}))} & , \text{ quando } MAX(ABS(\overline{ER})) > 0 \\ & , \text{ quando } MAX(ABS(\overline{ER})) = 0 \end{cases}$$

$$B = \begin{cases} \frac{ABS(S_{ER} - 1)_i}{MAX(ABS(S_{ER} - 1))} & , \text{ quando } MAX(ABS(S_{ER})) > 0 \\ & , \text{ quando } MAX(ABS(S_{ER})) = 0 \end{cases}$$

$ICE_i$  é o índice de comparação de erros para o modelo  $i$ .

O grau de dependência espacial foi classificado de acordo com o índice de dependência espacial (IDE, Equação 6), sendo que Cambardella *et al.* (1994) propuseram os seguintes intervalos:  $IDE \leq 25\%$  - forte dependência espacial;  $25 < IDE < 75\%$  - moderada dependência espacial e  $IDE \geq 75\%$  - fraca dependência espacial.

$$IDE = \frac{C_0}{C_1 + C_0} * 100 \quad (6)$$

em que  $C_0$  é o efeito pepita e  $C_1$  a contribuição.

Para comparação dos mapas utilizou-se o coeficiente de desvio relativo (CDR) proposto por Coelho *et al.* (2009), o qual expressa a diferença média em módulo dos valores interpolados em um mapa temático quando comparado com um mapa assumido como referência. Neste estudo, comparou-se os dados de AP com AC, considerado como referência, o que pode ser observado na equação 7:

$$CDR = \sum_{i=1}^n \left| \frac{V_{iAP} - V_{iAC}}{V_{iAC}} \right| * \frac{100}{n} \quad (7)$$

em que,  $n$  é o número de pontos interpolados;  $V_{iAC}$  é o valor de referência (AC) no ponto;  $V_{iAP}$  é o valor no ponto  $i$  para AP.

Para análise de correlação entre as variáveis foi utilizado o coeficiente de correlação linear de Pearson (R).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Análise exploratória

#### 5.1.1 Sistema AC

Pode-se verificar (Tabela 2) que no aspecto textural o solo apresenta-se como argiloso (mínimo de 60% de argila). Os coeficientes de variação para argila, areia e silte foram de 8,6% (baixo), 45,0 (muito alto) e 11,3 (médio), respectivamente (PIMENTEL-GOMES e GARCIA, 2002). Destaque-se a grande variabilidade da textura do solo visto que usualmente só se faz uma amostra composta por talhão. No aspecto de compactação, verifica-se que a área apresenta-se com compactação mais acentuada na camada de 0,10 a 0,20 m, onde há maior resistência do solo à penetração (em média 2468 kPa). A produtividade apesar de possuir valor médio próximo à mediana, possui CV classificado como alto (entre 20 e 30%). Os dados químicos apresentaram-se com CV alto (P, K e Cu) e moderado a baixo para os demais atributos. Somente os atributos areia, zinco e IC\_10\_20 não apresentaram distribuição normal de probabilidade a 5% de probabilidade.

A maioria dos parâmetros apresentou distribuição simétrica e mesocúrtica. Exceção para a argila com distribuição leptocúrtica e Fe com assimetria positiva.

**Tabela 2** Estatística exploratória das 45 amostras da AC

Variável	Mínimo	Média	Mediana	Máximo	DP	CV	Assimetria	Curtose
Produtividade (t ha <sup>-1</sup> )	0,10	2,63	2,56	5,62	0,75	28,50	0,55(a)	4,14(B)
Argila (%)	60,00	69,46	71,50	79,00	6,01	8,60	-0,41(a)	-1,20(C)
Areia*(%)	6,00	10,63	8,50	19,00	4,78	45,00	0,80(a)	-1,10(A)
Silte (%)	15,00	19,92	19,50	24,00	2,24	11,30	0,01(a)	-0,46(A)
P (mg dm <sup>-3</sup> )	9,60	18,13	17,00	30,00	4,90	27,00	0,54(a)	-0,27(A)
C (g dm <sup>-3</sup> )	21,82	28,76	29,61	36,62	3,38	11,80	-0,23(a)	-0,59(A)
pH	5,00	5,56	5,60	6,00	0,24	4,30	-0,26(a)	-0,50(A)
H+Al (cmolc dm <sup>-3</sup> )	3,18	4,86	4,96	7,20	0,91	18,60	0,55(a)	-0,01(A)
Ca (cmolc dm <sup>-3</sup> )	5,52	7,59	7,57	9,60	1,00	13,10	-0,11(a)	-0,34(A)
Mg (cmolc dm <sup>-3</sup> )	1,51	2,35	2,33	3,11	0,38	16,30	0,05(a)	-0,03(A)
K (cmolc dm <sup>-3</sup> )	0,15	0,28	0,28	0,44	0,06	23,50	0,22(a)	-0,19(A)
Cu (mg dm <sup>-3</sup> )	1,20	2,57	2,60	4,00	0,65	25,10	-0,09(a)	-0,78(A)
Fe (mg dm <sup>-3</sup> )	29,00	34,44	35,00	47,00	3,72	10,80	0,73(b)	1,47(A)
Mn (mg dm <sup>-3</sup> )	39,00	63,93	63,00	92,00	11,97	18,70	-0,10(a)	-0,18(A)
Zn* (mg dm <sup>-3</sup> )	1,00	4,11	0,53	17,90	3,57	12,70	1,94(a)	4,93(A)
IC_0_10 (kPa)	1101	1683	1698	2380	282,40	16,80	0,15(a)	-0,22(A)
IC_10_20* (kPa)	1551	2468	2248	3769	518,40	21,00	0,52(a)	-0,65(A)
IC_0_20 (kPa)	1482	2075	2018	2995	365,10	17,60	0,48(a)	-0,53(A)

DP - Desvio Padrão; CV - Coeficiente de Variação (%)

\*Não normal pelos testes de Anderson-Darling e Kolmogorov-Smirnov.

Assimetria - distribuição simétrica (a), assimetria positiva (b), assimetria negativa (c);

Curtose - mesocúrtica (A), platicúrtica (B), leptocúrtica (C)

Comparando-se os valores encontrados para os atributos do solo com os níveis de interpretação (Tabela 3) sugeridos por Costa e Oliveira (2001), o teor de Zn foi classificado como baixo (52%) ou médio (24%) dos pontos amostrais. O teor do P no solo foi classificado como muito alto em toda a área assim como em 54,8% das amostras do atributo K, que foi classificado nas demais amostras como médio (9,52%) ou alto (35,7%). Os elementos Ca, Mg, Mn foram classificados como tendo alto teor em toda área, sendo que para C esta classificação se manteve para 95% das amostras e para Cu em 83%. O teor do Fe foi classificado com médio em 95% dos pontos amostrais.

Percebe-se que a variabilidade dos atributos se manteve mais acentuada nos atributos K e Zn e moderada variabilidade para os atributos Ca, Mg e Mn ( $10\% < CV < 20\%$ ), considerando que a classificação se deu em uma única faixa de classificação, embora sem haver limites superiores no sistema de classificação. O atributo P, apesar de ter sido classificado em uma única faixa, apresenta-se com CV alto (27,0%). Pode se concluir que todos os atributos estudados estavam em nível de disponibilidade suficientes ao desenvolvimento da cultura, com exceção de 52% da área que estava faltando Zn.

**Tabela 3** Níveis de interpretação dos atributos químicos do solo com a porcentagem de pontos amostrais encontrada

Atributo		Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito alto
P (mg dm <sup>-3</sup> )	Classificação % Encontrado		≤ 3,0	3,1 - 6,0	6,1 - 9,0	>9,0 100%
K (cmolc dm <sup>-3</sup> )	Classificação % Encontrado		≤ 0,10	0,11 - 0,20 9,5%	0,21 - 0,30 35,7%	>0,30 54,8%
Ca (cmolc dm <sup>-3</sup> )	Classificação % Encontrado		≤ 2,0	2,1 - 4,0	>4,0 100%	
Mg (cmolc dm <sup>-3</sup> )	Classificação % Encontrado	<0,40	0,40 - 0,60	0,61 - 0,80	>0,80 100%	
C (g dm <sup>-3</sup> )	Classificação % Encontrado	<9,0	9,0 - 14,0	15,0 - 20,0	21,0-35,0 95%	>35,0 5%
Cu (mg dm <sup>-3</sup> )	Classificação % Encontrado		< 0,8	0,8 - 1,7 17%	> 1,7 83%	
Zn (mg dm <sup>-3</sup> )	Classificação % Encontrado		< 3,0 52%	3,0 - 7,0 24%	>7,0 24%	
Fe (mg dm <sup>-3</sup> )	Classificação % Encontrado		< 15,0	15,0 - 40,0 95%	> 40 5,0%	
Mn (mg dm <sup>-3</sup> )	Classificação % Encontrado		< 15,0	15,0 - 30,0	>30,0 100%	

Fonte: COSTA e OLIVEIRA (2001)

### 5.1.2 Sistema AP

Verifica-se (Tabela 4) que para os dados de produtividade houve aumento no CV, quando comparado com os dados apresentados no AC (de 28,5% para 34,8%), sendo classificado como muito alto (Heterocedasticidade). Além deste fator, verificou-se que a produtividade média também foi menor (AC= 2,63 t ha<sup>-1</sup>; AP= 2,48 t ha<sup>-1</sup>). Da mesma forma

que no AC, o solo pode ser classificado como argiloso e pode-se verificar que apesar da RMP ser menor que no AC, possui a camada superficial mais compacta superficial (0-0,10m). Verificou-se que os atributos químicos P, K, Cu, Zn puderam ser classificados como heterocedásticos (CV > 30%) e o Fe e pH homocedásticos (CV < 10%). Os demais foram classificados como CV moderado ou alto. Da mesma forma como ocorrido no sistema AP, os atributos Zn e IC\_10\_20 não se apresentaram com distribuição normal, assim como o atributo P.

Os parâmetros apresentaram distribuição simétrica em onze casos (argila, areia, C, pH, H+Al, Ca, K, Cu, Fe, Mn e IC\_0\_10) e assimétrica positiva em sete casos (produtividade, silte, P, Mg, Zn, IC\_10\_20 e IC\_0\_20). Treze casos apresentaram distribuição mesocúrtica (argila, silte, areia, C, pH, H+Al, Ca, Mg, Cu, Zn, Fe, Mn e IC\_0\_10) e 5 casos deles, platicúrtica (produtividade, P, K, IC\_10\_20 e IC\_0\_20).

**Tabela 4** Estatística exploratória das 42 amostras dos dados do sistema AP

Variável	Mínimo	Média	Mediana	Máximo	DP	CV	Assimetria	Curtose
Produtividade (t ha <sup>-1</sup> )	0,40	2,50	2,50	5,80	0,86	34,90	0,94(b)	2,74(B)
Argila (%)	65,00	71,50	72,00	77,00	3,39	4,70	-0,57(a)	-0,51(A)
Areia*(%)	17,00	19,40	19,00	25,00	2,27	11,70	1,28(b)	0,90(A)
Silte (%)	6,00	9,00	9,00	15,00	2,09	23,00	0,95(a)	1,84(A)
P (mg dm <sup>-3</sup> )	23,40	29,00	29,00	35,80	2,97	10,20	0,20(a)	-0,44(A)
C (g dm <sup>-3</sup> )	10,10	21,70	19,50	71,60	10,52	48,50	2,89(b)	11,88(B)
pH	5,00	5,50	5,50	6,10	0,28	5,00	0,20(a)	-0,77(A)
H+Al (cmolc dm <sup>-3</sup> )	3,20	4,90	5,00	6,70	0,93	18,80	-0,04(a)	-0,56(A)
Ca (cmolc dm <sup>-3</sup> )	5,90	7,50	7,40	9,90	0,97	12,90	0,36(a)	-0,52(A)
Mg (cmolc dm <sup>-3</sup> )	1,90	2,60	2,50	3,70	0,40	15,90	0,59(b)	0,21(A)
K (cmolc dm <sup>-3</sup> )	0,20	0,30	0,30	0,90	0,13	37,50	2,18(a)	8,12(B)
Cu (mg dm <sup>-3</sup> )	1,30	2,60	2,50	4,10	0,78	30,40	0,36(a)	-0,88(A)
Fe (mg dm <sup>-3</sup> )	1,00	4,20	2,80	11,60	3,23	77,20	0,88(b)	-0,54(A)
Mn (mg dm <sup>-3</sup> )	28,00	34,70	34,00	44,00	3,29	9,50	0,45(a)	0,54(A)
Zn* (mg dm <sup>-3</sup> )	47,00	69,80	69,00	98,00	11,72	16,80	0,33(a)	-0,13(A)
IC_0_10 (kPa)	1099	1601	1599	2255	281,80	17,60	0(a)	-0,60(A)
IC_10_20* (kPa)	1804	2226	2161	3065	235,50	10,60	1,29(b)	2,96(B)
IC_0_20 (kPa)	1526	1909	1887	2521	210,10	11,00	0,97(b)	1,71(B)

DP - Desvio Padrão; CV - Coeficiente de Variação (%)

\*Não normal pelos testes de Anderson-Darling e Kolmogorov-Smirnov.

