

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

**MÉTODOS GEOESTATÍSTICOS NO ESTUDO DE
ATRIBUTOS QUÍMICOS E FÍSICOS DO SOLO EM DOIS
SISTEMAS DE CULTIVO DA SOJA NO CERRADO**

JOSÉ MARCÍLIO DA SILVA

**ALEGRE
ESPÍRITO SANTO - BRASIL
NOVEMBRO – 2006**

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

**MÉTODOS GEOESTATÍSTICOS NO ESTUDO DE
ATRIBUTOS QUÍMICOS E FÍSICOS DO SOLO EM DOIS
SISTEMAS DE CULTIVO DA SOJA NO CERRADO**

JOSÉ MARCÍLIO DA SILVA

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, para obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal.

Orientador: Prof. Dr. Julião Soares de Souza Lima

Co-orientadores: Prof. Dr. Renato Ribeiro Passos
Prof. Dr. Fábio Ribeiro Pires

**ALEGRE
ESPÍRITO SANTO - BRASIL
NOVEMBRO – 2006**

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

S586m Silva, José Marcílio da, 1968-
Métodos geoestatísticos no estudo de atributos químicos e físicos do solo em dois sistemas de cultivo da soja no cerrado / José Marcílio da Silva. – 2006.
106 f. : il.

Orientador: Julião Soares de Souza Lima.

Co-Orientadores: Fábio Ribeiro Pires e Renato Ribeiro Passos.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias.

1. Solos - Conservação. 2. Solos - Manejo. 3. Soja - Cultivo. 4. Análise espacial (Estatística). 5. Métodos estatísticos. I. Lima, Julião Soares de Souza. II. Pires, Fábio Ribeiro. III. Passos, Renato Ribeiro. IV. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias. V. Título.

CDU: 63

MÉTODOS GEOESTATÍSTICOS NO ESTUDO DE ATRIBUTOS QUÍMICOS E FÍSICOS DO SOLO EM DOIS SISTEMAS DE CULTIVO DA SOJA NO CERRADO

JOSÉ MARCÍLIO DA SILVA

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, para obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal.

Aprovada: 01 de novembro de 2006.

Prof. Dr. Alexandre Cândido Xavier
Centro de Ciências Agrárias - UFES

Prof. Dr. Mauri Martins Teixeira
Universidade Federal de Viçosa - UFV

Prof. Dr. Renato Ribeiro Passos
Centro de Ciências Agrárias - UFES
(Co-orientador)

Prof. Dr. Fábio Ribeiro Pires
CEUNES – UFES
(Co-orientador)

Prof. Dr. Julião Soares de Souza Lima
Centro de Ciências Agrárias – UFES
(Orientador)

AO DEUS ETERNO CRIADOR DOS CÉUS E DA TERRA

AGRADEÇO

AOS MEUS PAIS

VICENTE PAULO DA SILVA
MARIA LUISA DA SILVA (*in memoriam*)

DEDICO

À MINHA FAMÍLIA

MÁRCIA CRISTINA FIGUEIRA DA SILVA
NATHÁLIA FIGUEIRA DA SILVA
LUCAS FIGUEIRA DA SILVA
JOÃO PEDRO FIGUEIRA DA SILVA

OFEREÇO

AOS MEUS IRMÃOS

MARIA JOSÉ, MÁRIO JOSÉ, MARCOS ANTÔNIO,
JOSÉ GILBERTO, DIVA LUÍZA, ISAQUE JOSÉ,
JOSIAS JOSÉ E MÁRCIA LUÍZA.

HOMENAGEIO

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço ao meu Deus que me deu a vida através dos meus queridos pais Vicente Paulo da Silva e Maria Luisa da Silva, os quais me ensinaram a olhar com bondade e ternura as pequenas coisas da vida, instruindo-me no caminho em que se deve andar para que, até quando envelhecer, não me desvie dele.

Aos meus sogros Francisco Figueira (*in-memorian*) e Edylia Ribeiro dos Santos Figueira, pelo carinho de ter-me como filho e pela confiança em entregar sua filha para ser minha esposa. Deus os abençoe.

À minha amada e querida esposa Márcia Cristina Figueira da Silva, pelo amor, carinho, compreensão, apoio, dedicação e motivação constante, indispensáveis à realização deste trabalho; pela paciência em superar minha ausência cuidando dos nossos filhos, na certeza que juntos fomos responsáveis pela conclusão desta dissertação de mestrado, com alegria pelos ganhos intelectuais e espirituais nesta fase da minha vida profissional.

Aos meus queridos e lindos filhos Nathália Figueira da Silva, Lucas Figueira da Silva e João Pedro Figueira da Silva, que souberam entender e aceitar o que o papai estava fazendo. Amo vocês hoje mais do que ontem e menos do que amanhã.

Ao meu orientador Professor Dr. Julião Soares de Souza Lima, pela orientação deste trabalho de pesquisa, pela paciência, compreensão, incentivo nas horas difíceis e conhecimentos transmitidos, pela confiança, convivência saudável e, acima de tudo, pela sua grande amizade, o meu muito obrigado. Deus o abençoe.

Aos meus co-orientadores Professor Dr. Renato Ribeiro Passos e Professor Dr. Fábio Ribeiro Pires, pela convivência agradável, amizade e pelas valiosas contribuições, incentivos e sugestões neste trabalho de dissertação.

Aos meus conselheiros Professor Dr. Alexandre Cândido Xavier e Professor Dr. Renato Lara de Assis pela amizade, incentivo e grande parcela de ajuda, pelas sugestões e colaborações nos trabalhos realizados.

Ao professor Dr. Luis Cesar da Silva pela grande contribuição no abstract e pela sua amizade. Obrigado.

Ao professor Dr. Paulo César Oliveira e sua esposa Regina Gonçalves dos Santos Oliveira, pela convivência e pela grande amizade. O meu reconhecimento.

Ao Laboratório de Análise de Solos e Folhas da Fundação de Ensino Superior da Universidade de Rio Verde (FESURV – Rio Verde, GO), pela oportunidade na realização das análises físicas do solo.

Ao Departamento de Engenharia Rural do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo (CCA – UFES/Alegre – ES) e a Faculdade de Agronomia da FESURV, pelas portas abertas durante a realização desta dissertação.

Às Coordenações do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal (PPGPV) do CCA-UFES e da FESURV, por esta grandiosa oportunidade a mim concedida.

À Escola Agrotécnica Federal de Araguatins, TO, pela liberação para realização desta capacitação profissional em nível de Mestrado.

Aos colegas Antônio da Lapa Rocha Passos, Cleofan Cardoso Guimarães e Raimundo João Bueno pela grande amizade construída e pela convivência agradável durante nossas jornadas de trabalho na EAFA-TO.

À Célia Cristina de Souza Lima, pela revisão lingüística deste trabalho de dissertação, o meu reconhecimento.

À secretária da Pós-Graduação Madalena Caetano Capucho de Oliveira, pela atenção, informações e trabalhos prestados.

À Maria Cândida Resende Regis Mauri (Bibliotecária do CCA-UFES), pelo auxílio e orientação na revisão das referências desta dissertação de mestrado. Muito obrigado.

Ao Coordenador de Pesquisa Dr. Carlos César Evangelista Menezes (FESURV) e ao Engenheiro Agrônomo Sr. Maurício Miguel da Cooperativa Mista dos Produtores Rurais do Sudoeste Goiano – COMIGO, pela grande ajuda prestada na escolha da área experimental e realização das análises químicas dos solos.

Ao proprietário da Fazenda Monte Alegre, Sr. Leonardo Macedo Fonseca, pela concessão da área experimental para realização deste trabalho de pesquisa, muito obrigado.

Aos futuros Engenheiros Agrônomos Aderlan Vieira Aguiar, Kássio Silva Ramos e Alexandre Luiz Barros, pela colaboração e total apoio durante as atividades de campo realizadas na Fazenda Monte Alegre no município de Rio Verde, Estado de Goiás.

Ao casal Sr. Cosme Brasil dos Santos e sua digna esposa Sr^a Necy Ferreira de Souza pela hospitalidade durante todos os dias que estivemos na Fazenda Monte Alegre realizando a coleta dos dados.

Aos colegas de mestrado da Pós-Graduação em Produção Vegetal do CCA-UFES, pela convivência agradável durante a realização do curso, em especial ao Vítor José Brum, Izaías dos Santos Bregoncci, Rosembergue Bragança, Idalúcia Shimith Bergher, Fabiana Ramos Dias Caçador, Pedro Quarto Júnior, Alaert Zini Júnior e Fernando Carlos Stocco, pela grande amizade construída, companheirismo, convivência agradável e pelos momentos felizes de descontração.

À Alice Pereira Lopes, minha senhoria e irmã em Cristo, pela hospitalidade em sua residência durante o período que morei na Cidade de Alegre – ES.

Ao casal Erasmo Rezende Moço e Justina de Fátima Christófori Moço, por tudo que fizeram por mim durante minha estadia na Cidade de Alegre – ES. Deus os abençoe sempre.

A todos os irmãos em Cristo Jesus da Assembléia de Deus que me apresentaram a Deus para que os meus objetivos fossem alcançados, em especial aos Pastores José Ribamar C. dos Santos e Deuramar Ribeiro Leite, a minha gratidão.

A todos aqueles que sempre se fizeram presente em minha vida e que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho de pesquisa, fica aqui registrada a minha gratidão.

Até aqui nos ajudou o SENHOR (I Samuel 7.12).

“Lançar mão no arado não é trabalho para muitos, mas para poucos, os que assumem sem olhar para trás, pois quem no arado põe a mão tem trabalho certo e perto tem serviço e profissão” (Lucas. 9.62).

BIOGRAFIA

JOSÉ MARCÍLIO DA SILVA, filho de Vicente Paulo da Silva e Maria Luisa da Silva, nasceu em 23 de agosto de 1968, na Cidade de Barreiros, Estado de Pernambuco.

Concluiu o segundo grau na Escola Agrotécnica Federal de Barreiros, no ano de 1986, na Cidade de Barreiros, Estado de Pernambuco.

Ingressou no Curso de Licenciatura Plena em Ciências Agrícolas na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro - UFRRJ no ano de 1987, e concluiu no mês de janeiro do ano de 1991. Em março do mesmo ano, ingressou como Professor de Ensino de 1º e 2º Graus na Escola Agrotécnica Federal de Araguatins, Estado do Tocantins, onde se encontra até a data presente.

No ano de 1992, ingressou no Curso de Especialização em *Metodologia do Ensino Superior* na Universidade Federal de Viçosa - UFV, concluindo no mesmo ano.

No ano de 2001, iniciou o Curso de Especialização em *Plantio Direto* na Faculdade de Medicina e Veterinária da Fundação Universidade de Brasília - UnB, concluindo no mês de outubro do ano de 2002.

Em fevereiro de 2005, iniciou o Curso em nível de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal - PPGPV, área de concentração Fitotecnia, no Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo (CCA – UFES/Alegre - ES), concluindo no mês de novembro do ano de 2006.

SUMÁRIO

	Página
DEDICATÓRIA.....	ii
AGRADECIMENTOS.....	iii
BIOGRAFIA.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	xi
LISTA DE EQUAÇÕES.....	xiii
LISTA DE FIGURAS.....	xv
RESUMO.....	xvii
ABSTRACT.....	xix
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1. Contextualização da soja no cenário mundial, brasileiro e na região dos cerrados.....	3
2.2. Caracterização da região e dos solos do cerrado brasileiro.....	6
2.3. Sistemas de manejo em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC).....	9
2.4. Agricultura de precisão.....	13
2.5. Mapeamento da produtividade.....	16
2.6. Variabilidade espacial de atributos do solo em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC).....	18
2.6.1. Amostragem de solo.....	20
2.6.1.1. Profundidade de amostragem de solo.....	21
2.6.2. Atributos químicos e físicos do solo.....	22

2.7. Geoestatística como ferramenta de análise espacial.....	25
2.7.1. Hipóteses de estacionaridade.....	27
2.7.1.1. Estacionaridade intrínseca.....	27
2.7.1.2. Estacionaridade de segunda ordem.....	28
2.7.2. Semivariograma e suas características.....	28
2.7.3. Modelos de semivariograma.....	31
2.7.4. Krigagem.....	32
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	35
3.1. Localização e característica da área experimental.....	35
3.2. Malha regular de distribuição dos pontos de amostragem.....	37
3.3. Classificação e frações granulométricas do solo.....	38
3.4. Preparo do solo, calagem, adubação, semeadura e colheita da soja.....	39
3.5. Produtividade da soja.....	40
3.6. Amostragem do solo e determinação dos atributos químicos e físicos do solo nos sistemas de manejo plantio direto (PD) e preparo convencional (PC).....	40
3.6.1. Determinação dos atributos químicos do solo.....	40
3.6.1.1. pH em CaCl_2	41
3.6.1.2. Matéria orgânica (MO).....	41
3.6.1.3. Fósforo (P) e potássio (K).....	42
3.6.1.4. Cálcio (Ca), magnésio (Mg) e alumínio trocável (Al).....	42
3.6.1.5. Acidez potencial (H+Al).....	42
3.6.1.6. Soma de bases trocáveis (SB), CTC potencial (T) e saturação por bases trocáveis (V).....	42
3.6.2. Avaliação dos atributos físicos do solo.....	43
3.6.2.1. Densidade do solo (Ds).....	44
3.6.2.2. Microporosidade do solo (MiP).....	44
3.6.2.3. Macroporosidade do solo (MaP).....	45
3.6.2.4. Porosidade total calculada do solo (Pt).....	46
3.6.2.5. Resistência mecânica do solo à penetração (RP).....	46
3.6.2.6. Umidade do solo (U).....	46
3.7. Análise estatística.....	47

3.7.1. Análise exploratória descritiva.....	47
3.7.2. Análise exploratória espacial.....	49
3.8. Análise geoestatística.....	50
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	53
4.1. Análise qualitativa dos atributos do solo sob plantio direto (PD) e preparo convencional (PC).....	53
4.1.1. Análise dos atributos químicos do solo.....	53
4.1.2. Análise dos atributos físicos do solo.....	57
4.2. Comparação das médias dos valores dos atributos do solo sob plantio direto (PD) e preparo convencional (PC).....	60
4.2.1. Médias dos atributos químicos do solo.....	60
4.2.2. Médias dos atributos físicos do solo.....	64
4.3. Distribuição espacial dos atributos do solo sob plantio direto (PD) e preparo convencional (PC).....	67
4.3.1. Análise espacial dos atributos químicos e físicos do solo.....	67
4.3.2. Análise espacial da produtividade da soja.....	87
5. CONCLUSÕES.....	90
6. REFERÊNCIAS.....	92

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 01- Estatística descritiva de atributos químicos do solo nas profundidades de 0 a 5 cm e 5 a 15 cm na área sob preparo convencional (PC).....	55
Tabela 02- Estatística descritiva de atributos químicos do solo nas profundidades de 0 a 5 cm e 5 a 15 cm na área sob plantio direto (PD).....	56
Tabela 03- Estatística descritiva de atributos físicos do solo sob preparo convencional (PC) em três profundidades.....	58
Tabela 04- Estatística descritiva de atributos físicos do solo sob plantio direto (PD) em três profundidades.....	58
Tabela 05- Estatística descritiva dos atributos físicos do solo sob plantio direto (PD) e preparo convencional (PC) em duas profundidades.....	60
Tabela 06- Média dos valores de atributos químicos do solo sob plantio direto (PD) e preparo convencional (PC) comparados na mesma profundidade de amostragem.....	62
Tabela 07- Média dos valores de atributos químicos do solo sob plantio direto (PD) e preparo convencional (PC) comparados em duas profundidades de amostragem.....	62
Tabela 08- Média dos valores de atributos físicos do solo sob plantio direto (PD) e preparo convencional (PC) na mesma profundidade de amostragem	65
Tabela 09- Média dos valores da resistência do solo à penetração (RP) e umidade do solo (U) no plantio direto (PD) e preparo convencional (PC) comparados na mesma profundidade de amostragem.....	66
Tabela 10- Parâmetros de ajustes dos semivariogramas escalonados para os atributos químicos no preparo convencional (PC).....	69
Tabela 11- Parâmetros de ajuste dos semivariogramas escalonados para os atributos químicos no plantio direto (PD).....	70
Tabela 12- Parâmetros de ajustes dos semivariogramas escalonados para os atributos físicos no preparo convencional (PC).....	74
Tabela 13- Parâmetros de ajustes dos semivariogramas escalonados para os atributos físicos no plantio direto (PD).....	75
Tabela 14- Estatística descritiva da produtividade da soja ($t\ ha^{-1}$) sob plantio direto (PD) e preparo convencional (PC) do solo.....	87

Tabela 15- Parâmetros de ajustes dos semivariogramas escalonados ajustados à produtividade da soja ($t\ ha^{-1}$) no plantio direto (PD) e preparo convencional (PC).....	88
---	----

LISTA DE EQUAÇÕES

	Página
Equação 01- Estacionaridade intrínseca ($x_i \in D$).....	27
Equação 02- Estacionaridade intrínseca quando ($x_i, x_i + h \in D$).....	27
Equação 03- Estacionaridade de segunda ordem ($x_i \in D$).....	28
Equação 04- Estacionaridade de segunda ordem ($x_i, x_i + h \in D$).....	28
Equação 05- Função da variância espacial.....	28
Equação 06- Semivariograma experimental.....	29
Equação 07- Modelo esférico ($0 < h < a$).....	32
Equação 08- Modelo esférico ($h > a$).....	32
Equação 09- Modelo exponencial.....	32
Equação 10- Modelo gaussiano.....	32
Equação 11- Estimadores de krigagem.....	33
Equação 12- Krigagem da variância do erro.....	33
Equação 13- Função aleatória.....	33
Equação 14- Covariância.....	33
Equação 15- Variável aleatória Z.....	34
Equação 16- Krigagem ordinária.....	34
Equação 17- Densidade do solo.....	44
Equação 18- Microporosidade do solo.....	44
Equação 19- Macroporosidade do solo.....	45
Equação 20- Porosidade total determinada.....	45
Equação 21- Umidade de saturação.....	45
Equação 22- Porosidade total calculada.....	46

Equação 23-	Resistência mecânica do solo à penetração.....	46
Equação 24-	Umidade do solo.....	47
Equação 25-	Média aritmética.....	48
Equação 26-	Variância.....	48
Equação 27-	Desvio padrão.....	49
Equação 28-	Coeficiente de variação.....	49
Equação 29-	Coeficiente de assimetria.....	49
Equação 30-	Coeficiente de curtose.....	49
Equação 31-	Semivariograma experimental.....	50
Equação 32-	Semivariograma escalonado.....	51
Equação 33-	Estimador de krigagem.....	52

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 01- Área ocupada pela vegetação do cerrado.....	07
Figura 02- Características da vegetação do cerrado: a) estratos lenhosos, b) estratos herbáceos.....	08
Figura 03- Ciclo da agricultura de precisão adaptado de AGCO.....	16
Figura 04- Semivariograma experimental e seus parâmetros.....	29
Figura 05- Comparação dos modelos de semivariograma.....	31
Figura 06- Localização da área experimental.....	35
Figura 07- Localização do perímetro e dos talhões A e B da Fazenda Monte Alegre – Rio Verde, Goiás.....	36
Figura 08- Dados médios de precipitação e temperatura entre os meses de outubro de 2005 a abril de 2006.....	37
Figura 09- Distribuição dos pontos de amostragem da malha regular utilizados nas áreas de plantio direto (PD) e preparo convencional (PC).....	38
Figura 10- Esquema de amostragem sistemática do solo utilizada, na área experimental com pá de corte.....	41
Figura 11- Cilindros volumétricos contendo monólitos naturais de solo.....	43
Figura 12- Amostras saturadas para obtenção da densidade do solo, macroporosidade, microporosidade e volume total de poros: a) monólitos saturados, b) unidade de sucção à tensão de 0,06 atm.....	44
Figura 13- Semivariogramas escalonados dos atributos químicos pH, MO, P e K no preparo convencional (PC) e plantio direto (PD) para as profundidades de 0 a 5 cm e 5 a 15 cm do solo.....	71
Figura 14- Semivariogramas ajustados dos atributos químicos Ca, Mg, Al e H+Al no preparo convencional (PC) e plantio direto (PD) para as profundidades de 0 a 5 cm e 5 a 15 cm do solo.....	72
Figura 15- Semivariogramas escalonados dos atributos químicos SB, CTC e V no preparo convencional (PC) e plantio direto (PD) para as profundidades de 0 a 5 cm e 5 a 15 cm do solo.....	73

Figura 16-	Semivariogramas escalonados dos atributos físicos Ds e MiP no preparo convencional (PC) e plantio direto (PD) para as profundidades de 0 a 10 cm, 10 a 20 cm e 20 a 40 cm do solo.....	76
Figura 17-	Semivariogramas escalonados dos atributos físicos MaP e Pt no preparo convencional (PC) e plantio direto (PD) para as profundidades de 0 a 10 cm, 10 a 20 cm e 20 a 40 cm do solo.....	77
Figura 18-	Semivariogramas escalonados dos atributos físicos RP e U no preparo convencional (PC) e plantio direto (PD) para as profundidades de 0 a 20 cm e 20 a 40 cm do solo.....	78
Figura 19-	Mapas da distribuição espacial dos atributos químicos pH (CaCl ₂), MO (g dm ⁻³), P (mg dm ⁻³), Mg (cmol _c dm ⁻³), Al (cmol _c dm ⁻³) e H+Al (cmol _c dm ⁻³) na profundidade de 0 a 5 cm no preparo convencional (PC).....	82
Figura 20-	Mapas da distribuição espacial dos atributos químicos SB (cmol _c dm ⁻³) e CTC (cmol _c dm ⁻³) na profundidade de 0 a 5 cm no preparo convencional (PC).....	83
Figura 21-	Mapas da distribuição espacial dos atributos químicos MO (g dm ⁻³) e P (mg dm ⁻³) na profundidade de 5 a 15 cm no preparo convencional (PC).....	83
Figura 22-	Mapas da distribuição espacial dos atributos químicos K (mg dm ⁻³) e CTC (cmol _c dm ⁻³) na profundidade de 5 a 15 cm no preparo convencional (PC)	84
Figura 23-	Mapas da distribuição espacial do atributo químico CTC (cmol _c dm ⁻³) na profundidade de 0 a 5 cm no plantio direto (PD).....	84
Figura 24-	Mapas da distribuição espacial dos atributos físicos Ds (kg dm ⁻³), MiP (%) e Pt (%) nas profundidade de 0 a 10 cm e 20 a 40 cm no preparo convencional (PC).....	85
Figura 25-	Mapas da distribuição espacial dos atributos físicos Ds (kg dm ⁻³), MaP (%), Pt (%) e RP (MPa) em diferentes profundidades no plantio direto (PD).....	86
Figura 26-	Mapas da distribuição espacial do atributo físico U (g g ⁻¹) na profundidade de 0 a 20 cm no plantio direto (PD).....	87
Figura 27-	<i>Postplot</i> da produtividade da soja: a) área sob preparo convencional, b) área sob plantio direto.....	89

SILVA, José Marcílio da, M.Sc., Universidade Federal do Espírito Santo, novembro de 2006. **Métodos geoestatísticos no estudo de atributos químicos e físicos do solo em dois sistemas de cultivo da soja no cerrado**. Orientador: Julião Soares de Souza Lima. Co-orientadores: Fábio Ribeiro Pires; Renato Ribeiro Passos.

RESUMO - A cultura da soja ocupa grandes extensões de área plantada na região do cerrado brasileiro e, é considerada um commodities de grande importância comercial para a economia do Brasil como fonte geradora de riqueza. A análise geoestatística permite detectar a existência da variabilidade e distribuição espacial, constituindo importante ferramenta na análise e descrição detalhada dos atributos do solo. O presente trabalho teve como objetivo avaliar a variabilidade espacial de atributos químicos e físicos do solo no cultivo de soja sob plantio direto (PD) e preparo convencional do solo (PC), em área de cerrado, usando a técnica da estatística clássica e da geoestatística na análise dos dados. Os dados foram coletados em duas áreas na Fazenda Monte Alegre, no município de Rio Verde – Goiás, em pontos de amostragem georeferenciadas com auxílio de um sistema de posicionamento global (GPS), definidos segundo uma malha regular com 44 pontos, com dimensão de 40 x 55 m. Foram estudados no PD e PC nas profundidades 0 a 10 cm, 10 a 20 cm e 20 a 40 cm os seguintes atributos físicos: densidade do solo (Ds), microporosidade (MiP), macroporosidade (MaP), porosidade total do solo (Pt), e nas profundidades 0 a 20 cm e 20 a 40 cm os atributos resistência mecânica do solo à penetração (RP) e umidade do solo (U); e os seguintes atributos químicos nas profundidades 0 a 5 cm e 5 a 15 cm: potencial hidrogeniônico (pH em CaCl_2), matéria orgânica (MO), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), alumínio (Al), acidez potencial (H+Al), soma de bases (SB), capacidade de troca de cátions (CTC) e saturação por bases trocáveis (V). Foi realizada análise descritiva dos atributos, seguida da análise geoestatística com base nas pressuposições de estacionaridade da hipótese intrínseca pela análise a partir de semivariogramas. Após ajustes dos modelos teóricos, realizou-se a interpolação por krigagem para estimar valores não amostrados no campo, construindo os mapas temáticos de contornos para os atributos que apresentaram distribuição espacial. Oitenta e dois e setenta e três por cento dos atributos químicos apresentam distribuição normal para PD e PC, respectivamente. Os atributos físicos avaliados nas três primeiras

profundidades apresentam cem por cento de distribuição normal, enquanto que nas outras duas não apresentam o mesmo comportamento. Na profundidade 0 a 5 cm, os atributos químicos MO e H+Al não apresentam diferença significativa entre os manejos, o mesmo ocorrendo com o Mg e a CTC na profundidade de 5 a 15 cm. Para o mesmo manejo comparado nas duas profundidades, o P, o Mg e o Al no PC e o Ca no PD não apresentam diferença significativa. A maioria dos atributos químicos avaliados no PC e PD apresenta dependência espacial entre moderada e forte, exceto o K que apresenta baixa dependência espacial no PC na profundidade de 0 a 5 cm. Todos os atributos físicos apresentam diferença significativa, com exceção para Ds e Pt na profundidade de 20 a 40 cm. A maioria dos atributos físicos avaliados no PC do solo apresenta dependência espacial entre moderada e forte, exceto a MaP na profundidade de 0 a 10 cm, Ds e MiP de 10 a 20 cm, MiP e MaP de 20 a 40 cm, e RP nas duas profundidades avaliadas. No PD, os atributos MiP nas três profundidades, a Pt de 10 a 20 cm, Ds e MaP e U na profundidade de 20 a 40 cm apresentam ausência de dependência espacial. O uso do semivariograma escalonado permite verificar o mesmo padrão de dependência espacial para os atributos químicos pH, MO, Al, H+Al e CTC, e físicos Ds e Pt no PC e no PD para RP. O manejo na área sob PC é decisivo no aumento da produtividade da soja em relação à área sob PD. O uso do sistema de informação geográfica associado a métodos geoestatísticos contribui com a tomada de decisão na implementação do manejo do solo, aumentando o potencial de utilização prática desses métodos.

PALAVRAS-CHAVE: Geoestatística, análise espacial, conservação de solo, manejo de solo.

SILVA, José Marcílio da, M.Sc., Federal University of Espírito Santo, November, 2006. **Geostatistical methods in the study of chemical and physical soil attributes in two soybean cultivation systems in the savannah.** Advisor: Julião Soares de Souza Lima. Co-advisors: Fábio Ribeiro Pires; Renato Ribeiro Passos.

ABSTRACT – Nowadays soybean culture occupies great area in Brazilian savannah region. And this commodity has a great commercial importance for economy of Brazil as source of richness. Geostatistics, which allows detecting existence of variability and spatial distribution, constituting an important tool for analysis and detail description of soil attributes. This work was carried out with objective to evaluate spatial variability of chemical and physical attributes of soils cultivated with soybean, under no-tillage (PD) and conventional-tillage (PC) systems. Data analysis was realized by means of classic statistics and geostatistics. Data were collected in Rio Verde – Goiás State, at Fazenda Monte Alegre, where two sample areas were referenced by means of Global Positioning System (GPS), and established a fishnet with 44 points, with dimension of 40 x 55 m. It was studied in these areas the following attributes: (a) in the depths of 0 to 10 cm, 10 to 20 cm and 20 to 40 cm - soil density (Ds), microporosity (MiP), macroporosity (MaP), total porosity of the soil (Pt); (b) in the depths of 0 to 20 cm and 20 to 40 cm - mechanical resistance attributes of the soil to the penetration (RP) and soil moisture (U); and (c) in the depths 0 to 5 cm and 5 to 15 cm the following chemical attributes: the activity of hydrogen ions (pH in CaCl₂), organic matter (MO), phosphorus (P), potassium (K), calcium (Ca), magnesium (Mg), aluminum (Al), potential acidity (H+Al), sum of bases (SB), cation exchange capacity (CTC) and exchangeable base saturation (V). It was accomplished descriptive statistical analysis of the attributes, followed of a geostatistical analysis based in the presuppositions of stationary of the intrinsic hypothesis, from semivariograma analyses. After adjustments of theoretical models, it was applied kriging method to estimate no-sampled values in the field, by building thematic maps that shows spatial distribution for attributes. Eighty two and seventy three percent of chemical attributes showed normal distribution for PC and PD, respectively. All evaluated physical attributes in the three first depths presented normal distribution, while for the others two it was not observed the same behavior. In the depth 0 to 5 cm, the chemical attributes MO and H+Al did not show significant difference between cultivation systems, the same happened with Mg and CTC in the depth 5 to 15 cm. For

the same cultivation system compared in these two depths, P, Mg and Al in PC and Ca in PD did not show significant difference. Most of the studied chemical attributes in PC and PD reveal spatial dependence between moderate and strong, except K that presents low spatial dependence in PC in the depth from 0 to 5 cm. All physical attributes demonstrated significant difference, with exception for Ds and Pt in the depth from 20 to 40 cm. Most of the evaluated physical attributes in PC show spatial dependence between moderate and strong, except MaP in the depth from 0 to 10 cm, Ds and MiP from 10 to 20 cm, MiP and MaP from 20 to 40 cm, and RP in the two considered depths. In PD attributes MiP in the three depths, Pt from 10 to 20 cm, Ds and MaP and U in the depth from 20 to 40 cm do not present spatial dependence. The use of the assigned semivariograms allowed verifying the same pattern of spatial dependence for chemical attributes pH, MO, Al, H+Al and CTC, and physical Ds and Pt in PC and in PD for RP. The soil management practice in PC area was decisive to increase soybean productivity in relation PD area. The use of the Geographic Information System (GIS), associate with geostatistical methods, supports decisions at soil management practice, this increases practical potential uses of these methods.

KEY WORDS: Geostatistic, spatial analyses, soil conservation, soil management.

1. INTRODUÇÃO

Com o surgimento de novas técnicas de sistemas integrados de produção, a agricultura passou por inúmeras modificações, enfrentando novos desafios em contribuir com o aumento da rentabilidade agrícola, impulsionando o desenvolvimento econômico do país. Neste cenário, a soja (*Glycine max* (L.) Merrill), desde a sua introdução no Brasil, tem sido conduzida com alto nível tecnológico em todas as suas operações, constituindo-se em um “commodities” de grande relevância para o desenvolvimento da produção de grãos no Brasil.

Nos últimos anos o aumento progressivo de áreas cultivadas com soja no plantio direto (PD), iniciado há cerca de 35 anos no Brasil com o objetivo de conservar o solo e controlar a erosão, tem resultado no incremento da demanda por informações sobre a variabilidade dos atributos químicos e físicos do solo. O PD constitui-se em uma das práticas essenciais para o desenvolvimento e sustentabilidade da agricultura moderna brasileira, e como um sistema de produção agropecuária que tem como princípio a menor intervenção no solo, mantendo-o o mais protegido possível ao longo dos anos, permitindo obter altas produções sem danificar o solo e o ambiente, que é o fator de vida dos animais e vegetais, consolidando-se como uma tecnologia conservacionista. Nesse contexto, surge a Agricultura de Precisão como ferramenta para o manejo específico das áreas de produção, com técnicas que oferecem grande potencial para o tratamento diferenciado de menores unidades de produção, possibilitando identificar e caracterizar melhor as áreas para o manejo do solo, programando a produção, reduzindo insumos, conhecendo suas causas e a variabilidade espacial dos fatores que

controlam o sistema solo-planta-atmosfera, preservando, com menor impacto possível, o meio ambiente.

Enquanto os sistemas tradicionais tratam as propriedades agrícolas de forma homogênea, a agricultura de precisão contempla a variabilidade espacial desses fatores para a tomada de decisão, recomendando procedimentos distintos para adequação edáfica da gleba monitorada, visando a obtenção de maiores rendimentos.

A maioria dos solos sob vegetação de cerrados tem sido diagnosticado como de baixa fertilidade natural, apresentando interferência direta na disponibilidade de nutrientes para as plantas se desenvolverem e alcançarem altas produtividades. A pobreza química dos solos, todavia, não se constitui em obstáculo para a ocupação de grandes extensões de terra pela agricultura moderna, especialmente à cultura da soja, um dos principais itens da pauta de exportação brasileira, e que ocupa a maior parte das áreas agrícolas no bioma do cerrado.

A estatística clássica considera em suas análises a independência entre as amostras através da média. Ela vem sendo complementada por análise geoestatística, que é considerada um instrumento de análise espacial associada a um sistema de informação geográfica (SIG), que tem se mostrado como poderosa ferramenta de aplicação prática, permitindo obter o mapeamento dos atributos de interesse com o menor erro de estimativa possível. A geoestatística vem despontando como alternativa viável na avaliação da variabilidade espacial de diversos atributos de interesse em Ciências Agrárias, disponibilizando métodos univariantes e multivariantes de interpolação e simulação espacial, baseados em modelos de continuidade espacial, possibilitando a interpretação dos resultados através da variabilidade natural, considerando a existência da dependência espacial dentro da área de amostragem.

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a variabilidade espacial de atributos químicos e físicos do solo e a produtividade da soja cultivada sob plantio direto e preparo convencional, em área de cerrado, usando a técnica da estatística clássica e da geoestatística na análise dos dados.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Contextualização da soja no cenário mundial, brasileiro e na região dos cerrados

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) é uma das espécies cultivadas mais antiga do mundo, sendo domesticada pelos chineses (PADOVAN, 2002). Entretanto, há dúvidas entre os autores sobre o local exato onde a soja cultivada teve sua origem. A maioria acredita que ela é oriunda do Leste da Ásia, mais precisamente das regiões Central e Oeste da China. No entanto, a mais antiga referência sobre a soja na literatura seria a que consta do herbário Pen Ts' ao Kang Um, datando de 2838 a.C. a 2383 a.C. (NEUMANN, 2000).

A partir do século XI a.C., a soja atingiu outros países do Oriente, deslocando-se para o sul da China, Coréia, Japão e Sudeste da Ásia. Após seu surgimento na China, onde era considerada o mais importante legume cultivado e um dos “WuKu”, ou cinco grãos sagrados (os outros eram o arroz, o trigo, a cevada e o milheto), a soja permaneceu no Oriente por dois milênios. Só atingiu o Ocidente no século XV e começo do século XVI. Somente no século XX a soja se expandiu e cresceu sua importância no Ocidente, constituindo-se atualmente na mais importante oleaginosa em produção no mundo sob cultivo extensivo (NEUMANN, 2000).