Assimetria - distribuição simétrica (a), assimetria positiva (b), assimetria negativa (c);

Curtose - mesocúrtica (A), platicúrtica (B), leptocúrtica (C).

Comparando-se os valores encontrados para os atributos do solo com os níveis de interpretação (Tabela 5), verificou-se que da mesma forma como apresentado no AC, o Zn pode ser classificado como baixo em mais de 50% dos pontos amostrais. Os elementos classificados como alto em toda área (Ca, Mg, C e Mn) mostram que houve moderada variabilidade (10% < CV < 20%), apesar de não haver limites máximos de classificação para

estes atributos. Para o atributo P, assim como ocorreu no AC, apresentou-se com CV elevado (48,48%), apesar de ter sido classificado como alto teor em toda a área, por se tratar de uma classificação que limita somente o nível mínimo, mas não o máximo. Tiveram variabilidade alta, variando de teor baixo a alto, o atributo K e de teor médio a muito alto para o atributo Zn. Pode se concluir, novamente, que todos os atributos estudados estavam em nível de disponibilidade suficientes ao desenvolvimento da cultura, com exceção de 58% da área que estava faltando Zn.

**Tabela 5** Níveis de interpretação dos atributos químicos do solo com a porcentagem de pontos amostrais encontrada

Atributo		Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito alto
P (mg dm <sup>-3</sup> )	Classificação % Encontrado		≤ 3,0	3,1 - 6,0	6,1 - 9,0	>9,0 100%
K (cmolc dm <sup>-3</sup> )	Classificação % Encontrado		≤ 0,10	0,11 - 0,20 15,56%	0,21 - 0,30 55,56%	>0,30 28,90%
Ca (cmolc dm <sup>-3</sup> )	Classificação % Encontrado		≤ 2,0	2,1 - 4,0	>4,0 100,00%	
Mg (cmolc dm <sup>-3</sup> )	Classificação % Encontrado	<0,40	0,40 - 0,60	0,61 - 0,80	>0,80 100%	
C (g dm <sup>-3</sup> )	Classificação % Encontrado	<9,0	9,0 - 14,0	15,0 - 20,0	21,0-35,0 100%	>35,0
Cu (mg dm <sup>-3</sup> )	Classificação % Encontrado		< 0,8	0,8 - 1,7 11%	> 1,7 89%	
Zn (mg dm <sup>-3</sup> )	Classificação % Encontrado		< 3,0 58%	3,0 - 7,0 18%	>7,0 24%	
Fe (mg dm <sup>-3</sup> )	Classificação % Encontrado		< 15,0	15,0 - 40,0 91%	> 40 9,0%	
Mn (mg dm <sup>-3</sup> )	Classificação % Encontrado		< 15,0	15,0 - 30,0	>30,0 100%	

## 5.2 Análise espacial

Para cada conjunto de dados foram relacionados os dados de erro médio  $\overline{ER}$  e erro médio reduzido ( $S_{ER}$ ), obtidos por meio das estatísticas fornecidas pela validação cruzada, visando obter o ICE (equação 5), o qual permitiu a seleção do melhor modelo do semivariograma para cada variável em cada sistema de cultivo (Tabela 6 – AC; Tabela 8 – AP).

### 5.2.1 Sistema AC

Para o sistema AC de cultivo, o modelo exponencial foi selecionado como melhor modelo para as variáveis produtividade, areia, pH, Mn, IC\_0\_10, o modelo gaussiano para as variáveis silte, P, H+Al, Cu, Fe e IC\_0\_20, e, para as demais variáveis, foi determinado o modelo esférico como melhor modelo do semivariograma.

**Tabela 6** Seleção do melhor modelo para o AC

Atributo	Modelo	ER	SER	ICE	Melhor modelo
Produtividade	Esférico	-0,01255	0,91590	1,99762	Exponencial
	Exponencial	-0,01223	0,91570	1,97450	
	Gaussiano	-0,01253	0,91570	1,99840	
Argila	Esférico	-0,00589	0,77900	1,49431	Esférico
	Exponencial	-0,00925	0,74230	2,10100	
	Gaussiano	-0,00545	0,75280	1,54918	
Silte	Esférico	0,01857	0,98510	1,55132	Gaussiano
	Exponencial	0,02075	0,97730	2,00100	
	Gaussiano	0,01775	0,99170	1,22106	
Areia	Esférico	0,00283	0,80270	1,38306	Exponencial
	Exponencial	0,00360	0,84660	1,26843	
	Gaussiano	0,00724	0,80100	2,00100	
P	Esférico	-0,00329	1,07200	1,70733	Gaussiano
	Exponencial	-0,00466	1,07000	1,97222	
	Gaussiano	-0,00234	1,07200	1,50192	
C	Esférico	-0,00070	0,98830	0,96619	Esférico
	Exponencial	0,00349	0,98720	1,83660	
	Gaussiano	0,00005	0,98470	1,01439	
pH	Esférico	0,02356	0,99580	1,60632	Exponencial
	Exponencial	0,02131	1,00200	1,14801	
	Gaussiano	0,02634	0,99410	2,00100	
H+Al	Esférico	-0,02787	1,05900	1,75874	Gaussiano
	Exponencial	-0,02700	1,07100	1,89880	
	Gaussiano	-0,03004	1,05200	1,73239	
Ca	Esférico	0,02120	1,00900	1,04550	Esférico
	Exponencial	0,03560	1,01400	1,70010	
	Gaussiano	0,03028	1,02000	1,85056	
Mg	Esférico	-0,00862	1,02000	1,51706	Esférico
	Exponencial	-0,00537	1,03000	1,53027	
	Gaussiano	-0,01014	1,01900	1,63333	
K	Esférico	0,00173	1,03500	2,00100	Esférico
	Exponencial	0,00173	1,03500	2,00100	
	Gaussiano	0,00173	1,03500	2,00100	
Cu	Esférico	-0,01578	1,08800	1,66414	Gaussiano
	Exponencial	-0,02376	1,06000	1,68181	
	Gaussiano	-0,00628	1,06200	0,96889	
Zn	Esférico	-0,00180	1,03500	0,86087	Esférico
	Exponencial	-0,00627	1,06100	2,00100	
	Gaussiano	0,00285	1,04700	1,22497	
Fe	Esférico	0,01888	1,07600	1,82827	Gaussiano
	Exponencial	0,02211	1,07800	2,00100	
	Gaussiano	0,01627	1,07500	1,69740	
Mn	Esférico	0,03451	0,99240	1,39220	Exponencial
	Exponencial	0,03727	1,00400	1,24539	
	Gaussiano	0,03408	0,98370	1,91440	
IC 0_10	Esférico	-0,02676	1,03900	1,83482	Exponencial
	Exponencial	-0,02764	1,03100	1,68888	
	Gaussiano	-0,02623	1,04500	1,94898	
IC10_20	Esférico	-0,01432	0,95290	1,20287	Esférico
	Exponencial	-0,00744	0,90210	1,37540	
	Gaussiano	-0,01984	0,95630	1,44637	
IC_0_20	Esférico	-0,01461	0,92460	1,28038	Gaussiano
	Exponencial	-0,03775	0,91560	2,00100	
	Gaussiano	-0,01526	0,94030	1,11158	

Definido o melhor modelo aplicável para cada variável em estudo, determinaram-se os parâmetros de efeito pepita, patamar e alcance obtidos no semivariograma, determinando-se ainda o Índice de Dependência Espacial (IDE) dos dados, utilizando-se os parâmetros de efeito pepita ( $C_0$ ) e patamar ( $C_1$ ).

No sistema AC de cultivo, verificou-se que os atributos produtividade, argila, areia, Cu e IC\_0\_20 apresentaram forte dependência espacial ( $IDE \leq 25\%$ , CAMBARDELLA *et al.*, 1994), indicando que as amostras são correlacionadas. Apresentaram-se baixa dependência espacial ( $IDE \geq 75\%$ ) os atributos K, IC\_0\_10 e IC\_0\_20, sendo os demais atributos classificados como tendo moderada dependência espacial ( $25 < IDE < 75\%$ ).

**Tabela 7** Dados de análise da dependência espacial para o AC

Atributo	Modelo	Parcial Sill	Alcance	Pepita	IDE%
Produtividade ( $t\ ha^{-1}$ )	Exponencial	0,63242	27,4	0,1323	20,9
Argila (%)	Esférico	51,0713	573,5	3,5733	7,0
Silte (%)	Gaussiano	5,671	573,5	3,7088	65,4
Areia (%)	Exponencial	29,6912	573,5	1,8292	6,2
P ( $mg\ dm^{-3}$ )	Gaussiano	27,5603	593,8	19,66	71,3
C ( $g\ dm^{-3}$ )	Esférico	12,0109	288,2	8,3348	69,4
pH	Exponencial	0,064215	593,8	0,043708	68,1
H+Al ( $cmolc\ dm^{-3}$ )	Gaussiano	0,9622	593,8	0,68638	71,3
Ca ( $cmolc\ dm^{-3}$ )	Esférico	1,0214	234,2	0,65742	64,4
Mg ( $cmolc\ dm^{-3}$ )	Esférico	0,1681	300,9	0,083849	49,9
K ( $cmolc\ dm^{-3}$ )	Esférico	0,0042605	568,6	0,004261	100,0
Cu ( $mg\ dm^{-3}$ )	Gaussiano	0,75443	593,8	0,11102	14,7
Zn ( $mg\ dm^{-3}$ )	Esférico	16,9698	593,8	5,7588	33,9
Fe ( $mg\ dm^{-3}$ )	Gaussiano	17,3932	593,8	11,089	63,8
Mn ( $mg\ dm^{-3}$ )	Exponencial	168,092	593,8	91,606	54,5
IC_0_10 (kPa)	Exponencial	81403	593,8	70947	87,2
IC_10_20 (kPa)	Esférico	277303	173,2	47093	17,0
IC_0_20 (kPa)	Gaussiano	147055	593,8	117870	80,2

### 5.2.2 Sistema AP

Para os dados referentes ao sistema de cultivo, verificou-se que o melhor modelo selecionado para os atributos argila, silte, Mg – em todos os níveis de compactação – foi o exponencial. O modelo gaussiano foi utilizado para os atributos areia, P, pH, H+Al, K, Fe e Mn e para os demais atributos foi selecionado o modelo esférico.

O sistema de cultivo AP apresentou forte dependência espacial ( $IDE \leq 25\%$ ) apenas o atributo Cu. O Mg apresentou-se com baixa dependência espacial ( $IDE \geq 75\%$ ) e os demais atributos apresentaram-se com dependência moderada ( $25 < IDE < 75\%$ ).

**Tabela 8** Seleção do melhor modelo para o AP

Atributo	Modelo	ER	SER	ICE	Melhor modelo
Produtividade	Esférico	-0,02574	1,0060	0,91938187	Esférico
	Exponencial	-0,02928	0,9791	1,31442719	
	Gaussiano	-0,03198	0,9476	2,00100100	
Argila	Esférico	0,03543	0,9430	1,99650350	Exponencial
	Exponencial	0,02762	0,9521	1,61697793	
	Gaussiano	0,03295	0,9428	1,93000282	
Silte	Esférico	0,01043	0,9014	1,84273504	Exponencial
	Exponencial	-0,00084	0,8902	1,01977506	
	Gaussiano	0,00311	0,8830	1,29817833	
Areia	Esférico	-0,03742	1,0700	1,63436365	Gaussiano
	Exponencial	-0,04615	1,0540	1,63529412	
	Gaussiano	-0,02918	1,0850	1,63228602	
P	Esférico	-0,04625	1,4520	1,61294072	Gaussiano
	Exponencial	-0,06735	1,4880	2,00100100	
	Gaussiano	-0,00576	1,4570	1,02199880	
C	Esférico	-0,00259	1,0240	1,02220866	Esférico
	Exponencial	0,00663	1,0230	1,60526316	
	Gaussiano	0,00533	1,0380	1,80325399	
pH	Esférico	-0,00748	0,9644	0,37840783	Gaussiano
	Exponencial	-0,05253	0,8491	2,00100100	
	Gaussiano	-0,00604	0,9753	0,27883781	
H+Al	Esférico	0,00083	0,9764	0,18381320	Gaussiano
	Exponencial	0,04719	0,8580	2,00100100	
	Gaussiano	-0,00098	0,9865	0,11584389	
Ca	Esférico	-0,0188	1,0190	1,64345865	Esférico
	Exponencial	-0,02128	1,0170	1,68001001	
	Gaussiano	-0,01635	1,0250	1,76832707	
Mg	Esférico	0,02011	0,9663	1,56734007	Exponencial
	Exponencial	-0,00074	0,9496	0,88550623	
	Gaussiano	-0,00503	0,9406	1,25012432	
K	Esférico	-0,03973	1,1810	1,73194155	Gaussiano
	Exponencial	-0,05034	1,1690	1,88020833	
	Gaussiano	-0,02463	1,1920	1,48927294	
Cu	Esférico	0,00622	1,0460	0,3817581	Esférico
	Exponencial	0,01225	0,8013	1,29553679	
	Gaussiano	-0,04145	1,0000	1,00001000	
Zn	Esférico	-0,00299	1,0070	0,86024587	Esférico
	Exponencial	-0,00708	0,9987	1,08125000	
	Gaussiano	0,00056	1,0160	1,08030196	
Fe	Esférico	0,01393	0,9885	1,47206557	Gaussiano
	Exponencial	0,02246	0,9865	2,00100100	
	Gaussiano	0,00462	0,9990	0,27986214	
Mn	Esférico	-0,02240	0,9741	2,00100100	Gaussiano
	Exponencial	-0,01784	0,9849	1,37944015	
	Gaussiano	-0,02224	0,9924	1,28629344	
IC0_10	Esférico	-0,06955	1,0450	1,97231931	Exponencial
	Exponencial	-0,06775	1,0330	1,68048837	
	Gaussiano	-0,07153	1,0450	2,00100100	
IC10_20	Esférico	-0,02527	1,0610	1,95312500	Exponencial
	Exponencial	-0,02352	1,0570	1,82137292	
	Gaussiano	-0,02476	1,0640	1,97981797	
IC_0_20	Esférico	-0,06227	1,1080	1,94460687	Exponencial
	Exponencial	-0,06027	1,1060	1,89526358	
	Gaussiano	-0,06352	1,1120	2,00100100	

Como somente a produtividade foi medida após a adubação diferenciada AC e AP, apenas a variável produtividade pode ser avaliada quanto à interferência do tipo de

adubação, e os resultados foram consistentes, visto que a variabilidade espacial diminuiu de alta (IDE = 20,9%) para moderada (IDE = 30,1%), o que é esperado quando se faz uma adubação localizada ( Tabela 9).

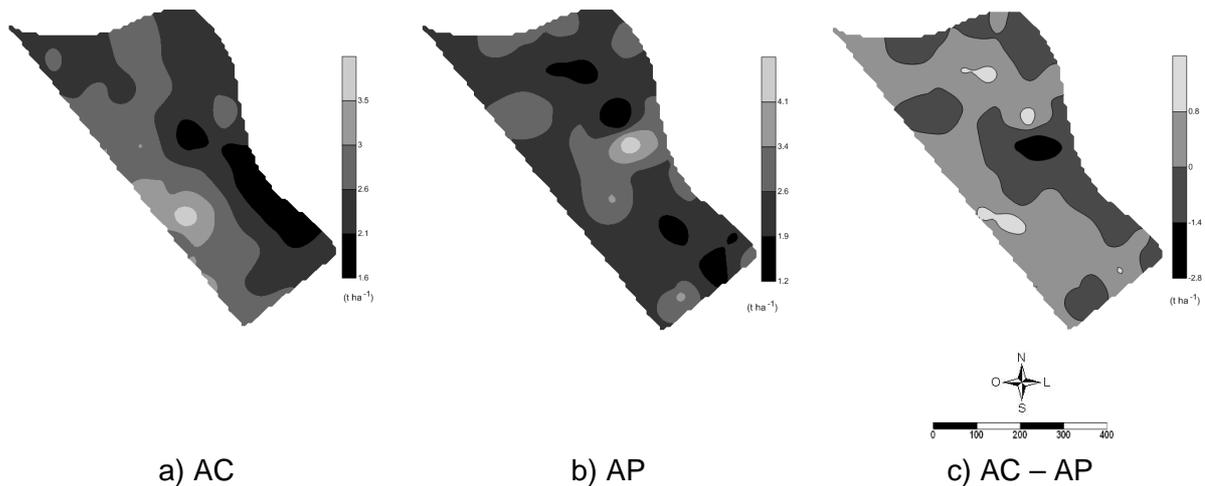
**Tabela 9** Dados da dependência espacial para o sistema AP

Atributo	Modelo	Parcial Sill	Alcance	Pepita	IDE%
Produtividade (t ha <sup>-1</sup> )	Esférico	0,90848	86,8	0,27349	30,1
Argila (%)	Exponencial	13,4794	455,7	4,2898	31,8
Silte (%)	Exponencial	6,6315	623,0	1,9945	30,1
Areia (%)	Gaussiano	5,2503	623,0	2,9888	56,9
P (mg dm <sup>-3</sup> )	Gaussiano	164,982	649,1	42,182	25,6
C (g dm <sup>-3</sup> )	Esférico	9,6587	615,8	7,7737	80,5
pH	Gaussiano	0,083571	649,1	0,070906	84,8
H+Al (cmolc dm <sup>-3</sup> )	Gaussiano	0,93995	649,1	0,78136	83,1
Ca (cmolc dm <sup>-3</sup> )	Esférico	1,06129	649,1	0,68569	64,6
Mg (cmolc dm <sup>-3</sup> )	Exponencial	0,167055	126,4	0,13987	83,7
K (cmolc dm <sup>-3</sup> )	Gaussiano	0,02012	649,1	0,010263	51,0
Cu (mg dm <sup>-3</sup> )	Esférico	0,85498	649,1	0	0,0
Zn (mg dm <sup>-3</sup> )	Esférico	12,2269	649,1	8,1322	66,5
Fe (mg dm <sup>-3</sup> )	Gaussiano	14,6778	649,1	7,0496	48,0
Mn (mg dm <sup>-3</sup> )	Gaussiano	154,968	298,8	85,948	55,5
IC_0_10 (kPa)	Exponencial	79542	102,6	25023	31,5
IC_10_20 (kPa)	Exponencial	41391	539,0	27536	66,5
IC_0_20 (kPa)	Exponencial	48043	649,1	30899	64,3

### 5.3 Mapas temáticos

Utilizando os parâmetros de Efeito Pepita, Patamar e Alcance – obtidos por meio do semivariogram – foram elaborados os mapas temáticos para cada um dos atributos, utilizando a krigagem ordinária (Figura 9 a 26).

Na maior parte da área (59,7%) o sistema AP apresentou maior produtividade que o AC (Figura 9c). Uma comparação direta das médias de produtividade para AC e AP não pode ser feita por meio de Análise de variância (ANOVA) porque os dados não são independentes, visto que apresentaram dependência espacial. O coeficiente de desvio relativo (CDR) entre os mapas de produtividade AC e AP foi de 16,37%, indicando qual foi a diferença média, em módulo, dos valores interpolados, considerando-se o mapa convencional como referência. Este fato pode estar relacionado à influência do interpolador que influenciou de forma mais significativa nos dados do AC (Tabela 10), em que o valor mínimo subiu mais e o valor máximo diminuiu.



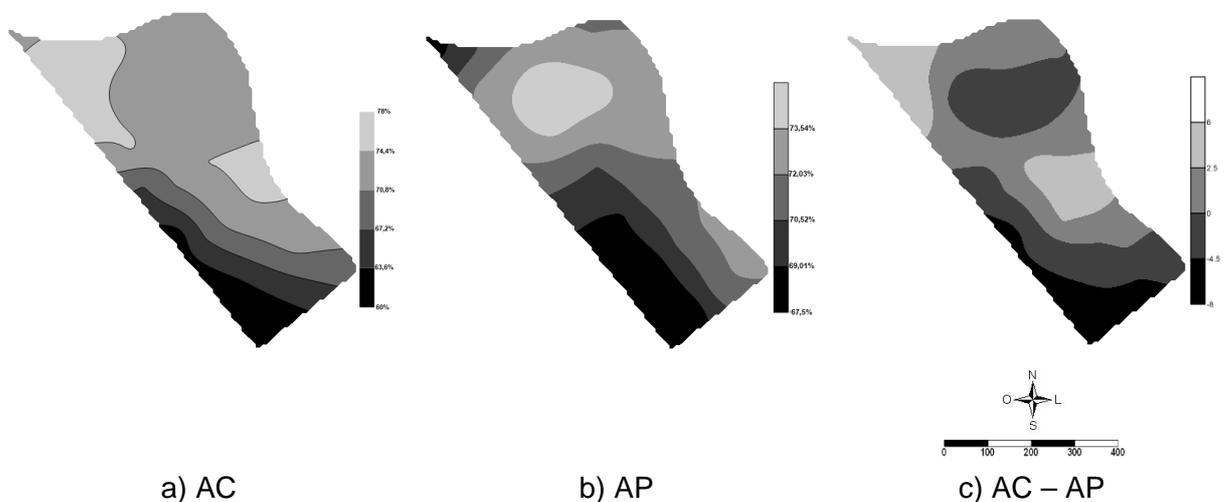
**Figura 9** Mapas da espacialização da produtividade ( $t\ ha^{-1}$ ) da soja para o ano de 2009.

**Tabela 10** Tabela de referência para avaliar a influência do interpolador

Variável		Mínimo	Média	Mediana	Máximo	DP	CV
Amostragem	Convencional	0,10	2,63	2,56	5,62	0,75	28,50
	AP	0,40	2,50	2,50	5,80	0,86	34,90
Interpolação	Convencional	1,63	2,53	2,53	3,96	0,34	13,40
	AP	1,25	2,49	2,49	4,76	0,42	16,90
Diferença		-2,63	0,05	0,12	1,26		

Verifica-se que, tanto para o sistema convencional como o de precisão, os dados foram suavizados, havendo diminuição tanto da média como da mediana dos valores interpolados em relação aos amostrais. A produtividade média interpolada foi praticamente a mesma para ambos os sistemas.

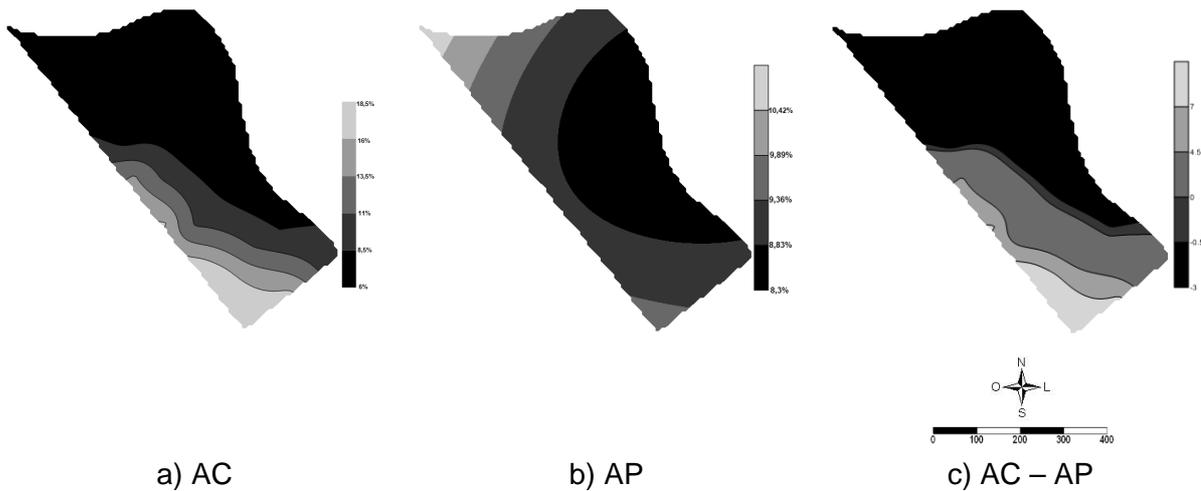
Em ambos os sistemas (AP e AC), a distribuição espacial da argila apresentou diminuição do teor de argila à medida que se desloca para o sul da área (Figura 10).