A soja chegou ao Brasil via Estados Unidos, em 1882. Gustavo Dutra, então professor da Escola de Agronomia da Bahia, realizou os primeiros estudos de avaliação de cultivares introduzidos daquele país. Em 1891, testes de adaptação de cultivares

semelhantes aos conduzidos por Dutra na Bahia, foram realizados no Instituto Agrônomo de Campinas, Estado de São Paulo (SP). Entre 1900 e 1901, este mesmo instituto promoveu a primeira distribuição de sementes de soja para produtores paulistas e para essa mesma data, têm-se registros do primeiro plantio de soja no Rio Grande do Sul (RS), onde a cultura encontrou efetivas condições para se desenvolver e expandir, dadas as semelhanças climáticas do ecossistema de origem dos materiais genéticos (EUA) com as condições climáticas predominantes no RS (EMBRAPA, 2003).

A soja é um cereal de extraordinário valor nutritivo, considerada a mais rica e importante cultura da agricultura moderna, pois nela são encontrados todos os aminoácidos essenciais à vida humana. No entanto, não faz parte da dieta alimentar dos brasileiros (MATTOS, 1987). Mesmo assim, vem passando por diversas mudanças, como alterações nas técnicas de manejo, a exemplo do sistema de semeadura direta ou sistema de plantio direto.

A soja é uma leguminosa de reconhecido valor para a economia nacional como geradora de riqueza; sua produtividade no Brasil cresceu significativamente nos últimos dez anos e grande parte desse aumento deve-se ao melhoramento genético dos cultivares e às inovações tecnológicas empregadas em seu cultivo, além de inúmeros fatores da economia mundial.

A soja é atualmente, no mundo, a primeira fonte para a produção de óleos vegetais; é também a planta que produz mais proteína por hectare e grande fonte de calorias, a ponto de substituir com vantagem a proteína animal na alimentação humana. Apesar disso, apenas recentemente se percebeu sua importância comercial no Brasil, hoje, o segundo maior produtor mundial de grãos, o primeiro maior exportador de óleo de soja e de farelo de soja. Por causa do mercado favorável, a cultura se expandiu da Região Sul para o Sudeste e Centro-Oeste do Brasil, atingindo até o norte do País (FAPCEN, 2002).

Conforme o USDA (Departamento de Agricultura dos Estados Unidos) a safra mundial 2004/2005 de soja cresceu 17% comparada à safra 2003/2004, isso foi ocasionado devido a um aumento de 10% na safra norte americana, 16% na brasileira e 18% na Argentina se comparado à safra de 2003/2004 (IGEAGRO, 2006).

De acordo com o USDA, a produção mundial de soja na safra 2005/2006 é de 221 milhões de toneladas. Os Estados Unidos produziram cerca de 80 milhões de toneladas de soja (36,2%), volume disponível na temporada comercial de agosto de 2005 a setembro de 2006, juntamente com uma de 107 milhões de toneladas da safra sul-americana (48,4%), 17 milhões de toneladas da China (7,7%) e 17 milhões (7,7%) do resto do mundo (ROESSING, 2006).

A área cultivada com grãos no Brasil na safra 2005/2006 foi de 47.198,0 mil hectares, inferior em 3,8% (1,9 milhões de hectares) à da safra 2004/2005 que atingiu 49.068,2 mil hectares de área cultivada. Desse total, a soja ocupa 22.212,2 mil hectares (47,1%) (CONAB, 2006).

A produção nacional de grãos na safra 2005/2006 contabilizada pela Companhia Nacional de Abastecimento é de 119,4 milhões de toneladas, 4,8% (5,5 milhões de toneladas) superior à safra 2004/2005 que atingiu 113,9 milhões de toneladas. Dessa produção a soja participa com 53,4 milhões de toneladas, ou seja, 44,7% do total da produção de grãos do Brasil e 24,2% da produção mundial. Em comparação à safra 2004/2005 que foi de 51,5 milhões de toneladas, verifica-se uma recuperação de 8,8% (195 kg ha^{-1}) na produtividade, que compensou a redução de 4,7% (1,1 milhão de hectares) na área cultivada, resultando na produção de 53,4 milhões de toneladas, superior em 3,7% (1,9 milhão de toneladas) à produção da safra anterior (CONAB, 2006).

O início da história da soja nos cerrados, como cultura de importância para a sustentabilidade da agricultura brasileira, ocorreu no final da década de 70 e início da década de 80. Considerando as áreas do polocentro nos quatro Estados (Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais e Goiás), observa-se que a lavoura da soja neste período (1975 a 1980) foi a que teve crescimentos mais significativos, passando de uma área de 81.719 hectares em 1975 para 519.579 hectares em 1980 (ROESSING & GUEDES, 1993).

A soja é cultivada em todas as regiões brasileiras, com maior concentração nas regiões Centro-Oeste e Sul, que respondem por 50,2% e 33,2% da produção nacional, respectivamente. As regiões Norte, Nordeste e Sudeste participam deste total com: 2,3%; 6,7% e 7,6%, respectivamente (CONAB, 2006).

A evolução da cultura da soja na região Centro-Sul, se dá em uma velocidade surpreendente. De uma área igual a 12,9 milhões de hectares e uma produção de 36,1 milhões de toneladas em 2000/2001, representando uma participação de 94,0% da produção nacional, que atingiu 38,4 milhões de toneladas (CONAB, 2005), passou-se a cultivar 20,2 milhões de hectares, com uma produção de 48,6 milhões de toneladas na safra 2005/2006 (CONAB, 2006). Nesse ano, a produção dessa região já contribuía com 91,0% (inferior em 3% a da safra 2000/2001), para a produção total obtida no país.

No Centro-Oeste, os Estados do Mato Grosso, Goiás, Mato Grosso do Sul e Distrito Federal são os que apresentam maior participação na produção regional de soja, o que se deve à expansão da área cultivada nesta região. O grande aumento da área plantada e da produção de soja nessa região ocorreu na década de 2000. De uma área igual a 5,4 milhões de hectares e uma produção de 17,0 milhões de toneladas em 2000, passou-se a cultivar 10,4 milhões de hectares com uma produção de 26,8 milhões de toneladas em 2006. Os três Estados e o Distrito Federal produziram o equivalente a 50,2% da produção total da região dos cerrados. A produção de soja, na década de 2000, nessa região, tem contribuído para o desenvolvimento da cultura no cenário nacional e determinante para a posição alcançada internacionalmente (CONAB, 2006).

A soja é, dentre as principais culturas, uma das que melhor se adaptam ao PD e, de modo geral, os resultados de literatura indicam que os rendimentos desta cultura, ao se considerar o efeito médio de várias safras, geralmente equivalem-se nos diferentes sistemas de manejo do solo, com pequena vantagem para o plantio direto (MUZILLI, 1981; LANDERS, 1995).

2.2. Caracterização da região e dos solos do cerrado brasileiro

O cerrado é a mais diversificada savana tropical do mundo, sendo o segundo maior bioma brasileiro, superado em área apenas pela Amazônia, ocupando cerca de 25% do território nacional, desde o Mato Grosso do Sul até o Maranhão. Ocupa toda área do Brasil central (Figura 1), sendo considerada a última fronteira agrícola do planeta, com aproximadamente 200 milhões de hectares localizados, em sua maior parte, na região Centro-Oeste (WALTER, 2006).

A distribuição do cerrado brasileiro é descontínua, através de doze Estados da Federação, com destaque para Goiás, Tocantins, Minas Gerais, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, além do Distrito Federal, onde cerca de 60% das terras apresentam aptidão para lavouras (WALTER, 2006).

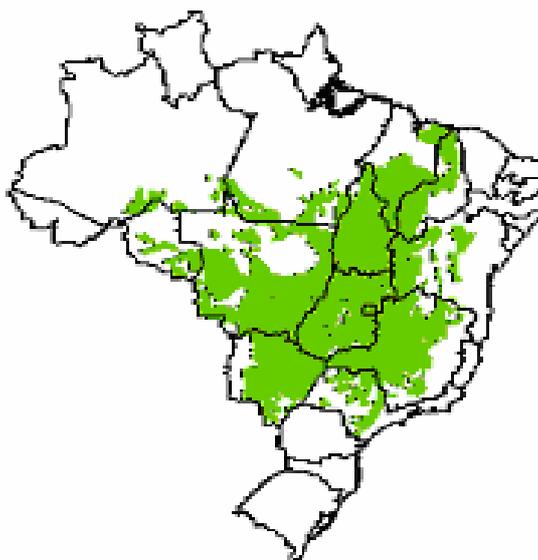


Figura 1 - Área ocupada pela vegetação do cerrado.
Fonte: Portal Brasil (2006).

Devido a sua localização, o cerrado compartilha espécimes com a maioria dos biomas brasileiros (floresta amazônica, caatinga e floresta atlântica) e, por isso, possui uma biodiversidade comparável à da floresta amazônica. De um modo geral, podemos distinguir dois estratos na vegetação dos cerrados: os estratos lenhosos, constituídos por árvores e arbustos, e os estratos herbáceos, formados por ervas e subarbustos (Figuras 2a e 2b).

Os cerrados apresentam relevos variados, embora predominem os amplos planaltos. Metade do cerrado situa-se entre 300 e 600 m acima do nível do mar, e apenas 5,5 % atingem uma altitude acima de 900 m (PORTAL BRASIL, 2006).

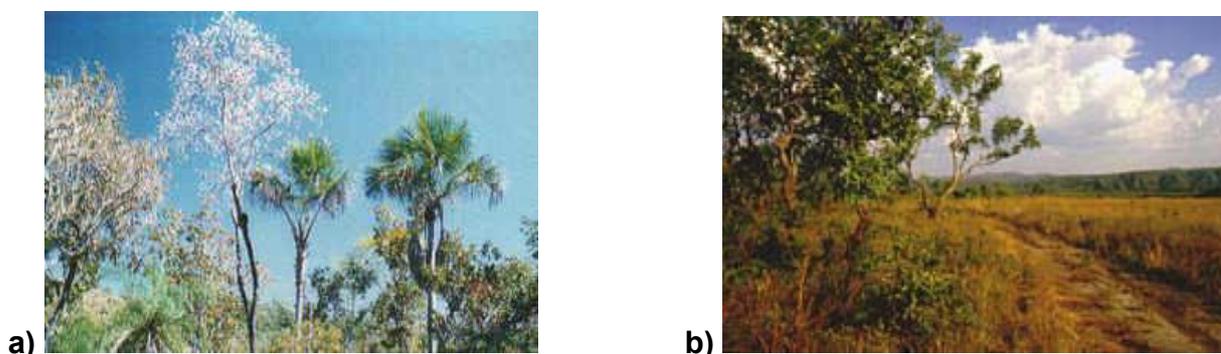


Figura 2 - Características da vegetação do cerrado: a) estratos lenhosos, b) estratos herbáceos.

Fonte: Portal Brasil (2006).

O clima dessa região é estacional, com um período chuvoso característico de outubro a março, seguido por um período seco de abril a setembro. A precipitação média anual é de 1500 mm e as temperaturas estão geralmente entre 22°C e 27°C ao longo do ano. Os remanescentes de cerrado que existem nos dias de hoje se desenvolveram sobre solos muito antigos, intemperizados, ácidos, depauperados em nutrientes e com concentrações elevadas de alumínio. Para torná-los produtivos para fins agrícolas, aplicam-se fertilizantes e corretivos. A pobreza dos solos, portanto, não se constitui em obstáculo para a ocupação de grandes extensões de terra pela agricultura moderna, especialmente a cultura da soja (KLINK & MACHADO, 2006).

Os solos mais usados na exploração agropecuária na região dos cerrados são os Latossolos. Estes solos são considerados como resistentes à erosão em condições naturais. Entretanto, os cultivos anuais e intensivos reduzem essa resistência (CARDOSO, 1993). Ainda segundo o autor, o cultivo desses solos exige a adição de grande quantidade de fertilizantes e corretivos. Assim sendo, a perda da camada superficial por erosão é economicamente mais grave do que em solos onde tais investimentos não são necessários.

2.3. Sistemas de manejo plantio direto (PD) e preparo convencional (PC)

O PD representa a mais significativa alteração no manejo de solos da história moderna da agricultura (MACHADO et al., 2004b). O PD trata de um sistema de produção conservacionista, que se contrapõe ao sistema tradicional de manejo. Envolve o uso de técnicas para produzir, preservando a qualidade ambiental. Fundamenta-se na ausência de preparo do solo e na cobertura permanente do terreno através de rotação de culturas (EMBRAPA, 2003).

O PC, por sua vez, promove maior aeração, quebra dos agregados do solo e incorporação dos resíduos vegetais, provocando rápida decomposição e perda do carbono orgânico ativo, assim como uma mineralização do nitrogênio e do fósforo orgânico existente no solo (HOLTZ, 1995). Para Mantovani (1987), citado por Silva et al. (1992), o PC consiste na combinação de uma aração e duas gradagens feitas com a finalidade de criar condições favoráveis para o estabelecimento da cultura.

O PC incorre em uma mobilização excessiva quando do preparo do solo, podendo diminuir a capacidade de produção, além da degradação física, química e biológica do solo (SCHERPINSKI, 2003).

A expressão plantio direto (PD) é adotada para definir a prática de semeadura ou de cultivo de plantas sem preparo físico do solo, mantendo a palha da cultura anterior na superfície (GASSEN & GASSEN, 1996).

O plantio direto é um sistema de produção agropecuária concebido na busca de uma agricultura sustentável em longo prazo e tem como característica principal o não revolvimento do solo (apenas na linha de semeadura), utilizando-o de acordo com a sua capacidade e protegendo-o conforme a sua necessidade (DIJKSTRA, 1984; SILVA, 2002a).

Saturnino & Landers (1997) afirmam que o plantio direto, quando implantado com critério e conduzido com persistência ao longo dos anos, diminui os riscos e melhora a sustentabilidade da agricultura. Mesmo perante descapitalização do produtor e demais dificuldades e riscos, observa-se a adoção desse sistema pela ampliação das áreas cultivadas, ano após ano, com maior aprendizado e interesse dos produtores pela proteção do solo, pelo manejo de culturas, pelo aumento da matéria orgânica, pela vida do solo e pela possibilidade de redução dos custos e aumento da lucratividade.

Machado (2005) cita que o PD é um termo que vem sendo bastante mencionado ultimamente no Brasil. Ainda segundo o autor, essa técnica de plantio foi introduzida no nosso país no início dos anos setenta, na Região Sul. Desde então, a adoção por parte dos agricultores tem sido cada vez maior, alastrando-se até a região do cerrado brasileiro.

O conceito inicialmente adotado foi derivado da expressão "zero tillage", "no-tillage" ou "direct drilling", que significa sem preparo, definido por Jones et al. (1968), como sendo um procedimento de plantio de uma cultura diretamente sobre uma cobertura morta quimicamente ou sobre resíduos da cultura anterior, sem preparo mecânico do leito de semeadura. Os ingleses e americanos foram os primeiros a mecanizarem a técnica, plantando sementes ou mudas com o mínimo de interferência no solo, preservando os resíduos de cobertura vegetal (SÁ, 1992).

Derpsch (1998) afirma que o plantio direto moderno só se tornou realidade a partir de pesquisas de cientistas norte-americanos e europeus, com o controle químico de plantas daninhas, dispensando-se o uso de cultivos mecânicos. Como resultado desse esforço de pesquisa a Imperial Chemical Industries - ICI, da Inglaterra, lançou no mercado, em 1961, a molécula do "paraquat", descoberta seis anos antes, e que deu o impulso significativo aos primeiros trabalhos e aos fundamentos de formação da palha, base para o uso do PD.

Segundo Koronka (1973) citado por Wiethölter (2000), os primeiros estudos sobre o PD foram realizados na Estação Experimental de Rothamsted na Inglaterra, na mesma década de 40, quando se constatou que o preparo do solo era dispensável, desde que não houvesse competição de plantas daninhas que, segundo Corrêa & Cruz (1987), era o maior problema do PD. Com a descoberta, em 1956, do Paraquat e Diquat esse sistema se tornou uma realidade.

O primeiro experimento comparando o PD com o PC foi implantado em 1961, na estação experimental da Universidade de Ohio, em Wooster, por Glover Triplett. As primeiras culturas comerciais mecanizadas com o plantio direto foram idealizadas e colocadas em prática por Shirley H. Phillips, uma extensionista da Universidade de Kentucky, e por Harry M. Young, um agricultor do mesmo Estado, em um trabalho articulado com a empresa Allis Chalmers, a qual, em 1966, lança a primeira semeadora

com disco ondulado para corte frontal da palha. Em 1973 é lançado o livro "No-tillage Farming" que é, ainda hoje, referência sobre o sistema em todo o mundo (PLATAFORMA PLANTIO DIRETO, 2005).

De acordo com Landers (2001), as primeiras referências sobre a possibilidade de deixar de arar o solo foram feitas por Edward H. Faulkner, em 1943, no livro "Plowman's Folly", em que o autor admitia não haver, até aquele momento, qualquer razão científica razoável para o preparo mecânico do solo e propunha o cultivo mínimo como alternativa. As idéias de Faulkner foram comprovadas por Louis Bromfield em Ohio. Agricultores americanos não estavam, naquela época, preparados para aceitar e usar os conceitos de Faulkner, Scarseth, Bromfield ou Klingham.

Grande parte do sucesso do sistema de plantio direto, consolidado como a maior inovação tecnológica da agricultura no fim do milênio, reside no fato de que a palha deixada por culturas de cobertura sobre a superfície do solo, somada aos resíduos das culturas comerciais, cria um ambiente extremamente favorável ao crescimento vegetal e contribui para a estabilização da produção e para a recuperação ou manutenção da qualidade do solo (AVARENGA, 2001).

O grande ganho do sistema de plantio direto, no entanto, é a redução no processo de erosão, a valorização da terra e a diminuição dos riscos que é uma característica de todos os tipos de agricultura, fundamentando-se na adequação e formação de cobertura morta do solo, na rotação e diversificação de culturas e na redução das operações de preparo do solo (SILVA, 2002a). Ainda segundo o autor, a iniciativa em torno desse sistema tem refletido uma mudança de comportamento dos produtores e técnicos na busca da sustentabilidade da agricultura.

O PD compreende um conjunto de técnicas integradas que visa melhorar as condições ambientais (água-solo-clima) para explorar da melhor forma possível o potencial genético de produção das culturas, respeitando os três requisitos mínimos: não revolvimento do solo, rotação de culturas e uso de culturas de cobertura para formação de palhada, associadas ao manejo integrado de pragas, doenças e plantas daninhas (SILVA, 2002a).

Cruz et al. (2001) afirmam que por seus efeitos benéficos sobre os atributos físicos, químicos e biológicos do solo, o PD torna-se uma ferramenta essencial para se

alcançar a sustentabilidade dos sistemas agropecuários, exigindo, segundo Schindwein (1999), a utilização de novos procedimentos e técnicas de manejo em relação ao sistema convencional.

No PD, as despesas com herbicidas são maiores que no sistema convencional, entretanto, os gastos com os serviços de máquinas são menores. Enquanto o PC requer o uso de grade pesada, escarificador e grade leve, no PD o uso desses implementos é dispensado, pois a semeadura é feita sobre o solo, sem preparo. No final, o custo de produção no PD é menor que no sistema convencional (SNA, 2006).

O PD teve seu início no Brasil no final dos anos 60, nos Estados do Paraná e do Rio Grande do Sul, desenvolvendo-se rapidamente a partir da década de 70. O primeiro PD no Brasil foi realizado na Cidade de Rolândia, Estado do Paraná pelo agricultor Herbert A. Bartz em 1972. Desde então, esse pioneiro do PD pratica ininterruptamente este sistema. Com o processo de adoção pelos agricultores, a partir de 1976, o sistema plantio direto passou a ser adotado e adaptado em quase todas as regiões do país (SILVA, 2002a).

O PD tem contribuído significativamente para o avanço quantitativo e qualitativo da agricultura de grande parte da região tropical brasileira. Consagrado como o sistema conservacionista mais efetivo na resolução dos problemas de degradação dos frágeis solos dos trópicos, reduzindo os custos de proteção ambiental, o PD tem representado o melhor caminho para a diminuição dos custos de produção e sustentabilidade da produtividade agropecuária, sendo adaptado a todos os tamanhos e tipos de exploração (EMBRAPA, 2005). Silva (2002b) afirma que sua adoção em substituição à prática convencional deve ser considerada como um investimento na gestão dos recursos naturais e sócio-econômicos, cujos principais impactos são assegurados pela conservação do solo e economia no uso de maquinários e produtos agroquímicos.

Atualmente, o Brasil tem a segunda maior área de PD do mundo, segundo Machado et al. (2004b), somando cerca de 20 milhões de hectares, com um terço localizado na região do cerrado brasileiro, com grande perspectiva de que a adoção desse sistema de cultivo se estenda para outras regiões agrícolas do país.

No decorrer dos anos 80, o plantio direto evoluiu-se com pioneirismo na região do cerrado brasileiro, ocorrendo maior embasamento técnico e uma expansão de área

em todo o Brasil; tornou-se um sistema diferenciado de produção agropecuária, que mantinha altas produções, sem danificar o solo e o meio ambiente (SILVA, 2002a). Nessa mesma década ocorreu a introdução dos trabalhos visando a viabilização do sistema de plantio direto nos cerrados, fato considerado extremamente importante, “pois atende a maior fronteira agrícola do país, onde há necessidade de cuidados especiais para defesa do meio ambiente” (SADE, 2000).

O PD, na região do cerrado, apresenta desafio como uma ferramenta essencial para se alcançar a sustentabilidade do sistema de manejo, controlando as perdas de solo por erosão, consolidando a principal vantagem e o fator que mais influencia o agricultor na adoção do sistema, onde ele irá praticar a agricultura de forma diferente, tendo uma visão organizada a médio e a longo prazo por seus efeitos benéficos sobre os fatores físicos, químicos e biológicos do solo, tornando-o mais protegido e aumentando a capacidade de produção das plantas.

2.4. Agricultura de precisão

Muitos são os desafios antepostos na agricultura para se alcançar um manejo adequado do solo e das plantas. A agricultura de precisão surge como uma técnica onde as práticas de desenvolvimento agrícola são aplicadas de acordo com as condições de campo, sendo para isso necessário conhecer os fatores determinantes de produção que limitam o crescimento e desenvolvimento dos vegetais.

Para Manzatto et al. (1999), o termo agricultura de precisão vem sendo utilizado, no Brasil, para designar o sistema de produção adotado por agricultores, em outros países denominado de *Precision Agriculture*, *Precision Farming*, *Site-Specific Crop Management*, que consiste em uma técnica de aplicação de insumos no local correto, no momento adequado, na quantidade necessária à produção agrícola para áreas cada vez menores e mais homogêneas, tanto quanto a tecnologia e os custos envolvidos o permitam. Assim, segundo Plant (2001), a agricultura de precisão ou manejo sítio-específico é o manejo de lavouras agrícolas ou pecuárias em uma escala especial, maior que aquela normalmente adotada para toda a lavoura.

A agricultura de precisão tem por princípio básico o manejo da variabilidade espacial dos solos e das culturas no espaço e no tempo (COELHO, 2003). Com base

nesses princípios, Pierce & Nowak (1999) definiram agricultura de precisão como sendo a aplicação de princípios e tecnologias para manejar as variabilidades espaciais e temporais, associadas com todos os aspectos da produção agrícola, com o objetivo de aumentar a produtividade na agricultura e a qualidade ambiental.

Enquanto os sistemas tradicionais tratam as propriedades agrícolas de forma homogênea, tomando como base as condições médias das extensas áreas de produção para programar as ações corretivas dos fatores limitantes da produção, a agricultura de precisão contempla a variabilidade espaço-temporal desses fatores para a tomada de decisão (MANTOVANI et al., 2006), com aplicação de insumos em locais específicos, dividindo-se os campos inteiros em zonas de manejo menores e homogêneas (DOERGE, 2006).

Segundo Luchiari Junior et al. (2004), zonas homogêneas de manejo são utilizadas para delimitação das áreas visando o manejo mais eficiente de insumos em sítios, correspondendo à área do terreno de igual produção potencial, eficiência do uso de insumos e risco de impacto ambiental.

Mantovani et al. (2006) complementam ainda que a agricultura de precisão é uma ferramenta de trabalho para exploração e gerenciamento da produção agrícola, baseado na coleta, organização, processamento e análise de informações relevantes à agricultura com objetivo final de otimizar a produção, reduzir insumos utilizados e preservar com menor impacto possível o ambiente. A agricultura de precisão não se resume na aquisição de equipamentos sofisticados de alta tecnologia, mas sim na aquisição e uso racional da informação obtida a partir daquela tecnologia, visando aumento de produtividade.

Dobermann & Ping (2004) relatam que no manejo do solo a agricultura de precisão tem como principal conceito a aplicação no local correto (espaço) e no momento adequado (tempo) de quantidades de insumos necessários à produção agrícola, para áreas cada vez menores e mais homogêneas, tanto quanto a tecnologia e os custos envolvidos o permitam.

Vários autores relatam que a agricultura de precisão contém três componentes primários: o sistema de posicionamento global (GPS), que fornece a posição onde o equipamento está localizado; o sensoriamento remoto, que são mecanismos para

controle de aplicação de nutrientes, defensivos agrícolas, água ou outros insumos em tempo real; e o uso de sistemas de informações geográficas (SIG), que é um banco de dados que fornece a informação necessária para desenvolver as relações causa efeito e as respostas à aplicação de insumos a várias condições especificamente localizadas (DAVIS et al., 1998; DALLMEYER & SCHLOSSER, 1999).

Conforme Mantovani et al. (2006), a prioridade é para a interferência no sistema de produção, uma vez que, desde 1999, muita ênfase foi dada às duas primeiras, disponibilizando, assim, informações para a realização da intervenção nos sistemas de produção, destacando: estabelecimento de padrões de produção e identificação de causas da variabilidade espacial e temporal, e correção após a colheita; identificação e manejo da variabilidade espacial em tempo real; e manejo de insumos à taxa variável no estabelecimento da cultura. Ainda segundo os autores, nessas intervenções, aplicando as técnicas de agricultura de precisão, a parte agrônômica, instrumental e gerencial deverá estar em sintonia.

A agricultura de precisão através do emprego de informática, programas específicos, sensores, controladores de máquina e sistema de posicionamento global (GPS), conhece, localiza geograficamente e delimita as áreas de diferentes produtividades, reduzindo quantidade de insumos, contaminação ambiental e custos de produção, aumentando os rendimentos das culturas, fornecendo informações para a tomada de decisões de manejo, mais embasadas, prevendo registros de fazenda mais detalhados e úteis (BATCHELOR et al., 1997; CAPELLI, 1999; CAMPO, 2000).

A agricultura de precisão, com base no manejo diferenciado de áreas na agricultura, caracteriza-se em aumentar a eficiência e diminuir os custos de produção. Além disso, suas técnicas devem ser vistas como uma forma de manejo sustentável, na qual as mudanças ocorrem sem prejuízos para as reservas naturais, ao mesmo tempo em que os danos são minimizados.

A Figura 3 mostra o ciclo da agricultura de precisão que, segundo Miranda (2006), envolve um processo complexo cujo funcionamento é o conhecimento baseado no uso de dados obtidos com auxílio de satélites.

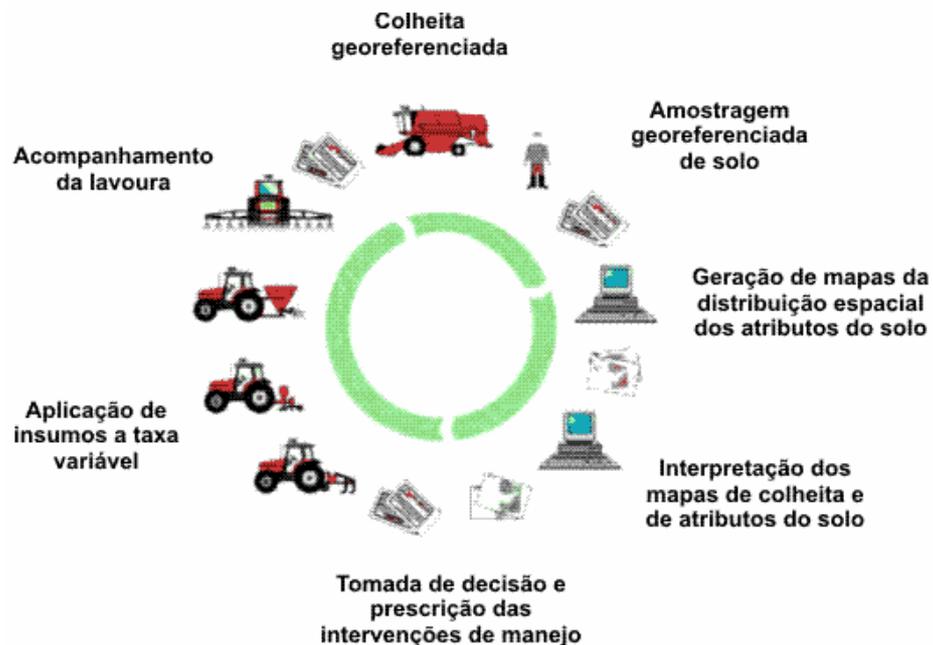


Figura 3 - Ciclo da agricultura de precisão adaptado de AGCO.
Fonte: Amado et al. (2006).

Balastreire (2000) afirma que os principais benefícios econômicos que podem advir da utilização da agricultura de precisão são em decorrência da possibilidade de se fazer aplicação localizada de insumos (fertilizantes, corretivos, defensivos agrícolas) em taxa variável em cada ponto do campo, possibilitando assim a melhoria das suas características, pois, aplicam-se as quantidades certas nos locais certos, e com isso, pode-se aumentar a produtividade das culturas com redução de custos.

O ferramental de agricultura de precisão deve ser testado e adaptado para os diferentes agentes e atores que compõem a cadeia produtiva da soja, tanto os que agregam mais, quanto os que agregam menos tecnologia (MACHADO et al., 2004a).

2.5. Mapeamento da produtividade

O mapa de produtividade é um importante componente para a agricultura de precisão, pois identifica e quantifica a variabilidade espacial da produtividade das culturas e auxilia para o manejo específico nos próximos cultivos (HAN et al., 1994).

O mapeamento da produtividade compreende a aquisição de informações sobre a produtividade das lavouras através de sensores e sistemas de posicionamento. Portanto, muitos pesquisadores e mesmo usuários estabelecem que o mapa de produtividade de um talhão é a informação mais completa para a visualização da variabilidade espacial da lavoura (GIMENEZ & MOLIN, 2004).

No final dos anos 80, segundo Gimenez & Molin (2004), surgiram as primeiras tentativas de se medir o fluxo de grãos em colhedoras de cereais. A partir deles passaram a ser disponibilizados vários produtos no mercado mundial dedicados à geração de dados para a obtenção de mapas de produtividade. Esses dados apresentam limitações e erros, sendo sempre necessários, segundo Molin (2002), que se faça um tratamento preliminar dos dados antes de transformá-los em mapas, pois estes irão servir para análise e tomada de decisão. Tais erros são intrínsecos ao processo de geração dos dados às limitações dos sistemas. No entanto, não devem ser motivo para descrédito à informação, mas sim para seu aperfeiçoamento.

Makepeace (1996) citado por Gimenez & Molin (2004), afirma que o mapeamento da produtividade é considerado por muitos pesquisadores como sendo uma parte essencial da agricultura de precisão. Uma das maneiras para avaliar a eficiência do manejo é através do mapa de produtividade, que é um processo de registro do fluxo de grãos, através de um sensor instalado na colhedora, ao mesmo tempo em que é registrada a localização da colhedora no campo pelo sistema de posicionamento global (GPS). O advento dos monitores de colheita para fins de obtenção de mapas de produtividade possibilitou a coleta de dados mais completos e em maior quantidade.

O mapa de produtividade é considerado por Thylén et al. (1997) como um dos métodos mais corretos para estimar a heterogeneidade de uma lavoura, embora tenha identificado diversos erros em mapas de produtividade, levando-os às características físicas da colhedora e do sistema de medição da produtividade, às variações dentro do talhão, ao operador e, ainda, ao procedimento de obtenção do mapa. Da mesma forma, Menegatti & Molin (2003) desenvolveram uma metodologia para identificar e caracterizar erros em mapas de produtividade, aplicando-a em diferentes monitores de produtividade comerciais.

Para alguns autores, os mapas de produtividade necessitam de ajustes após a geração dos dados em campo (BLACKMORE & MOORE, 1999).

Um mapa de produtividade, segundo Lark & Stafford, (1997), evidencia regiões com alta e baixa produtividade, mas não explica a causa de tal variação, que pode ser devido às doenças, deficiências, desequilíbrios químicos ou ao estresse hídrico. Se a causa específica não é determinada, nenhuma resposta ao gerenciamento pode ser obtida.

2.6. Variabilidade espacial de atributos do solo em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC)

A caracterização da variabilidade espacial dos atributos do solo, quando associados com a experiência do agricultor e com as técnicas estatísticas de tomada de decisão, pode contribuir para se alcançar uma agricultura econômica e ecologicamente sustentável no cerrado brasileiro.

O manejo e o desenvolvimento da cultura são influenciados pela variabilidade espacial dos atributos do solo (MULLA et al., 1990). Portanto, conhecê-la é um importante passo para que se possa empregar um manejo mais adequado com relação à realização de práticas agrícolas, estratégias de amostragem e planejamento agrícola eficiente (BHATTI et al., 1991).

Segundo vários autores, o solo é um corpo natural e complexo, resultante da interação dos seus fatores de formação que o tornam um sistema dinâmico e variável, fundamental para a sustentabilidade das diversas formas de vida existentes no globo terrestre (ALVARENGA & SOUZA, 1995; BORGES et al., 1999; OLIVEIRA et al., 1999). Para esses autores os processos de formação determinam as características químicas, físicas e biológicas do solo, conferindo-lhe alta variabilidade espacial. Essa heterogeneidade natural do solo é também acentuada por seu uso agrícola, variando em função das técnicas de manejo de solo adotados.

Cambardella et al. (1994) afirmam que o conhecimento da distribuição espacial dos atributos do solo em determinada área é importante para o refinamento das práticas de manejo e avaliação dos efeitos da agricultura sobre a qualidade ambiental, assim como é importante para a intensidade de amostragem do solo para sua

caracterização, possibilitando, desta maneira, reduzir o erro-padrão da média, maximizando a eficiência da amostragem, reduzir os custos e a mão-de-obra do trabalho.

Os processos e os atributos do solo que determinam o desempenho e a produção das culturas, bem como o impacto da agricultura ao ambiente variam no espaço e no tempo. Por essa razão, o conhecimento da variabilidade espacial e temporal dos fatores de produção da cultura é o primeiro passo para adoção, com êxito, do sistema de agricultura de precisão. Esse sistema tem sido adotado por diferentes grupos, incluindo fabricantes de equipamentos, fornecedores de insumos, companhias de sementes, consultores agrônômicos, cientistas e produtores, como um caminho para melhorar o retorno econômico da atividade agrícola (RUNGE & HONS, 1999).

Segundo Coelho (2003), para o sucesso na aplicação correta do conceito de manejo por zonas uniformes, deve-se identificar o conjunto dos fatores mais importantes que influenciam as produtividades das culturas no campo. Os principais fatores causadores da variabilidade na produção das culturas podem ser classificados em três categorias: fatores fixos – difíceis de serem alterados (textura e profundidade do solo); fatores persistentes – podem ser alterados (características químicas e físicas do solo: pH, disponibilidade de nutrientes, densidade do solo, etc.); e fatores sazonais – alterações em curto espaço de tempo (clima e incidência de pragas e doenças).