**Figura 10** Mapas da espacialização do teor de argila (%) para o ano de 2009.

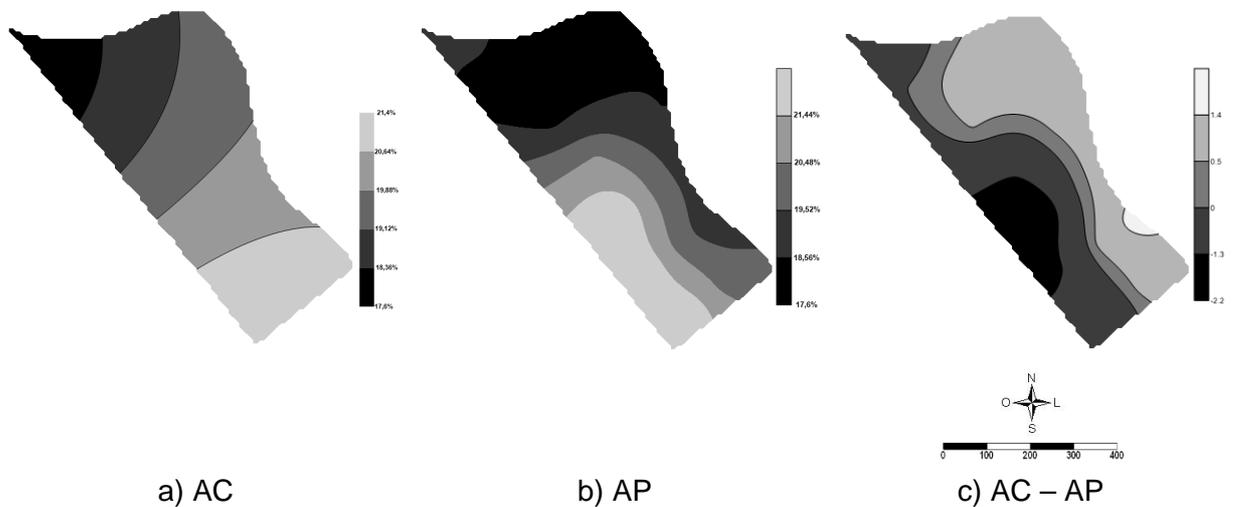
Entretanto a área de AP também apresentou diminuição quando se dirigiu para o noroeste da área. A diferença foi mais significativa na direção sul, quando os valores de argila do sistema AP superaram os da área AC. A maior parte da área (53,3%) apresentou maior teor de argila no sistema AP.

O teor de areia apresentou-se superior em 63,4% da área para o cultivo convencional (Figura 11), sendo que para o sistema AP, nos locais onde houve níveis superiores, esta diferença foi bastante significativa (até 7% da composição do solo, na parte sul da área), superior ao encontrado no outro sistema. Já para o AC, esta diferença foi superior em no máximo 3% (parte centra e norte da área).



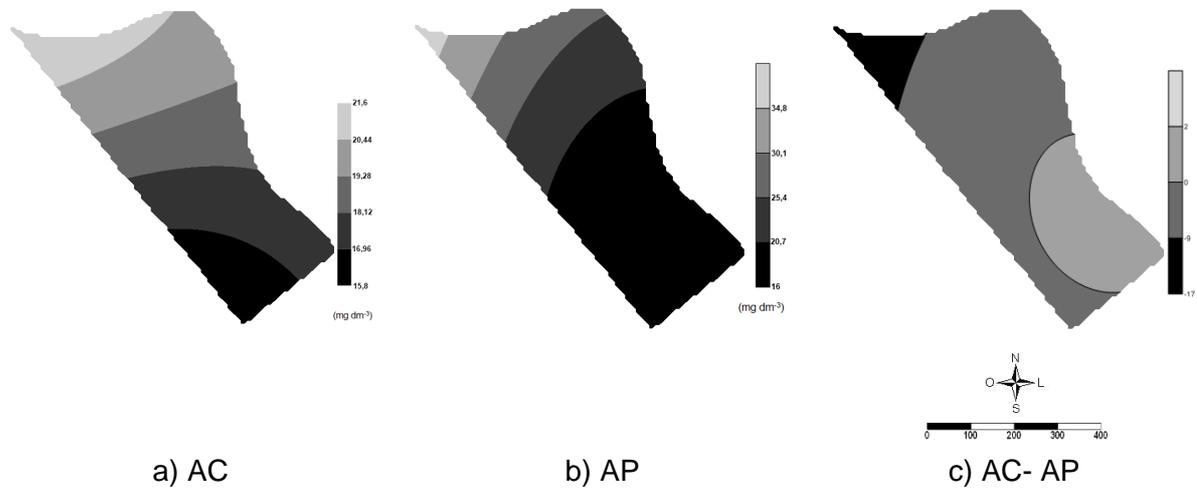
**Figura 11** Mapas da espacialização do teor de areia (%) para o ano de 2009.

O teor de silte de AP foi maior que o de AC em 55,8% da área (Figura 12). Tanto para AC como AP o teor de silte diminuiu quando se foi do norte para o sul. A diferença entre AC e AP se manteve pequena em toda a área (máximo de 2,2%), sendo positiva no lado leste e negativa a oeste.



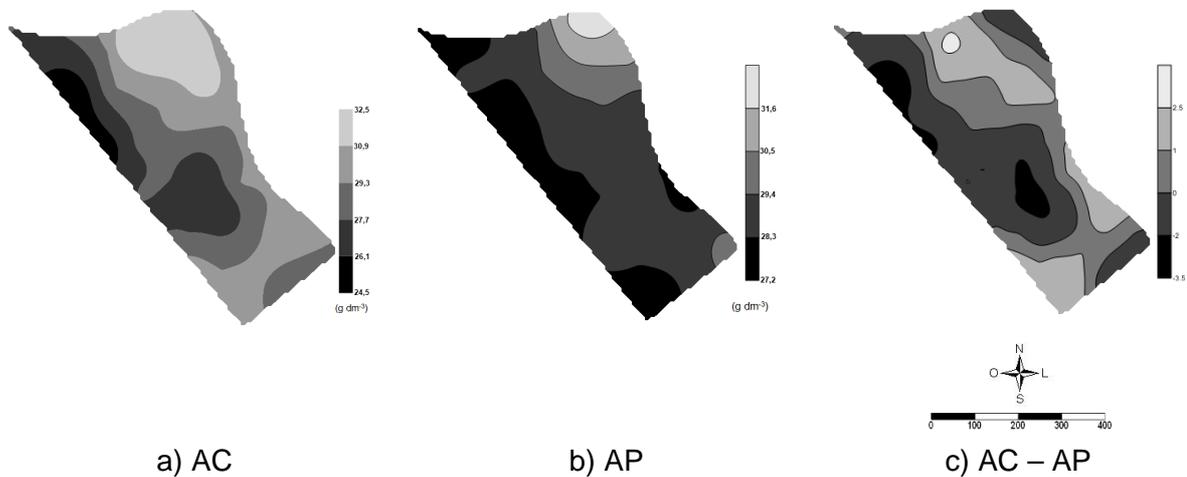
**Figura 12** Mapas da espacialização do teor de silte (%) para o ano de 2009.

Os níveis de fósforo foram encontrados em praticamente toda a área (73,4%) de forma mais significativa no sistema AC de cultivo (Figura 13), variando de forma expressiva em parte da área ( $17 \text{ mg dm}^{-3}$ ) se comparado com o sistema AP.



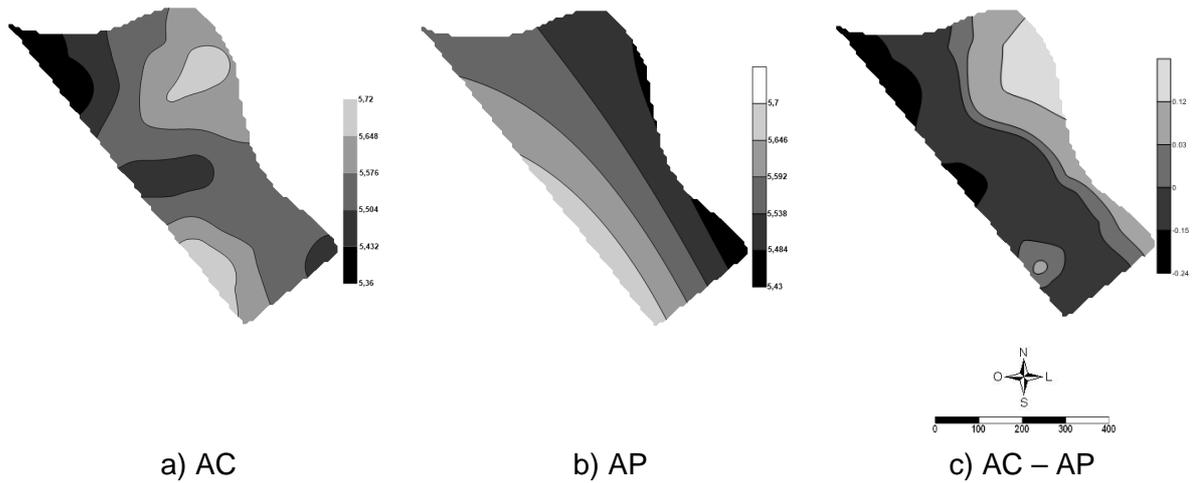
**Figura 13** Mapas da espacialização do teor de P ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) para o ano de 2009.

O atributo C apresentou níveis superiores e inferiores em regiões distintas da área para os dois sistemas de cultivo (52% da área foi superior para AP e 48% AC) (Figura 14), sendo que variou no máximo  $3,5 \text{ g dm}^{-3}$  (inferior para o AP).



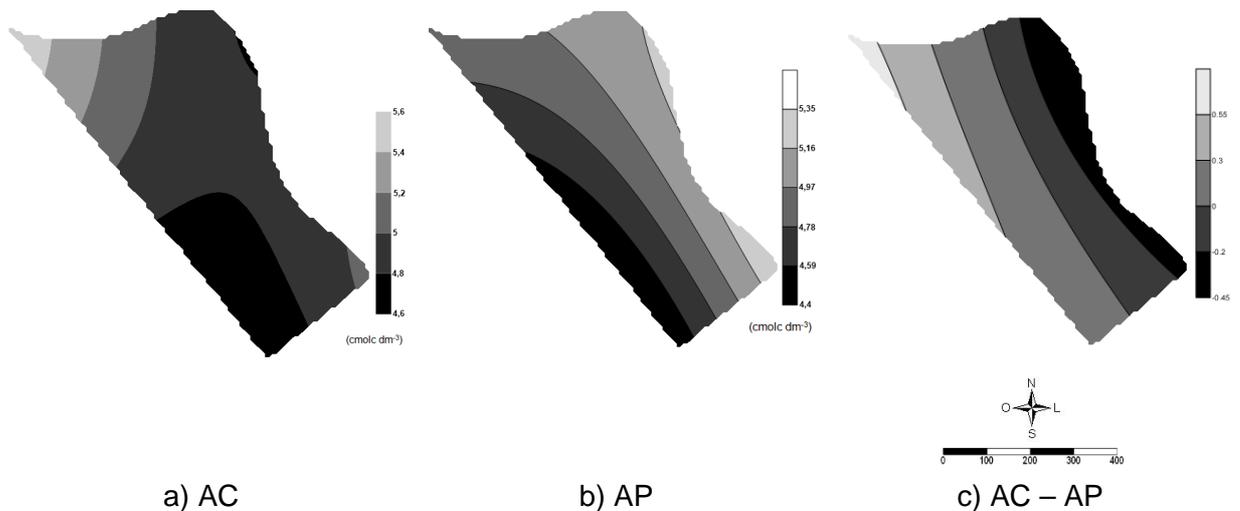
**Figura 14** Mapas da espacialização do teor de C ( $\text{g dm}^{-3}$ ) para o ano de 2009.

Os maiores valores de pH foram encontrados na região sudoeste da área no sistema AP e AC e nordeste para AC (Figura 15). Em 57,7% da área este atributo foi maior no AP, apesar da variação ser pequena (menor que 0,24).



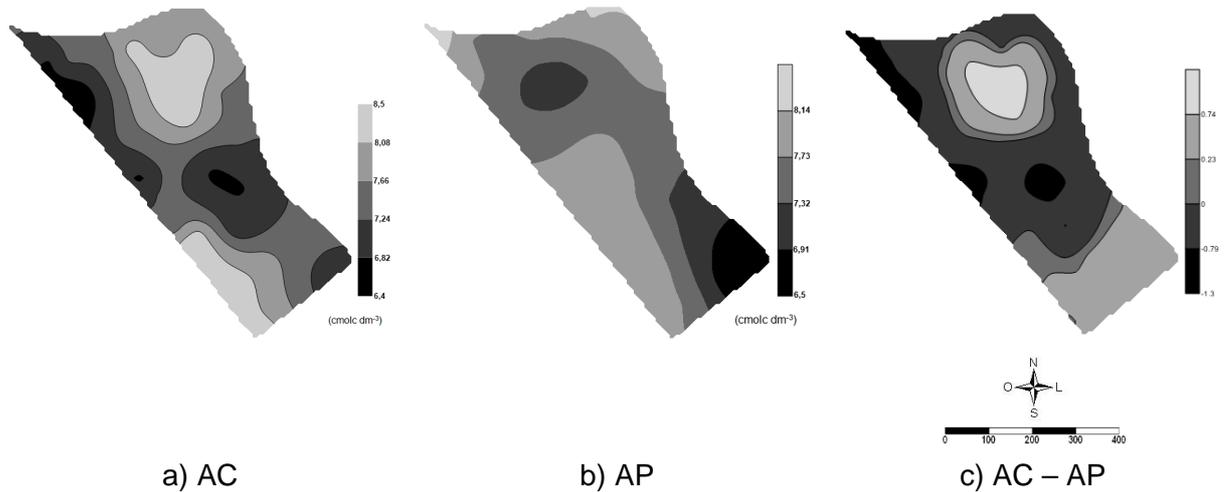
**Figura 15** Mapas da espacialização do pH para o ano de 2009.