O estudo da variabilidade espacial das propriedades e características dos solos permite definir o grau de correlação espacial das amostras em associação com o sistema de informação geográfica (SIG), que tem se mostrado como poderosa ferramenta de aplicação prática, permitindo obter o mapeamento dos atributos de interesse com o menor erro de estimativa possível (GUIMARÃES, 2000).

A variabilidade espacial do solo introduz uma nova e importante dimensão nas análises da relação entre os atributos de solo e influencia o manejo, o desenvolvimento e a produtividade das culturas, entre essas a soja. Portanto, conhecer a variabilidade de propriedades do solo que controlam a produtividade de culturas é um fator indispensável na implantação da agricultura de precisão (BERALDO, 2004; GRECO & VIEIRA, 2005).

2.6.1. Amostragem de solo

A amostragem de solo consiste na etapa inicial para avaliação de sua fertilidade e deve ser realizada de modo adequado e representativo. O êxito na avaliação da fertilidade do solo está na conjugação de uma criteriosa e correta amostragem que represente toda a área onde serão aplicados corretivos e fertilizantes e na qualidade dos resultados obtidos nas análises laboratoriais, pois a análise laboratorial não corrige os erros de uma amostragem inadequada, considerando que no laboratório são tomados para análise frações de 5 a 10 cm³ dessa amostra, a qual resulta em interpretação e recomendação equivocadas, com prejuízos econômicos ao produtor e no rendimento das culturas, além de danos ao ambiente (ANGHINONI & SALET, 1998; LIMA, 2004).

A forma de coleta, o número de subamostras e a forma de adubação também são aspectos importantes na amostragem de solo. Além disso, o instrumento utilizado na amostragem do solo também pode ser fonte de variabilidade, considerando o próprio volume do solo da subamostra, como também possíveis perdas, como, por exemplo, na coleta com trado de rosca, que pode acarretar perdas de solo, principalmente das camadas superficiais mais ricas em alguns dos atributos químicos do solo (SCHLINDWEIN et al., 1998).

A agricultura de precisão tem como principal elemento na sua abordagem a análise de informação de atributos de solo e planta. O enfoque da agricultura de precisão no manejo da fertilidade do solo e nutrição de plantas é fundamentado na amostragem do solo e planta e na análise de laboratório. Essa informação precisa ser estimada espacialmente para toda a área de estudo (ORTIZ VALENCIA et al., 2004).

A amostragem do solo assume maior importância, no PD, pela ação residual das linhas de adubação (variabilidade horizontal) e pelo acúmulo de resíduos, deposição de calcário e adubos na superfície do solo e ciclagem dos nutrientes (variabilidade vertical). Além disso, gradientes de acidez também podem ocorrer no perfil do solo com o tempo no sistema (NICOLODI et al., 2002).

Segundo vários autores, a heterogeneidade é uma condição natural do solo e ela ocorre, tanto no sentido horizontal como no vertical, em função dos fatores de formação do solo. Pela ação antrópica, em função do manejo, esta heterogeneidade pode

umentar ou diminuir (ANGHINONI & SALET, 1998; FREIRE et al., 2001). Quanto maior a heterogeneidade do solo, maior o número de subamostras necessárias (ANGHINONI & SALET, 1995).

2.6.1.1. Profundidade de amostragem do solo

A amostragem de solo pode ser realizada utilizando dois métodos: ao acaso e sistematizado. O esquema ao acaso é o método tradicional, com seleção prévia de glebas homogêneas e coleta de amostras. A amostragem sistematizada é o método recomendado para a aplicação da agricultura de precisão, através do georeferenciamento, que permite estudar e visualizar melhor a variabilidade espacial das propriedades do solo de uma área, na forma de mapas de fertilidade, tornando-se adequado ao PD (LIMA, 2004).

Segundo Lima (2004), a profundidade de amostragem, tanto para avaliação da fertilidade quanto para necessidade de calagem, deve considerar a fase de estabelecimento da cultura, o sistema estabelecido e aplicação de fertilizantes a lanço e em linha.

No plantio convencional, recomenda-se a coleta de 15 a 20 amostras simples, na profundidade de 0 a 20 cm por gleba homogênea para compor uma amostra composta (RAIJ, 1991). Entretanto, isto não se aplica em sistema plantio direto, pois neste sistema ocorre variabilidade nos atributos do solo, tanto horizontal quanto vertical (LANGE & MALAVOLTA, 2006). Recomenda-se nos primeiros anos (dois a três) de implantação do PD, coletar amostras nas camadas de 0 a 10 cm e de 10 a 20 cm. Nos anos seguintes, amostrar as camadas de 0 a 5 cm, 5 a 10 cm e 10 a 20 cm.

Schindwein & Gianello (2004) sugerem que a amostragem em solos sob sistema convencional de cultivo seja feita na camada de 0 a 17/20 cm de profundidade, enquanto que em solos sob PD na camada de 0 a 10 cm.

Segundo Cantarutti et al. (1999), no PD o número de trincheiras amostradas para formar as amostras compostas pode variar de 10 a 15 na gleba.

Para Lange & Malavolta (2006), a abertura da trincheira deve abranger a linha mais a metade do espaçamento da entrelinha da cultura anterior para ambos os lados, na profundidade desejada, coletando as amostras no sentido perpendicular à última

linha de semeadura. Esse procedimento é indicado para diminuir o efeito residual da adubação utilizada na cultura anterior, realizando um processo de diluição do fertilizante que ainda esteja acumulado na última linha de semeadura.

No PC do solo, há uma camada superficial diferenciada oriunda da ação dos arados e grades que funcionam misturando os adubos, os corretivos e os resíduos culturais. A espessura dessa camada depende da profundidade da operação dos implementos. Normalmente varia de 15 a 20 cm. No caso do plantio direto, não havendo o revolvimento do solo, há acúmulo continuado de adubos e corretivos na superfície, o que determina a formação de gradientes em profundidade e maior variabilidade no sentido horizontal, quando comparado ao sistema convencional. Portanto, é importante definir, com critério, a profundidade de amostragem, de modo que os resultados analíticos retratem com fidelidade a disponibilidade de nutrientes para as plantas (FREIRE et al., 2001).

2.6.2. Atributos químicos e físicos do solo

O avanço da agricultura brasileira tem-se dado principalmente em direção à região dos cerrados, que possuem solos caracteristicamente dotados de boas propriedades físicas e topografia favorável, porém com propriedades químicas inadequadas, tais como: elevada acidez, altos teores de alumínio trocável e deficiência generalizada de nutrientes, especialmente Ca, Mg e P. Solos dessa natureza, uma vez corrigidos quimicamente, apresentam grande potencial agrícola, possibilitando uma agricultura tecnificada com boas produtividades (ALVAREZ V. et al., 1990).

Segundo Sousa et al. (1993), o P é um dos nutrientes mais importantes para a produção de grãos, sendo que na região dos cerrados a disponibilidade deste elemento, em condições naturais, é muito baixa. Portanto, é imprescindível a prática da adubação fosfatada para obtenção de produções satisfatórias da cultura da soja.

De maneira geral, os solos da região dos cerrados são bastante intemperizados, e a reserva de K não é suficiente para suprir a quantidade extraída pela cultura da soja por longos períodos de tempo. Portanto, o suprimento às plantas deve ser feito através da adubação potássica (SOUSA et al., 1993).

Eltz et al. (1989) observaram algumas mudanças em solos sob PD, destacando-se a menor adsorção de P pelo menor revolvimento do solo, uma maior concentração superficial e sub-superficial de nutrientes, entre eles o P e o K, e também o aumento da matéria orgânica. Quando essas mudanças encontram-se associadas à resteva das culturas mantida na superfície, diminuem-se as perdas de solo e nutrientes por erosão permitindo um melhor aproveitamento dos fertilizantes aplicados (BERTOL et al., 1997)

Como resultado do cultivo do solo, a matéria orgânica (MO), em muitos casos, pode ser reduzido a níveis inferiores a 1%. No caso dos cerrados, torna-se necessário que no sistema de produção se realize um manejo adequado da MO. Segundo Cardoso (1993), os teores de MO na maioria desses solos situam-se entre 2,0% e 3,0%, não sendo considerado nível baixo.

Em solos submetidos ao plantio da soja, o pH deve estar entre 5,5 e 6,0, pois é neste intervalo que as plantas têm adequadas condições de assimilação de nutrientes (EMBRAPA, 2003).

O solo quando mantido em seu estado natural, sob vegetação nativa, apresenta características físicas, como permeabilidade, estrutura, densidade do solo e porosidade, adequados ao desenvolvimento normal das plantas (ANDREOLA et al., 2000). Segundo Schlindwein & Gianello (2004), a dinâmica dessas características são alteradas quando passam de um PC para o PD. Nessas condições, o volume de solo explorado pelas raízes é relativamente grande. À medida que o solo vai sendo submetido ao uso agrícola, os atributos físicos do solo sofrem alterações, geralmente desfavoráveis ao desenvolvimento vegetal (SPERA et al., 2004).

As propriedades físicas do solo: densidade do solo, porosidade total, macro e microporosidade têm sido usadas para indicar restrições ao desenvolvimento de plantas (SPERA et al., 2004). De acordo com McGarry et al. (2000), a densidade do solo tem sido o atributo mais comum de avaliação de compactação de solos em ensaios sobre PD e PC do solo. Derpsch et al. (1986) verificaram que a densidade do solo no plantio direto foi maior em relação ao sistema preparo convencional e cultivo mínimo de solo, entretanto os rendimentos de trigo e soja foram maiores sob plantio direto.

Borges (1995) ao promover a compactação do solo, elevando os valores de densidade do solo de $1,32 \text{ kg dm}^{-3}$ para $1,77 \text{ kg dm}^{-3}$ em um Latossolo Vermelho

Escuro textura média, observou uma redução de 5,80 vezes na porosidade de aeração e um aumento de 1,58 vezes na umidade.

Segundo Benghough & Mullins (1990), a penetrometria é considerada um método apropriado para avaliar a resistência à penetração de raízes no solo, apesar das diferenças marcantes existentes entre uma raiz e um cone metálico. O ideal é a mensuração da resistência real encontrada pelas raízes realizada através de métodos diretos, entretanto as dificuldades práticas têm levado os pesquisadores a utilizar o penetrômetro em sua investigação. A facilidade aliada à rapidez na obtenção dos resultados, além de possibilitar um maior número de repetições, são as principais vantagens do uso do penetrômetro.

A resistência do solo à penetração de um penetrômetro é um indicador secundário de compactação, não sendo medição física direta de qualquer condição do solo. Esta é afetada por outros fatores além da compactação, sendo o mais importante o teor de água do solo (MANTOVANI, 1987).

A resistência mecânica do solo à penetração (RP) é influenciada por vários fatores, sendo a densidade do solo e a umidade do solo os principais (KLEIN et al., 1998). Ainda segundo os autores, é necessário que se faça o monitoramento dos solos de densidade e umidade em uma pesquisa de resistência mecânica à penetração, uma vez que estes fatores influenciam diretamente os valores da RP.

A RP é uma propriedade física relativamente fácil de ser obtida e, de certa forma, de ser correlacionada com a densidade do solo e com a macroporosidade (TORRES & SARAIVA, 1999). Os mesmos autores afirmam que para um mesmo solo, quanto maior for a densidade do solo, maior será a resistência à penetração e menor será a macroporosidade, que é o principal espaço para o crescimento do sistema radicular da cultura.

Tormena & Roloff (1996), considerando o índice de cone de 2,0 MPa como impeditivo ao crescimento de raízes no solo, obtiveram resultados que indicam, na umidade padrão de 0,340 kg kg⁻¹, que não ocorreram condições impeditivas ao crescimento de raízes.

Nas últimas décadas muitos são os trabalhos procurando correlacionar dado de RP com parâmetros físicos do solo, principalmente com a densidade.

Apesar da resistência ser afetada pela textura, densidade do solo e conteúdo de água, Canarache (1990) sugere que valores acima de 2,5 MPa começam a restringir o pleno crescimento das raízes das plantas, enquanto outros pesquisadores, como Sene et al. (1985), consideram críticos os valores que variam de 6,0 a 7,0 MPa, para solos arenosos, e em torno de 2,5 MPa, para solos argilosos. Já Nesmith (1987) adotou o valor de 2,0 MPa como o limite crítico de resistência para a penetração das raízes. Alguns autores, no entanto, têm adotado um índice de cone de 1,0 MPa como crítico, mas não impeditivo, ao crescimento de raízes no solo (HENDERSON, 1989).

Segundo Lanças (1998), existem os métodos precisos que se baseiam na determinação das propriedades físicas do solo: densidade do solo, distribuição de poros por tamanho, taxa de difusão de oxigênio e condutividade hidráulica saturada, enquanto que a resistência à penetração se enquadra como um método intermediário.

Ao estudar a fertilidade de um solo na agricultura de precisão, há necessidade de se fazer um levantamento completo da mesma e caracterizar sua variabilidade espacial através de autocorrelogramas, variogramas e métodos de interpolação, como a krigagem, que define o grau de dependência no espaço da grandeza medida e o alcance ou domínio de cada amostragem (MANZIONE, 2002).

2.7. Geoestatística como ferramenta de análise espacial

A geoestatística é uma ferramenta importante para a análise de dados no âmbito da Agricultura de Precisão. Pode ser usada no planejamento e desenho de amostragens do solo e planta, na análise da continuidade espacial e na obtenção de grades interpoladas através da krigagem.

Segundo Ortiz Valencia et al. (2004), a geoestatística é um conjunto de métodos estatísticos apropriados para analisar um atributo de um fenômeno que tem distribuição contínua sobre uma área geográfica.

O desenvolvimento da geoestatística iniciou-se a partir de 1951, quando o matemático sul-africano D. G. Krige, estudando dados de concentração de ouro, chegou à conclusão que as variâncias obtidas não faziam nenhum sentido sem levar em consideração a distância entre amostras (VIEIRA, 2000). A teoria desenvolvida a partir das observações de Krige pelo matemático G. Matheron de 1963 a 1971 foi

chamada de Teoria das Variáveis Regionalizadas, sendo considerada a base da geoestatística (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989; TAKEDA, 2000; CARVALHO & VIEIRA, 2001).

Matheron (1963) concretizou os fundamentos da geoestatística com o desenvolvimento da Teoria das Variáveis Regionalizadas. Ele definiu a variável regionalizada como uma função espacial numérica, que apresenta uma variação de um local para outro, com continuidade aparente e cuja variação não pode ser representada por uma função matemática simples. Para isso, baseou-se em conceitos de função aleatória e estacionaridade de segunda ordem.

Nos anos 80, surgiu uma corrente de aplicações de métodos estatísticos e matemáticos na ciência do solo, denominada de Pedometria (McBRATNEY et al., 2000). Dentre esses métodos, a Geoestatística influiu como um método para quantificar a variabilidade espacial de atributos químicos e físicos do solo (GOOVAERTES, 1999).

A geoestatística vem sendo utilizada por diversos pesquisadores como instrumento que permite o mapeamento de fenômenos contínuos, quantificando, modelando e interpolando os valores de atributos do solo nos intervalos dos pontos amostrados (VIEIRA, 1997; SOUZA et al., 1998; COUTO & KLANT, 1999; MERCANTE et al., 2003).

Oliver (1999) afirma que a variação espacial das propriedades do solo pode ser descrita usando-se a teoria e os métodos geoestatísticos. O semivariograma, sua ferramenta central, fornece uma descrição imparcial da escala e padrão de variação espacial. Ele efetua isso medindo o grau de correlação ou dependência espacial entre os pontos amostrados, baseado na noção de que as propriedades do solo são mais prováveis de serem similares entre localizações vizinhas do que entre aquelas distantes entre si.

A estatística clássica utiliza os parâmetros, como a média e o desvio padrão, para representar um fenômeno e se baseia na hipótese principal de que as variações de um local para o outro são aleatórias e a geoestatística utiliza o semivariograma que expressa a dependência espacial entre as amostras. Havendo dependência espacial, podem-se estimar valores da propriedade em estudo para os locais não amostrados

dentro do campo, sem tendenciosidade e com variância mínima, pelo método denominado krigagem (VIEIRA, 2000).

Reichardt et al. (1986) em revisão sobre o tema variabilidade espacial de solos apresentaram uma comparação entre a estatística clássica e a geoestatística, afirmando que as técnicas são complementares e que a geoestatística possibilita a obtenção de respostas que os métodos clássicos não conseguem fornecer.

2.7.1. Hipóteses de estacionaridade

Na maioria das aplicações da estatística, os dados são obtidos através de um desenho amostral que garante que a amostra seja representativa da população. Para Montgomery & Runger (2003), os dados são modelados como sendo independentes e pertencendo à mesma distribuição de probabilidade. Na dimensão espacial, uma amostra corresponde a uma única observação do fenômeno. Isto é, não existe aplicação nos dados ou a amostra contém apenas um elemento. Essa limitação é superada considerando uma hipótese de estacionaridade no modelo espacial (ORTIZ VALENCIA et al., 2004).

2.7.1.1. Estacionaridade intrínseca

A hipótese de estacionaridade intrínseca definida pelas Equações 1 e 2, estabelecem que:

$$E [Z(x_i)] = \mu \quad x_i \in D \quad (1)$$

$$\gamma (h) = \frac{1}{2} E [(Z(x_i) - Z(x_i + h))^2] \quad x_i, x_i + h \in D \quad (2)$$

A primeira condição estabelece a função média (μ) constante em todo domínio (D). A segunda condição estabelece a existência da função semivariograma definida como o valor esperado do quadrado da diferença de função aleatória, definida em duas posições espaciais. Nesse caso, o semivariograma não depende das posições x_i e $x_i + h$, depende unicamente do vetor h , isto é, do seu módulo e direção. Essa propriedade é denominada de invariância para translações e é o princípio para gerar replicações espaciais.

2.7.1.2. Estacionaridade de segunda ordem

A hipótese de estacionaridade de segunda ordem definida pelas Equações 3 e 4 estabelecem que:

$$E [Z(x_i)] = \mu \quad x_i \in D \quad (3)$$

$$C(h) = E [(Z(x_i) - \mu)(Z(x_i + h) - \mu)] \quad x_i, x_i + h \in D \quad (4)$$

Esta hipótese estabelece a existência da função covariância munida da propriedade de invariância para translações. Toda função aleatória que satisfaz essa propriedade também é estacionária intrínseca, mas o inverso não é verdadeiro.

Para Ortiz Valencia (1999), o semivariograma pode existir em situações onde a função covariância não existe. A estacionaridade é uma propriedade do modelo espacial e não dos dados. Portanto, não se pode testá-la matematicamente a partir dos dados da amostra (MYERS, 1989).

2.7.2. Semivariograma e suas características

A função da variância espacial permite verificar a dependência espacial através da medida da variância das diferenças dos valores amostrais entre todos os pontos separados por uma distância h . Esta função é definida segundo a Equação 5.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E [(Z(x_i) - Z(x_i + h))^2] \quad (5)$$

Para investigar a dependência espacial entre os dados, utiliza-se o semivariograma, que mede a dependência entre os pontos amostrais e serve para a interpolação de valores necessários à construção de mapas de contorno (isolinhas) e superfícies através da krigagem (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989). A função semivariância estimada $\gamma^*(h)$, proposta por Matheron (1963), é definida através da Equação 6.

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (6)$$

Em que:

$N(h)$ = número de pares de valores medidos; e

$Z(x_i)$, $Z(x_i + h)$ = valores medidos na posição x_i e $x_i + h$, separados por um vetor h .

O semivariograma normalmente é representado pelo gráfico $\gamma^*(h)$ versus h (distância) que é conhecido como semivariograma experimental e expressa a variabilidade espacial entre as amostras, sendo uma função que só depende do vetor h , e, portanto depende de ambos, magnitude e direção de h .

Segundo Trangmar et al. (1985), o semivariograma é uma equação que relaciona a semivariância com a distância e pode adquirir muitas formas, dependendo do conjunto de dados e do intervalo amostral.

O semivariograma experimental é caracterizado por três parâmetros de ajuste: o efeito pepita, o patamar e o alcance. Estes parâmetros são ilustrados na Figura 4.

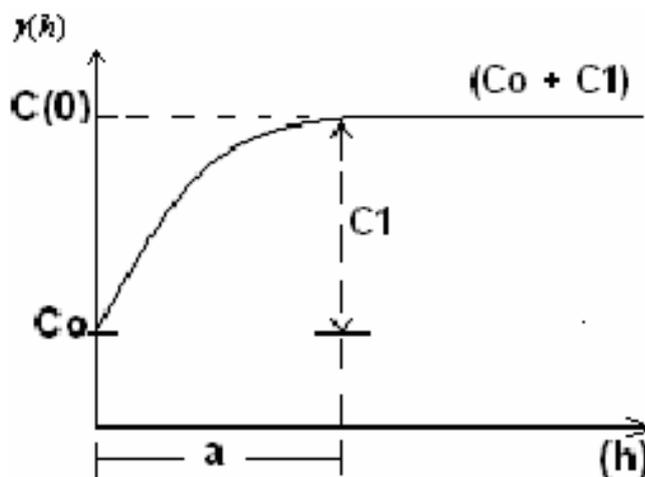


Figura 4 - Semivariograma experimental e seus parâmetros.

- **Efeito Pepita (C_0)**

O efeito pepita (C_0) revela a descontinuidade do semivariograma perto da origem, em distância menor que aquela amostrada. Esse parâmetro é usado para explicar duas fontes de variação: (1) Variação do atributo para distâncias menores que a considerada na malha de amostragem; e (2) Erros de medição (ORTIZ VALENCIA et al., 2004).

O efeito pepita constitui medida importante do semivariograma e indica variabilidade não explicada, que pode ser devida a erros de medidas ou microvariação não detectada, considerando a distância de amostragem utilizada (CAMBARDELLA et al., 1994; VIEIRA, 2000) e pode ser expresso como percentagem do patamar, com o objetivo de facilitar a comparação do grau de dependência espacial das variáveis em estudo (TRANGMAR et al., 1985).

- **Patamar ($C_0 + C_1$)**

Representa o valor máximo no qual $\gamma^*(h)$ estabiliza-se, tornando-se independente à variação h , ou seja, é quando o semivariograma tende a estabilizar-se a uma constante. O patamar pode variar com a direção (ORTIZ VALENCIA et al., 2004).

Segundo Trangmar et al. (1985), o patamar corresponde à variância da amostra $C(0)$ para dados estacionários. C_1 é denominado de contribuição ou variância estrutural e corresponde a variação modelada pelo semivariograma (ORTIZ VALENCIA et al., 2004).

- **Alcance (a)**

É a distância que vai da origem do semivariograma até o momento em que ele se estabiliza, ou seja, é o montante da semivariância que efetivamente é relacionada com a disposição espacial das amostras (OLIVER, 1999). O alcance (a) é o raio de influência da amostra, ou seja, o ponto a partir do qual toda semivariância da amostra é de influência aleatória. Ele determina a região espacial até onde a variável é autocorrelacionada e em geral pode variar com a direção (ORTIZ VALENCIA et al., 2004).

Segundo Oliver (1999), os semivariogramas limitados pelo patamar sugerem que os valores têm uma distribuição regionalizada, com algumas áreas possuindo valores

altos e outras com valores menores. Indicam também que toda a variação nesse nível de resolução foi englobada pela amostragem.

O alcance de dependência espacial é outro atributo importante no estudo do semivariograma e significa a distância máxima que uma variável está correlacionada espacialmente. Dessa forma, o valor do alcance de determinada variável garante que todos os vizinhos situados dentro de um círculo com esse raio são tão semelhantes que podem ser usados para estimar valores para qualquer ponto entre eles (VIEIRA & LOMBARDI NETO, 1995).

Quando um semivariograma não apresenta uma curva que tende a se iniciar em valores mais baixos de semivariância e exibe uma inclinação positiva com o avanço da distância, até atingir o patamar, ele representa uma situação onde há dependência espacial aparente nos dados, ou seja, a variação representa um somatório de fatores envolvidos no processo sem correlação com a distância entre as amostras (OLIVER, 1999). A descrição de padrões espaciais raramente é um objeto por si só. Geralmente o que se objetiva é beneficiar-se da existência de dependência espacial para estimar propriedades do solo em locais não amostrados (GOOVAERTS, 1999).

2.7.3. Modelos de semivariograma

Um modelo de semivariograma é uma função que determina a variabilidade espacial para qualquer distância e direção. Modelos de semivariograma que possuem patamar são denominados de Modelos de transição. Os três modelos de semivariogramas mais comuns, e as comparações entre eles são definidos e ilustrados na Figura 5 (ORTIZ VALENCIA et al., 2004).

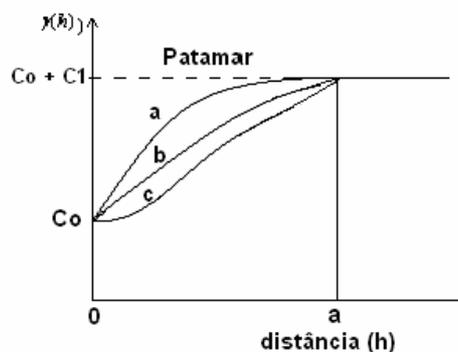


Figura 5 - Comparação dos modelos de semivariogramas: a) Esférico, b) Exponencial e c) Gaussiano.

a) Modelo Esférico:

O modelo esférico tem comportamento linear perto da origem e atinge o patamar a uma distância igual ao alcance (a). As Equações 7 e 8 definem este modelo.

$$\gamma(h) = C_0 + C_1[3/2(h/a) - 1/2(h/a)^3] \quad \text{quando } 0 < h < a \quad (7)$$

e

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \quad \text{quando } h > a \quad (8)$$

b) Modelo Exponencial:

Este modelo definido pela Equação 9 é caracterizado por ter um comportamento linear perto da origem.

$$\gamma(h) = C_0 + C_1[1 - \exp(-3h/a)] \quad \text{quando } 0 < h < d \quad (9)$$

Em que:

d = máxima distância na qual o variograma é definido.

c) Modelo Gaussiano:

Este modelo definido na Equação 10 apresenta um comportamento parabólico perto da origem e aproxima-se do patamar de forma assintótica.

$$\gamma(h) = C_0 + C_1[1 - \exp(-3h^2/a^2)] \quad \text{quando } 0 < h < d \quad (10)$$

2.7.4. Krigagem

A Krigagem é um conjunto de métodos de interpeladores especiais lineares ponderados (ORTIZ VALENCIA et al., 2004), ou seja, é um nome genérico adaptado pelos geoestatísticos para a família de algoritmos de regressão de mínimos quadrados generalizados (GOOVAERTS, 1997). Todos os estimadores de krigagem são variantes do estimador básico de regressão linear $Z^*(u)$, que é definido através da Equação 11.

$$Z^*(x) - m(x) = \sum_{i=1}^{n(x)} \lambda_{\alpha}(x) [Z(x_i) - m(x_i)] \quad (11)$$

Em que:

$\lambda_{\alpha}(x)$ = pesos definidos para os dados $z(x_i)$;

$Z(x_i)$ = variável aleatória; e

$m(u)$ e $m(u_{\alpha})$ = valores esperados das variáveis aleatórias $Z(x)$ e $Z(x_i)$.

O número de amostras necessárias para a estimação bem como seus pesos variam de um local para outro. Na prática, somente os $n(u)$ pares de observação perto do local x a ser estimado são mantidos. A interpretação de $z(x)$ e $z(x_i)$, como realizações das variáveis aleatórias $Z(u)$ e $Z(x_i)$, permitem a definição do erro de estimação como uma variável aleatória $Z^*(x) - Z(x)$.

Através da Equação 12, verifica-se que a estimação por krigagem se baseia na minimização da estimativa da variância do erro $\sigma^2 E(x)$ sobre a suposição da não tendenciosidade do estimador, ou seja:

$$\sigma^2 E(x) = \text{Var}\{Z^*(x) - Z(x)\} \quad \text{que é minimizada por:}$$

$$E\{Z^*(x) - Z(x)\} = 0 \quad (12)$$

A Equação 13 mostra que o estimador de krigagem varia conforme o modelo adotado para a função aleatória $Z(x)$. Ela é usualmente decomposta em um componente residual $R(x)$ e um componente de tendência $m(x)$, ou seja:

$$Z(x) = R(x) + m(x) \quad (13)$$

Através da Equação 14, o componente residual é modelado como uma função aleatória estacionária com média zero e covariância $CR(h)$, ou seja:

$$E\{R(x)\} = 0$$

$$\text{Cov}\{R(x), R(x+h)\} = E\{R(x) \cdot R(x+h)\} = CR(h) \quad (14)$$

Na Equação 15, observa-se que o valor esperado da variável aleatória Z no local x é o valor do componente de tendência neste local, isto é:

$$E\{Z(x)\} = m(x) \quad (15)$$

Os diversos estimadores de krigagem se diferenciam conforme o modelo considerado para o componente de tendência.

A krigagem ordinária é um dos métodos mais usados e simples na geoestatística (CRESSIE, 1993). Na krigagem ordinária, as flutuações locais da média são consideradas, limitando o domínio de sua estacionaridade para a vizinhança do local $W(x)$. A média é constante, mas desconhecida. O estimador linear é definido pela Equação 16.

$$Z^*(x) = \sum_{i=1}^{n(x)} \lambda_i(x) Z(x_i) \quad \text{Para} \quad \sum_{i=1}^{n(x)} \lambda_i(x) = 1 \quad (16)$$

Os $n(x)$ pesos $\lambda_i(x)$ são determinados de tal maneira que a variância do erro seja mínima.

A escolha da melhor técnica de interpolação para estimar propriedades do solo em locais não amostrados representa um importante princípio na agricultura de precisão.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Localização e característica da área experimental

O experimento foi conduzido na Fazenda Monte Alegre, localizada no município de Rio Verde – Goiás, cujas coordenadas estão situadas geograficamente entre 17° 29' 24" a 17° 30' 36" de Latitude Sul e 51° 23' 24" a 51° 24' 36" de Longitude Oeste, com altitude média de 784 m e topografia plana. A localização das áreas experimentais para o sistema de manejo em PD e de PC está representada, na Figura 6.



Figura 6 - Localização da área experimental.

Fonte: Embrapa Monitoramento por Satélite. Imagem Landsat (2006).

As áreas objetos deste estudo encontram-se situadas a 75 km da sede do município de Rio Verde, que está localizado na Microrregião sudoeste do Estado de

Goiás, que é o quarto maior produtor de soja do país, com uma área de aproximadamente 2,5 milhões de hectares e uma produção de 6,4 milhões de toneladas com uma participação de 12% da produção nacional de soja (CONAB, 2006). Rio Verde ocupa uma área de 8.415, 40 km². Considerada o berço do SPD na região Centro-Oeste, possui uma população de 136.000 habitantes, sendo a maior produtora de soja de Goiás e respondendo por cerca de 1% da produção nacional de grãos e pela segunda maior arrecadação no Estado de Goiás. Ocupa, ainda, o sexto lugar entre os vinte maiores municípios produtores de soja do país. Rio Verde é um município com topografia plana, clima estável e chuvas regulares no verão, que, aliados a fertilidade de suas terras e ao uso de tecnologia avançada, o município constitui-se num importante pólo brasileiro de produção agropecuária, destacando-se nas culturas de soja, milho, arroz, feijão, sorgo, algodão e tomate (SILVA, 2004).

A Figura 7 apresenta a localização dos talhões A (PD) e B (PC) da área experimental localizada na Fazenda Monte Alegre, no município de Rio Verde, Goiás, com uma área total de aproximadamente 368 hectares georeferenciadas com auxílio de um GPS.

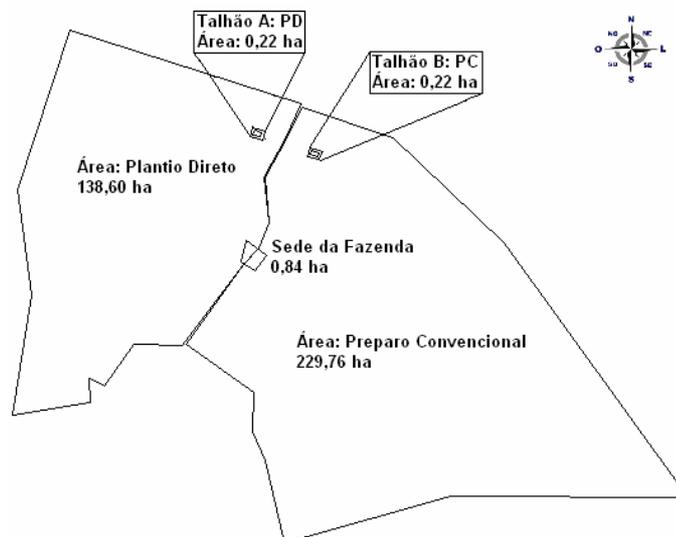


Figura 7 – Localização do perímetro e dos talhões A e B da Fazenda Monte Alegre – Rio Verde, Goiás.

A vegetação natural predominante no município de Rio Verde é do tipo cerrado. O clima é definido como tropical sazonal com duas estações bem definidas: uma seca, de maio a outubro, e outra chuvosa de novembro a abril, com temperatura média mensal de 24° C e precipitação média anual de 1500 mm. A precipitação ocorrida no período entre a semeadura e a colheita da soja na safra 2005/2006 foi de 1679,3 mm (Figura 8).

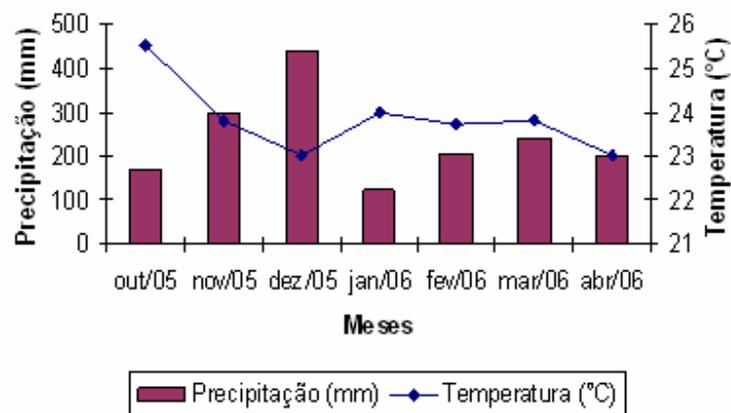


Figura 8 - Dados médios de precipitação e temperatura entre os meses de outubro de 2005 a abril de 2006.

Fonte: Universidade de Rio Verde - Estação meteorológica da FESURV (2006).

3.2. Malha regular de distribuição dos pontos de amostragem

Para cada talhão da área experimental foi realizado levantamento por amostragem em uma malha regular (Figura 9) com as dimensões de 40 x 55 m, totalizando 44 pontos de amostragem em uma área de 2200 m². O espaçamento de 5 x 5 m foi usado na malha interna com 40 pontos, sendo que a menor distância entre amostras foi de 5 m, e 4 pontos externos com espaçamento equidistantes de 10 m dos pontos extremos da malha interna. A área experimental e os talhões A e B foram georeferenciados (Garmin, modelo 12) e as malhas amostrais construída com coordenadas topográficas locais.

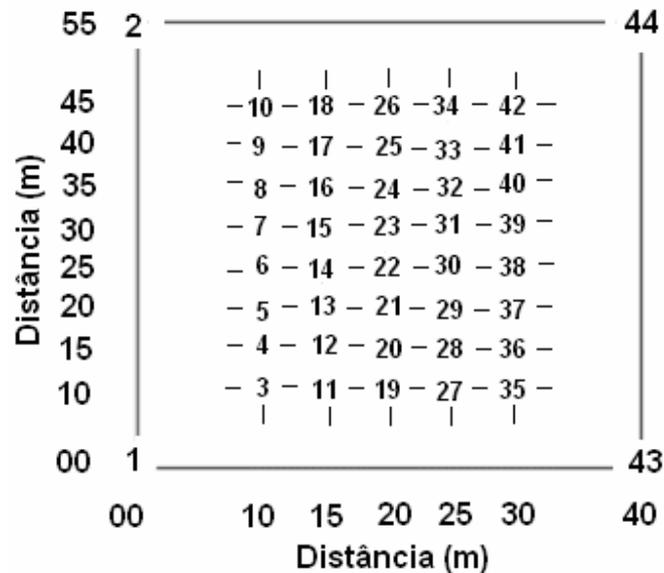


Figura 9 - Distribuição dos pontos de amostragem da malha regular utilizados nas áreas de plantio direto (PD) e preparo convencional (PC).

3.3. Classificação e frações granulométricas do solo

O solo nas duas áreas experimentais foi classificado como Latossolo Vermelho Distrófico típico textura argilosa (EMBRAPA, 1999).

A análise granulométrica do solo foi obtida a partir da média aritmética de 44 pontos de amostragem utilizados nos sistemas de PD e PC, na profundidade de 0 a 20 cm. Os valores médios das frações encontradas na área de PC foram de 120 g kg⁻¹ para areia, 200 g kg⁻¹ para silte e 680 g kg⁻¹ para argila; e para área de PD foi de 140 g kg⁻¹ para areia, 160 g kg⁻¹ para silte e 700 g kg⁻¹ para argila.

Para determinação da análise textural foi utilizado o método da pipeta, conforme descrito pela Embrapa (1997), para analisar os constituintes sólidos do solo, baseado na velocidade de queda das partículas que compõem o solo, utilizando processos de dispersão adotados para a determinação da densidade da suspensão que se admite ser a concentração de silte mais argila e argila, respectivamente.

3.4. Preparo do solo, calagem, adubação, semeadura e colheita da soja

Segundo informações pessoais do proprietário, a soja vinha sendo cultivada na área por dez anos em PD, em monocultivo, após este período, a área de plantio de soja foi dividida em duas: na primeira (talhão A), continuou-se com o PD e na segunda (talhão B), foi realizado o preparo do solo com auxílio de uma grade aradora para instalação da soja sob cultivo convencional. Nos últimos cinco anos, na área sob PD, a soja foi cultivada no verão e sucedida pelo milho cultivado na safrinha.

Foi realizada aplicação do calcário calcítico com 42% de Ca e 2,47% de Mg com Poder Relativo de Neutralização Total (PRNT) de 82%, a lanço, no mês de junho de 2005, apenas na área experimental sob preparo convencional, totalizando 1,5 toneladas por ha⁻¹ para elevar o teor de cálcio (Ca) no solo para 2,5 cmol_c dm⁻³. Foi utilizada uma distribuidora com capacidade de 5 toneladas com discos duplos da marca Maschietto tracionada por um trator marca Massey Ferguson modelo MF 630 com 130 cv. Após a aplicação, o mesmo foi incorporado no solo por meio de duas gradagens pesadas, realizadas com auxílio de grade intermediária de 20 discos de 28 polegadas na profundidade de até 0,20 m. Após a incorporação, foi realizado o nivelamento da superfície do solo com auxílio de uma grade niveladora Piccin de 42 discos, sendo tracionada por um trator de marca Massey Ferguson modelo MF 680. Na área do talhão A (PD) não foi realizada aplicação de calcário antes do último plantio.

A semeadura da soja (*Glycine max* (L.) Merrill), cultivar CD 219 RR, ocorreu entre os dias 24 de outubro a 08 de novembro de 2005, na área experimental, utilizando espaçamento de 0,50 m entre linhas e densidade de 12 sementes por metro linear, totalizando 240.000 plantas por hectares, em uma área de aproximadamente 368 hectares. Segundo Shuster et al. (2005), a CD 219 RR é uma cultivar do grupo de maturação precoce para os Estados de Goiás e Mato Grosso, semiprecoce para o estado de São Paulo e médio para os estados de Mato Grosso do Sul e Minas Gerais. Nestes Estados, o ciclo até a maturação varia de 115 a 123 dias e o florescimento ocorre com 48 a 56 dias, com estatura de plantas variando de 65 a 110 cm.

Foi realizada no mês de setembro de 2005 (um mês antes da semeadura da soja) uma adubação nos talhões A e B com cloreto de potássio (KCl) na quantidade de

100 kg ha⁻¹, distribuídos a lanço. A adubação de plantio foi realizada com o adubo MAP 11-52-00 na quantidade de 150 kg ha⁻¹, distribuídos na linha de semeadura.

3.5. Produtividade da Soja

Para a determinação da produtividade da soja, realizou-se a colheita da cultivar CD 219 RR, manualmente, no talhão B no dia 05 de março de 2006, e no talhão A no dia 12 de março de 2006, sendo colhidas 36 plantas em uma área de 1,5 m² em cada ponto de amostragem da malha regular (Figura 9). A soja foi trilhada através de uma batedora de cereais, modelo BC – 30 Júnior, sendo tracionada por um trator marca Valmet modelo 68. Posteriormente, efetuou-se a correção do teor de água dos grãos para 13% e a obtenção da massa de grãos por ponto amostrado.

3.6. Amostragem do solo e determinação dos atributos químicos e físicos do solo nos sistemas de manejo plantio direto (PD) e preparo convencional (PC)

Após a colheita da soja, foram coletadas amostras deformadas de solo para análise de fertilidade e amostras indeformadas para análise física.

As amostras de solos foram acondicionadas em sacos plásticos, identificadas e conduzidas ao Laboratório de Análise de Solos e Folhas da FESURV – Universidade de Rio Verde – GO; para serem secas ao ar e peneiradas. Após, foram preparadas e transportadas para o laboratório da Cooperativa Mista dos Produtores Rurais do Sudoeste Goiano (COMIGO) para serem submetidas às análises químicas de rotina de acordo com os procedimentos descritos pela Embrapa (1997).

3.6.1. Determinação dos atributos químicos do solo

As amostras de solo para fins de fertilidade foram coletadas em cada ponto de amostragem da malha regular nos talhões A e B da área experimental utilizando a pá de corte reta, conforme descrito por vários autores (FREIRE et al., 2001; LIMA, 2004; LANGE & MALAVOLTA, 2006). A determinação constituiu na abertura de uma trincheira abrangendo a linha de plantio mais a metade do espaçamento das entrelinhas da cultura (25 cm de cada lado), totalizando 50 cm de comprimento, 10 cm de largura e 5 cm de espessura (Figura 10).

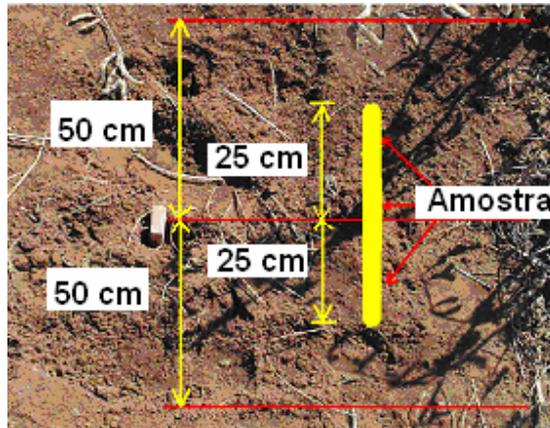


Figura 10 - Esquema de amostragem sistemática do solo utilizada na área experimental com pá de corte.

Fonte: Lange & Malavolta (2006).

Foram realizadas as seguintes análises químicas do solo: potencial hidrogeniônico (pH em CaCl_2), cálcio (Ca), magnésio (Mg), alumínio (Al), fósforo (P), potássio (K), acidez potencial (H+Al), matéria orgânica (MO), capacidade de troca de cátions (CTC), saturação por bases trocáveis (V) e soma de bases (SB), de acordo com a EMBRAPA (1997), as quais serão descritas a seguir.

3.6.1.1. pH em CaCl_2

Para a determinação do pH em CaCl_2 do solo utilizou-se a relação solo/solução de 1:2,5, usando uma quantidade de 10 cm^3 de terra fina seca ao ar (TFSA) e misturada com 25 cm^3 de solução de CaCl_2 (cloreto de cálcio), na concentração de $0,01 \text{ mol L}^{-1}$. Foi obtido mediante utilização de um potenciômetro com eletrodo combinado, sendo a leitura realizada diretamente no aparelho denominado potenciômetro.

3.6.1.2. Matéria Orgânica (MO)

O teor de matéria orgânica (MO) do solo foi obtido pelo método colorimétrico, utilizando-se 1 cm^3 de TFSA misturada com 10 cm^3 de ácido sulfúrico (H_2SO_4) adicionados a 10 cm^3 de solução de dicromato de potássio $0,5 \text{ mol L}^{-1}$, em temperatura elevada a 150° C , utilizando metodologia proposta por Raji et al. (2001).

3.6.1.3. Fósforo (P) e potássio (K)

Os teores de P e K disponíveis, em mg dm^{-3} , foram obtidos utilizando-se a solução de Mehlich-1, como meio extrator. Para a quantificação do teor de P foi utilizado um processo analítico denominado colorimetria, mediante a utilização de fotolorímetro, usando filtro vermelho, com comprimento de onda de 660 nm. Para a determinação do K foi utilizado o fotômetro de emissão de chama.

3.6.1.4. Cálcio (Ca), magnésio (Mg) e alumínio trocável (Al)

Os teores de Ca, Mg e Al trocáveis, em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, foram obtidos utilizando a solução extratora Mehlich-1. Para obtenção do teor de Al do solo, procedeu-se a titulação com NaOH ($0,025 \text{ mol L}^{-1}$), sendo o teor de Al, em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, equivalente ao volume gasto na titulação com NaOH. Para obtenção dos teores de Ca + Mg do solo, realizou-se a titulação com ácido etilenodiaminotetracético (EDTA $0,0125 \text{ mol L}^{-1}$), determinando-se, primeiro, a quantidade conjunta dos teores de Ca + Mg ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), depois a quantidade de Ca de forma semelhante ao Ca + Mg. Já o teor de Mg, em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, foi obtido pela diferença entre os teores de Ca + Mg e o teor de Ca.

3.6.1.5. Acidez potencial (H + Al)

A acidez potencial (H + Al), em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, foi determinada utilizando-se o extrator de Mehlich-1.

3.6.1.6. Soma de bases trocáveis (SB), CTC potencial (CTC) e saturação por bases trocáveis (V)

A partir da determinação dos atributos químicos Ca, Mg e K, obteve-se a soma de bases trocáveis (SB). Com os valores de SB e de H + Al, realizaram-se os cálculos dos valores de CTC e V.

3.6.2. Avaliação dos atributos físicos do solo

As amostras de solo para determinação dos resultados de densidade do solo (Ds), microporosidade (MiP), macroporosidade (MaP) e porosidade total (Pt) foram submetidas ao método da mesa de tensão seguindo metodologia descrita pela EMBRAPA (1997). As amostras indeformadas foram coletadas em cilindros volumétricos nas profundidades de 0 a 10 cm, 10 a 20 cm e 20 a 40 cm com auxílio de amostrador de Uhland. Cada amostra de solo ficou acondicionada em um anel de aproximadamente 7,0 cm de altura por 7,2 cm de diâmetro, com capacidade de aproximadamente 285 cm³ (Figura 11). Após a determinação do peso do conjunto (Cilindro + Solo natural + Gaze + Látex), as amostras foram colocadas em uma bandeja contendo aproximadamente 1 cm de altura de água, e após a saturação por capilaridade, as amostras foram saturadas de modo a cobrir o monólito por um período de 24 horas. Em seguida, as amostras foram pesadas novamente e colocadas na mesa de tensão (unidade de sucção) à tensão de 0,06 atm (60 cm de coluna de água), a qual retira a água dos macroporos (poros com diâmetro $\geq 0,05$ mm), conforme Figuras 12a e 12b. Após pesagem, antes e depois de ir à estufa a 105 - 110 °C, obtém-se a macroporosidade (MaP), a microporosidade (MiP) e a densidade do solo (Ds).



Figura 11 - Cilindros volumétricos contendo monólitos naturais de solo.



Figura 12- Amostras saturadas para obtenção da densidade do solo, macroporosidade, microporosidade e volume total de poros: a) monólitos saturados, b) unidade de sucção à tensão de 0,06 atm.

3.6.2.1. Densidade do solo (D_s)

A D_s foi determinada através da Equação 17. Foram utilizadas amostras indeformadas retiradas em cada ponto de amostragem da grade regular nas profundidades descritas anteriormente, com auxílio de amostrador de Uhland.

$$D_s = \frac{M_{ss}}{V_c} \quad (17)$$

Em que:

D_s = Densidade do solo (kg dm^{-3});

M_{ss} = Massa de solo seco em estufa a 105 -110 °C (kg); e

V_c = Volume do cilindro (dm^3).

3.6.2.2. Microporosidade do solo (MiP)

Para a determinação da MiP , foi considerado o teor volumétrico de água retida no solo após a aplicação de uma tensão de 0,006 MPa. Foram utilizadas amostras indeformadas retiradas em cada ponto de amostragem da malha regular, seguindo a mesma metodologia da densidade do solo, sendo determinada através da Equação 18.

$$MiP = \frac{M_3 - (M_5 + M_8 + M_9 + M_{ss})}{M_{ss}} * 100 * D_s \quad (18)$$

Em que:

MiP = microporosidade do solo (%);

Mss = Massa de solo seco em estufa (kg);

Ds = Densidade do solo (kg dm^{-3});

M3 = Massa do conjunto (cilindro + solo + gaze + látex) à tensão 0,06 atm (kg);

M5 = Massa do cilindro (kg);

M8 = Massa do látex (kg); e

M9 = Massa da gaze 60 cm (gaze saturada + gaze seca)/2 (kg).

3.6.2.3. Macroporosidade do solo (MaP)

Para a determinação da MaP foi considerado o volume do solo ocupado por poros com diâmetro maior que 0,05 mm, dado pela diferença entre a porosidade total determinada e o volume de microporos, obtidos através das Equações 19 a 21.

$$\text{MaP} = \text{Pt} - \text{MiP} \quad (19)$$

Em que:

MaP = macroporosidade do solo (%);

MiP = microporosidade do solo (%); e

Pt = porosidade total determinada (%)

$$\text{Pt} = \text{US} \times \text{Ds} \quad (20)$$

$$\text{US} = \frac{\text{M2} - (\text{M5} + \text{M7} + \text{M8} + \text{Mss})}{\text{Mss}} 100 \quad (21)$$

Em que:

Ds = Densidade do solo (kg dm^{-3});

US = Umidade de saturação (%);

Mss = Massa de solo seco em estufa (kg);

M2 = Massa do conjunto (cilindro + solo + gaze + látex) saturado (kg);

M5 = Massa do cilindro (kg);

M7 = Massa da gaze saturada (kg);

M8 = Massa do látex (kg).

3.6.2.4. Porosidade total calculada (Pt)

O volume total de poros ou porosidade total calculada, ou seja, o volume de vazios totais do solo que pode estar ocupado por água e/ou ar, foi obtido indiretamente através da relação existente entre a densidade do solo (D_s) e a densidade de partículas (D_p), determinada pelo método do balão volumétrico, conforme metodologia proposta pela EMBRAPA (1997) cujo valor foi de ($D_p = 2,73 \text{ kg dm}^{-3}$), obtida pela Equação 22.

$$Pt = \left(1 - \frac{D_s}{D_p} \right) * 100 \quad (22)$$

Em que:

Pt = porosidade total calculada (%);

D_s = densidade do solo (kg dm^{-3}); e

D_p = densidade de partículas (kg dm^{-3}).

3.6.2.5. Resistência mecânica do solo à penetração (RP)

A RP avaliada nos sistema de manejo PD e PC foi realizada em cada ponto de amostragem da malha regular nas profundidades de 0 a 20 cm e 20 a 40 cm, com cinco repetições, utilizando-se um penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar-Stolf (STOLF et al., 1983) e efetuadas medições até a profundidade de 40 cm. Determinou-se a resistência mecânica do solo à penetração através da Equação 23.

$$RP = \{5,6 + [68,9 / (P/N)]\} / 10,2 \quad (23)$$

Em que:

RP = Resistência mecânica do solo à penetração (MPa);

N = número de impactos (golpes) por camada de solo analisada; e

P = profundidade de penetração do penetrômetro (cm).

3.6.2.6. Umidade do solo (U)

Para a determinação da umidade do solo, as amostras foram coletadas com auxílio de um trado holandês nas profundidades de 0 a 20 cm e 20 a 40 cm, no

momento da determinação da RP em cada ponto de amostragem da malha regular, utilizando o método termogravimétrico, conforme metodologia descrita pela EMBRAPA (1997). As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos, identificadas e levadas para o Laboratório de Análise de Solos e Folhas da FESURV. Foram pesados 10 cm³ de cada amostra de solo em Becker tarado antecipadamente. As amostras de solo foram secas em estufa entre 105 - 110 °C por um período de 24 horas. Após, procedeu-se à pesagem do solo seco em estufa. Os cálculos da umidade foram efetuados através da relação entre a massa de água e a massa de solo seco através da Equação 24.

$$U = \frac{(Mb + su) - (Mb + ss)}{(Mb + ss) - Mb} \quad (24)$$

Em que:

U = Umidade do solo em base seca (g g⁻¹);

Mb = Massa do Becker (g);

su = solo úmido (g); e

ss = solo seco em estufa (g).

3.7. Análise estatística

Os dados obtidos para cada atributo e da produtividade da soja nas condições de manejo do solo foram armazenados em planilhas eletrônicas com as devidas coordenadas locais. Estes dados foram utilizados na análise estatística descritiva, descritiva espacial e geoestatística.

3.7.1. Análise exploratória descritiva

Com os dados dos atributos químicos e físicos do solo foi realizado um resumo estatístico, onde foram calculados a média, mediana, variância, desvio padrão, valores mínimos e máximos, coeficiente de variação, assimetria e curtose de acordo com as Equações 25 a 30, respectivamente. Para essa análise exploratória dos dados foram utilizados os *softwares* Excel for *windows* e o pacote estatístico Statistica 6.0 (STAT SOFT, 2001).

Esta análise verifica a presença de pontos discrepantes, os chamados *outliers*, que são observações extremas que destoam do conjunto de dados, e alteram os valores de algumas medidas, como a média dos dados. Conforme menciona Hoaglin et al. (1983), é necessária uma medida de dispersão que seja insensível a essas observações o que, contrariamente à amplitude e aos valores de desvio padrão amostrais, a dispersão dos quartis fornece (JAKOB, 1999). Utilizou-se o gráfico *boxplot*, que é composto por uma caixa dividida em quartis, sendo que os pontos além dos limites críticos identificados são considerados anormais.

A normalidade dos dados foi verificada pelo *software* Statistica 6.0 pelo método de Kolmogorov-Smirnov (K-S) a 5% de significância (STAT SOFT, 2001). A verificação de normalidade dos dados foi, também, realizada por meio do coeficiente de assimetria, que indica o grau de desvio ou afastamento da simetria de uma distribuição, e do coeficiente curtose, que mede o grau de achatamento de uma curva em relação à distribuição normal (GUIMARÃES, 1993). No *software* utilizado os coeficientes de assimetria e curtose próximos de zero indicam aproximação com a distribuição da normal padrão.

- Média (\bar{X})

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (25)$$

Em que:

\bar{X} = média amostral;

x_i = valor da i -ésima observação; e

n = tamanho da amostra.

- Variância (s^2)

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n - 1} \quad (26)$$

-Desvio Padrão (s)

$$s = \sqrt{s^2} \quad (27)$$

- Coeficiente de Variação (C.V)

$$CV = \frac{s}{\bar{X}} * 100 \quad (28)$$

- Coeficiente de Assimetria (C_s)

$$C_s = \frac{m_3}{\sqrt{(m_2)^3}} \quad (29)$$

Em que:

m_2 e m_3 = segundo e terceiro momentos centrados na média.

- Coeficiente de Curtose (C_k)

$$C_k = \frac{m_4}{\sqrt{(m_2)^4}} \quad (30)$$

Em que:

m_4 = quarto momento em relação a média aritmética.

3.7.2. Análise exploratória espacial

Esta análise é realizada com o objetivo de verificar a presença de tendência dos dados na área de amostragem. A análise de tendência dos atributos com os eixos x e y foi realizada por meio de equações de regressões polinomiais, até o nível quadrático e com todas as interações entre esses eixos, conforme descrito por Vieira (2000) e Azevedo (2004). A presença da tendência ao longo dos eixos da malha de amostragem indica o chamado efeito proporcional e com isto a falta de estacionaridade dos dados. Detectada a tendência significativa dos dados, utilizaram-se os resíduos da regressão na análise geoestatística. Outro método usado foi o do refinamento pela

mediana descrito por Silva et al. (2003a), conforme a seguir: a) dispor os dados de acordo com sua posição na malha amostral; b) calcular a mediana de cada linha e coluna e c) subtrair de cada valor amostrado o valor da mediana da linha e da coluna em que se encontra e adicionar, a cada valor amostrado, o valor da mediana de todo o conjunto de dados.

3.8. Análise geoestatística

A análise de dependência espacial é baseada na suposição de que medições separadas por distâncias pequenas são mais semelhantes entre si do que aquelas separadas por distâncias maiores (LANDIM, 1998). A geoestatística foi utilizada para verificar a existência e, neste caso, quantificar o grau de dependência espacial dos valores das variáveis estudadas a partir do ajuste de funções teóricas aos modelos de semivariogramas (esférico, exponencial, linear, linear com patamar e gaussiano). Com o ajuste de semivariogramas foi assumido a suposição de estacionaridade fraca e hipótese intrínseca, em que a variância da diferença ao quadrado é função da distância entre os pontos e não da sua localização na área para definição dos parâmetros necessários para a estimativa de valores para locais não amostrados.

A análise geoestatística foi realizada conforme procedimentos e técnicas descritas por Isaaks & Srivastava (1989), por meio do semivariograma experimental, estimando os parâmetros importantes (efeito pepita, alcance de dependência espacial e patamar). Para o ajuste dos modelos teóricos aos semivariogramas experimentais, utilizou-se o *Software GS+* (ROBERTSON, 1998). A semivariância dos dados em função da distância de amostragem é estimada através da Equação 31.

$$\gamma^*(h) = \frac{\sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2}{2N(h)} \quad (31)$$

Em que:

$N(h)$ = número de pares de valores medidos; e

$Z(x_i)$, $Z(x_i + h)$ = valores medidos na posição x_i e $x_i + h$, separados por um vetor h .

O gráfico de gama asterisco (γ^*) em função da distância (h) é denominado semivariograma.

O programa GS⁺ aplica a metodologia dos mínimos quadrados para os ajustes dos modelos e utiliza, como critérios para a seleção do modelo, o maior valor de R² (coeficiente de determinação) e menor SQR (soma de quadrados dos resíduos). Quanto menor o SQR, melhor será o modelo de semivariograma. Esse resultado é utilizado para a seleção do modelo e, por meio de combinações dos parâmetros do modelo, minimiza-se o SQR. O autor do programa alega que a utilização desse critério na seleção do modelo é o preferido, por ser este mais sensível e mais robusto quando comparado somente com o coeficiente de determinação (GUIMARÃES, 2004). Os modelos teóricos apresentados no *software* GS⁺ para ajuste dos dados são: esférico, exponencial, linear, linear com patamar e gaussiano.

Escolhido o modelo com melhor ajuste ao semivariograma experimental, foi realizada a verificação pelo método da validação cruzada. Nessa análise, cada valor original é removido do domínio espacial e, usando-se os demais, um novo valor é estimado pela krigagem para esse ponto. Desse modo, constrói-se um gráfico mostrando a relação entre valores reais e os valores estimados, analisando o coeficiente angular e o R² (GUIMARÃES, 2000).

Em seguida, os semivariogramas foram escalonados pela variância, de acordo com Vieira et al. (1998), com isso, o efeito pepita tornou-se automaticamente uma fração do patamar, facilitando as interpretações e comparações entre semivariogramas de diferentes atributos, visto que assim pode ser verificado se apresentam o mesmo padrão de variabilidade espacial, uma vez que assumem valores em uma escala padronizada. O semivariograma escalonado $\gamma^* e$ pode ser estimado pela Equação 32.

$$\gamma^* e = \frac{\gamma_i^*(h)}{S^2} \quad (32)$$

Em que:

i = número de variáveis medidas; e

S^2 = valor da variância de cada atributo estudado.

Para análise do índice de dependência espacial (IDE) das variáveis foi utilizada a relação $C_1/(C_0 + C_1)$, definida no *Software GS+*, indicando forte dependência para relação maior ou igual a 0,75, moderada dependência para relação entre 0,25 a 0,75 e baixa dependência para relação menor que 0,25.

Conhecendo-se o semivariograma da variável, e havendo dependência espacial entre as amostras, interpolou-se pelo *Software GS+*, por combinação linear dos valores medidos, valores na posição 0,50 x 0,50 metros no campo de estudo pelo método da krigagem ordinária. Neste método, pontos próximos da posição a ser interpolada levam maiores pesos que os mais distantes. Esse estimador nada mais é que uma média móvel ponderada (VIEIRA, 2000).

A estimativa por krigagem ordinária segue a Equação 33.

$$Z^*(x) = \sum \lambda_i \cdot Z(x_i) \quad (33)$$

Em que:

λ_i = pesos de cada valor medido;

Z = valor medido; e

Z^* = valor estimado através do método de krigagem.

Os pesos λ , que são obtidos pelo método de multiplicadores de Lagrange, associados à equação de estimação e à exigência de que a esperança dos erros seja igual a zero e a variância de estimação seja mínima, faz com que a variância de krigagem seja a menor variância entre todos os processos de interpolação (GUIMARÃES, 2000).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Análise qualitativa dos atributos do solo sob plantio direto (PD) e preparo convencional (PC)

Inicialmente, os dados dos atributos do solo coletados na malha amostral nas duas áreas de estudo foram analisados em busca da presença de pontos discrepantes. Após observação da presença de poucos pontos discrepantes em alguns atributos, fez-se sua remoção e, novamente procedeu-se a verificação se os dados apresentavam comportamento próximo à curva da distribuição normal padrão. A exclusão dos pontos discrepantes daqueles atributos não contribuiu para o comportamento dos dados se ajustarem à distribuição normal padrão pelo teste Kolmogorov-Smirnov (K-S). Nesse caso, optou-se por mantê-los em função do número de amostras não ser muito grande e, também, pela diferença entre a média e a mediana dos dados não sofrerem alterações significativas. Segundo Salviano (1996), um dado é realmente um valor discrepante ou não, se a sua retirada do conjunto de dados implicarem numa modificação dos valores da média e mediana, tornando-as mais semelhantes.

4.1.1. Análise dos atributos químicos do solo

Do total dos atributos químicos amostrados no PC e PD nas duas profundidades, 0 a 5 cm e 5 a 15 cm, dezoito e dezenove apresentaram distribuição de frequência com assimetria positiva, respectivamente. Nesses casos, observa-se que a mediana apresenta valor menor que a média, mostrando assim, uma tendência para

concentração de valores abaixo da média (Tabelas 1 e 2). Porém, estas tendências para esses atributos são pequenas, uma vez que os valores das médias e das medianas estão próximos.

A grande maioria dos atributos químicos, nos dois sistemas de preparo do solo, a distribuição de frequência é leptocúrtica, ou seja, com curtose maior que zero (positiva), o que mostra uma tendência de maior homogeneidade dos dados, com maior concentração em torno da média, conforme encontrado por Manzione (2002) e Azevedo (2004).

Os atributos químicos MO e Mg na profundidade de 0 a 5 cm e os atributos MO, P, K, SB e CTC na profundidade de 5 a 15 cm, no PC (Tabela 1), e pH, MO e CTC no plantio direto (PD) na profundidade de 0 a 5 cm e o Ca na profundidade de 5 a 15 cm, no PD (Tabela 2), apresentam distribuição platicúrtica, ou seja, com curtose menor que zero (negativa), mostrando a tendência desses atributos apresentarem maior variabilidade em torno da média, uma vez que os valores encontrados são mais distribuídos ao longo do eixo X, no gráfico de distribuição de frequências.

Os atributos químicos nos dois sistemas de preparo do solo e nas duas profundidades estudadas apresentam uma média variação na distribuição de frequência; a assimetria assume valores entre -0,66 a 2,45 e a curtose uma grande variação entre os valores de -1,00 a 8,13. Porém, testada a normalidade dos dados pelo teste Kolmogorov-Smirnov (K-S), 82% e 73% dos atributos apresentam distribuição normal para o PC e PD, respectivamente. Nesse caso, o fato de alguns atributos não se ajustarem a uma distribuição normal, implica na limitação de métodos, para os quais esse requisito é básico (MEAD & CURNOW, 1983), não podendo a média ser tomada como medida representativa da população amostral (QUEIROZ, 1995; GUERRA, 1998).

Uma vez comprovado que existem atributos sem distribuição normal dos dados fica clara a importância da geoestatística no complemento da estatística clássica, conforme descreve Jakob (1999), para interpretar com mais clareza e certeza os atributos estudados, como confirmado por Sattler (2006).

Tabela 1 - Estatística descritiva de atributos químicos do solo nas profundidades de 0 a 5 cm e 5 a 15 cm, na área sob preparo convencional (PC)

Atributos	\bar{X}	Md.	S	Valores		Coeficientes			Distr.
				Min.	Max	CV	C _s	C _k	
Profundidade de 0 a 5 cm									
pH em CaCl ₂	4,85	4,90	0,20	4,30	5,30	4,12	-0,32	0,27	*
MO (g dm ⁻³)	38,59	37,10	2,55	34,00	42,80	6,61	0,27	-1,00	**
P (mg dm ⁻³)	9,34	8,94	2,74	5,50	16,68	29,34	1,00	0,64	**
K (mg dm ⁻³)	95,53	93,80	22,78	54,70	156,4	23,85	0,92	0,54	*
Ca (cmol _c dm ⁻³)	2,41	2,35	0,43	1,52	3,80	17,84	1,11	2,13	*
Mg (cmol _c dm ⁻³)	0,73	0,75	0,14	0,47	1,02	19,18	-0,21	-0,77	*
Al (cmol _c dm ⁻³)	0,048	0,045	0,034	0,01	0,20	70,83	2,18	8,13	*
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	5,01	5,00	0,81	3,10	7,50	16,20	0,70	2,15	*
SB (cmol _c dm ⁻³)	3,38	3,39	0,52	2,38	4,90	15,40	0,73	0,93	*
CTC (cmol _c dm ⁻³)	8,39	8,40	0,81	6,47	10,61	9,70	0,10	0,68	*
V (%)	40,29	40,29	5,98	27,57	55,68	14,80	0,35	0,38	*
Profundidade de 5 a 15 cm									
pH em CaCl ₂	4,66	4,70	0,17	4,30	5,20	3,65	0,45	1,88	*
MO (g dm ⁻³)	36,88	36,90	2,65	32,70	42,80	7,19	0,26	-0,50	**
P (mg dm ⁻³)	8,45	8,10	3,02	2,81	15,41	35,74	0,45	-0,07	*
K (mg dm ⁻³)	35,11	35,20	7,96	19,60	54,70	22,67	0,08	-0,26	*
Ca (cmol _c dm ⁻³)	2,10	2,03	0,47	1,04	3,38	22,38	0,06	0,57	*
Mg (cmol _c dm ⁻³)	0,75	0,71	0,18	0,42	1,19	24,00	0,47	0,17	*
Al (cmol _c dm ⁻³)	0,094	0,080	0,075	0,02	0,36	79,79	2,45	6,03	**
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	6,00	6,00	0,94	3,80	8,70	15,67	0,53	1,29	*
SB (cmol _c dm ⁻³)	2,94	2,86	0,61	1,54	4,24	20,70	-0,20	-0,05	*
CTC (cmol _c dm ⁻³)	8,95	8,92	0,68	7,92	10,73	7,60	0,46	-0,25	*
V (%)	33,12	33,30	7,37	17,62	52,74	22,30	-0,04	0,68	*

\bar{X} : Média dos dados; Md: Mediana; S: Desvio padrão; Min: Valor mínimo; Max: Valor máximo; CV: Coeficiente de variação; C_s: Coeficiente de assimetria; C_k: Coeficiente de curtose; * : Distribuição normal; e ** : Distribuição não definida.

No PC na profundidade de 0 a 5 cm, o pH apresenta o menor coeficiente de variação (CV), com valor de 4,12%, e o Al o valor superior (70,83%); e na profundidade de 5 a 15 cm, os atributos que apresentam menor e maior CV são os mesmos, com valores de 3,65% e 79,79%, respectivamente.

Tabela 2 - Estatística descritiva de atributos químicos do solo nas profundidades de 0 a 5 cm e 5 a 15 cm, na área sob plantio direto (PD)

Atributos	\bar{X}	Md.	S	Valores		Coeficientes			Distr.
				Min.	Max	CV	C _s	C _k	
Profundidade de 0 a 5 cm									
pH em CaCl ₂	4,75	4,70	0,15	4,50	5,10	3,16	0,62	-0,06	**
MO (g dm ⁻³)	39,77	39,80	3,32	32,70	45,90	8,34	-0,42	-0,41	**
P (mg dm ⁻³)	3,90	3,56	1,25	2,11	7,61	32,11	1,26	1,60	**
K (mg dm ⁻³)	82,02	76,25	28,25	35,20	199,40	34,44	1,74	5,93	*
Ca (cmol _c dm ⁻³)	1,54	1,50	0,33	1,05	2,70	21,05	1,26	3,04	*
Mg (cmol _c dm ⁻³)	0,94	0,93	0,23	0,40	1,43	24,50	0,02	0,01	*
Al (cmol _c dm ⁻³)	0,07	0,07	0,04	0,02	0,20	55,90	1,10	2,35	*
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	5,28	5,45	0,68	3,30	6,60	12,87	-0,66	0,60	*
SB (cmol _c dm ⁻³)	2,69	2,64	0,45	1,93	4,03	16,70	0,72	0,74	*
CTC (cmol _c dm ⁻³)	7,96	8,05	0,53	6,73	8,88	6,70	-0,31	-0,43	*
V (%)	33,85	32,77	6,12	24,80	54,98	18,10	1,09	1,80	*
Profundidade de 5 a 15 cm									
pH em CaCl ₂	4,44	4,40	0,20	4,10	5,00	4,50	0,58	0,32	*
MO (g dm ⁻³)	34,53	34,00	3,38	28,80	44,40	8,34	0,83	1,06	*
P (mg dm ⁻³)	6,61	6,36	2,53	2,24	13,96	47,95	0,64	0,63	*
K (mg dm ⁻³)	48,27	48,00	18,36	19,60	105,60	38,04	0,94	1,18	*
Ca (cmol _c dm ⁻³)	1,38	1,35	0,45	0,55	2,44	21,05	0,37	-0,25	**
Mg (cmol _c dm ⁻³)	0,67	0,60	0,26	0,19	1,39	38,80	0,79	0,78	**
Al (cmol _c dm ⁻³)	0,07	0,07	0,04	0,02	0,20	54,30	1,21	0,85	**
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	6,83	6,90	1,107	4,40	9,30	16,21	0,11	0,00	*
SB (cmol _c dm ⁻³)	2,17	2,03	0,73	0,80	4,01	33,60	0,53	0,14	*
CTC (cmol _c dm ⁻³)	9,00	9,05	0,59	8,02	10,78	6,60	0,95	2,12	*
V (%)	24,44	22,16	8,89	8,51	47,68	36,40	0,54	0,14	*

\bar{X} : Média dos dados; Md: Mediana; S: Desvio padrão; Min: Valor mínimo; Max: Valor máximo; CV: Coeficiente de variação; C_s: Coeficiente de assimetria; C_k: Coeficiente de curtose; *: Distribuição normal; e **: Distribuição não definida.