Embora de forma pouco expressiva, o H+Al (variação máxima de  $0,55 \text{ cmolc dm}^{-3}$ ) apresentou-se de forma gradativa de leste (maior concentração para AP) para oeste (menor concentração para AP), sendo que em 54,9% da área apresentou-se maior no AP (Figura 16).



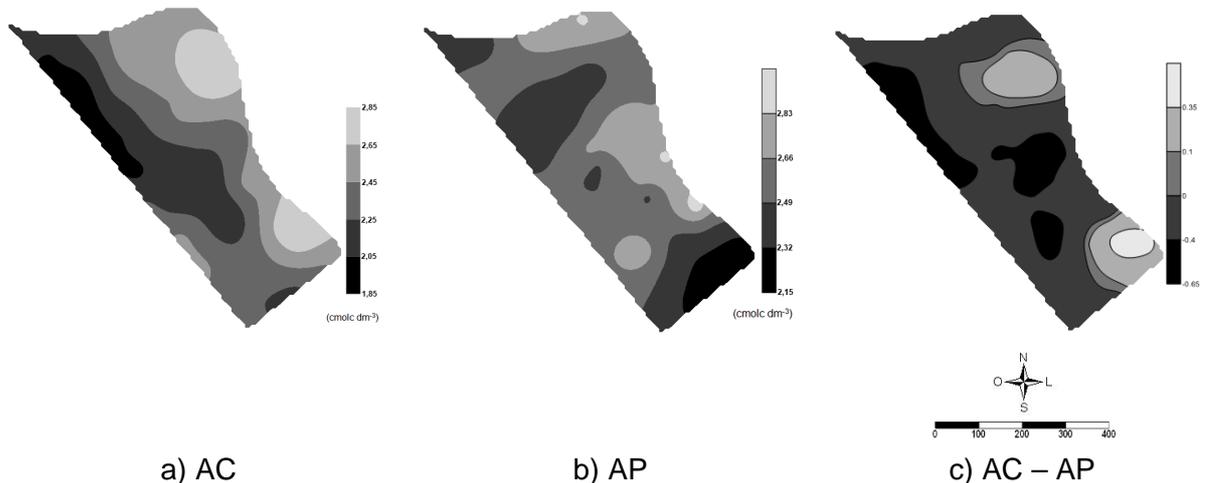
**Figura 16** Mapas da espacialização da H+Al ( $\text{cmolc dm}^{-3}$ ) para o ano de 2009.

Apesar dos níveis de Ca apresentarem praticamente estáveis para toda a área, verificou-se que em algumas regiões este atributo apresentou-se em maior quantidade no AC em até  $1,3 \text{ cmolc dm}^{-3}$ . Em 53% da área AC, este atributo foi maior que no AP (Figura 17).



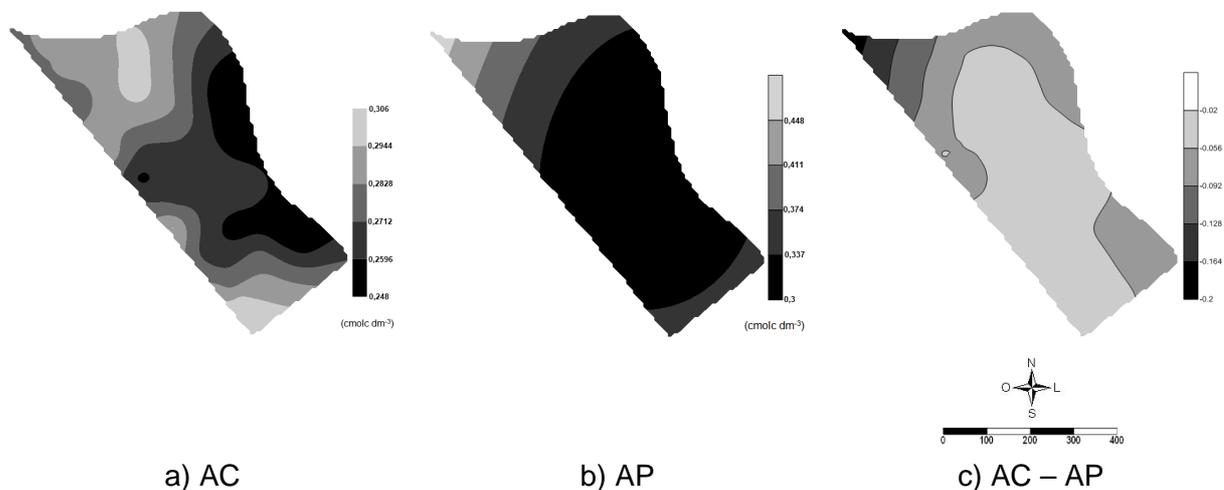
**Figura 17** Mapas da espacialização do teor de Ca ( $\text{cmolc dm}^{-3}$ ) para o ano de 2009.

O atributo Mg (Figura 18) apresentou-se em maior disponibilidade no AC em cerca de 77,7% da área, com variação de até  $0,65 \text{ cmolc dm}^{-3}$ .



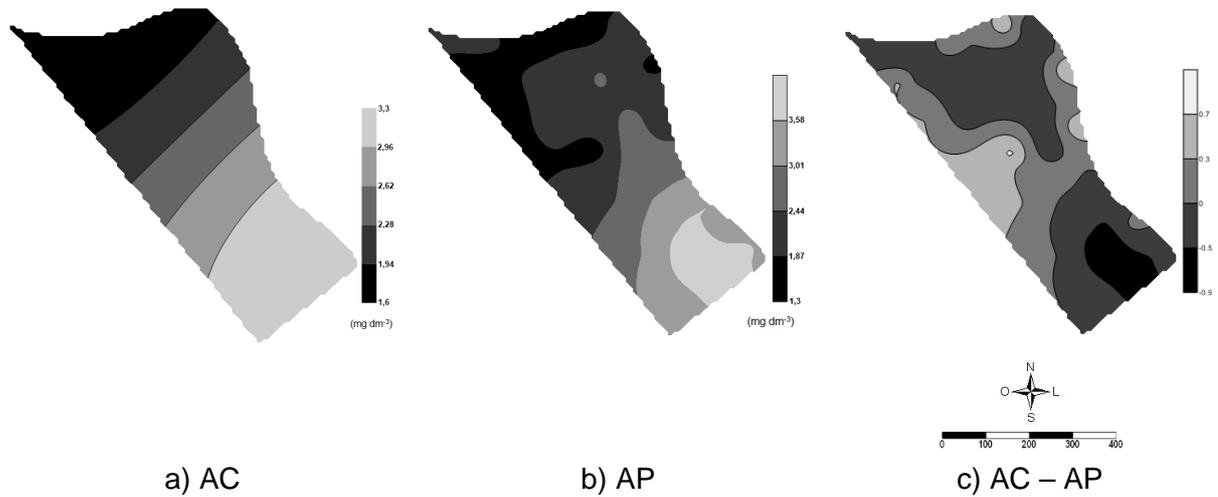
**Figura 18** Mapas da espacialização do teor de Mg ( $\text{cmolc dm}^{-3}$ ) para o ano de 2009.

Como pode ser verificado (Figura 19 c), o atributo K foi maior em toda a área no AP.



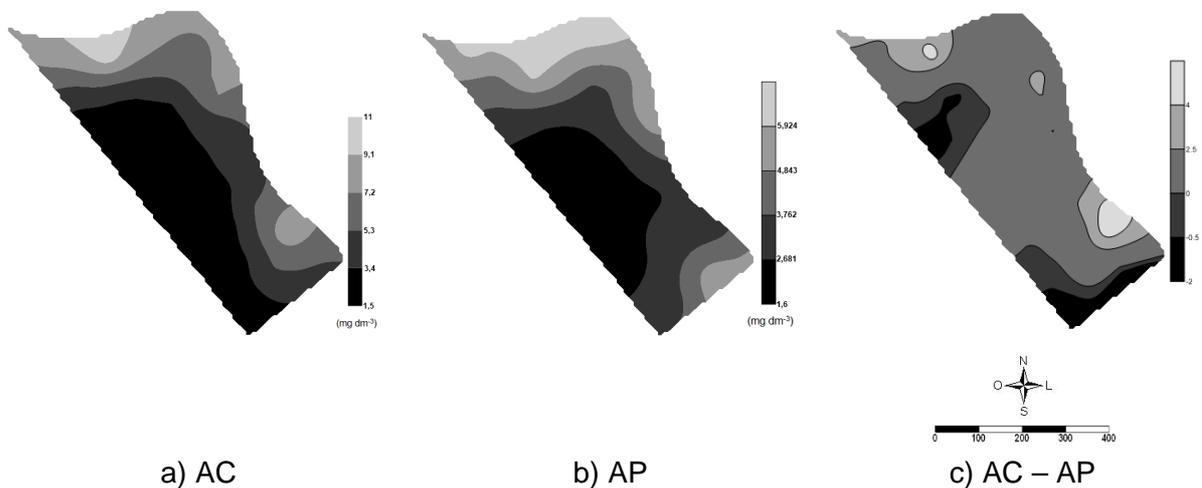
**Figura 19** Mapas da espacialização do teor de K ( $\text{cmolc dm}^{-3}$ ) para o ano de 2009.

Os níveis de Cu variaram de forma distinta na área para cada sistema, sendo que apresentou níveis mais elevados para o sistema AC em relação ao AP em 55,4% da área, localizada principalmente na região sudoeste (Figura 20).



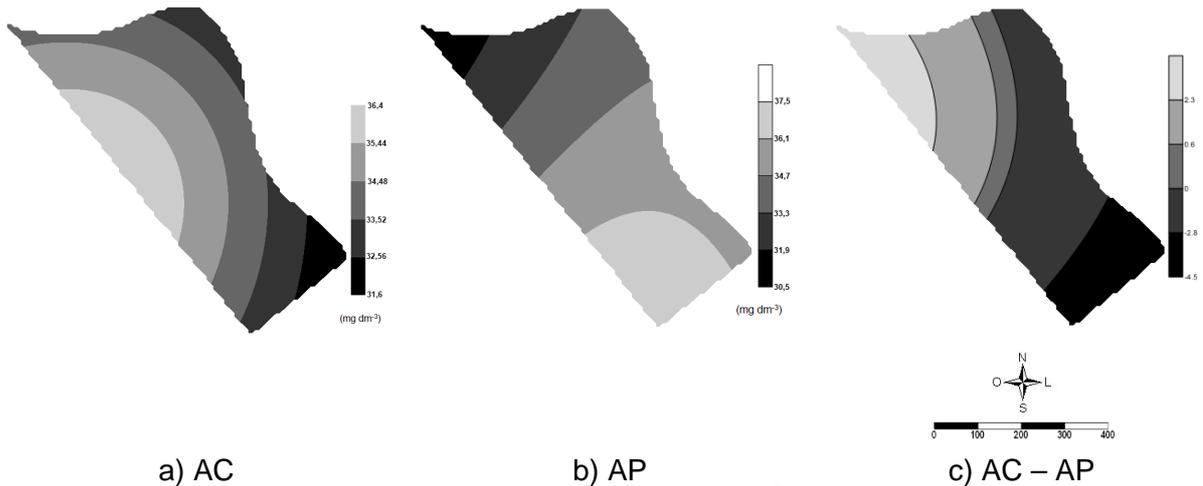
**Figura 20** Mapas da espacialização do teor de Cu ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) para o ano de 2009.

O atributo Zn foi mais disponível para AC em 79% da área, sendo que apresentou-se com até  $4 \text{ mg dm}^{-3}$  superior. Entretanto o AP se apresentou superior em até  $2 \text{ mg dm}^{-3}$  em parte da área (Figura 21).



**Figura 21** Mapas da espacialização do teor de Zn ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) para o ano de 2009.

O Fe apresentou-se mais disponível no sistema AP (57,1% da área total), apresentando-se maior em até  $4,5 \text{ mg dm}^{-3}$  e menor em até  $2,3 \text{ mg dm}^{-3}$  (Figura 22).