No PD na profundidade de 0 a 5 cm, o atributo pH apresenta o menor CV, com valor de 3,16%, e o Al o maior CV com valor de 55,90%; e na profundidade de 5 a 15 cm o pH apresenta o menor CV de 4,50% e o maior de 54,30% para o Al. Castrignano et al. (2000), também encontraram menor valor de CV para o pH.

Adotando o critério de classificação para o coeficiente de variação (CV) proposto por Warrick & Nielsen (1980), os valores são: baixos (CV < 12%) para o pH, MO e CTC (27,30% dos dados) nas duas profundidades para PC e PD; médios (12% < CV < 60%), no PC nas duas profundidades para P, K, Ca, Mg, H+Al, SB e V (63,6% dos dados) e no PD nas duas profundidades para P, K, Ca, Mg, H+Al, SB, V e Al (72,7% dos dados);

e altos ($CV > 60\%$) no PC nas duas profundidades, somente enquadrando o atributo Al (9,1% dos dados). Isto mostra que para os atributos químicos, em geral, a dispersão de valores em torno da média aritmética dos dados está distribuída entre 12,0% a 60,0% nas duas áreas experimentais, indicando média dispersão.

Os intervalos de classificação do CV para o pH e P, K, Ca e Mg vêm confirmar os resultados de Carvalho et al. (2002), estudando a variabilidade desses atributos em PD e PC primário do solo com arado e grade aradora. Tais atributos, apresentaram-se dentro da mesma classificação do CV, baixo para o pH e médio para os demais nas profundidades de 0 a 5 e 5 a 20 cm.

4.1.2. Análise dos atributos físicos do solo

Dos atributos físicos amostrados nas três profundidades (Tabela 3 e 4) nos sistemas PC e PD, oito apresentam distribuição de frequência com assimetria positiva. Nesses casos, observa-se que a mediana apresenta valor menor que a média, mostrando, assim, a tendência para concentração de valores menores que a média. A curtose é positiva (leptocúrtica) para seis atributos.

No PD nas duas profundidades, a RP apresenta média maior que a mediana, portanto, assimetria positiva e no PC este atributo apresenta comportamento contrário (Tabela 5).

Dos atributos físicos estudados nas três profundidades, seis no PC e quatro no PD apresentam distribuição platicúrtica (Tabelas 3 e 4). Cabe lembrar que o programa Statistica 6.0, utilizado na análise descritiva, tem como padrão o valor zero para a distribuição mesocúrtica e que, segundo Spiegel (1993), uma curva perfeitamente simétrica apresentará coeficiente de assimetria nulo.

Dos atributos físicos avaliados, no PC, a Ds, na profundidade de 20 a 40 cm, apresenta o menor CV com valor de 2,61%. O maior CV, com 22,98%, ocorre para o atributo MaP na profundidade de 0 a 10 cm (Tabela 3). No PD, a Pt apresenta o menor CV, com valor de 2,81%, na profundidade de 20 a 40 cm e o maior CV para a MaP na profundidade de 0 a 10 cm, com valor de 37,32% (Tabela 4).

Tabela 3 - Estatística descritiva de atributos físicos do solo sob preparo convencional (PC) em três profundidades

Atributos	\bar{X}	Md.	S	Valores		CV	Coeficientes		Distr.
				Min.	Max		C_s	C_k	
Profundidade de 0 a 10 cm									
Ds (kg dm ⁻³)	1,01	1,01	0,04	0,94	1,11	3,96	0,29	-0,26	*
MiP (%)	42,29	41,84	2,54	38,44	49,24	6,01	0,94	0,64	*
MaP (%)	14,84	15,01	3,41	7,38	21,29	22,98	-0,18	-0,29	*
Pt (%)	57,13	57,20	1,95	52,43	61,12	3,41	-0,22	-0,13	*
Profundidade de 10 a 20 cm									
Ds (kg dm ⁻³)	1,11	1,12	0,05	1,00	1,19	4,50	-0,52	-0,30	*
MiP (%)	40,88	40,70	1,83	38,10	47,28	4,48	1,45	3,14	*
MaP (%)	12,09	12,05	2,15	8,96	19,89	17,78	1,09	2,58	*
Pt (%)	52,97	52,74	2,15	49,90	60,55	4,06	1,10	2,19	*
Profundidade de 20 a 40 cm									
Ds (kg dm ⁻³)	1,15	1,16	0,03	1,10	1,22	2,61	0,08	-0,67	*
MiP (%)	38,72	38,51	1,26	35,77	42,01	3,25	0,71	1,16	*
MaP (%)	13,49	13,53	1,85	9,36	17,73	13,71	-0,14	-0,22	*
Pt (%)	52,21	51,99	1,40	49,82	56,03	2,68	0,58	0,32	*

\bar{X} : Média dos dados; Md: Mediana; S: Desvio padrão; Min: Valor mínimo; Max: Valor máximo; CV: Coeficiente de variação; C_s : Coeficiente de assimetria; C_k : Coeficiente de curtose; *: Distribuição normal; **: Distribuição não definida; Ds: Densidade do solo; MiP: Microporosidade; MaP: Macroporosidade; e Pt: Porosidade total.

Tabela 4 - Estatística descritiva de atributos físicos do solo sob plantio direto (PD) em três profundidades

Atributos	\bar{X}	Md.	S	Valores		CV	Coeficientes		Distr.
				Min.	Max		C_s	C_k	
Profundidade de 0 a 10 cm									
Ds (kg dm ⁻³)	1,05	1,05	0,06	0,95	1,18	5,71	0,39	-0,74	*
MiP (%)	43,86	44,45	3,06	37,92	50,47	6,98	-0,15	-0,50	*
MaP (%)	11,79	11,29	4,40	5,03	23,30	37,32	0,47	-0,23	*
Pt (%)	55,65	55,65	2,60	49,58	61,62	3,41	-0,36	0,04	*
Profundidade de 10 a 20 cm									
Ds (kg dm ⁻³)	1,13	1,13	0,04	1,04	1,21	3,54	-0,11	0,09	*
MiP (%)	42,46	42,61	2,03	37,35	47,31	4,78	-0,06	0,35	*
MaP (%)	9,52	9,38	2,53	4,81	15,48	26,58	0,64	0,09	*
Pt (%)	51,98	52,00	1,56	48,51	56,31	3,00	0,43	0,88	*
Profundidade de 20 a 40 cm									
Ds (kg dm ⁻³)	1,14	1,14	0,04	1,06	1,27	3,51	0,55	1,29	*
MiP (%)	40,35	39,83	2,38	36,08	46,30	5,90	0,42	0,08	*
MaP (%)	11,52	11,41	2,70	5,96	18,43	23,44	0,32	0,62	*
Pt (%)	51,88	51,94	1,46	48,80	54,92	2,81	0,04	-0,49	*

\bar{X} : Média dos dados; Md: Mediana; S: Desvio padrão; Min: Valor mínimo; Max: Valor máximo; CV: Coeficiente de variação; C_s : Coeficiente de assimetria; C_k : Coeficiente de curtose; *: Distribuição normal; **: Distribuição não definida; Ds: Densidade do solo; MiP: Microporosidade; MaP: Macroporosidade; e Pt: Porosidade total.

No PC, o atributo umidade do solo (U) apresenta menor CV na profundidade 20 a 40 cm, com valor de 8,69%. O maior CV é observado para RP, na profundidade de 0 a 20 cm, com valor de 22,52%. No PD, o menor CV é observado para U com valor de 6,97% na profundidade de 20 a 40 cm e o maior CV na profundidade de 0 a 20 cm para RP com valor de 19,52% (Tabela 5).

Adotando o critério de classificação para o coeficiente de variação (CV) proposto por Warrick e Nielsen (1980), para medida de dispersão, seus valores são: baixos ($CV < 12\%$) para os atributos físicos Ds, MiP e Pt nas três profundidades (75% dos dados) e para RP e U nas duas profundidades (50% dos dados); médios ($12\% < CV < 60\%$) para MaP nas três profundidades no PC e PD, com 25% dos dados; e nenhum atributo físico se enquadra na classe de CV alto ($CV > 60\%$), indicando baixa dispersão dos atributos físicos.

No PD nas duas profundidades, a resistência mecânica do solo à penetração apresenta média maior que a mediana, portanto, assimetria positiva e, no PC, este atributo apresenta comportamento contrário.

Nos atributos físicos avaliados em três profundidades (Tabelas 3 e 4), o coeficiente de assimetria varia de -0,52 a 1,45 e a curtose apresenta uma média variação entre -0,74 a 3,14. Porém, testada a normalidade dos dados pelo teste Kolmogorov-Smirnov (K-S), os atributos físicos nas três profundidades e nos dois sistemas de manejo apresentam 100% dos dados com distribuição normal. Na Tabela 5, para a resistência do solo à penetração e a umidade do solo, a assimetria dos dados varia de -1,19 a 3,54 e a curtose tem uma grande variação entre os valores de -1,01 a 13,23, apresentando para os atributos RP 100% dos dados com distribuição normal, e 50% com distribuição não definida para a umidade do solo (U).

Como a média aritmética dos dados é uma medida de posição que representa o conjunto de dados dos valores de determinado atributo, e é tanto menos representativa quanto maior for a variação em torno dela, que por sua vez é medida pelo coeficiente de variação, pode-se afirmar que há baixa variabilidade dos atributos físicos em relação aos químicos.

Tabela 5 - Estatística descritiva dos atributos físicos do solo sob plantio direto (PD) e preparo convencional (PC) em duas profundidades

Atributos	Manejo	\bar{X}	Md.	S	Valores		Coeficientes		Distr.	
					Min.	Max	CV	C _s		C _k
Profundidade de 0 a 20 cm										
RP (MPa)	PD	2,92	2,87	0,57	1,72	4,36	19,50	0,51	0,72	*
	PC	2,53	2,56	0,48	1,54	3,37	18,97	-0,25	-0,79	*
Profundidade de 20 a 40 cm										
RP (MPa)	PD	4,00	3,97	0,55	2,94	5,36	13,75	0,25	-0,21	*
	PC	4,59	4,64	0,51	3,56	5,43	11,11	-0,28	-1,01	*
Profundidade de 0 a 20 cm										
U (g g ⁻¹)	PD	0,24	0,24	0,02	0,19	0,28	8,35	-0,21	-0,27	*
	PC	0,21	0,22	0,01	0,17	0,23	4,73	-1,19	0,32	*
Profundidade de 20 a 40 cm										
U (g g ⁻¹)	PD	0,29	0,27	0,11	0,15	0,77	38,31	3,54	13,23	**
	PC	0,23	0,23	0,01	0,21	0,25	4,35	-0,95	1,30	**

\bar{X} : Média dos dados; Md: Mediana; S: Desvio padrão; Min: Valor mínimo; Max: Valor máximo; CV: Coeficiente de variação; C_s: Coeficiente de assimetria; C_k: Coeficiente de curtose; *: Distribuição normal; **: Distribuição não definida; RP: Resistência do solo à penetração; e U: Umidade do solo.

4.2. Comparação das médias dos valores dos atributos do solo sob plantio direto (PD) e preparo convencional (PC)

Com a finalidade de se comparar as médias dos valores dos atributos químicos e físicos do solo cultivado com soja no PC e PD, nas diferentes profundidades, realizou-se o teste t-Student, conforme descrito por Azevedo (2004), cujos resultados encontram-se nas Tabelas 6, 7, 8 e 9. Ressalta-se que para este teste existe a pressuposição de distribuição normal das variáveis. Na prática, quando n aumenta, indo além de 30 observações, a necessidade de admitir a normalidade diminui (STEVENSON, 2001).

4.2.1. Médias dos atributos químicos do solo

De acordo com a Tabela 6, no PC e PD para o cultivo da soja, na profundidade de 0 a 5 cm, há diferença significativa entre os valores das médias para quase todos os atributos, exceto para a MO e H+Al. Os teores de MO na área de PC, a qual sofreu intervenção nos últimos cinco anos, não diferem significativamente da área de PD. Esse comportamento pode estar associado aos resíduos orgânicos da soja, os quais por

apresentarem relação C/N estreita, tendem a não contribuírem tanto para o aumento do teor de MO do solo e, principalmente, ao tempo em que foi implantado o cultivo convencional (cinco anos) em área que era adotado o PD. Portanto, espera-se com o decorrer do tempo que o PD favoreça para o incremento da MO, sobretudo, na camada superficial do solo (CFSEMG, 1999). Guimarães (2000) encontrou diferença significativa para a MO comparando esses dois sistemas de manejo na profundidade de 0 a 20 cm, com valores de 30,4 e 37,5 g dm⁻³ para o PC e PD, respectivamente. Já Muzilli (1983) não verificou diferença significativa entre os dois sistemas de manejo para esse atributo. Segundo Gassen & Gassen (1996), a MO é responsável pela retenção e liberação lenta de nitrogênio, fósforo, enxofre, micronutrientes e solubilização de outros elementos.

Aumentos significativos são observados para o P e K após o revolvimento do solo (PC) na camada superficial (0 a 5 cm). Esse fato pode ser explicado porque, no PD, esses elementos são colocados somente na linha de semeadura, enquanto, no PC, há uma homogeneização dos mesmos no solo após o preparo, proporcionando aumento nas concentrações de nutrientes nas entrelinhas. Segundo Eltz et al. (1989) e Schlindwein & Anghinoni (2000), a maior concentração de P e K ocorre na superfície e subsuperfície na camada de 0 a 10 cm de profundidade em solo sob PD.

Comparando-se os atributos químicos na profundidade de 5 a 15 cm, verifica-se, exceto para Mg e CTC, diferença significativa entre os manejos (PC e PD) para os atributos químicos avaliados.

Verificam-se teores significativamente superiores de MO na área com revolvimento do solo (PC) na profundidade de 5 a 15 cm, e uma diminuição no seu teor com a profundidade (PC e PD), corroborando Tomé Júnior (1997), que afirma que o teor de MO do solo sempre diminui com a profundidade. Os maiores teores de MO observados no PC se devem, provavelmente, à incorporação dos resíduos orgânicos. O P e o K apresentam comportamento contrário em relação ao manejo. Os teores de P no PC são superiores em relação ao PD, enquanto que o PD apresenta maiores valores de K em relação ao PC na profundidade de 5 a 15 cm (Tabela 6).

O solo da área sob PC apresenta melhores condições de fertilidade em relação ao solo sob PD na profundidade de 0 a 5 cm, refletida pelos valores estatisticamente

superiores de pH, P, K, Ca, SB, CTC e V. Entretanto, os valores encontrados para esses atributos de acordo com Cantarutti et al. (1999) indicam que é necessário intensificar a prática da calagem e adubação, visando tornar o solo mais produtivo.

Tabela 6 - Média dos valores de atributos químicos do solo sob plantio direto (PD) e preparo convencional (PC) comparados na mesma profundidade de amostragem

Atributos	Profundidade de 0 a 5 cm		Profundidade de 5 a 15 cm	
	PC	PD	PC	PD
pH (em CaCl ₂)	4,85 a	4,75 b	4,66 a	4,44 b
MO (g dm ⁻³)	38,59 a	39,77 a	36,88 a	34,53 b
P (mg dm ⁻³)	9,34 a	4,33 b	8,45 a	7,07 b
K (mg dm ⁻³)	95,53 a	82,02 b	35,11b	48,27 a
Ca (cmol _c dm ⁻³)	2,41 a	1,54 b	2,10 a	1,38 b
Mg (cmol _c dm ⁻³)	0,73 b	0,94 a	0,75 a	0,67 a
Al (cmol _c dm ⁻³)	0,05 b	0,07 a	0,09 b	0,23 a
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	5,01 a	5,28 a	6,00 b	6,82 a
SB (cmol _c dm ⁻³)	3,38 a	2,68 b	2,94 a	2,17 b
CTC (cmol _c dm ⁻³)	8,39 a	7,96 b	8,95 a	9,00 a
V (%)	40,49 a	33,85 b	33,12 a	24,44 b

Médias seguidas pela mesma letra e na mesma profundidade não diferem significativamente entre si, ao nível de 5%, pelo teste t.

Tabela 7 - Média dos valores de atributos químicos do solo sob plantio direto (PD) e preparo convencional (PC) comparados em duas profundidades de amostragem

Atributos	PC		PD	
	Profundidade (cm)		Profundidade (cm)	
	0 a 5	5 a 15	0 a 5	5 a 15
pH (em CaCl ₂)	4,85 a	4,66 b	4,75 a	4,44 b
MO (g dm ⁻³)	38,59 a	36,88b	39,77 a	34,53 b
P (mg dm ⁻³)	9,34 a	8,45 a	4,33 b	7,07 a
K (mg dm ⁻³)	95,53 a	35,11 b	82,02 a	48,27 b
Ca (cmol _c dm ⁻³)	2,41 a	2,10 b	1,54 a	1,38 a
Mg (cmol _c dm ⁻³)	0,73 a	0,75 a	0,94 a	0,67 b
Al (cmol _c dm ⁻³)	0,05 a	0,09 a	0,07 b	0,23 a
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	5,01 b	6,00 a	5,28 b	6,82 a
SB (cmol _c dm ⁻³)	3,38 a	2,94 b	2,68 a	2,17 b
CTC (cmol _c dm ⁻³)	8,39 b	8,95 a	7,96 b	9,00 a
V (%)	40,49 a	33,12 b	33,85 a	24,44 b

Médias seguidas pela mesma letra no mesmo sistema de manejo do solo não diferem significativamente entre si, ao nível de 5%, pelo teste t.

Verifica-se que, na Tabela 7, para o PC a maioria dos atributos apresenta diferença significativa entre a profundidade de 0 a 5 cm e 5 a 15 cm, com exceção do P, Mg e Al. No PD, somente o atributo Ca não apresenta diferença significativa entre 0 a 5 cm e 5 a 15 cm de profundidade.

Neste trabalho, não se verifica acúmulo de Ca nas profundidades de 0 a 5 cm e 5 a 15 cm nos dois sistemas de manejo estudados, e de Mg na profundidade de 5 a 15 cm no PD, havendo pouco acúmulo no PC para esse mesmo atributo com o aumento da profundidade. Resultados semelhantes foram encontrados por Klepker & Anghinoni (1995) que também não observaram acúmulo de Ca e Mg trocáveis nas profundidades de 0 a 15 cm de solo, enquanto que Sidiras & Pavan (1985) e Eltz et al. (1989) verificaram acúmulo de Ca e Mg trocáveis na superfície do solo (0 a 15 cm) no PD em relação ao PC.

Independente do sistema de preparo do solo adotado neste trabalho, o calcário calcítico, aplicado no PC quatro meses antes da semeadura da soja, que foi realizada entre 24 de outubro a 08 de novembro de 2005, proporcionou, 10 meses após sua aplicação, por ocasião da coleta das amostras no mês de abril de 2006, maiores valores de pH e Ca na profundidade de 0 a 5 cm, enquanto foi observado maior valor para o Mg no PD na mesma profundidade. Estes resultados estão de acordo com os obtidos por Klepker & Anghinoni (1995) que observaram o resultado do calcário aplicado antes da instalação do milho, 20 meses depois, com maiores valores de pH e de Ca e Mg trocáveis nas camadas de 0 a 15 cm de profundidade, independentes do método de preparo do solo. A CTC (Tabela 6) não apresenta diferença significativa na profundidade de 5 a 15 cm, porém os maiores valores nesta profundidade, são justificados pelos maiores valores da acidez potencial (H + Al).

Nos dois sistemas de manejo do solo e nas duas profundidades, a saturação por bases trocáveis (V) do solo apresenta baixos valores após a colheita da soja, o que é característico de um solo ácido, com baixa disponibilidade de bases trocáveis (Tabela 7), indicando que a calagem nas áreas, independente do manejo adotado pelo agricultor não estar bem conduzida. Segundo Malavolta (1992), a calagem em PD corrige a acidez superficial do solo, o que confirma os valores baixos de pH na maior profundidade estudada (5 a 15 cm) nesse sistema.

4.2.2. Médias dos atributos físicos do solo

Através da Tabela 8, verifica-se que os valores de Ds diferem significativamente entre o PD e o PC nas profundidades de 0 a 10 cm e 10 a 20 cm, apesar dos baixos valores encontrados. Tais resultados estão de acordo com a afirmação de Canalli & Roloff (1997), de que, na maioria dos casos, a densidade do solo na camada superficial no PD é superior àquela no PC. O revolvimento do solo no PC contribuiu para diminuição da Ds até a profundidade de 20 cm. Esse atributo, na profundidade de 20 a 40 cm, não apresenta diferença significativa entre os manejos. Isso também pode ter ocorrido em virtude da profundidade adotada pela grade aradora não ter sido suficiente para mudar a estrutura do solo. Resultados semelhantes foram obtidos por Da Ros et al. (1997) que observaram em estudo sobre sistema de manejo do solo em Latossolo Vermelho Escuro Distrófico argiloso, durante cinco anos, que a menor Ds ocorreu no PC com aração e gradagem em relação ao PD, em três camadas estudadas entre 0 a 21 cm. Guimarães (2000), trabalhando com atributos físicos em solo de cerrado em PC e PD, encontrou diferença significativa entre os manejos, com valores médios de 1,11 e 1,20 kg dm⁻³, respectivamente, na profundidade de 0 a 20 cm.

Vários autores observaram que, em PD, a Ds é maior na profundidade superficial (0 a 20 cm) e decresce em maiores profundidades (DERPSCH et al., 1986; TREIN et al., 1991; ALBUQUERQUE et al., 2001), o que não foi observado no presente trabalho. As diferenças entre PC e PD ocorrem na camada arável, provavelmente, sob influência da gradagem para o preparo do solo, diminuindo a Ds.

Em todas as profundidades avaliadas, a MiP apresenta diferença estatística entre os dois manejos, com os maiores valores no PD (Tabela 8), podendo ser resultado do não revolvimento do solo durante o período de 15 anos, permitindo assim maior retenção de água no solo. Por outro lado, a maior MiP no PD é decorrente da maior Ds observada nesse sistema, cuja causa é a ausência de revolvimento associada ao trânsito de máquinas pesadas sobre o solo. Entretanto, espera-se que ocorra elevado aporte e acúmulo de MO no sistema e haja uma redução da Ds e conseqüentemente, da MiP, o que foi observado por Andreola et al. (2000) em trabalho PD versus PC com sistema de manejo de solo com rotação de culturas em um

Nitossolo Vermelho argiloso, onde não constataram diferenças entre os tratamentos para MiP.

A macroporosidade (MaP) nas três profundidades estudadas apresenta, contrariamente ao observado para MiP, maiores valores no PC em relação ao PD. Esse comportamento também foi encontrado por Spera et al. (2004), Treine et al. (1991) e Albuquerque et al. (2001). Os resultados obtidos neste trabalho estão de acordo com os obtidos por Guimarães (2000), que atribuiu esse comportamento ao próprio manejo empregado, pois, na camada superficial, o solo revolvido no PC, devido ao preparo, proporciona um volume maior de macroporos. Estes, por sua vez, tendem a diminuir em sistemas sem revolvimento e baixo teor de MO e/ou ausência de rotação de culturas.

Verifica-se, neste trabalho, ao se comparar a Pt nas profundidades de 0 a 10 cm, 10 a 20 cm e 20 a 40 cm, maiores valores no PC em relação ao PD, refletindo assim em menor Ds como resultado de modificações na estrutura do solo. Na profundidade de 20 a 40 cm, é observada diferença significativa entre os manejos. Os dados encontrados neste trabalho corroboram com os obtidos por Da Ros et al. (1997), os quais observaram maior Pt em solos sob PC com aração e gradagem em duas camadas (0 a 7 e 7 a 14 cm) em relação ao PD, enquanto que Anjos et al. (1994) não encontraram diferenças para Pt do solo entre esses dois sistemas de preparo, na camada de 0 a 20 cm.

Tabela 8 - Média dos valores de atributos físicos do solo sob plantio direto (PD) e preparo convencional (PC) na mesma profundidade de amostragem

Atributos	Profundidade de 0 a 10 cm		Profundidade de 10 a 20 cm		Profundidade de 20 a 40 cm	
	PC	PD	PC	PD	PC	PD
Ds (kg dm ⁻³)	1,01 b	1,05 a	1,11 b	1,13 a	1,15 a	1,14 a
MiP (%)	42,29 b	43,86 a	40,88 b	42,46 a	38,72 b	40,35 a
MaP (%)	14,84 a	11,79 b	12,09 a	9,52 b	13,49 a	11,52 b
Pt (%)	57,12 a	55,64 b	52,96 a	51,97 b	52,21 a	51,87 a

Médias seguidas pela mesma letra na mesma profundidade não diferem significativamente entre si, ao nível de 5%, pelo teste t.

Ds: Densidade do solo; MiP: Microporosidade; MaP: Macroporosidade; e Pt: Porosidade total.

A resistência mecânica do solo à penetração (RP) apresenta diferença significativa entre os dois sistemas para uma mesma profundidade. A RP é superior na profundidade de 20 a 40 cm em relação à profundidade de 0 a 20 cm nos dois sistemas de manejo avaliados (Tabela 9), apresentando o mesmo comportamento obtido por Klepker & Anghinoni (1995). No PD na profundidade de 0 a 20 cm, a RP é maior em relação ao PC. Isso pode ter ocorrido devido ao não revolvimento do solo por 15 anos e está relacionado aos resultados obtidos para Ds, MaP e MiP. Os valores médios da RP encontrados para as duas profundidades estão acima do limite de 2,0 MPa especificado por Tormena (2002) como solo compactado. Entretanto, Torres & Saraiva (1999), Sene et al. (1985), Nesmith (1987), estabeleceram o valor até 3,5 MPa como baixo e 6,5 MPa como limite máximo da compactação restringindo o desenvolvimento radicular de plantas.

A umidade do solo nos dois sistemas de manejo avaliados, nas duas profundidades, apresenta valores baixos, porém significativamente diferentes. Nesse caso, observa-se maior valor de umidade no PD, indicando influência do maior volume de microporos nesse sistema, o que pode ser beneficiado pelo acúmulo de palhada na superfície do solo, proporcionando maior armazenamento de água nos microporos. Guimarães (2000) observou que em solo revolvido há um volume maior de macroporos, diminuindo assim o teor de umidade no solo.

Tabela 9 - Média dos valores da resistência do solo à penetração (RP) e umidade do solo (U) no plantio direto (PD) e preparo convencional (PC) comparados na mesma profundidade de amostragem

Atributos	Profundidade de 0 a 20 cm		Profundidade de 20 a 40 cm	
	PC	PD	PC	PD
RP (MPa)	2,53 b	2,92 a	4,59 a	4,00 b
U (g g ⁻¹)	0,211 b	0,239 a	0,230 b	0,287 a

Médias seguidas pela mesma letra na mesma profundidade não diferem significativamente entre si, ao nível de 5%, pelo teste t.

RP: Resistência mecânica do solo à penetração (MPa) e U: Umidade do solo (g g⁻¹).

4.3. Distribuição espacial dos atributos do solo sob plantio direto (PD) e preparo convencional (PC)

Os dados da análise da variabilidade espacial por meio de semivariogramas escalonados para cada um dos atributos químicos e físicos dos solos sob cultivo da soja, no PC e PD, com os parâmetros e modelos ajustados aos semivariogramas são apresentados, respectivamente nas Tabelas 10 e 11.

O objetivo não é modelar a anisotropia dos atributos, fato que é comum em estudo na ciência do solo, devido ao processo de sua formação e atividades antrópicas. Logo, a dependência espacial é considerada isotrópica em todas as direções (0°, 45°, 90° e 135°) do vetor h (distância) na determinação do semivariograma experimental, isto é, todos os pares de observações estão considerados no cálculo do estimador do semivariograma pelo *software* GS⁺.

A análise da dependência espacial foi realizada com os 40 pontos centrais da malha amostral de 5 x 5 m. Essa decisão foi tomada após as tentativas no ajuste do semivariograma experimental e a observação de que os pontos mais distantes estavam com poucos pares de dados. Segundo Landim (1998), para realizar a somatória das diferenças ao quadrado, elas devem ser constituídas por um número suficiente de pares que tornem o resultado significativo no ajuste do semivariograma experimental a um modelo teórico. Como na determinação da dependência espacial de alguns atributos percebeu-se a falta de ajuste, optou-se por modelar os resíduos. Após tentativas não bem sucedidas trabalhou-se com os dados originais sendo ajustados aos modelos lineares sem patamar e efeito pepita puro.

4.3.1. Análise espacial dos atributos químicos e físicos do solo

Observando os parâmetros dos semivariogramas escalonados, nas Tabelas 10 e 11, percebe-se que os modelos ajustados estão de acordo com os critérios de aceitação definidos por Azevedo (2004). Estes critérios são o R^2 do semivariograma igual ou maior que 0,50 e R^2 significativo na validação cruzada, em nível de 5% de probabilidade.

Na Tabela 10, no PC do solo na profundidade de 0 a 5 cm, os atributos pH, MO, Mg, Al, H+Al, SB e CTC apresentam dependência espacial com ajuste do

semivariograma escalonado experimental ao modelo esférico. O menor alcance é para a SB (9,80 m) e o maior para o H+Al (25,00 m). Excluindo o Mg e a SB, os demais atributos apresentam um padrão espacial bem próximo, tendo os seus alcances variando de 23,20 a 25,00 m, inferindo uma grande associação entre eles. Guimarães (2000) ajustou o modelo esférico ao semivariograma experimental para o teor de MO no sistema convencional com alcance de 30,00 m, na profundidade de 0 a 20 cm. O P ajusta-se ao modelo exponencial com alcance de 11,50 m e o K não apresenta estabilização, realizando-se então o ajuste ao modelo linear sem patamar. Os atributos Ca e V (0 a 5 cm), pH, Mg, H+Al e V (5 a 15 cm) não apresentam dependência espacial, ajustando-se ao modelo efeito pepita puro.

Na profundidade de 5 a 15 cm, os atributos MO, P, K e CTC ajustam-se ao modelo esférico. O menor alcance é para o K (10,40 m) e o maior para o teor de matéria orgânica (MO) (32,00 m). Nesta profundidade, o alcance do K é menor comparado com o do P (16,60 m), o que pode ser explicado pela maior mobilidade do K no solo. Conforme Costa (1996), a baixa difusão do P é relacionada com a textura muito argilosa do solo, conforme o solo utilizado neste trabalho.

Na Tabela 11, no PD na profundidade de 0 a 5 cm, somente o atributo químico CTC apresenta dependência espacial com ajuste do modelo esférico ao semivariograma escalonado experimental. Entre os demais atributos, três apresentam o modelo linear sem patamar e sete com efeito pepita puro. Na profundidade de 5 a 15 cm, a CTC não apresenta estacionaridade ajustando-se ao modelo linear. Os demais atributos apresentam efeito pepita puro, ou seja, falta de correlação espacial, o que indica que a profundidade e o sistema de manejo são fatores importantes no estudo da dependência espacial.

O alcance encontrado em alguns atributos indica o limite de dependência espacial, ou seja, determinações realizadas em distâncias maiores que o alcance têm distribuição espacial aleatória e, por isso, são independentes entre si, podendo ser aplicadas à estatística clássica. Por outro lado, determinações realizadas em distâncias menores que o alcance são correlacionadas entre si, o que permite que sejam feitas interpolações para espaçamentos menores que os amostrados (SILVA et al., 2003b). De acordo com Mulla e McBratney (2000), o tamanho da malha amostral, ou seja, a

menor distância de amostragem pode ser definida como sendo de 0,25 a 0,50 vezes o valor do alcance.

Tabela 10 - Parâmetros de ajustes dos semivariogramas escalonados para os atributos químicos no preparo convencional (PC)

Atributos	Parâmetros dos Semivariogramas - Preparo Convencional								
	Modelos	Co	a (m)	Co+C ₁	B	IDE	R ²	R-VC	Sig
Profundidade de 0 a 5 cm									
pH em CaCl ₂	ESF	0,05	23,70	1,23	-	0,96 F	0,76	0,69	< 0,01
MO (g dm ⁻³)	ESF	0,43	24,80	1,19	-	0,65 M	0,65	0,46	< 0,01
P (mg dm ⁻³)	EXP	0,23	11,50	0,98	-	0,77 F	0,50	0,26	-
K (mg dm ⁻³)	LIN	0,80	-	1,00	0,09	0,24 Fr	0,70	-	-
Ca (cmol _c dm ⁻³)	EPP	1,00	-	1,00	-	-	-	-	-
Mg (cmol _c dm ⁻³)	ESF	0,04	13,10	1,14	-	0,96 F	0,68	0,78	< 0,01
Al (cmol _c dm ⁻³)	ESF	0,40	23,20	1,17	-	0,70 M	0,89	0,55	< 0,01
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	ESF	0,48	25,00	1,13	-	0,60 M	0,60	0,46	< 0,01
SB (cmol _c dm ⁻³)	ESF	0,18	9,80	1,03	-	0,82 F	0,74	0,46	< 0,01
CTC (cmol _c dm ⁻³)	ESF	0,23	24,50	1,33	-	0,82 F	0,99	0,66	< 0,01
V (%)	EPP	1,00	-	1,00	-	-	-	-	-
Profundidade de 5 a 15 cm									
pH em CaCl ₂	EPP	1,00	-	1,00	-	-	-	-	-
MO (g dm ⁻³)	ESF	0,52	32,00	1,20	-	0,57 M	0,56	0,39	< 0,01
P (mg dm ⁻³)	ESF	0,39	16,60	1,09	-	0,65 M	0,91	0,41	< 0,01
K (mg dm ⁻³)	ESF	0,11	10,40	1,14	-	0,90 F	0,99	0,48	< 0,01
Ca (cmol _c dm ⁻³)	LIN	0,70	-	1,10	0,01	0,33 M	0,73	-	-
Mg (cmol _c dm ⁻³)	EPP	1,00	-	1,00	-	-	-	-	-
Al (cmol _c dm ⁻³)	LIN	0,60	-	-	0,01	-	-	-	-
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	EPP	1,00	-	-	-	-	-	-	-
SB (cmol _c dm ⁻³)	LIN	0,74	-	-	0,01	0,31 M	0,61	-	-
CTC (cmol _c dm ⁻³)	ESF	0,40	21,00	1,11	-	0,64 M	0,85	0,41	< 0,01
V (%)	EPP	1,00	-	1,00	-	-	-	-	-

EPP: Efeito pepita puro; ESF: Esférico; LIN: Linear com patamar; EXP: Exponencial; Co: Efeito pepita; a (m): Alcance; Co+C₁: Patamar; B: Inclinação da reta; IDE: Índice de dependência espacial (F: forte; M: moderada; Fr: fraco); R²: Coeficiente de determinação do ajuste; R-VC: Coeficiente de determinação da validação cruzada; e Sig: Nível de significância.

O modelo linear sem patamar encontrado para alguns atributos mostra dependência espacial ou tendência dentro de toda área experimental. Este modelo pode indicar a presença de um fenômeno com capacidade infinita de dispersão ou que o tamanho do campo amostrado não foi suficiente para exibir a estacionaridade dos dados (VIEIRA, 2000). A remoção de tendência pelos métodos da mediana e de equações de regressão polinomial de grau dois não produziram efeitos significativos

nos modelos de semivariograma desses atributos. Nesses casos, optou-se pela não utilização da modelagem dos resíduos.

Tabela 11 - Parâmetros de ajustes dos semivariogramas escalonados para os atributos químicos no plantio direto (PD)

Atributos	Parâmetros dos Semivariogramas – Plantio Direto								
	Modelos	Co	a (m)	Co+C ₁	B	IDE	R ²	R-VC	Sig
Profundidade de 0 a 5 cm									
pH em CaCl ₂	EPP	1,00	-	1,00	-	-	-	-	-
MO (g dm ⁻³)	EPP	1,00	-	1,00	-	-	-	-	-
P (mg dm ⁻³)	LIN	0,51	-	1,56	0,05	0,77F	0,91	-	-
K (mg dm ⁻³)	EPP	1,00	-	1,00	-	-	-	-	-
Ca (cmol _c dm ⁻³)	EPP	1,00	-	1,00	-	-	-	-	-
Mg (cmol _c dm ⁻³)	LIN	0,75	-	1,12	0,01	0,33 M	0,33	-	-
Al (cmol _c dm ⁻³)	EPP	1,00	-	1,00	-	-	-	-	-
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	LIN	0,75	-	1,21	0,02	0,40 M	0,33	0,46	-
SB (cmol _c dm ⁻³)	EPP	1,00	-	1,00	-	-	-	-	-
CTC (cmol _c dm ⁻³)	ESF	0,59	24,50	1,19	-	0,51 M	0,54	0,40	< 0,01
V (%)	EPP	1,00	-	1,00	-	-	-	-	-
Profundidade de 5 a 15 cm									
pH em CaCl ₂	EPP	1,00	-	1,00	-	-	-	-	-
MO (g dm ⁻³)	EPP	1,00	-	1,00	-	-	-	-	-
P (mg dm ⁻³)	EPP	1,00	-	1,00	-	-	-	-	-
K (mg dm ⁻³)	EPP	1,00	-	1,00	-	-	-	-	-
Ca (cmol _c dm ⁻³)	EPP	1,00	-	1,00	-	-	-	-	-
Mg (cmol _c dm ⁻³)	EPP	1,00	-	1,00	-	-	-	-	-
Al (cmol _c dm ⁻³)	EPP	1,00	-	1,00	0,01	-	-	-	-
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	EPP	1,00	-	1,00	-	-	-	-	-
SB (cmol _c dm ⁻³)	EPP	1,00	-	1,00	-	-	-	-	-
CTC (cmol _c dm ⁻³)	LIN	0,81	-	1,14	0,01	0,36 M	0,45	-	-
V (%)	EPP	1,00	-	1,00	-	-	-	-	-

EPP: Efeito pepita puro; ESF: Esférico; LIN: Linear com patamar; Co: Efeito pepita; a (m): Alcance; Co+C₁: Patamar; B: Inclinação da reta; IDE: Índice de dependência espacial (F: forte; M: moderado; Fr: fraco); R²: Coeficiente de determinação do ajuste; R-VC: Coeficiente de determinação da validação cruzada; e Sig: Nível de significância.

O alcance, para os modelos de semivariogramas ajustados, varia nos dois sistemas de manejo para os atributos químicos e físicos nas diferentes profundidades estudadas, mostrando assim, variação de escala conforme o atributo. Isto pode ser visto nos semivariogramas escalonados ajustados dos atributos que se encontram nas Figuras de 13 a 17.

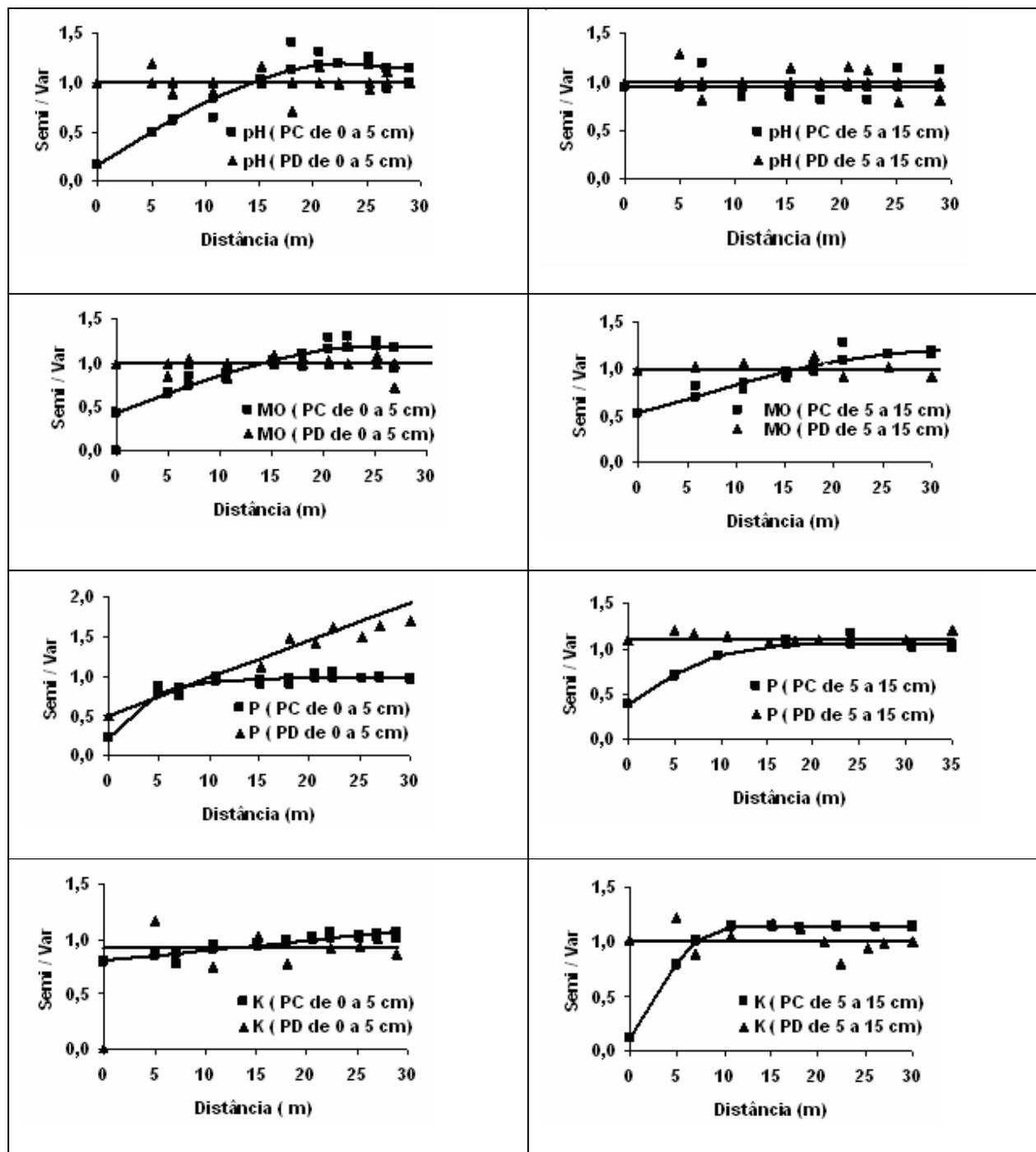


Figura 13 - Semivariogramas escalonados dos atributos químicos pH, MO, P e K no preparo convencional (PC) e plantio direto (PD) para as profundidades de 0 a 5 cm e 5 a 15 cm do solo.

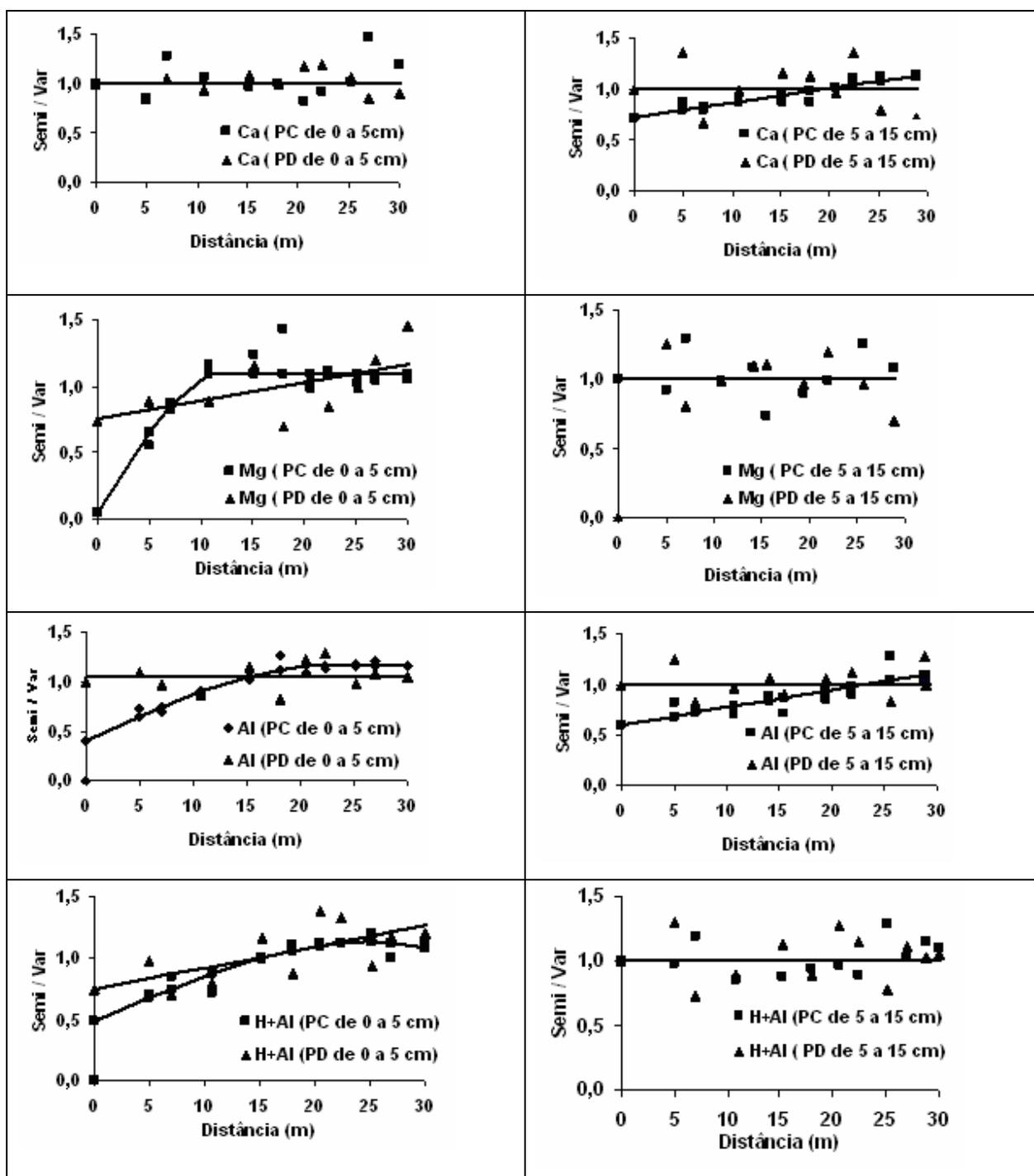


Figura 14 - Semivariogramas escalonados dos atributos químicos Ca, Mg, Al e H+Al no preparo convencional (PC) e plantio direto (PD) para as profundidades de 0 a 5 cm e 5 a 15 cm do solo.

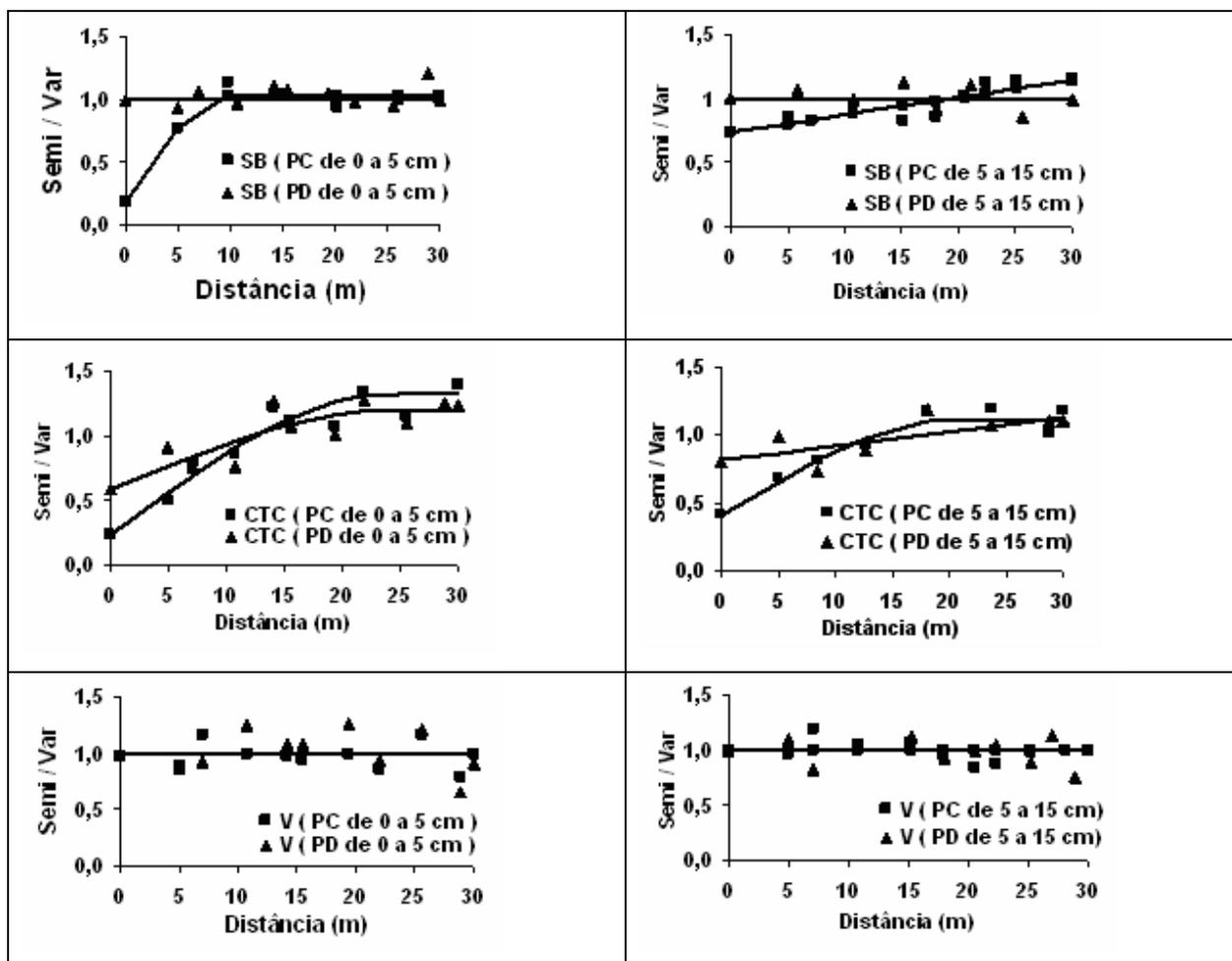


Figura 15 - Semivariogramas escalonados dos atributos químicos SB, CTC e V no preparo convencional (PC) e plantio direto (PD) para as profundidades de 0 a 5 cm e 5 a 15 cm do solo.

Pela Tabela 12, no PC, pode-se observar que o semivariograma escalonado experimental dos atributos físicos Ds, MiP e Pt, na profundidade de 0 a 10 cm, ajustam-se ao modelo esférico, bem como a Ds na profundidade de 20 a 40 cm. A MaP e a Pt, na profundidade de 10 a 20 cm, ajustam-se ao modelo linear sem patamar, bem como a Pt na profundidade de 20 a 40 cm. Os demais, incluindo a RP, apresentam falta de dependência espacial, ajustando-se ao modelo efeito pepita puro.

Tabela 12 - Parâmetros de ajustes dos semivariogramas escalonados para os atributos físicos no preparo convencional (PC)

Atributos	Parâmetros dos Semivariogramas - Preparo Convencional								
	Modelos	Co	a (m)	Co+C ₁	B	IDE	R ²	R-VC	Sig
Profundidade de 0 a 10 cm									
Ds (kg dm ⁻³)	ESF	0,29	11,12	1,07	-	0,73 M	0,77	0,29	< 0,05
MiP (%)	ESF	0,18	9,50	1,05	-	0,83 F	0,47	0,24	> 0,05
MaP (%)	EPP	0,95	-	0,95	-	-	-	-	-
Pt (%)	ESF	0,30	10,90	1,04	-	0,71 M	0,92	0,36	< 0,05
Profundidade de 10 a 20 cm									
Ds (kg dm ⁻³)	EPP	1,00	-	1,00	-	-	-	-	-
MiP (%)	EPP	1,10	-	1,10	-	-	-	-	-
MaP (%)	LIN	0,79	-	1,34	0,01	0,60 M	0,38	-	-
Pt (%)	LIN	0,79	-	1,11	0,01	0,30 M	0,45	-	-
Profundidade de 20 a 40 cm									
Ds (kg dm ⁻³)	ESF	0,21	16,50	1,08	-	0,81 F	0,80	0,35	< 0,05
MiP (%)	EPP	1,09	-	1,09	-	-	-	-	-
MaP (%)	EPP	1,00	-	-	-	-	-	-	-
Pt (%)	LIN	0,77	-	1,11	0,01	0,31 M	0,38	-	-
Profundidade de 0 a 20 cm									
RP (MPa)	EPP	1,00	-	1,00	-	-	-	-	-
U (g g ⁻¹)	LIN	0,45	-	1,43	0,04	0,68 M	0,71	-	-
Profundidade de 20 a 40 cm									
RP (MPa)	EPP	1,00	-	1,00	-	-	-	-	-
U (g g ⁻¹)	LIN	0,67	-	1,11	0,02	0,40 M	-	-	-

EPP: Efeito pepita puro; ESF: Esférico; LIN: Linear com patamar; Co: Efeito pepita; a (m): Alcance; Co+C₁: Patamar; B: Inclinação da reta; IDE: Índice de dependência espacial (F: forte; M: moderada; Fr: fraco); R²: Coeficiente de determinação do ajuste; R-VC: Coeficiente de determinação da validação cruzada; Sig: Nível de significância; Ds: Densidade do solo; MiP: Microporosidade; MaP: Macroporosidade; Pt: Porosidade total; RP: Resistência mecânica do solo à penetração; e U: Umidade do solo.

Na profundidade de 0 a 10 cm, o semivariograma escalonado experimental da Ds apresenta maior alcance no PD do que no PC e com o mesmo ajuste ao modelo esférico (Tabela 13). O maior alcance indica maior continuidade desse atributo, na área de plantio direto, pelo não revolvimento do solo por longo tempo. A malha de amostragem 5 x 5 m, para o solo mobilizado, possibilitou determinar um alcance de 11,12 m para Ds, mostrando menor descontinuidade, ou seja, se a malha fosse de 10 x 10 m, provavelmente, encontraríamos o efeito pepita puro e falta de dependência espacial, e nesse caso, as amostras seriam independentes. Ainda na profundidade de 0 a 10 cm no PC, podemos observar que a Ds, MiP e Pt apresentam alcances bem próximos, indicando o mesmo padrão espacial.

No PD, a MaP de 0 a 10 cm, a Ds de 10 a 20 cm, a Pt de 20 a 40 cm, a RP de 0 a 20 cm e de 20 a 40 cm ajustam-se ao modelo exponencial, enquanto que a Pt de 0 a 10 cm ao modelo linear sem patamar e a U de 0 a 20 cm ao modelo esférico (Tabela 13). Os demais atributos apresentam falta de dependência espacial com o modelo efeito pepita puro. Esse comportamento dos atributos físicos de apresentarem independência entre os pontos amostrados foi também detectado por Guimarães (2000) em uma malha de 10 x 10 m, caracterizando amostras insuficientemente espaçadas, com isso, necessitando de maior adensamento entre as amostras.

Tabela 13 - Parâmetros de ajustes dos semivariogramas escalonados para os atributos físicos no plantio direto (PD)

Atributos	Parâmetros dos Semivariogramas – Plantio Direto								
	Modelos	Co	a (m)	Co+C ₁	B	IDE	R ²	R-VC	Sig
Profundidade de 0 a 10 cm									
Ds (kg dm ⁻³)	ESF	0,49	20,80	1,09	-	0,56 M	0,55	0,52	< 0,01
MiP (%)	EPP	0,95	-	0,95	-	-	-	-	-
MaP (%)	EXP	0,25	18,50	1,11	-	0,78 F	0,50	0,36	< 0,05
Pt (%)	LIN	0,48	-	1,50	0,04	0,68 M	0,69	-	-
Profundidade de 10 a 20 cm									
Ds (kg dm ⁻³)	EXP	0,24	15,90	1,09	-	0,78 F	0,60	0,35	< 0,05
MiP (%)	EPP	0,98	-	0,98	-	-	-	-	-
MaP (%)	EPP	1,00	-	1,00	-	-	-	-	-
Pt (%)	EPP	0,98	-	0,98	-	-	-	-	-
Profundidade de 20 a 40 cm									
Ds (kg dm ⁻³)	EPP	0,90	-	0,90	-	-	-	-	-
MiP (%)	EPP	1,30	-	1,30	-	-	-	-	-
MaP (%)	EPP	1,00	-	1,00	-	-	-	-	-
Pt (%)	EXP	0,29	14,40	1,11	-	0,74 M	0,61	0,37	< 0,05
Profundidade de 0 a 20 cm									
RP (MPa)	EXP	0,23	27,30	1,18	-	0,76 F	0,85	0,57	< 0,01
U (g g ⁻¹)	ESF	0,32	17,30	1,03	-	0,70 M	0,85	0,50	< 0,01
Profundidade de 20 a 40 cm									
RP (MPa)	EXP	0,21	26,50	1,20	-	0,82 F	0,65	0,57	< 0,01
U (g g ⁻¹)	EPP	1,00	-	1,00	-	-	-	-	-

EPP: Efeito pepita puro; ESF: Esférico; LIN: Linear com patamar; EXP: Exponencial; Co: Efeito pepita; a (m): Alcance; Co+C₁: Patamar; B: Inclinação da reta; IDE: Índice de dependência espacial (F: forte; M: moderada; Fr: fraco); R²: Coeficiente de determinação do ajuste; R-VC: Coeficiente de determinação da validação cruzada; Sig: Nível de significância; Ds: Densidade do solo; MiP: Microporosidade; MaP: Macroporosidade; Pt: Porosidade total; RP: Resistência mecânica do solo à penetração; e U: Umidade do solo.

A RP, no PD, apresenta o mesmo padrão de dependência espacial, nas duas profundidades avaliadas, com o ajuste dos dados experimentais ao modelo exponencial

e com valores próximos para o efeito pepita e alcance. Mercante et al. (2003) também ajustaram os parâmetros dos semivariogramas escalonados para esse atributo ao modelo exponencial em áreas com e sem as técnicas de agricultura de precisão.

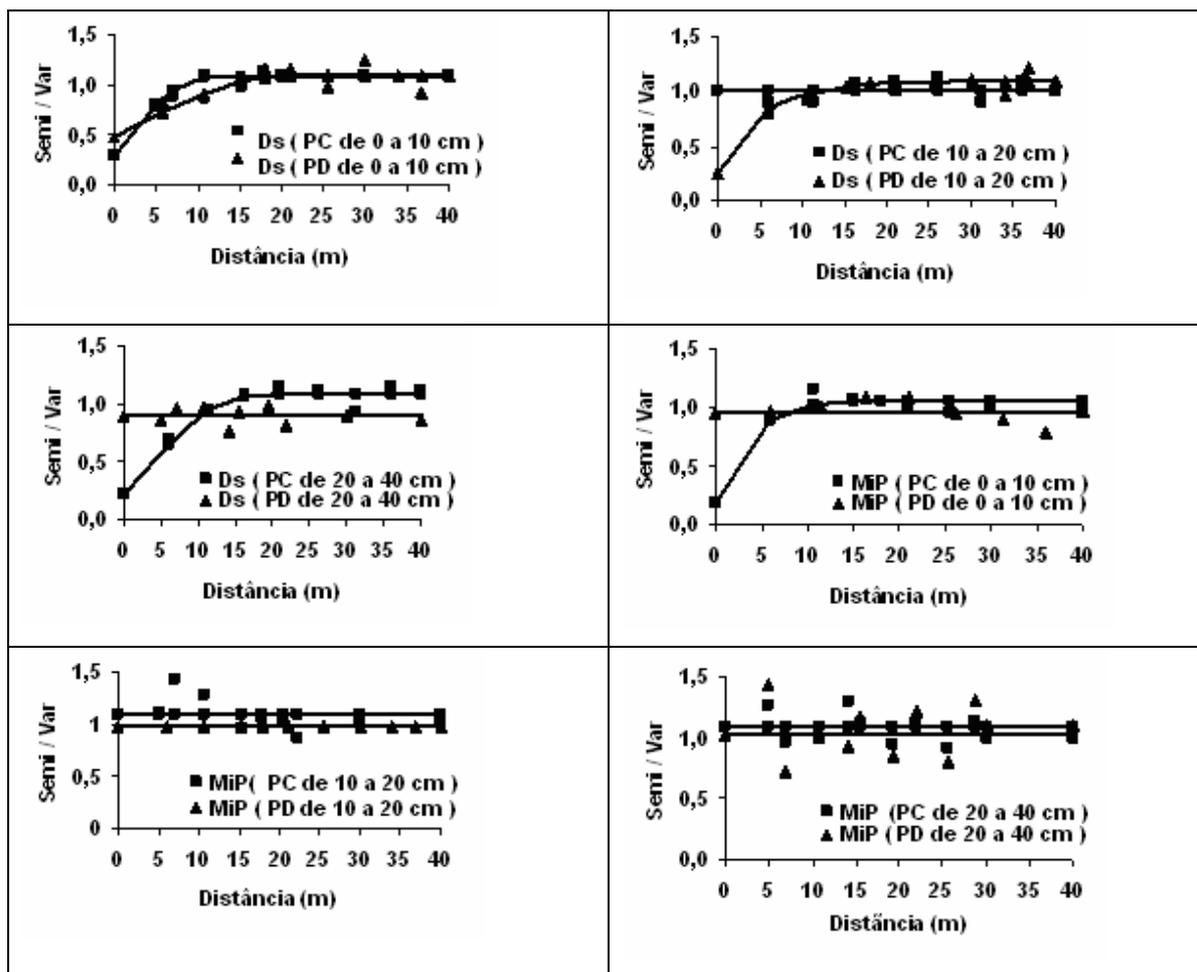


Figura 16 - Semivariogramas escalonados dos atributos físicos Ds e MiP no de preparo convencional (PC) e plantio direto (PD) para as profundidades de 0 a 10 cm, 10 a 20 cm e 20 a 40 cm do solo.

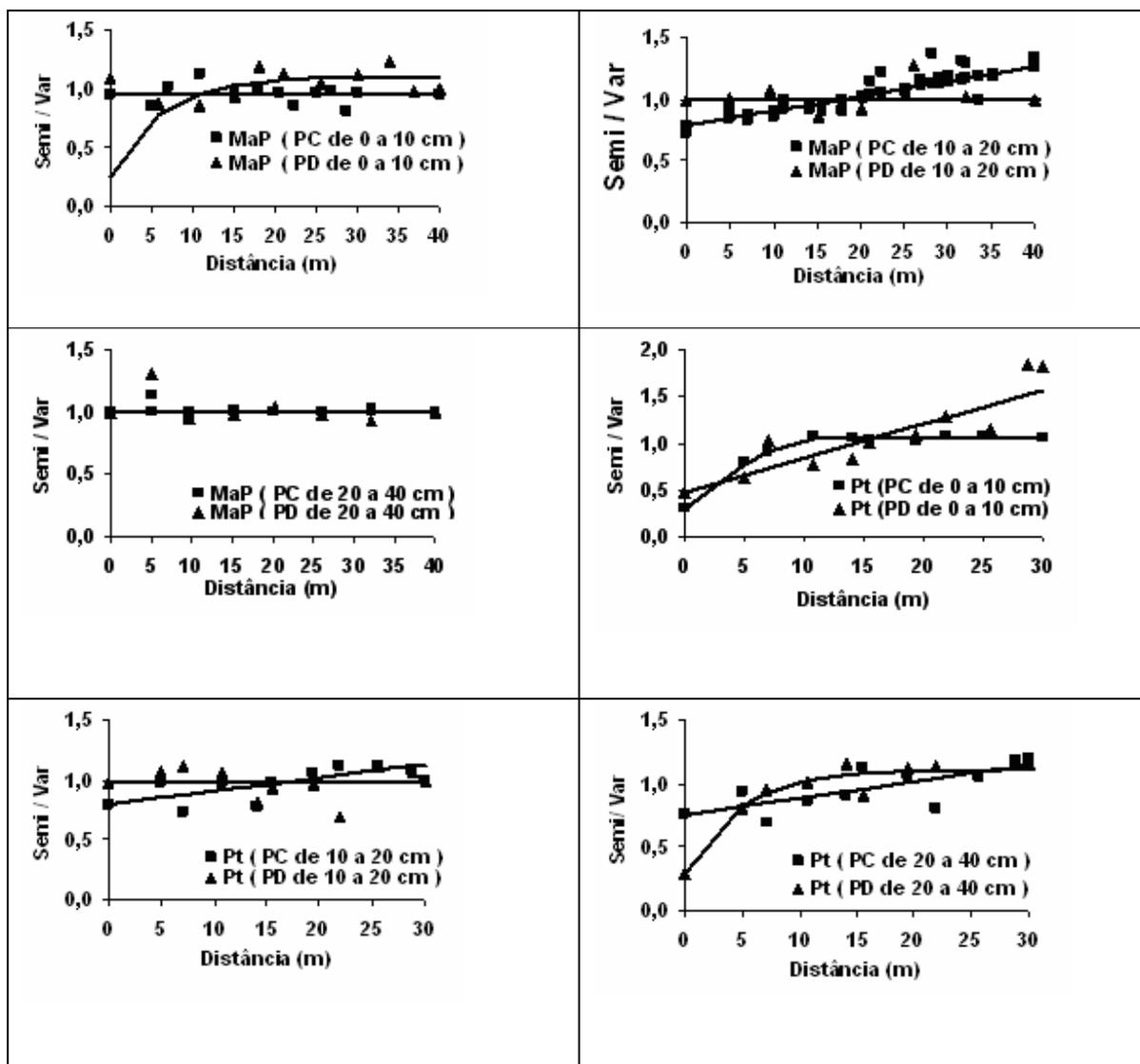


Figura 17 - Semivariogramas escalonados dos atributos físicos MaP e Pt no preparo convencional (PC) e plantio direto (PD) para as profundidades de 0 a 10 cm, 10 a 20 cm e 20 a 40 cm do solo.

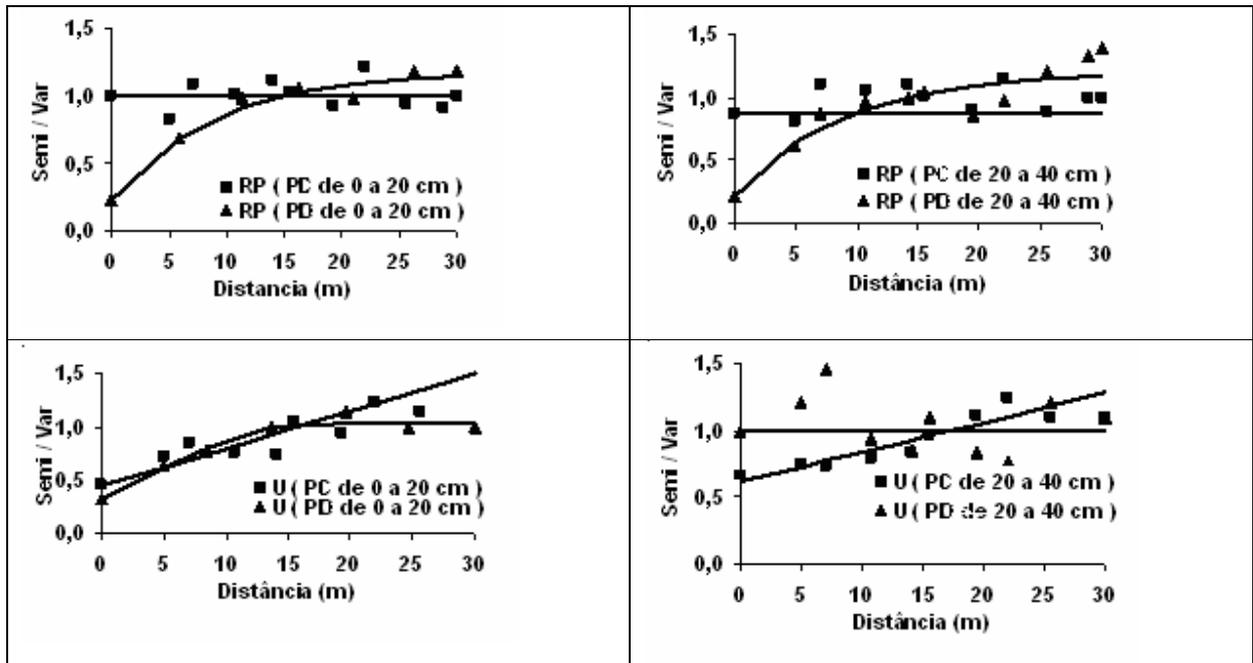


Figura 18 - Semivariogramas escalonados dos atributos físicos RP e U no preparo convencional (PC) e plantio direto (PD) para as profundidades de 0 a 20 cm e 20 a 40 cm do solo.

A variabilidade espacial dos atributos físicos e químicos do solo é imposta por processos que diferem espacialmente em escala e ao longo do tempo, sendo que uns dependem do manejo e uso do solo e outros dependem de fenômenos naturais relacionados à estrutura e textura do solo (CASTRIGNANO et al., 2000). No presente trabalho, a variação do alcance de dependência espacial dos atributos avaliados nos dois sistemas é em função do tempo, intensidade de uso, calagem, adubação, textura do solo e sistemas de manejos adotados.

O índice de dependência espacial (IDE) está relacionado com o efeito pepita (C_0), que indica uma descontinuidade do semivariograma na origem. O IDE, que mede a variabilidade com dependência espacial para os modelos de semivariogramas aceitos (ajustados), apresenta para os atributos químicos nas duas profundidades e físicos nas três profundidades estudadas, no PC e PD: sete atributos químicos e seis atributos físicos com valores de IDE entre 0,77 a 0,96; doze atributos químicos e onze atributos físicos com valores de IDE entre 0,30 e 0,73; um atributo químico (K) no PC com IDE de 0,24; e vinte três atributos químicos e quinze atributos físicos que não apresentam

dependência (Tabelas 10, 11, 12 e 13). Quanto maior for o IDE para determinado atributo, melhor é a estimativa pelo método da krigagem.