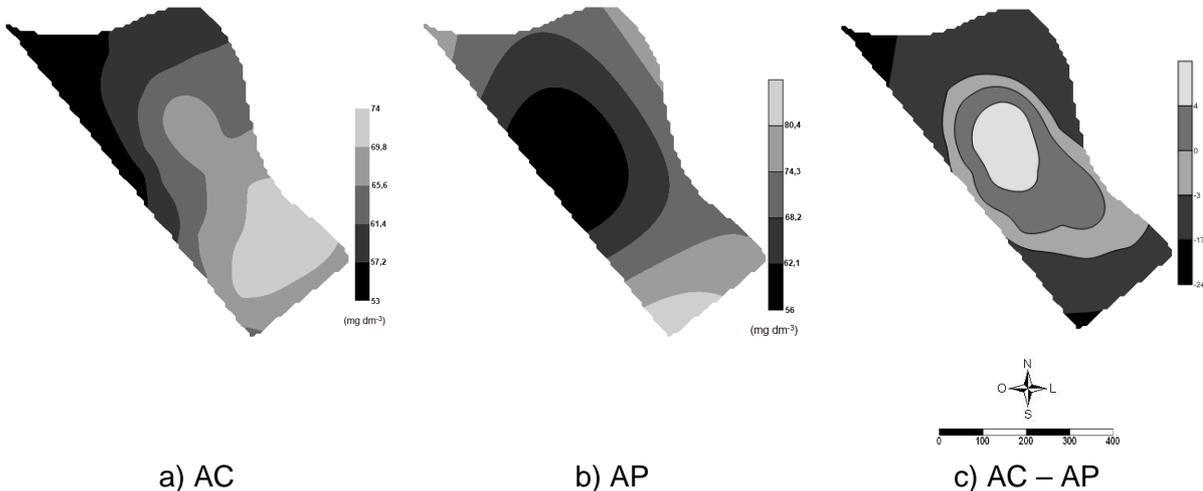
a) AC

b) AP

c) AC – AP

**Figura 22** Mapas da espacialização do teor de Fe ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) para o ano de 2009.

O atributo Mn apresentou-se com níveis superiores em 77,7% da área no sistema AP, com exceção da região central (Figura 23c).



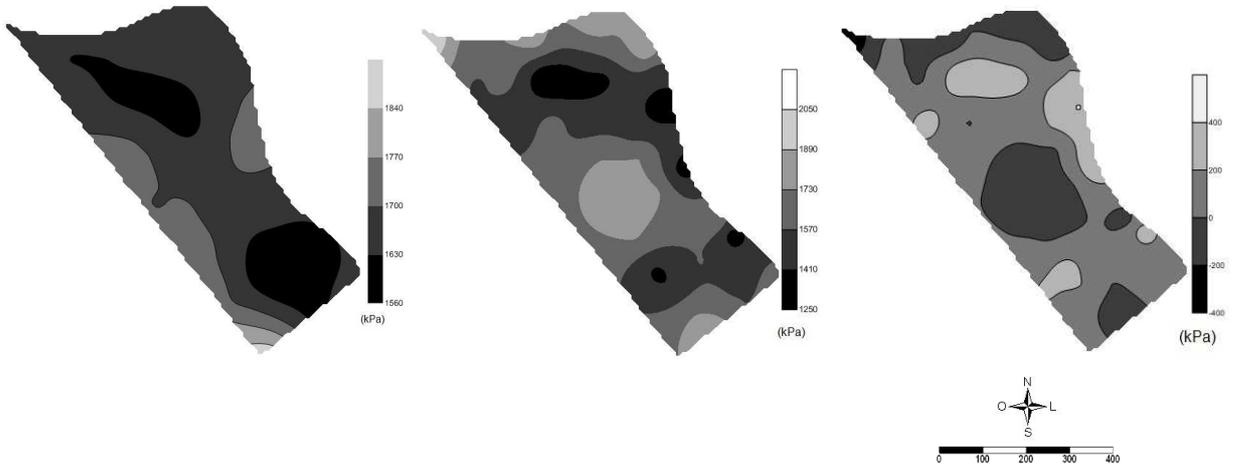
a) AC

b) AP

c) AC – AP

**Figura 23** Mapas da espacialização do teor de Mn ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) para o ano de 2009.

Cerca de 70,3% apresentou-se com maior nível de compactação na camada 0 - 0,10 m no sistema AC, sendo que apenas em uma região central e algumas regiões de borda da área a compactação foi maior no sistema .



a) AC

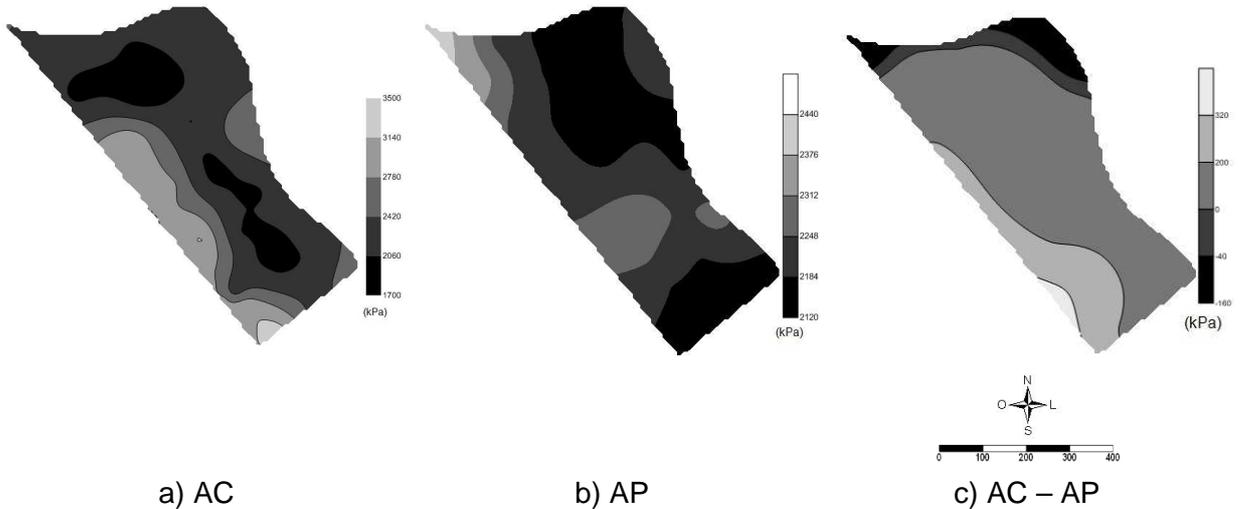
b) AP

c) AC – AP

**Figura 24** Mapas da espacialização da resistência mecânica do solo a penetração IC<sub>0\_10</sub>

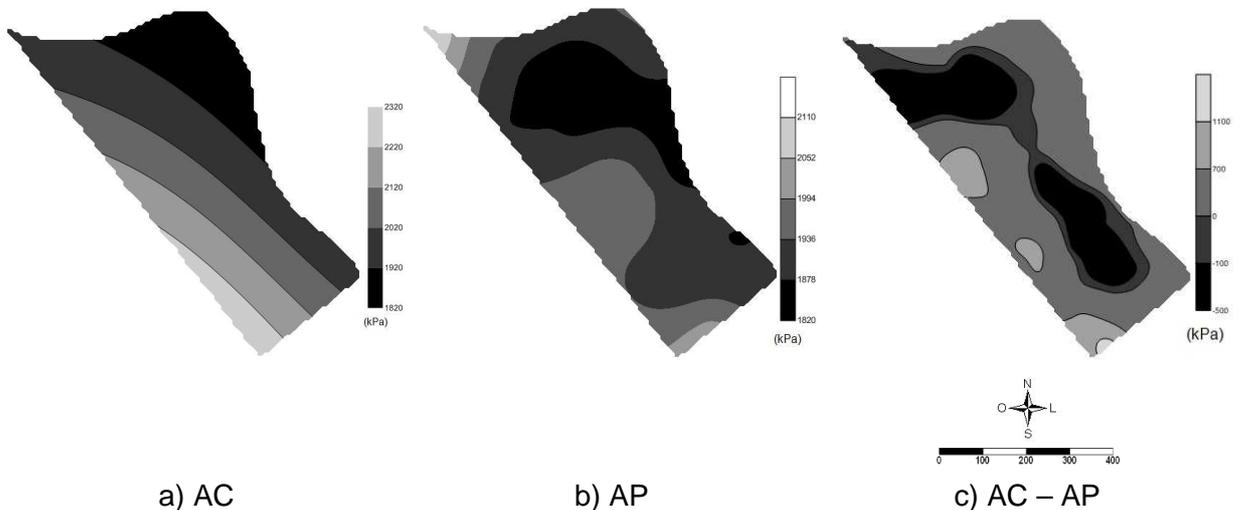
(kPa) para o ano de 2011.

Assim como ocorreu na camada 0 – 0,10m, na camada de 0,10 – 0,20 m, a compactação foi superior em 87,1% da área no sistema AC (Figura 25).



**Figura 25** Mapas da espacialização da resistência mecânica do solo a penetração IC\_10\_20 (kPa) para o ano de 2011.

De forma a avaliar a compactação geral (0 – 0,20 m), percebeu-se que em 62% da área o solo apresentou-se mais compactado no sistema AC (Figura 26). Entretanto, Falker (2009) sugeriu que para solos com mais de 50% de argila a resistência do solo à penetração é crítica somente acima de 4 MPa, o que não foi atingido nos sistemas.



**Figura 26** Mapas da espacialização da resistência mecânica do solo a penetração IC\_0\_20 (kPa) para o ano de 2011.

Na Tabela 11 são apresentados os CDR que indicam qual foi a diferença média, em módulo, dos valores interpolados para cada atributo analisado. Pode-se observar que a areia, Zn e K apresentaram os maiores CDR (maior que 20%); que produtividade, P, Mg, Mn e IC\_10\_20 apresentaram CDR intermediários (entre 10 e 20%), e IC\_0\_10, Ca, IC\_0\_20, Fe, silte, H+Al, C, argila e pH apresentaram os menores CDR (menor que 10%). Isto significa, na prática, que os atributos que apresentaram os menores CDR tiveram seus

mapas, para ambos os sistemas, mais próximos. Por outro lado os atributos que apresentaram maiores CDR tiveram seus mapas, para ambos os sistemas, mais distantes. Como os dados foram levantados da mesma área, mas de diferentes curvas de nível, pode-se concluir que a ação de diversos agentes como vento, erosão, contenção de água, entre outros, interferiram nos resultados.

**Tabela 11** Coeficiente de desvio relativo em função do atributo

Atributo	CDR
Areia	26,7%
Zn	23,1%
K	21,5%
Produtividade	16,4%
P	15,8%
Mg	11,2%
Mn	10,4%
IC_10_20	10,1%
Cu	9,4%
IC_0_10	6,5%
Ca	6,1%
IC_0_20	6,1%
Fe	5,1%
Silte	4,1%
H+Al	4,0%
C	3,6%
Argila	3,3%
pH	1,3%

#### 5.4 Análise de correlação

O atributo que mais se correlacionou com a produtividade (Tabelas 12 e 13) para os dois sistemas de agricultura foi o K (AC=0,966 ; AP=0,953).