Conforme definido por Azevedo (2004), com relação aos valores de R^2 dos semivariogramas no PC, nos atributos químicos e físicos nas profundidades avaliadas, cinco atributos apresentam valores iguais ou inferiores a 0,50, dez atributos exibem valores entre 0,50 e 0,75 e oito atributos com valores acima de 0,75. No solo sob PD, para os atributos químicos e físicos avaliados nas profundidades, três atributos apresentam R^2 abaixo de 0,50, sete com valores entre 0,50 a 0,75 e três atributos com valores acima de 0,75. Segundo Azevedo (2004), tais resultados mostram, em geral, ajustes dos semivariogramas que possibilitam a obtenção dos mapas da distribuição espacial dos atributos de forma confiável.

Com relação à validação cruzada, os coeficientes de correlação entre os valores medidos e os estimados pelos modelos teóricos de semivariogramas são baixos, porém todos apresentam significância em nível de 5% de probabilidade exceto a MiP na profundidade de 0 a 10 cm no PC (Tabela 12).

A partir dos modelos aceitos (ajustados), realizou-se a krigagem ordinária por pontos para a obtenção dos mapas de cada atributo que apresenta dependência espacial, os quais se encontram nas Figuras de 19 a 26. Nos mapas, percebe-se a tendência com os eixos x e/ou y para vários casos, além de poder localizar sítios específicos de maiores ou menores valores dos atributos estudados. Nesse sentido, segundo Azevedo (2004), os mapas de variabilidade espacial permitem localizar as áreas com problemas e testar a eficiência de práticas utilizadas para solucioná-los, indicando que podem eficientemente ajudar na identificação e estabelecimento de zonas de manejo de áreas agrícolas, que possibilitem a adoção de tratamentos diferenciados de acordo com as necessidades específicas do solo.

A partir dos mapas foi possível localizar geograficamente as áreas mais problemáticas, o que não ocorre com os procedimentos clássicos, quando se utiliza a média do conjunto de dados de cada atributo em análise. Esse fato está de acordo com Castrignano et al. (2000) e Azevedo (2004), que afirmam que a estatística clássica não pode separar as diferentes fontes de variação espacial que estariam influenciando os atributos do solo.

Segundo Lima & Silans (1999), em áreas aparentemente homogêneas, a variabilidade espacial pode ser considerável e a análise estatística clássica somente permite caracterizar esta variabilidade. Por outro lado, a geoestatística permite detectar a existência de uma estrutura ou de organização na distribuição espacial dos parâmetros e a partir daí, com a krigagem, mapear e identificar no campo os locais e suas respectivas representações de valores. Nesse sentido, a obtenção dos mapas dos atributos do solo em PD e PC são de grande importância, pois permite detalhar as alterações ocorridas entre os manejos.

O comportamento de cada atributo químico no solo que apresenta variabilidade espacial no PC, de 0 a 5 cm de profundidade, é observado nas Figuras de 19 a 23.

Na Figura 19, pode-se verificar que nas regiões em que o pH apresenta valores mais altos são coincidentes com a região de maiores teores de fósforo (P) no solo. Segundo Quaggio (2000), com o aumento do pH a disponibilidade de P na solução do solo é aumentada em função da calagem, o que é observado neste trabalho, em solo de cerrado na camada de 0 a 5 cm de profundidade. Isso pode ter ocorrido devido ao solo ter sido revolvido, homogeneizando, assim, os nutrientes no seu perfil. Observa-se que na faixa de maior pH (entre 4,9 a 5,0) há uma redução dos teores de Al e H+Al. Esse fato está de acordo com Quaggio (2000) que afirma que nas regiões onde há maior valor de pH ocorre menores teores de Al e H+Al na solução do solo.

No mapa da MO, a região que apresenta maiores teores, entre 38,9 a 40,1 g dm^{-3} , é a faixa que coincide com os maiores valores de pH, o que indica que em condições que favorecem a elevação do pH, favorecem o desenvolvimento das plantas e, conseqüentemente, a produção de resíduos culturais que promoverão o aumento no teor de MO, apesar dos valores de pH não se encontrarem muito elevados. No caso do Mg os maiores teores são observados nas regiões de menores valores de pH, sendo que em boa parte da área os teores encontram-se entre 0,73 a 0,82 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$. O comportamento do Mg pode estar relacionado ao calcário calcítico utilizado, que promove aumento pronunciado nos teores de Ca em detrimento dos de Mg. Já a saturação por bases (V) e o Ca não apresentam dependência espacial nesse sistema.

Áreas que apresentam diferenças visuais nos mapas que revelam manchas em regiões coincidentes de pH baixo, onde H+Al e Al são considerados altos, observa-se alta capacidade de troca de cátions (CTC) na faixa entre 7,99 a 8,47 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ (Figura 20), apresentando comportamento semelhante ao Mg. Segundo Quaggio (2000), onde a SB é alta ocorre também alto valor de pH, o que não foi observado neste trabalho. Isso pode ter ocorrido devido à baixa concentração de Mg (2,47%) no corretivo nesse sistema.

Comparando os mapas dos atributos químicos MO, P, K e CTC na profundidade de 5 a 15 cm, nas Figuras 21 e 22, observa-se que P e K, bem como MO e CTC se apresentam com tendência de concentração dos maiores valores na região direita da área.

Para o PD, o único atributo químico que apresenta dependência espacial e que foi interpolado pelo método da krigagem ordinária é a CTC, na profundidade de 0 a 5 cm (Figura 23), com valores altos entre 8,06 e 8,26 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$. Esse comportamento deve ter ocorrido pelos altos teores, na mesma região, de Ca, K e por teores menores de H+Al em comparação à maior profundidade no perfil do solo.

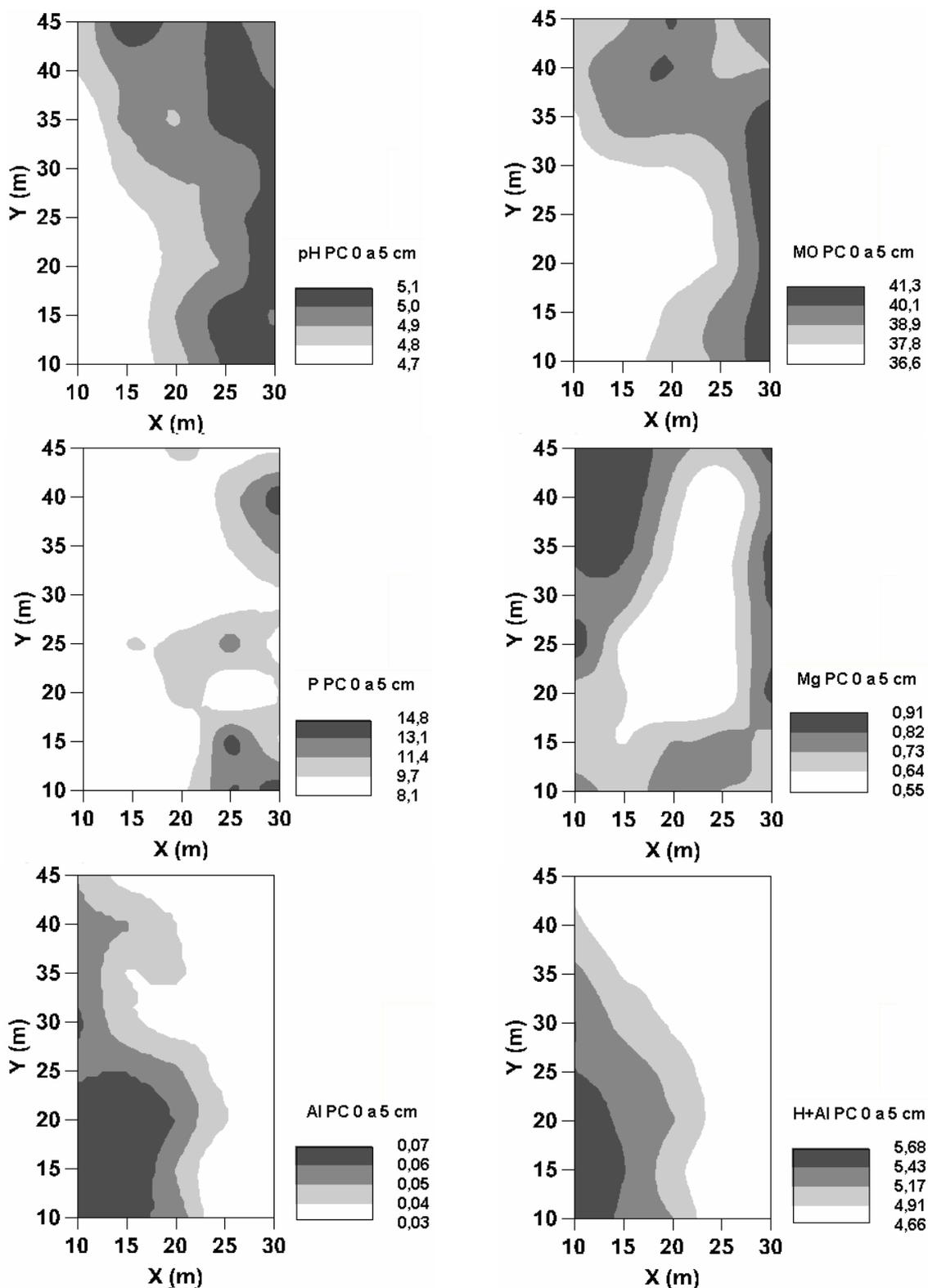


Figura 19 - Mapas da distribuição espacial dos atributos químicos pH (CaCl_2), MO (g dm^{-3}), P (mg dm^{-3}), Mg ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), Al ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e H+Al ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) na profundidade de 0 a 5 cm no preparo convencional (PC).

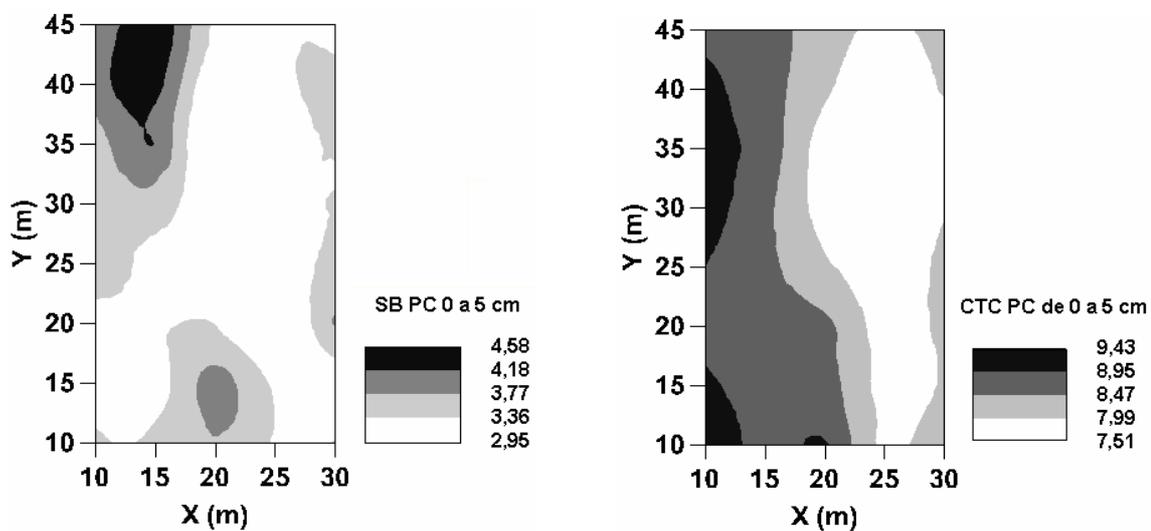


Figura 20 - Mapas da distribuição espacial dos atributos químicos SB ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) e CTC ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) na profundidade de 0 a 5 cm no preparo convencional (PC).

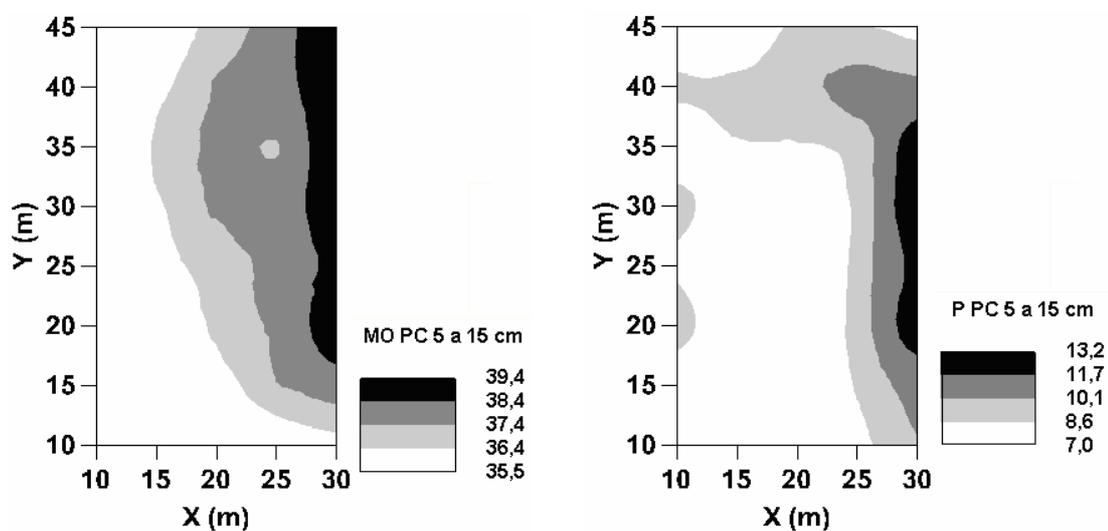


Figura 21 - Mapas da distribuição espacial dos atributos químicos MO (g dm^{-3}) e P (mg dm^{-3}) na profundidade de 5 a 15 cm no preparo convencional (PC).

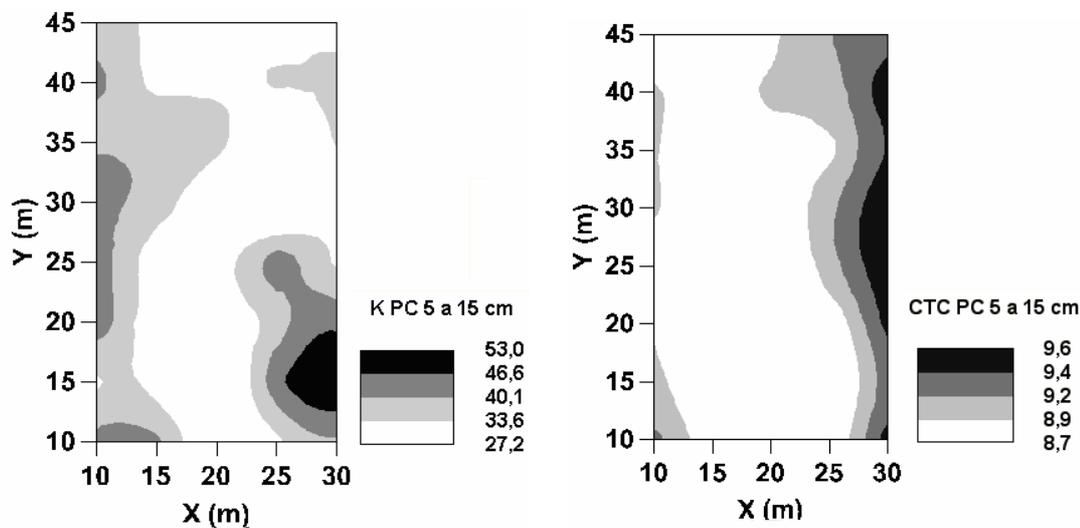


Figura 22 - Mapas da distribuição espacial dos atributos químicos K (mg dm^{-3}) e CTC ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) na profundidade de 5 a 15 cm no preparo convencional (PC).

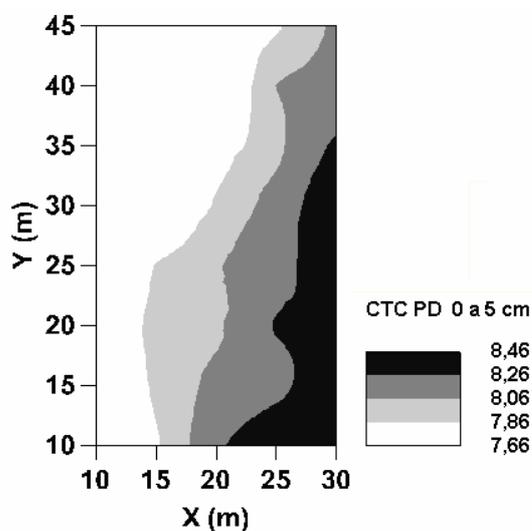


Figura 23 - Mapas da distribuição espacial do atributo químico CTC ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) na profundidade de 0 a 5 cm no plantio direto (PD).

Nas Figuras de 24 a 26, são observados os mapas de distribuição espacial dos atributos físicos nos dois sistemas. Verifica-se, na Figura 24, que as regiões de maiores valores de Ds na profundidade de 0 a 10 cm no PC correspondem também aos maiores valores de MiP. Em geral, tem se observado aumento da MiP associado a um

incremento da Ds. Não ocorre, entretanto, uma perfeita coincidência entre os mapas dos atributos físicos no PC, mas ocorre no PD com Ds e RP, já que ambos estão estreitamente relacionados. Os dados obtidos corroboram com Azevedo (2004), que afirma que, em solos argilosos a Pt está na faixa de 40% a 60%, o que é observado neste trabalho.

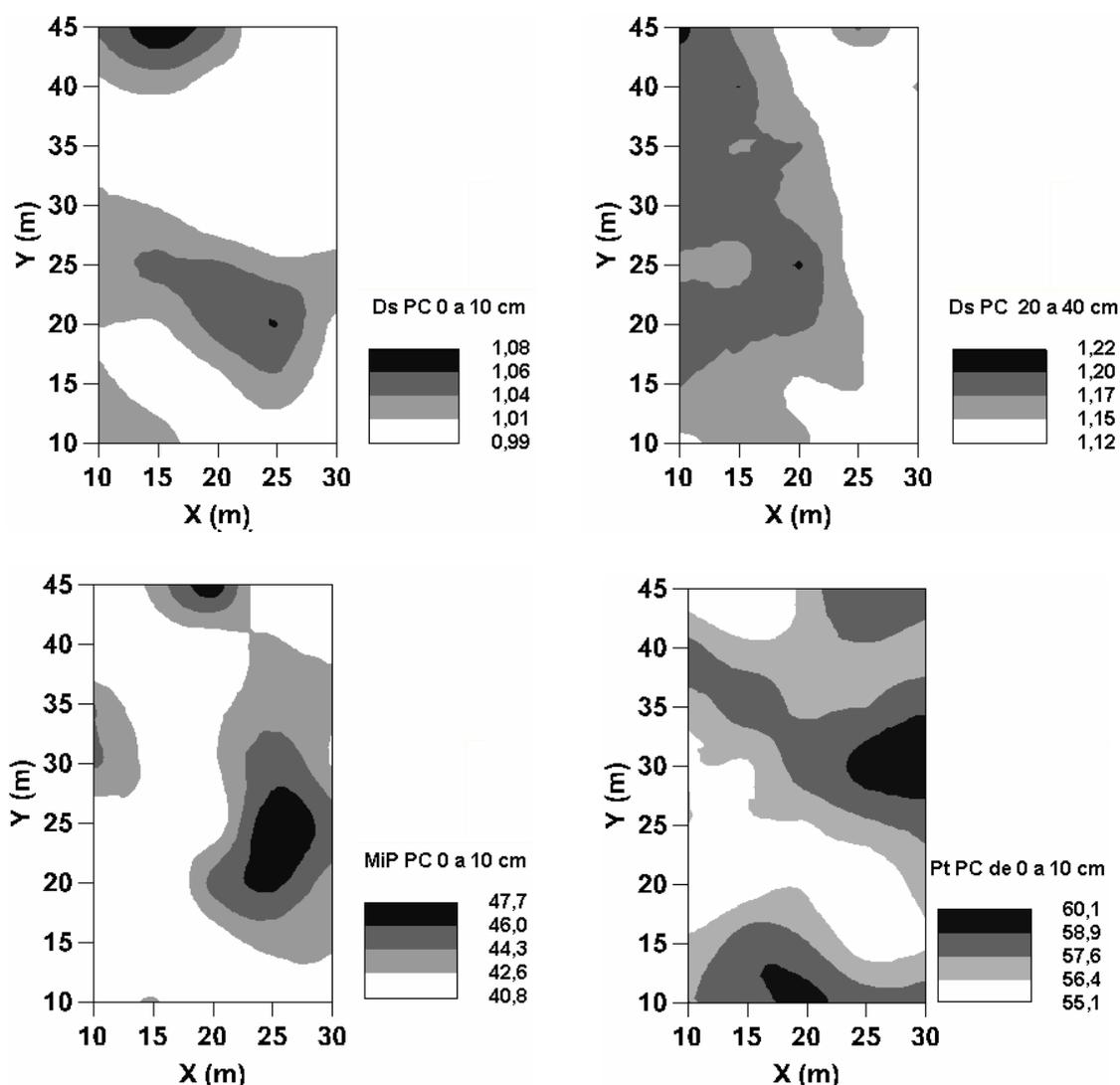


Figura 24 - Mapas da distribuição espacial dos atributos físicos Ds (kg dm^{-3}), MiP (%) e Pt (%) nas profundidade de 0 a 10 cm e 20 a 40 cm no preparo convencional (PC).

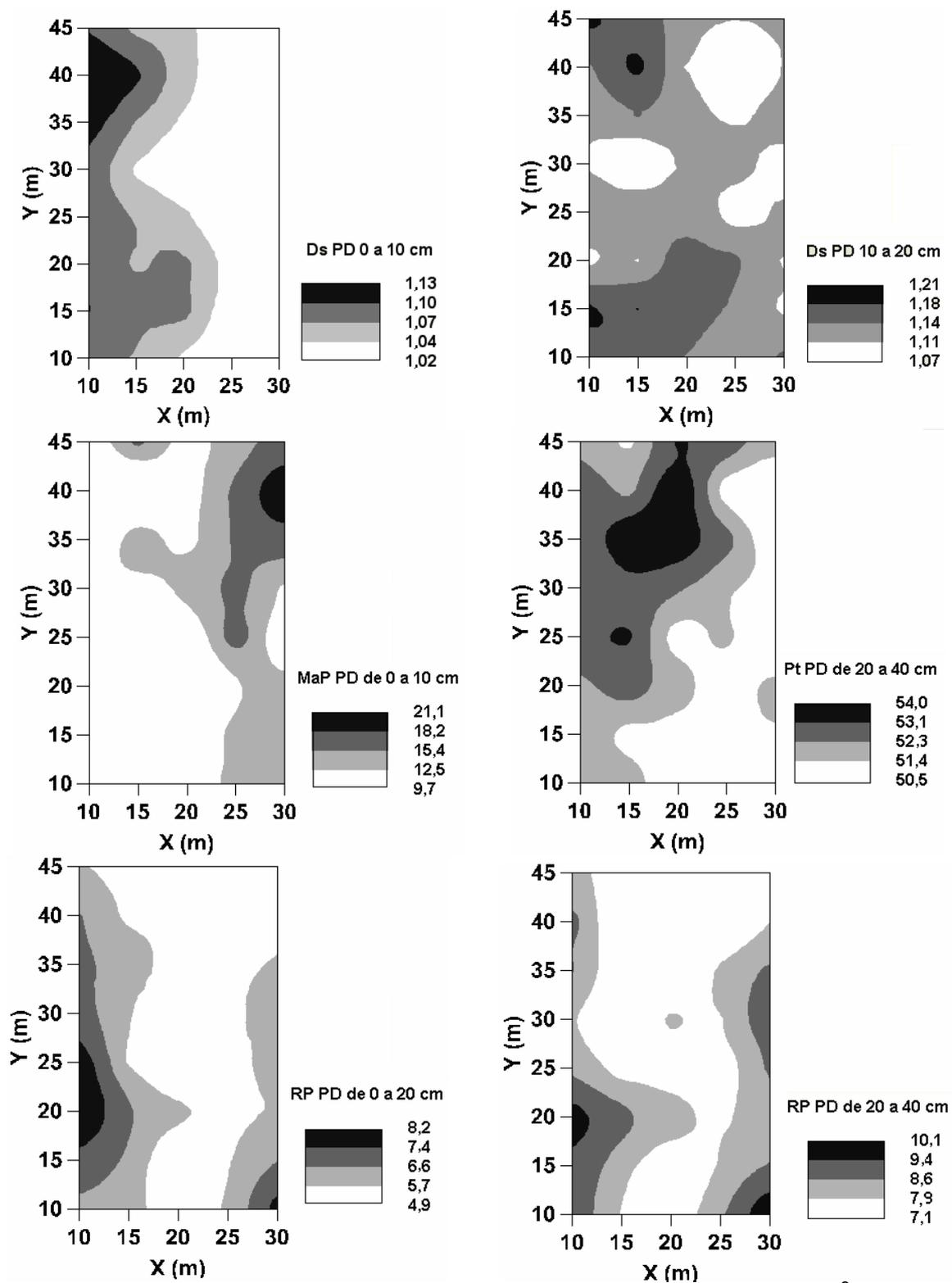


Figura 25 - Mapas da distribuição espacial dos atributos físicos Ds (kg dm^{-3}), MaP (%), Pt (%) e RP (MPa) em diferentes profundidades no plantio direto (PD).

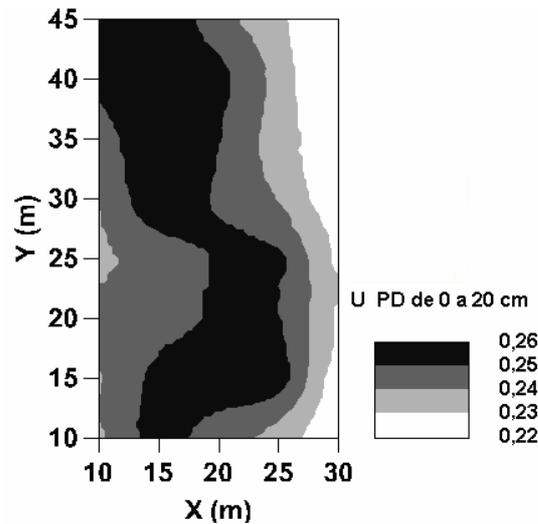


Figura 26 - Mapas da distribuição espacial do atributo físico U (g g^{-1}) na profundidade de 0 a 20 cm no plantio direto (PD).

4.3.2. Análise espacial da produtividade da soja

O estudo da produtividade da soja nas duas áreas sob diferentes manejos de solo é apresentado com os dados da análise descritiva na Tabela 14.

Tabela 14 - Estatística descritiva da produtividade da soja (t ha^{-1}) sob plantio direto (PD) e preparo convencional (PC) do solo

Manejo	\bar{X}	Md.	S	Valores		Coeficientes			Distr.
				Min.	Max	CV	C_s	C_k	
PC	4,20 a	4,17	0,37	3,20	5,04	8,89	-0,07	0,68	*
PD	3,38 b	3,33	0,50	2,45	4,42	14,91	0,07	-0,77	*

\bar{X} : média dos dados; Md: mediana; S: desvio padrão; CV: coeficiente de variação; C_k : coeficiente de curtose; C_s : coeficiente de assimetria; PC: preparo convencional do solo; PD: plantio direto; e *: Distribuição normal pelo teste Kolmogorov-Smirnov (K-S) ao nível de 5% de probabilidade.

Observa-se, na Tabela 14, que os valores da média e mediana, para a produtividade no PC e PD, estão próximas, mostrando distribuição simétrica, o que pode ser confirmado pelo coeficiente de assimetria (C_s) próximo de zero e pela normalidade dos dados pelo teste Kolmogorov-Smirnov (K-S). O coeficiente de variação é baixo (menor que 12%) para o PC e médio (12% a 60%) para o PD, segundo classificação de Warrick & Nielsen (1980).

Analisando a Tabela 14, observamos que a produtividade da soja na área sob PC proporciona maiores valores em relação a área sob PD. Em estudo realizado por Cardoso (1993), em Latossolo Vermelho Amarelo, foram encontrados maiores valores de produtividade de soja no PC em relação ao PD. Esse fato pode ser devido às melhores condições de fertilidade do solo sob o PC, favorecido pela aplicação e incorporação do calcário calcítico através da grade aradora, quatro meses antes da semeadura da soja, o que também proporcionou melhor arejamento e homogeneização do perfil do solo, disponibilizando maiores quantidades de cátions trocáveis, reduzindo a toxidez de Al e contribuindo com o aumento do pH e CTC. Cabe ressaltar que as análises de solo nas áreas foram realizadas após colheita.

A produtividade da soja nos dois sistemas de manejo não apresenta dependência espacial, mostrando aleatoriedade nos dados amostrados. O modelo ajustado ao semivariograma experimental foi o efeito pepita puro, indicando ausência de dependência espacial para distância maior que a menor distância de amostragem (Tabela 15).

Tabela 15 - Parâmetros de ajustes dos semivariogramas escalonados ajustados à produtividade da soja ($t\ ha^{-1}$) no plantio direto (PD) e preparo convencional (PC)

Manejo	Parâmetros de Ajustes dos Semivariogramas								
	Modelos	Co	a (m)	Co+C ₁	B	IDE	R ²	R-VC	Sig
Plantio Direto	EPP	1,00	-	1,00	-	-	-	-	-
Preparo Convencional	EPP	1,00	-	1,00	-	-	-	-	-

EPP: Efeito pepita puro; Co: Efeito pepita; a (m): Alcance; Co+C₁: Patamar; B: Inclinação da reta; IDE: Índice de dependência espacial; R²: coeficiente de determinação do ajuste; R-VC: coeficiente de determinação da validação cruzada; e Sig: nível de significância.

A análise descritiva espacial da produtividade da soja está na Figura 27, mostrando o agrupamento em quartis. Para esta variável foi utilizado o gráfico *postplot* construído pelo software Geocac (SILVA et al., 2003a). Nesse caso, verifica-se que as áreas de menores produtividades estão apresentadas em cores claras no gráfico, e podem ser associadas às áreas que apresentam impedimentos químicos e/ou físicos no solo. Observando esta distribuição e comparando com os mapas dos atributos pH, MO e Ds no PC, construídos por krigagem ordinária, verifica-se uma tendência de

agrupamento dos maiores valores de produtividade da soja nas regiões de maior pH e MO, bem como menor Ds. Logo, conclui-se que o manejo no PC é decisivo no aumento da produtividade da soja em relação ao PD, sugerindo assim práticas que contribuam com a melhoria nos atributos químicos e físicos do solo no PD, como a adição de maiores quantidades de matéria orgânica proveniente de resíduos culturais e rotação de culturas na área.

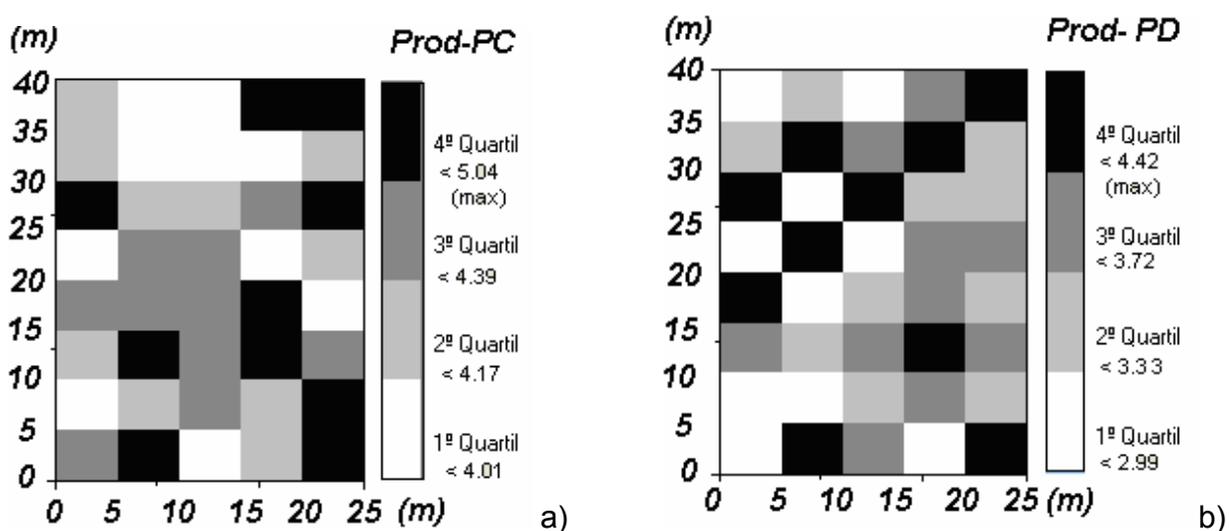


Figura 27 - *Postplot* da produtividade da soja: a) área sob preparo convencional, b) área sob plantio direto.

5. CONCLUSÕES

1. Na profundidade 0 a 5 cm, somente os atributos químicos matéria orgânica e acidez potencial não apresentam diferença significativa entre os manejos, o mesmo ocorrendo com o magnésio e a capacidade de troca de cátions na profundidade de 5 a 15 cm.
2. Para um mesmo manejo comparado entre as profundidades (0 a 5 cm e 5 a 15 cm), o fósforo, o magnésio e o alumínio no preparo convencional e o cálcio no plantio direto não apresentam diferença significativa.
3. Os atributos químicos potencial hidrogeniônico, matéria orgânica, alumínio, acidez potencial e capacidade de troca de cátions apresentam o mesmo padrão de dependência espacial no preparo convencional.
4. Todos os atributos químicos avaliados no plantio direto e preparo convencional do solo apresentam dependência espacial entre moderada e forte, exceto o potássio que apresenta baixa dependência espacial no preparo convencional na camada de 0 a 5 cm de profundidade.
5. Todos os atributos físicos apresentam diferença significativa entre manejos em uma mesma profundidade, exceto a densidade do solo e a porosidade total na profundidade de 20 a 40 cm.
6. No preparo convencional e plantio direto, na profundidade de 0 a 10 cm, os atributos macroporosidade e microporosidade apresentam ausência de dependência espacial.

7. Os atributos resistência do solo à penetração nas duas profundidades no preparo convencional e a umidade do solo na profundidade de 20 a 40 cm no plantio direto apresentam ausência de dependência espacial.
8. O uso do semivariograma escalonado permite verificar o mesmo padrão de dependência espacial para os atributos densidade do solo e porosidade total no preparo convencional, na profundidade de 0 a 10 cm, e para resistência do solo à penetração no plantio direto nas duas profundidades estudadas.
9. O manejo na área sob preparo convencional é decisivo no aumento da produtividade da soja em relação à área sob plantio direto. Entretanto, não foi observada dependência espacial para a produtividade da soja.
10. O uso de sistemas de informação geográfica associados a métodos geoestatísticos contribui com a tomada de decisão na implementação do manejo de solo, aumentando o potencial de utilização prática desses métodos.

6. REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, J. A.; REINERT, D. J.; FIORIN, J. E.; RUEDELL, J.; PETRERE, C.; FONTINELLI, F. Rotação de culturas e sistemas de manejo do solo: efeito sobre a forma da estrutura do solo ao final de sete anos. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v. 19, n.1, p. 115-119, 1995.

ALBUQUERQUE, J. A.; SANGOL, L.; ENDER, M. Efeitos da integração lavoura-pecuária nas propriedades físicas do solo e características da cultura do milho. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v. 25, n. 3, p. 717-723, 2001.