**Tabela 12** Coeficientes de correlação linear de Pearson (R) para atributos químicos e físicos do solo e produtividade para o sistema AP

	Prod	Argila	Silte	Areia	P	C	pH	H_Al	Ca	Mg	Cu	Zn	Fe	Mn	0-10	0-20	10-20
Argila	-0.156																
Silte	0.191	<b>-0.919</b>															
Areia	-0.135	-0.107	-0.180														
P	-0.069	0.481	-0.711	0.711													
C	-0.180	0.368	-0.391	-0.324	0.032												
Ph	0.169	-0.617	0.613	0.327	-0.035	-0.608											
H_Al	-0.172	0.621	-0.641	-0.283	0.088	0.626	<b>-0.997</b>										
Ca	0.287	-0.432	0.252	0.166	0.230	0.068	0.497	-0.453									
Mg	0.280	0.084	-0.154	-0.347	0.003	0.326	-0.185	0.204	0.442								
Cu	-0.194	-0.456	0.554	-0.303	-0.795	-0.106	-0.109	0.067	-0.499	-0.289							
Zn	-0.219	0.484	-0.699	0.417	0.583	0.517	-0.589	0.631	-0.126	0.050	-0.257						
Fe	0.058	-0.620	<b>0.803</b>	-0.572	-0.980	-0.094	0.157	-0.205	-0.149	-0.066	<b>0.821</b>	-0.574					
Mn	-0.229	-0.305	0.116	0.240	-0.185	0.196	-0.298	0.311	-0.165	-0.144	0.563	0.455	0.289				
0-10	0.380	-0.465	0.352	0.195	0.045	-0.039	0.273	-0.257	0.478	0.022	-0.103	-0.134	0.019	-0.043			
0-20	0.223	-0.754	0.590	0.414	-0.007	-0.363	0.505	-0.489	0.488	-0.186	0.073	-0.239	0.140	0.165	<b>0.823</b>		
10-20	0.021	-0.306	0.134	0.419	0.307	-0.452	0.314	-0.292	0.320	0.016	-0.169	-0.207	-0.251	-0.097	0.320	0.555	
K	<b>0.953</b>	-0.100	0.158	-0.177	-0.091	-0.164	0.084	-0.091	0.188	0.239	-0.134	-0.190	0.066	-0.212	0.329	0.173	-0.021

0 ≤  R  < 0,2 (muito fraca)
0,2 ≤  R  < 0,4 (fraca)
0,4 ≤  R  < 0,6 (moderada)
0,6 ≤  R  < 0,8 (forte)
0,8 ≤  R  ≤ 1 (muito forte)

Este fato pode estar correlacionado com os valores no nutriente, variando de médio a muito alto em toda a área experimental. Embora a quantidade de K absorvida pelas plantas seja grande, a quantidade removida pelos grãos é relativamente pequena ( $\pm 20\%$ ), sendo o seu restante retornado ao solo via ciclagem biogeoquímica (FERREIRA *et al.* 2011). O melhoramento da fertilidade pelo bom uso do solo, intensifica a ciclagem de K (SANTI *et al.*, 2003; ROSSATO, 2004), com saldo positivo no sistema.

A baixa correlação encontrada para alguns atributos (Tabela 12) também pode estar associada ao efeito que certos nutrientes exercem sobre outros. No caso da relação entre o Zn e o Ca ( $R=0,061$ ), K e Ca ( $R=0,136$ ) existe uma inibição competitiva, ou seja, o excesso do segundo elemento provoca a diminuição do primeiro. Já no caso do Cu e do Ca, existe um efeito chamado antagonismo, ou seja, uma incompatibilidade entre os elementos. A presença do Ca diminui a toxidez do Cu.

**Tabela 13** Coeficientes de correlação linear de Pearson (R) para atributos químicos e físicos do solo e produtividade para AC

	Prod	Argila	Silte	Areia	P	C	pH	H_Al	Ca	Mg	Cu	Zn	Fe	Mn	0-10	0-20	10-20
Argila	-0,420																
Silte	-0,057	-0,733															
Areia	0,459	-0,954	0,655														
P	-0,159	0,797	-0,943	-0,781													
C	-0,378	-0,058	0,147	-0,161	0,119												
Ph	0,028	-0,426	0,431	0,196	-0,307	0,657											
H_Al	-0,145	0,639	-0,807	-0,495	0,733	-0,270	-0,730										
Ca	0,129	-0,403	0,129	0,196	-0,030	0,711	0,789	-0,358									
Mg	-0,493	0,001	0,255	-0,230	0,027	0,879	0,588	-0,274	0,541								
Cu	-0,094	-0,653	0,968	0,622	-0,945	-0,027	0,240	-0,683	-0,060	0,142							
Zn	-0,469	0,980	-0,388	-0,516	0,614	0,469	-0,184	0,524	0,061	0,523	-0,401						
Fe	0,566	0,204	-0,531	-0,085	0,249	-0,580	-0,255	0,194	-0,182	-0,677	-0,480	-0,480					
Mn	-0,344	-0,443	0,884	0,334	-0,777	0,248	0,404	-0,683	0,136	0,392	0,888	-0,237	-0,566				
0-10	0,424	-0,269	0,053	0,307	-0,144	-0,105	0,237	-0,283	0,025	-0,227	-0,023	-0,341	0,246	-0,273			
0-20	0,573	-0,781	0,524	0,850	-0,761	-0,493	0,004	0,417	-0,031	-0,527	0,556	-0,746	0,266	0,255	0,309		
10-20	0,547	-0,558	0,273	0,593	-0,415	-0,237	0,180	-0,335	0,054	-0,290	0,236	-0,495	0,210	-0,085	0,771	0,593	
K	0,966	-0,494	-0,060	0,458	-0,163	-0,359	0,037	-0,141	0,136	-0,516	-0,098	-0,504	0,582	-0,333	0,424	0,588	0,526

$0 \leq  R  < 0,2$ (muito fraca)
$0,2 \leq  R  < 0,4$ (fraca)
$0,4 \leq  R  < 0,6$ (moderada)
$0,6 \leq  R  < 0,8$ (forte)
$0,8 \leq  R  \leq 1$ (muito forte)

## 6 CONCLUSÕES

A produtividade da soja teve alta correlação com o K nos dois sistemas de cultivo, AC e AP, mas foi pouco correlacionada linearmente com os demais atributos analisados.

No sistema AC verificou-se que os atributos produtividade, argila, areia, Cu e Índice de Cone 0\_20 cm (IC\_0\_20) apresentaram forte dependência espacial, indicando que as amostras não são independentes. Apresentaram baixa dependência espacial os atributos K, IC\_0\_10 e IC\_0\_20, sendo os demais atributos classificados como tendo moderada dependência espacial.

Para o sistema AP, o atributo Cu apresentou forte dependência espacial, o Mg apresentou baixa dependência espacial e os demais atributos apresentaram dependência moderada.

Após a adubação diferenciada a variabilidade espacial da produtividade foi menor no sistema AP do que no AC, o que é esperado quando se faz uma adubação localizada. Este resultado mostra o potencial do uso da agricultura de precisão, que proporciona uma diminuição da variabilidade espacial dos atributos trabalhados.

Com exceção do Zn todos os atributos estudados estavam em nível de disponibilidade suficientes ao desenvolvimento da cultura, fato este que influenciou a produtividade de AP não ser significativamente superior. A produtividade média interpolada foi praticamente a mesma para ambos os sistemas, sendo que na maior parte da área (59,7%) AP apresentou maior produtividade que AC. Ressalte-se que os resultados são relativos a somente um ano de experimento.

## 7 REFERÊNCIAS

- ANDA Associação Nacional para Difusão de Adubos. Solos, análises dizem o que falta. **Revista DBO Agrotecnologia**. Disponível em [www.anda.org.br/portug/boletins](http://www.anda.org.br/portug/boletins). Acesso em: 25 jan. 2010.
- ANDREOLA, F.; COSTA, L.M.; MENDONÇA, E.S.; OLSZEWSKI, N. Propriedades químicas de uma terra roxa estruturada influenciadas pela cobertura vegetal de inverno e pela adubação orgânica e mineral. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p.609-620, 2000.
- ASSMANN, A. L. **Adubação nitrogenada de forrageiras de estação fria em presença e ausência de trevo branco, na produção de pastagem e animal em área de integração lavoura-pecuária**. 2002. Tese (Doutorado em Agronomia – Produção Vegetal) - Departamento de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.
- BALBINOT JUNIOR, A. A.; MORAES, A.; VEIGA, M.; PELISSARI, A.; DIECKOW, J. Integração lavoura-pecuária: intensificação de uso de áreas agrícolas. **Ciência Rural**, Santa Maria v.39, n.6, set, 2009.
- BALASTREIRE, L. A. Aplicação Localizada de Insumos – ALI: Um velho conceito novo. In: XXIII **CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**, 1994, Campinas, SP. Campinas: UNICAMP/SBEA, 1994, p. 248.
- BALASTREIRE, L. A. A experiência com pesquisas em Agricultura de Precisão na ESALQ-USP. In: **ANAIS DO CONGRESSO E FEIRA PARA USUÁRIOS DE GEOPROCESSAMENTO DA AMÉRICA LATINA**, 4, 1998, Curitiba: Microservice, 1998. 1 CR-ROM.
- BALASTREIRE, L. A.; ELIAS, A. I; AMARAL, J. R. do. Agricultura de Precisão: mapeamento da produtividade da cultura do milho. **Engenharia Rural**, Piracicaba, v. 8, n. 1, p. 97-111, 1997.
- BARRETO, A. C.; FERNANDES, M. F. Cultivo de *Gliricidia sepium* e *Leucaena leucocephala* em alamedas visando a melhoria dos solos dos tabuleiros costeiros. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 10, p. 1287-1293, 2001.
- BAZZI, C. L.; SOUZA, E. G. ; URIBE-OPAZO, M. A. ; SANTOS, D. ; KONOPATZKI, M R S . Uso da validação cruzada na seleção de modelos de semivariogramas. In: **ANAIS DO XXXVIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**. Petrolina/Juazeiro 2009. v. 1. p. 1-4.
- BIFFI, L. J. **Mapeamento e análise espacial de variáveis de produção de maçã conduzida sobre pomar comercial na região de São Joaquim – SC**. 2006. 106 p. Dissertação (Mestrado) – Centro de Ciências Agroveterinárias. UDESC. 2006.
- BLACKMORE, S. Precision farming: an introduction. **Outlook on Agriculture**. Elmsford, v.23, n.4, p. 75-284, 1994.
- BRASIL. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E REFORMA AGRÁRIA. **Regras para análise de sementes**. Brasília, 1992.
- CALEGARI, A. A importância da rotação de culturas. Plantio Direto. **Revista A Granja**. nº 471, ano 66. p. 65-67. Set. 2010.
- CAMBARDELLA, 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**, v.58, p. 1501-1511, 1994.

CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M.V. **Introdução à ciência da geoinformação**. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/livros.html>. Acesso em: mar. 2008.

CARVALHO, M.P.; TAKEDA, E.Y.; FREDDI, O.S. Variabilidade espacial de atributos de um solo sob videira em Vitória-Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v.27, n.4, p. 695-703, 2003.

COELHO, E.C.; SOUZA, E.G.; URIBE-OPAZO, M.A.; PINHEIRO NETO, R. Influência da densidade amostral e do tipo de interpolador na elaboração de mapas temáticos. **Acta Scientiarum Agronomy**. Maringá, v.31, n.1, p. 165-174, 2009.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento de safra de grãos, sétimo levantamento, abril/2010**. Brasília: Conab. 2010. 42p. Disponível em: [http://www.conab.gov.br/conabweb/download/safra/7graos\\_7\\_4.10.pdf](http://www.conab.gov.br/conabweb/download/safra/7graos_7_4.10.pdf). Acesso em: 29 abr. 2010.

COSTA, J. M.; OLIVEIRA, E. F. de. **Fertilidade do solo e nutrição de plantas: culturas: soja-milho-trigo-algodão-feijão**. 2ed. Campo Mourão: COAMO, Cascavel: COODETEC, 2001.

DELLAMEA, R.B.C. **Eficiência da adubação a taxa variável em áreas manejadas com agricultura de precisão no Rio Grande do Sul**. Dissertação (Mestrado), p.161. Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, RS, 2008.

DELLAMEA, R.B.C.; AMADO, T.J.C.; BELLÉ, G. L.; LONDERO, G.T.; DONDÉ, R.J. AP voltada à melhoria da fertilidade do solo no sistema plantio direto. **III CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO**. Gramado (2007), CD ROM.

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

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2ed. Rio de Janeiro, 1997.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistemas de produção, n.2: Cultivo do milho**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e sorgo. 2009. Disponível em: <[http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/milho\\_5\\_ed/feramostra.htm](http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/milho_5_ed/feramostra.htm)>. Acesso em: 27 de abril de 2010.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistemas de produção, n.2: Cultivo do milho**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e sorgo. 2008. Disponível em: <<http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/milho/mandireto.htm>>. Acesso em: 27 abr. 2010.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistemas de produção, n.2: Tecnologias de Produção de Soja Paraná 2004**. Disponível em: <<http://www.cnpso.embrapa.br/producaosojaPR/SojanoBrasil.htm>>. Acesso em: 27 jul. 2010.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solo**. 2 ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 2006.

FALKER Automação Agrícola. **Parâmetros para avaliação da resistência à penetração**. Nota de Aplicação –PLG1020 – n3. Ver. A – Ago 2009.

FARNHAM, D. E. *Site-specific crop management: what have we learned and where do we go from here?* Ames: Iowa State University-Department of Agronomy, 2000. 6 p.

FERREIRA, E. V. O.; ANGHINONI, I.; ANDRIGUETTI, M. H.; MARTINS, A.P.; CARVALHO, P. C. F. Ciclagem e balanço de potássio e produtividade de soja na integração lavoura-pecuária sob semeadura direta<sup>(1)</sup>. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35. p.161-169, 2011.

FIEZ, T. E.; MILLER, B. C.; PAN, W. L. Assessment of spatially variable nitrogen fertilizer management in winter wheat. **Journal of Production Agriculture**, Madison, v. 7, n.1, p. 86-93, may, 1994.

FRIDGEN, J.J.; KITCHEN, N.R.; SUDDUTH, K.A. Variability of soil and landscape attributes within sub-field management zones. International conference on precision agriculture, 5., 2000, Minneapolis. **Proceeding**. Minneapolis: University of Minnesota, 2000. 1 CD-ROM.

GIMENEZ, L.M.; MOLIN, J.P. Mapeamento da produtividade. *In*: MACHADO, P.L.O.A.; BERNARDI, A.C.C.; SILVA, C.A. **Agricultura de precisão para o manejo da fertilidade do solo em sistema plantio direto**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, cap.4, 2004.

GOERING, C. E. Recycling a concept. **Agricultural Engineering**, St. Joseph, v. 65, n. 6, p. 25, 1993.

GOEDERT, W.J.; SCHERMACK, M.J.; FREITAS, F.C. Estado de compactação do solo em áreas cultivadas no sistema de plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 2, p. 223-227, fev. 2002.

HAMZA, M.A.; ANDERSON, W.K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.82, n.2, p.121-145, Jun. 2005.

JORGE, L. A. C.; TORRE-NETO, A. Agricultura de precisão. Embrapa Instrumentação Agropecuária. **Jornal Agrosoft**. Disponível em: [www.agrosoft.org.br/agropag/58.htm](http://www.agrosoft.org.br/agropag/58.htm). Acesso em: 12 ago. 2010.

KILIÇ, K.; ÖZGÖZ, E.; AKBA, F. Assessment of spatial variability in penetration resistance as related to some soil physical properties of two fluvents in Turkey. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.76, n.1, p. 1-11. 2004.

KRAVCHENKO, A. N.; BULLOCK, D. G. A comparative study of interpretation methods for mapping properties. **Agronomy Journal**, v. 91, p. 393-400. 1999.

LANDERS, J.N. Tropical crop-livestock systems in conservation agriculture. The Brazilian experience. **Integrated Crop Management**, v.5, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 2007.

LANDIS, J.R.; KOCH, G.G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, St. Louis, v.33, n.1, p.159-174, 1977.

LEAL, J. C. G. **Mapeamento da produtividade na colheita mecanizada do café**. 2002. 74 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

McKENZIE, B.A.; HAMPTON, J.G.; WHITE, J.G.H; Annual crop production principles. *In*: WHITE, J.; HODGSON,L. (Eds) **New Zealand Pasture and Crop Science**. Oxford: Oxford University Press, p. 199-212. 1999.

MEGDA, M.M.; CARVALHO, M.P.; VIEIRA, M.X.; ANDREOTTI, M.; PEREIRA, E.C. Correlação linear e espacial entre a produtividade de feijão e a porosidade de um Latossolo Vermelho de Selvíria (MS). **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa,v.32, n.2, p. 781-788, 2008.

MIRANDA, J.I. **Fundamentos de sistemas de informações geográficas**. Embrapa, Brasília, 2005.

MOLIN, J. P. **Agricultura de Precisão: O gerenciamento da variabilidade**. Piracicaba, SP, 2001.

MOLIN, J. P. Desafios da agricultura brasileira a partir da agricultura de precisão. In: **Simpósio sobre rotação soja/milho no plantio direto**, 3, 2002, Campinas. 9 p. Disponível em: <[http://www.potafos.org/ppiweb/pbrazil.nsf/\\$webindex/article=36ED230B83256C950066174233DC5CAO!opendocument/](http://www.potafos.org/ppiweb/pbrazil.nsf/$webindex/article=36ED230B83256C950066174233DC5CAO!opendocument/)> Acesso em: 8 jul. 2007.

MOLIN, J. P.; MASCARIN, L. S.; VIEIRA JUNIOR, P. A. Avaliação de intervenções em unidades de aplicação localizada de fertilizantes e de populações de milho. **Engenharia Agrícola** v.26, n.2, Jaboticabal, 2006.

NATALE W.; PRADO, R.M., 2002. Avaliação da fertilidade do solo e do estado nutricional de plantas. Disponível em: /[www.todafruta.com.br/portal/icNoticiaAberta.asp?idNoticia=222](http://www.todafruta.com.br/portal/icNoticiaAberta.asp?idNoticia=222). Acesso em: 26 out. 2010.

OLIVEIRA,G.C.; DIAS JUNIOR,M.S.; Rescke, D.V.S.; CURTI, N. Alterações estruturais e comportamento compressivo de um Latossolo Vermelho distrófico argiloso sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v. 38, n. 2, p. 291-299, fev. 2003

ORTIZ, J. L.; FREITAS, M. I. C. Análise da transformação do uso da terra, vegetação e impactos ambientais por meio de sensoriamento remoto e geoprocessamento. São Paulo, UNESP, **Geociências**, Rio Claro, v. 24, n. 1, p. 77-89, 2005.

PENTEADO, S. R. **Adubação verde e produção de biomassa: Melhoria e recuperação dos solos**. Campinas - SP, Fraga e Penteado: Livros Via Orgânica, 2007.

PERIN, G. F. **Determinação da capacidade e eficiência operacional utilizando técnicas de agricultura de precisão**. 2008. 114p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria – RS, 2008.

PERIN, A.; GUERRA, J .G. M.; TEIXEIRA, M. G.; PEREIRA, M. G.; FONTANA, A. Efeito da cobertura viva com leguminosas herbáceas perenes na agregação de um argissolo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.26, p.713-720, 2002.

PIMENTEL-GOMES, F.; GARCIA, C. H. **Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais**. Piracicaba: Biblioteca de Ciências Agrárias Luiz de Queiroz. FEALQ. 2002.

PIRES, J. L. F.; CUNHA, G. R. DA; PASINATO, A.; FRANÇA, S.; RAMBO, L. **Discutindo agricultura de precisão – aspectos gerais**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2004. 18p. HTML (Emparapa Trigo. Documentos OnLine; 42) Disponível em: <http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/do/p> . Acesso em: 12 jul. 2008.

RAMIREZ-LOPEZ, L.; REINA-SANCHEZ, A.; CAMACHO-TAMAYO, J.H. Variabilidad espacial de atributos físicos de un Typic Haplustox de los Llanos Orientales de Colômbia. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.28, n.1, p. 55-63, 2008.

REINERT, D. J.; REINERT, J. M. Propriedades físicas do solo. Universidade Federal de Santa Maria, RS - **Apostila**. 18p. 2006.

RESENDE, M; CURTI, N.; REZENDE, S. B; CORREA, G. F. **Pedologia base para distinção de ambientes**. 4ed. Viçosa, MG: NEPUT, 2002.

ROSSATO, R. R. **Potencial de ciclagem de nitrogênio e potássio pelo nabo forrageiro intercalar ao cultivo do milho e trigo em plantio direto**. 2004. 106p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria-RS, 2004.

SÁ, M.F.M. **Abordagem quantitativa na predição espacial de atributos do solo e geração de zonas de manejo agrícola**. 2001. 117 f. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

SANTI, A.; AMADO, T. J. C. & ACOSTA, J. A. A. Adubação nitrogenada na aveia preta. I - Influência na produção de matéria seca e ciclagem de nutrientes sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27. p.1075-1083, 2003.

SAMORA, R. **Produtividade menor deve afetar safra de soja 10/11 do Paraná Reuters/Brasil Online**. Publicada em 30/08/2010 às 17h33m. Disponível em: [/oglobo.globo.com/pais/mat/2010/08/30/produtividade-menor-deve-afetar-safra-de-soja-10-11-do-parana-917510537.asp](http://oglobo.globo.com/pais/mat/2010/08/30/produtividade-menor-deve-afetar-safra-de-soja-10-11-do-parana-917510537.asp). Acesso em: 12 out. 2010.

SANTI, A. L; ROSSATO, R. R. **Agricultura de Precisão Amostragem do Solo**. Disponível em: [www.portaldoagronegocio.com.br/conteudo.php?id=23787](http://www.portaldoagronegocio.com.br/conteudo.php?id=23787). Acesso em: 22 out. 2010.

SCHAFFRATH, V.R.; TORMENA, C.A.; GONÇALVES, A.C.A.; FIDALSKI, J. Variabilidade e correlação espacial de propriedades físicas de solo sob plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.4, p. 1369-1377, 2008.

SCHUELLER, J. K. A review and integrating analysis of Spatially-Variable Crop Control of crop production. **Fertilizer Research**, The Hague, v.33, p.1-34, 1992.

SECCO, D.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; ROS, C. O. Produtividade de soja e propriedades físicas de um Latossolo submetido a sistemas de manejo e compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.5, p. 797-804, 2004.

SILVA, F. M.; SOUZA, Z. M.; FIGUEIREDO, C. A. P.; MARQUES JUNIOR, J.; MACHADO, R. V. Variabilidade espacial de atributos químicos e de produtividade na cultura do café. **Ciência Rural**. Santa Maria v. 37, n. 2, 2007.

SILVA, L. S.; CAMARGO, F. A. O.; CERETTA, C. A. Composição de fase sólida orgânica do solo. In: MEURER, E. J. **Fundamentos de química do solo**. 2ed. Porto Alegre: Gênese, 2004. Cap. 3, p. 73-100.

SILVA, V. R; REINERT, D. J; REICHERT, J. M. Susceptibilidade à compactação de um Latossolo vermelho-escuro e de um Podzólico vermelho- Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24: p. 239-249, 2000.

SOARES, I. I. B. B. Redes WLAN: Fundamentação Teórica: Interpolação de Dados. 2006. Disponível em: [www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialredeswlan/pagina\\_2.asp](http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialredeswlan/pagina_2.asp). Acesso em: 28 de out. 2010.

SOUZA, W.J.O.; MELO, W.J. Matéria orgânica em um Latossolo submetido a diferentes sistemas de produção de milho. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v.27, p. 1113 – 1122. 2003

SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; BENTO, M. J. C. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v.8, n.1, p. 51-58, 2004.

SOUZA, Z .M.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Spatial variability of the physical and mineralogical properties of the soil from the areas with variation in landscape shapes. **Braz. arch. biol. technol.**, Curitiba, v. 52, n. 2, Apr. 2009. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1516-89132009000200007&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-89132009000200007&lng=en&nrm=iso). Acesso em: 01 nov. 2010.

STEWART, C. M.; MCBRATNEY, A. B. Development of a methodology for the variable-rate application of fertilizer in irrigated cotton fields. **INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE**, 5, 2000, Minneapolis. *Proceeding*. Minneapolis: University of Minnesota, 2000. 1 CD-ROM.

STRUDLEY, M. W.; GREEN, T. R.; ASCOUGH, J. C.; Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: State of the science. **Soil and Tillage Research**. Amsterdam, v.99, n.1, p. 4-48, 2008.

SUZUKI, L. E. A. S.; REICHERT, J. M.; REINERT, D .J.; LIMA, C .L. R. Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.42, n.8, p.1159-1167, 2007.

TOSI, F. A. **GPS na agricultura/2000**. Artigo. Disponível em <http://www.gaussmapeamentocom.br> Acesso em: 10 mai. 2005.

TRACY, B. F.; ZHANG, Y. Soil compaction, corn yield response, and soil nutrient pool dynamics within an integrated croplivestock system in Illinois. **Crop Science**, Madison, v.48, n.3, p.1211-1218, 2008.

TROECH, F. R.; THOMPSON, L. M. **Solos e fertilidade do solo**. 6ed. São Paulo: Ed. Andrei, 2007.

WANG, H. J., SHI, X. Z., YU, D. S., WEIDORF, D. C., HUANG, B., SUN, W. X., RITSEMA, C. J., MILNE, E. Factors determining soil nutrient distribution in a small-scaled watershed in the purple soil region of Sichuan Province, **Soil and Tillage Research, Soil and Tillage Research**. China v.105, n.3 p.300-306, 2009.

WIEDA, R., BORGELT, S. T. Geoestatistical analysis of plant nutrients from sample nested grids. St. Joseph. **ASAE Paper**, MCR93-131, 14p. 1993.

WOLLENHAUPT, N. C.; WOLKOWSKI, R. P.; CLAYTON, M. K. Mapping soil test phosphorus and potassium for variable-rate fertilizer application. **Journal of Production Agriculture**, n.7: p.441-448, 1994.

YASREBI, J.; SAFFARI, M.; FATHI, H.; KARIMIAN, N.; MOAZALLAHI, M.; GAZNI, R. Evaluation and comparison of ordinary kriging and inverse distance weighting methods for prediction of spatial variability of some soil chemical parameters. **Research Journal of Biological Sciences**, Faisalabad, v.4, n.1, p. 93-102, 2009.

ZHANG, N.; WANG, M.; WANG, N. Precision agriculture – a worldwide overview. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 36, p. 113-132, 2002.