ALVARENGA, M. I. N.; SOUZA, J. A. **Atributos de solo e o impacto ambiental**. Lavras: ESAL/FAEAP, 1995. 140 p.

ALVARENGA, R. C.; CABEZAS, W. A. L.; CRUZ, J. C.; SANTANA, D. P. Plantas de cobertura de solo para sistema de plantio direto. **Informe Agropecuário**: Belo Horizonte, v. 22, n. 208, p. 25-36, 2001.

ALVAREZ V., V. H.; MELLO, J. W. V. de; DIAS, L. E. Acidez e calagem do solo In: CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM FERTILIDADE E MANEJO DO SOLO, 4., 1990, Viçosa. **Cursos...** Viçosa: ABEAS, 1990. 68 p.

AMADO, T. J. C.; BELLÉ, G. L.; DELLAMEA, R. B. C.; PES, L. Z.; FULBER, R.; PIZZUTI, L.; SHENATO, R. B.; LEMAINSKI, C. L. Projeto Aquáriu-Cotrijol: pólo de agricultura de precisão. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, n. 91, p. 39-47, jan/fev. 2006.

ANDREOLA, F.; COSTA, L. M.; OLSZEWSKI, N. Influência da cobertura vegetal de inverno e da adubação orgânica e, ou, mineral sobre as propriedades físicas de uma terra roxa estruturada. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v. 24, n. 4, p. 857-865, 2000.

ANGHINONI, I.; SALET, R. L. Variabilidade espacial de propriedades químicas do solo no sistema de plantio direto. In: CURSO SOBRE MANEJO DO SOLO NO SISTEMA DE PLANTIO DIRETO, 1995, Castro. **Anais...** Castro: Fundação ABC, 1995. p. 274-284.

ANGHINONI, I.; SALET, R. L. Amostragem do solo e as recomendações de adubação e calagem no sistema de plantio direto. In: NUERBERG, N. J. (Ed.). **Conceitos e fundamentos do sistema de plantio direto**. Lages: SBCS - Núcleo Regional Sul, 1998. p. 27-52.

ANJOS, J. T.; UBERTI, A. A. A.; VIZZOTTO, V. J.; LEITE, G. B.; KRIEGER, M. Propriedades físicas em solos sob diferentes sistemas de uso e manejo. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v. 18, n. 1, p. 139-145, 1994.

AZEVEDO, E. C. **Uso da geoestatística e de recursos de geoprocessamento no diagnóstico da degradação de um solo argiloso sob pastagem no estado de Mato Grosso**. Campinas – SP, 2004. 132 f. Tese (Doutorado) - Área de concentração: Água e Solo. Universidade Estadual de Campinas – Unicamp, Campinas, 2004.

BALASTREIRE, L. A. **O estado da arte da agricultura de precisão no Brasil**. Piracicaba: ESALQ/USP, 2000.

BATCHELOR, B.; WHIGHAM, K.; DEWITT, J. et al. **Precision agriculture: introduction to precision agriculture**. Iowa Cooperative Extension, 1997. 4 p. Disponível em: <http://www.extension.astate.edu/pages/precisionag/pres_ag.pdf>. Acesso em: 26 jul. 2006.

BENGOUGH, A. G.; MULLINS, C. E. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. **Journal of Soil Science**, v. 41, p. 341-358, 1990.

BERALDO, J. M. G. **Variabilidade espacial de atributos do solo e da produtividade de soja**. Jaboticabal - SP, 2004. 62 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Área de concentração: Produção Vegetal. Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2004.

BERTOL, I.; COGO, N. P.; LEVIEN, R. Erosão hídrica em diferentes preparos do solo logo após as colheitas de milho e trigo, na presença e na ausência dos resíduos culturais. **R. Bras. Ci. Solo**, Campinas, v. 21, n. 3, p. 409-418, 1997.

BHATTI, A. U. MULLA, D. J.; FRAZIER, B. E. Estimation of soil properties and wheat yields on complex eroded hills using geostatistics and thematic mapper images. **Ren. Sens. Envir.**, St Paul, v. 37, p. 181-191, 1991.

BORGES, E. N. **Efeito de doses de gesso + matéria seca de crotalária e de níveis de compactação em atributos físicos de um Latossolo Vermelho-Escuro**. Piracicaba – SP, 1995. 136 f. Tese (Doutorado). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.

BORGES, A. L.; KIEHL, J. C.; SOUZA, L. S. Alterações de propriedades físicas e atividade microbiana de um latossolo amarelo álico após o cultivo com frutíferas perenes e mandioca. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v. 23, n. 4, p. 1019-1025, 1999.

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 lowa soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 58, p. 1501-1511, 1994.

CAMPO, P. do. **Agricultura de precisão: inovações do campo**. Piracicaba, 2000. Disponível em: <http://www1.portaldocampo.com.br/inovacoes/agric_precisao.htm>. Acesso em: 25 jul. 2006.

CANALLI, L. B.; ROLOFF, G. Influencia do prepare e da conservação do solo na condição hídrica de um latossolo vermelho-escuro sob plantio direto. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v. 21, n.1, p. 1-6, 1997.

CANARACHE, A. Penetr: a generalized semi-empirical model estimating soil resistance to penetration. **Soil & Tillage Res.**, Amsterdam, v.16, p.51-70, 1990.

CANTARUTTI, R. B.; ALVAREZ V, V. H.; RIBEIRO, A. C. Amostragem do solo. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V, V. H. (Ed.). **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**, 5., Viçosa: CFSEMG, 1999. p. 13-20.

CAPELLI, N. L. **Agricultura de precisão: novas tecnologias para o processo produtivo**. UNICAMP, 1999. Disponível em: <<http://wwwbases.cnptia.embrapa.br/cria/gip/gipap/capelli.doc>> Acesso em: 26 jul. 2006.

CARDOSO, A. N. Manejo e conservação do solo na cultura da soja. In: ARANTES, N. E.; SOUZA, P. I. de M. de. **Cultura da soja nos cerrados**. Piracicaba: POTAFOS, 1993. p. 71-104.

CARVALHO, J. R. P. de; VIEIRA, S. R. **Avaliação e comparação de estimadores de krigagem para variáveis agrônomicas: uma proposta**. Campinas: EMBRAPA Informática Agropecuária, 2001. 21 p.

CARVALHO, J. R. P. de; SILVEIRA, P. M.; VIEIRA, S. R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. Brasília, **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v. 37, n. 8, p. 1151- 1159, 2002.

CASTRIGNANO, A.; GIUGLIARINI, L.; RISALIT, R. Study of spatial relationships among some soil physico-chemical of a field in central Italy using multivariate geostatistics. **Geoderma**, v. 97, n. 1-2, p. 39-60, 2000.

COELHO, A. M. Agricultura de precisão: Manejo da variabilidade espacial e temporal dos solos e das culturas. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v. 3, n. 2, p. 249-290, 2003.

COMISSÃO DE FERTILIZANTES DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS – CFSEMG. **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**, 5., In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V, V. H. (Ed.). Viçosa: 1999. 359 p.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Avaliação da safra agrícola 2004/2005 – Quinto levantamento**.

Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/download/safra/SojaSerieHist>>. Acesso em: 21 jun.2005.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Avaliação da safra agrícola 2005/2006 – Oitavo levantamento**.

Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/download/safra/SojaSerieHist>>. Acesso em: 19 jul.2006.

CORRÊA, L. A.; CRUZ, J. C. Plantio Direto. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 13, n. 147, p. 46-50, mar. 1987.

COSTA, J. A. **Cultura da soja**. Porto Alegre: Evangraf, 1996.

CRESSIE, N. A. **Statistics for spatial data**, New York: John Wiley & Sons, 1993. 928p.

CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO, I. A.; ALVARENGA, R. C.; SANTANA, D. P. Plantio direto e sustentabilidade do sistema agrícola. **Informe Agropecuário**: Belo Horizonte, v. 22, n. 208, p. 13-24, jan/fev, 2001.

DALLMEYER, A. U.; SCHLOSSER, J. F. Mecanización para la agricultura de precisión. In: BLU, R. O.; MOLINA, L. F. **Agricultura de precisión**: introducción al manejo sitio-específico. Chillán, Chile: INIA, c. 3, 1999. p. 75-104.

DA ROS, C. O.; SECCO, D.; FIORIN, J. E.; PETRERE, C.; CADORE, M. A.; PASSA, L. Manejo do solo a partir de campo nativo: efeito sobre a forma e estabilidade da estrutura ao final de cinco anos. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v. 21, n. 3, p. 241-247, 1997.

DAVIS, G.; CASADY, W.; MASSEY, R. **Precision agriculture**: an introduction. Water quality. University of Missouri – System, 1998. 8 p.

DERPSCH, R.; SIDIRAS, N.; ROTH, C. H. Results of studies made from 1977 to 1984 to control erosion by cover crops and no-tillage techniques in Paraná, Brazil. **Soil Till. Res.**, v. 8, p. 253-263, 1986.

DERPSCH, R. Historical review of no-tillage cultivation of crops. In: SEMINAR NO TILLAGE CULTIVATION OF SOYBEAN AND FUTURE RESEARCH NEEDS IN SOUTH AMERICA, 1., 1998, Foz do Iguaçu. **Proceedings...** Tóquio: JIRCAS, 1998. p. 1-18. (JIRCAS Working Report n. 13).

DIJKSTRA, F. **Porque utilizo o plantio direto**. São Paulo: BASF, 1984.

DOBERMANN, 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.

DOERGE, T. A. Management zone concepts: site-specific management guidelines. p. 4, 1999. Disponível em: <http://www.farmresearch.com/SSMG/ssmg_02/SSMG02.pdf> Acesso em: 26 jul. 2006.

ELTZ, F. L. P.; PEIXOTO, R. T. G.; JASTER, F. Efeitos de sistemas de preparo do solo nas propriedades físicas e químicas de um latossolo bruno álico. **R. Bras. Ci. Solo**, Campinas, v. 13, n. 2, p. 259-267, 1989.

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

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: EMBRAPA Serviço de Produção de Informação, Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 1999. 412 p.

EMBRAPA – Centro Nacional de Pesquisa de Soja. **Tecnologia de produção de soja. região central do Brasil, 2003. sistema de produção 1**, Londrina: EMBRAPA Soja, 2003. 199 p.

EMBRAPA – Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sustentabilidade da agricultura brasileira e o sistema de plantio direto**. Disponível em: <<http://www.cnpso.embrapa.br>>. Acesso em: 3 set.2005.

EMBRAPA – Monitoramento por Satélite. **Brasil em relevo**. Disponível em: <http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br/go/hth0/go46_24.htm>. Acesso em: 26 jul.2006.

FAPCEN - Fundação de Apoio a Pesquisa do Corredor e Exportação Norte. **Cultivares de soja 2002 regiões norte e nordeste**. Balsas - MA: EMBRAPA Soja, 2002. (Documentos, 179).

FREIRE, F. M.; VASCONCELOS, C. A.; FRANÇA, G. E. de. Manejo da fertilidade do solo em sistema de plantio direto. **Informe Agropecuário**: Belo Horizonte, v. 22, n. 208, p. 49-62, jan/fev, 2001.

GASSEN, D. N.; GASSEN, F. R. **Plantio direto: o caminho do futuro**. 2. ed. Passo Fundo: Aldeia Sul, 1996, 207 p.

GIMENEZ, L. M.; MOLIN, J. P. Mapeamento da produtividade. In: MACHADO, P. L. O. de A.; BERNARDI, A. C. de C.; SILVA, C. A. (Ed.). **Agricultura de precisão para o manejo da fertilidade do solo em sistema plantio direto**. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2004. p. 77-92.

GOOVAERTS, P. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives. **Geoderma**, Amsterdam, v. 89, n. 1, p. 1-45. 1999.

GRECO, C. R.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v. 29, n. 2, maio/abr. 2005.

GUERRA, P. A. G. **Produção mineral**, 1998. 145 p.

GUERRA, S. P. S.; LANÇAS, K. P.; MAZETTO, F. R. Utilização do GPS e do penetrômetro hidráulico eletrônico para localização de pontos e avaliação da compactação do solo. In: REUNIÃO CIENTÍFICA EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS DO LAGEADO, 7., 2000, Botucatu. **Resumos...** Botucatu: UNESP, 2000. p. 85.

GUIMARÃES, E. C. **Variabilidade espacial da umidade e da densidade do solo em um latossolo roxo**. 1993. 135 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Unicamp, Campinas, 1993.

GUIMARÃES, E. C. **Variabilidade espacial de atributos de um latossolo vermelho escuro textura argilosa na região do cerrado, submetido ao plantio direto e ao plantio convencional**. Campinas – SP, 2000. 92 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Área de concentração: Água e Solo. Universidade Estadual de Campinas, Unicamp, Campinas, 2000.

GUIMARÃES, E. C. **Geoestatística básica e aplicada**. Uberlândia, Universidade Federal de Uberlândia, 2004. 76 p.

HAN, S.; HUMMEL, J. W.; GOERING, C. E.; CAHN, M. D. Cell size selection for site-specific crop management. **Trans. ASAE**, St. Joseph, v. 37, n. 1, p. 19-26, 1994.

HENDERSON, C. W. L. Using a penetrometer to predict the effects of soil compaction on the growth and yield of wheat on uniform sandy soils. **Aust. J. Agric. Res.**, Melbourne, v. 40, p. 497-508, 1989.

HOAGLIN, D. C.; MOSTELLER, F.; TYKEY, J. W. **Análise exploratória de dados: técnicas robustas, um guia**. Lisboa: Ed. Salamandra, 1983. 446 p.

HOLTZ, G. P. **Dinâmica da decomposição da palha e da distribuição do carbono, nitrogênio e fósforo numa rotação de culturas sob plantio direto na região de carambei (PR)**. Curitiba – PR, 1995. 129 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Área de concentração: Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1995.

IGEAGRO – BENTEN – Benchmarking na agricultura: informativo soja. Disponível em: <<http://200.161.200.233/INFORMATIVO%20soja.pdf>>. Acesso em: 28 jul. 2006.

ISAAKS, H. E.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. 561p.

JAKOB, A. A. E. **Estudo da correlação entre mapas de variabilidade de propriedades do solo e mapas de produtividade para fins de agricultura de precisão**. Campinas – SP, 1999. 145 f. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas – Unicamp. Campinas, 1999.

JONES, J. N.; MOODY, J. E.; SHEAR, G. M. et al. The no-tillage system for corn (*Zea mays* (L.)). **Agronomy Journal**, v. 60, n. 1, p. 17-20, 1968.

KLEPKER, D.; ANGHINONI, I. Características físicas e químicas do solo afetadas por métodos de preparo e modos de adubação. **R. Bras. Ci. Solo**, Campinas, v. 19, n. 1, p. 395-401, 1995.

KLINK, C. A.; MACHADO, R. B. **A conservação do cerrado brasileiro**. Disponível em: <http://www.conservation.org.br/publicacoes/megadiversidade/20_Klink_Machado.pdf>. Acesso em: 1 maio.2006.

KLEIN, V.A., LIBARDI, P.L., SILVA, A.P. Resistência mecânica do solo à penetração sob diferentes condições de densidade e teor de água. In: **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.18, n.2, p.45-54, dez. 1998.

LANÇAS, K.P. **A compactação do solo agrícola**. Botucatu: UNESP, 1998. 22 p.

LANDERS, J. N. Situação do plantio direto. In: CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM PLANTIO DIRETO, 1., 2001. Brasília. **Curso...** Brasília: ABEAS, 2001. p. 2 -29.

LANDERS, J. N. **Fascículo de experiências de plantio direto no cerrado**. Goiânia: APDC, 1995. 216 p.

LANDIM, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos**. São Paulo: UNESP, 1998. 226 p.

LANGE, A.; MALAVOLTA, E. Algumas dúvidas sobre a amostragem de solo e a interpretação dos resultados em sistema de semeadura direta no cerrado. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v. 22, n. 92, p. 21-25, mar/abr. 2006.

LARK, R. M.; STAFFORD, J. V. Exploratory analysis of yield maps of combine crops. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 1., 1997, Warwick. **Proceedings...** Oxford: BIOS Scientific, 1997. p. 887-894.

LIMA, C. A. G.; SILANS, A. P. Variabilidade espacial da infiltração de água no solo. **Pesq. agropec. Bras.** Brasília, v. 34, n. 12, p. 2311-2320, 1999.

LIMA, G. J. E. de O. Amostragem de solos no sistema plantio direto. **Direto no Cerrado**: Brasília, v. 8, n. 35, p. 14, abr/maio. 2004.

LUCHIARI JUNIOR, A.; SILVA, A. de S.; BUSCHINELLI, C. C. de A.; HERMES, L. C.; CARVALHO, J. R. P.; SHANAHAN, J.; SCHEPERS, J. S. Agricultura de precisão e meio

ambiente. In: MACHADO, P. L. O. de A.; BERNARDI, A. C. de C.; SILVA, C. A. (Ed.). **Agricultura de precisão para o manejo da fertilidade do solo em sistema plantio direto**. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2004. p. 19-35.

MACHADO, P. L. O. de A.; BERNARDI, A. C. de C.; SILVA, C. A. **Agricultura de precisão para o manejo da fertilidade do solo em sistema plantio direto**. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2004a. 209 p.

MACHADO, P. L. O. de A.; BERNARDI, A. C. de C.; SILVA, C. A.; CARMO, C. A. F. de S. do.; MEIRELLES, M. S. P.; MANZATTO, C. V. Estudo de caso em agricultura de precisão: manejo de lavoura de soja na região de campos gerais, PR. In: MACHADO, P. L. O. de A.; BERNARDI, A. C. de C.; SILVA, C. A. (Ed.). **Agricultura de precisão para o manejo da fertilidade do solo em sistema plantio direto**. (Ed.). Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2004b. p. 93-113.

MACHADO, P. L. O. de A. **Plantio direto: situação atual e desafios**. EMBRAPA Solos. Disponível em: <<http://www.cnpso.embrapa.br/search/pesq/faqfert3/faqfert3/html>>. Acesso em: 3 set.2005.

MALAVOLTA, E. **ABC da análise de solos e folhas: amostragem, interpretação e sugestões de adubação**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1992. 124 p.

MANTOVANI, E. C. Compactação do solo. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 13, n. 147, p. 52-55, 1987.

MANTOVANI, E. C.; COELHO, A. M.; MATOSO, M. J. Agricultura de precisão. In: EMBRAPA. **Artigos...**

Disponível em: <http://www.embrapa.br/noticias/artigos/folder.2005-02-02.1550581232/ArtigoAgriculturaPrecisao/mostra_artigo>. Acesso em: 29 abr.2006.

MANZATTO, C. V.; BHERING, S. B.; SIMÕES, M. **Agricultura de precisão: propostas e ações da Embrapa solos**. EMBRAPA Solos, 1999.

Disponível em: <<http://www.cnpso.embrapa.br/search/pesqs/proj01/proj01.html>>. Acesso em: 23 jul.2006.

MANZIONE, R. L. **Variabilidade especial de atributos químicos do solo em Araguari - MG**. Botucatu – SP, 2002. 155 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Área de concentração: Energia na Agricultura. Faculdade de Ciências Agronômicas. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2002.

MATHERON, G. Principles of geostatistics. **Economic Geology**, Lancaster, v. 58, p. 1246-1266, 1963.

MATHERON, G. The theory of regionalized variables and its application. **Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique**, n. 5, 1971.

MATTOS, M. P. de. **Soja**: a mais importante oleaginosa da agricultura moderna. São Paulo: Ícone, 1987. 73 p.

MAURO, A. O. DI. et al., Correlação entre medidas paramétricas e não paramétricas de estabilidade em soja. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v. 35, n. 4, p. 687-696, 2000.
McBRATNEY, A.; ODEH, I.; BISHOP, T.; DUNBAR, M.; SHATAR, T. An overview of pedometric techniques for use in soil survey. **Geoderma**, Amsterdam, v. 97, p. 293-324. 2000.

McGARRY, D.; BRIDGE, B. J.; RADFORD, B. J. Contrasting soil physical properties after zero and traditional tillage of an alluvial soil in the semi-arid tropics. **Soil Till. Res.**, v. 53, p. 105-115, 2000.

MEAD, R.; CURNOW, R. W. **Chapman and hall publisher**, 1983. 163 p.

MENEGATTI, L. A. A.; MOLIN, J. P. Metodologia para identificação e caracterização de erros em mapas de produtividade. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 2, p. 367-374, 2003.

MIRANDA, E. E. de. **Informática brasileira em análise – quem precisa da agricultura de precisão?**. EMBRAPA Monitoramento por Satélite. Disponível em: <http://www.cesar.org.br/analise/n_20/artigon_20.html>. Acesso em: 26 jul. 2006.

MOLIN, J. P. Definição de unidades de manejo a partir de mapas de produtividade. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 22, n. 1, p. 83-92, 2002.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied statistics and probability for engineers 3**. New York: John Wiley & Sons, 2003. 706 p.

MULLA, D. J.; BHATTI, A. V.; KUNKEL, R. Methods for removing spatical variability from field research triajs. **Adv. Soil Sci**, New York, v. 13, p. 201-213, 1990.

MUZILLI, O. Cultura da soja: princípios e perspectivas de expansão. In: INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. **Plantio direto no Estado do Paraná**. Londrina: IAPAR, 1981. p. 11-14. (Circular 23).

MUZILLI, O. Influência do sistema de plantio direto, comparado ao convencional sobre a fertilidade da camada arável do solo. **R. Bras. Ci. Solo**, Campinas, v. 7, n. 1, p. 95-102, 1983.

MUZILLI, O. 1999. Plantio direto em solos de baixa aptidão agrícola. In: CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O. (Ed.). **Uso e manejo dos solos de baixa aptidão agrícola**. Londrina: IAPAR, 1999. p. 100-123 (Circular Técnico, 108).

MYERS, D. E. To be or not to be...stationary? That is the question. **Mathematical geology**, Dodrecht, v. 21, p. 347-362. 1989.

NESMITH, D. S. Soil compaction in double cropped wheat and soybean on Ultissol. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, v. 51, p. 183-186, 1987.

NEUMANN, R. I. **Anuário brasileiro da soja 2000**: brazilian soybean yearbook. Santa Cruz do Sul, 2000. 143 p.

NICOLODI, M.; ANGHINONI, I.; SALET, R. L. Alternativa à coleta de uma secção transversal, com pá de corte, na largura da entrelinha, na amostragem de solo em lavouras com adubação em linha no sistema plantio direto. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, n. 69, maio/jun. 2002.

OLIVEIRA, J. J.; CHAVES, L. H. G.; QUEIROZ, J. E.; LUNA, J. G. de. Variabilidade espacial de propriedades químicas em um solo salino-sódico. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v. 23, n. 4, p. 783-789, 1999.

OLIVER, M.A. Exploring soil spatial variation geostatistically. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 2., 1999. Odense. **Proceedings...** Silsoe: Sheffield, 1999. p. 03-18.

ORTIZ VALENCIA, L. I. **O paradigma da krigagem indicatriz e problema espaço-temporal na geoestatística**. Rio de Janeiro - RJ, 1999. 215 f. Dissertação (Mestrado em Estatística). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

ORTIZ VALENCIA, L. I.; MEIRELLES, M. S. P.; BETTINI, C. Geoestatística aplicada à agricultura de precisão. In: MACHADO, P. L. O. de A.; BERNARDI, A. C. de C.; SILVA, C. A. (Ed.). **Agricultura de precisão para o manejo da fertilidade do solo em sistema plantio direto**. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2004. p. 37-56.

PADOVAN, M. P. **Desempenho da soja, sob manejo orgânico, para produção de grãos e adubação verde**. Seropédica – RJ, 2002. 88 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Área de concentração: Ciência do Solo. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2002.

PIERCE, F. J.; NOWAK, P. Aspects of precision agriculture. **Adv. Agronomy**, v. 67, n. 1, p. 1-85, 1999.

PLANT, R. E. Site-specific management: the application of information technology to crop production. **Computers and electronics in agriculture**, Amsterdam, v. 30, n. 1, p. 9-29. 2001.

PLATAFORMA PLANTIO DIRETO. **Introdução e histórico**. 2001. Disponível em: <<http://www22.sede.embrapa.br/plantiodireto/IntroducaoHistorico/Hist1.htm>>. Acesso em: 3 set.2005.

PORTAL BRASIL – **O cerrado brasileiro**.

Disponível em: <<http://www.portalbrasil.net.eti.br/cerrado.htm>>. Acesso em: 1 maio.2006.

PROCHNOW, L. I. **Considerações gerais sobre manejo específico das áreas de produção**. Viçosa: SBCS, v. 25, n. 2, p. 21-24, 2000. (Boletim informativo).

QUAGGIO, J. A. **Acidez e calagem em solos tropicais**. Campinas, SP. Instituto Agrônomo, 2000. 111 p.

QUEIROZ, J. E. **Parâmetros hidrodinâmicos para um solo de várzeas para fins de drenagem subterrânea**. Piracicaba – SP, 1995. 167 f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: POTAFOS, 1991. 343 p.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J. C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285 p.

RAIJ, B. van. Fósforo no solo e interação com outros elementos. **Informações Agrônomicas**, Piracicaba: POTAFOS, n 102, jun. 2003.

REICHARDT, K.; VIEIRA, S. R.; LIBARDI, P. L. Variabilidade espacial de solos e experimentação de campo. **R. Bras. Ci. Solo**, Campinas, v. 10, n. 1, p. 1-6, 1986.

ROBERTSON, G. P. **GS+ Geostatistics for the environmental sciences: GS+ User's Guide**. Plainwell: Gamma Design Software, 1998. 152 p.

ROESSING, A. C.; GUEDES, L. C. A. Aspectos econômicos do complexo soja: sua participação na economia brasileira e evolução na região do Brasil Central. In: ARANTES, N. E.; SOUZA, P. I. de M. de. **Cultura da soja nos cerrados**. Piracicaba: POTAFOS, 1993. p. 1–69.

ROESSING, A. C. **Soja safra 2005/2006: E agora?**. EMBRAPA Soja. Disponível em: <http://www.cnpso.embrapa.br/download/artigos/impacto_economico.pdf>. Acesso em: 28 jul. 2006.

RUNGE, E. C. A.; HONS, F. M. Precision agriculture: development of a hierarchy of variables influencing crop yields. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4., 1998, Minnesota. **Proceedings...** Madison: ASA/CSSA/SSSA, 1999. p. 143-158.

SÁ, J. C. M. **Fertilidade do solo em plantio direto**. Castro – PR: Fundação ABC, 1992.

SADE, M. 2000. Um breve histórico do sistema de plantio direto na palha no Brasil. In: ENCONTRO NACIONAL DE PLANTIO DIRETO NA PALHA, 7., 2000, Foz do Iguaçu, PR. **Resumos...** Ponta Grossa, PR: FEBRAPDP, 2000. p. 15-17.

SALTON, J. C.; FABRÍCIO, A. C.; HERNANI, L. C. Rotação lavoura pastagem no sistema plantio direto. **Informe Agropecuário**: Belo Horizonte, v. 22, n. 208, p. 92-99, 2001.

SALVIANO, A. A. C. **Variabilidade de atributos de solo e de *Crotalaria juncea* em solo degradado do município de Piracicaba –SP**. Piracicaba - SP, 1996. 91 f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de agricultura “Luiz de Quiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1996.

SATTER, M. A. **Variabilidade espacial de atributos de um argissolo vermelho amarelo sob pastagem e vegetação nativa na Bacia Hidrográfica do Itapemirim**. Alegre – ES, 2006. 80 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Área de concentração: Fitotecnia. Centro de Ciências Agrárias. Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, 2006.

SATURNINO, H. M.; LANDERS, J. N. **O meio ambiente e o plantio direto**. Goiânia: APDC, 1997. 116 p.

SATURNINO, H. M. Evolução do plantio direto e as perspectivas nos cerrados. **Informe Agropecuário**: Belo Horizonte, v. 22, n. 208, p. 5-12, 2001.

SCHERPINSKI, N. I. **Variabilidade especial de atributos físicos-hídricos e do rendimento de grãos de soja em um latossolo vermelho sob sistema de plantio direto e convencional**. Cascavel - PR, 2003. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agroindustriais. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2003.

SCHLINDWEIN, J. A.; SALET, L. R.; ANGHINONI, I. Variabilidade dos índices de fertilidade do solo no sistema plantio direto e coleta de amostras representativas do solo. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 23.; REUNIÃO BRASILEIRA SOBRE MICORRIZAS, 7.; SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE MICROBIOLOGIA DO SOLO, 5.; REUNIÃO BRASILEIRA DE BIOLOGIA DO SOLO, Caxambu, 1998. **Resumos...** Caxambu: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1998. 265 p.

SCHLINDWEIN, J. A. **Variabilidade da fertilidade e amostragem de solo no sistema de plantio direto**. Porto Alegre - RS, 1999. 110 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Área de concentração: Química e Fertilidade do Solo. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

SCHLINDWEIN, J. A.; ANGHINONI, I. Variabilidade horizontal de atributos de fertilidade e amostragem de solo no sistema plantio direto. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v. 24, n. 1, p. 85-91, jan/fev. 2000.

SCHLINDWEIN, J. A.; GIANELLO, C. Necessidades de novos estudos de calibração e recomendação de fertilizantes para as culturas sob sistema plantio direto. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, n, 79, jan/fev. 2004.

SEAGRO – Secretaria da Agricultura, Pecuária e Abastecimento do Estado do Tocantins. Disponível em: <http://www.seagro.to.gov.br/v_conteudo_prn>. Acesso em: 22 jun.2005.

SENE, M.; VEPRASKAS, M. J.; NADERMAN, G. C., DENTON, H. P. Relationships of soil texture and structure to corn yield response to subsoiling. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 49, p. 422-427, 1985.

SEPLAN – Secretaria do Planejamento e Desenvolvimento: Anuário Estatístico de Goiás. Disponível em: <http://portalsepin.seplan.go.gov.br/anuario2005/agricultura/tab79_agricultura.htm>. Acesso em: 29 abr.2006.

SHUSTER, I.; OLIVEIRA, M. A. R de; VICENTE, D.; PALAGI, C. A.; DELLAGOSTIN, M. **CD 219RR nova cultivar de soja para o cerrado**. Cascavel: COODETEC, 2005. v. 1, 2005. (Informe Técnico, 1).

SIDIRAS, N.; PAVAN, M. A. Influência do sistema de manejo do solo no seu nível de fertilidade. **R. Bras. Ci. Solo**, Campinas, v. 9, n. 3, p. 249-254, 1985.

SILVA, A. R. P. Pólo regional ou cluter: o caso do município de Rio Verde - Goiás. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 13, n, 3, p. 41-55, 2004.

SILVA, E. A. A. et al. Programa computacional para produção e ajuste de modelos teóricos e semivariogramas experimentais em variáveis regionalizadas: GEOCAC, In: JORNADA CIENTIFICA DA UNIOESTE, 2., 2003, Toledo. **Anais...** Toledo: Unioeste, PRPPG, 2003a.

SILVA, J. M. da. **O processo de adoção do sistema de plantio direto na palha: alternativa viável para uma agricultura sustentável**. Brasília – DF, 2002. 22 f. Monografia (Especialização em Plantio Direto) Programa de Pós-Graduação Lato Sensu em Plantio Direto, Associação Brasileira de Educação Agrícola Superior, Universidade de Brasília, Brasília, 2002a.

SILVA, M. L. N.; BAHIA, V. G.; BARROSO, D. G. Perdas de solo em sistemas de preparo convencional e plantio direto. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.16, n.176, p. 44-50, 1992.

SILVA, M. L. de S. **Sistema de amostragem do solo e avaliação da disponibilidade de fósforo na fase de implantação do plantio direto**. Piracicaba – SP, 2002, 111 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Área de concentração: Solos e Nutrição de Plantas. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002b.

SILVA, V. R.; REICHERT, J. M.; STORCK, L.; FEIJÓ, S. Variabilidade espacial das características químicas do solo e produtividade de milho em um argissolo vermelho amarelo distrófico arênico. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v. 27, n. 6, p. 1013-1020, 2003b.

SILVEIRA, P. M.; STONE, L. F. Profundidade de amostragem do solo sob plantio direto para avaliação de características químicas. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v. 26, n.1, p. 157-162, 2002.

SNA – Sociedade Nacional de Agricultura. **Plantio direto**: sistema é mais econômico que o convencional. Artigos técnicos. Disponível em: <<http://www.snagricultura.org.br/artigos/artitec-plantio.htm>>. Acesso em: 1 maio.2006.

SOUZA, L.; COGO, N. P.; VIEIRA, S. R. **Variabilidade espacial de fósforo, potássio e matéria orgânica no solo em relação a sistema de manejo. P, K, Ca, Mg, H+Al, SB**, Viçosa, 1993. v. 22.

SOUZA, Z. M.; SILVA, M. L. S.; GUIMARÃES, G. L.; CAMPOS, D. T. S.; CARVALHO, M. P.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos físicos em um latossolo vermelho distrófico sob semeadura direta em Selvíria - MS. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v. 25, n. 3, p. 699-707. 2001.

SPERA, S. T.; SANTOS, H. P.; FONTANELY, R. S.; TOMM, G. O. Efeito de sistemas de produção de grãos envolvendo pastagens sob plantio direto nos atributos físicos de solo e na produtividade. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v. 28, n. 3, p. 533-542, 2004.

STAT SOFT Inc, **Programa Statistica for windows, versão 6.0**. Tulsa, EUA: Stat Soft, Inc, 2001. 1 CD-ROM.

SPIEGEL, M. R. **Estadística**. 3. ed. São Paulo: MKRON BOOKS, 1993. 643 p.

STEVENSON, W. **Estatística aplicada à administração**. São Paulo: HARBRA. 2001. 495 p.

STOLF, R., FERNANDES, J.; FURLANI NETO, V. L. Recomendações para uso do penetrômetro de impacto modelo IAA/PLANALSUCAR/STOLF. **STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 1, n. 3, p.18-23, 1983.

TAKEDA, E. Y. **Variabilidade espacial de atributos físicos e químicos de uma associação de solos sob videira (*Vitis vinifera L.*) em Vitória Brasil - SP**. Ilha Solteira, 2000. 102 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Área de concentração: Sistema de Produção. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Universidade Estadual Paulista, Ilha solteira, 2000.

TAYLOR, H. M.; BRAR, G. S. Effect of soil compaction on root development. **Soil Till. Res.**, Amsterdam, v. 19, n. 1, p. 111-119, 1991.

THYLÉN, L.; JURCHIK, P.; MURPHY, D. L. P. Improving the quality of yield data, In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 1,, 1997, Warwick. **Proceedings...** Oxford: BIOS Scientific, 1997. p. 743-750.

TOMÉ JÚNIOR, J. B. **Manual para interpretação de análise de solo**. Guaíba: Agropecuária, 1997. 247 p.

TORMENA, C.A.; ROLOFF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v. 20, n. 2, p. 333-339, 1996.

TORRES, E.; SARAIVA, O. F. **Camada de impedimento do solo em sistemas agrícolas com a soja**. Londrina: EMBRAPA Soja, 1999. 58 p. (Circular Técnico, 23).

TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; WADE, M. K.; UEHARA, G. Applications of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Adv. Agron.**, Madison, v. 38, n. 1, p. 45-94, 1985.

TREIN, C. R.; COGO, N. P.; LEVIEN, R. Métodos de preparo do solo na cultura do milho e ressemeadura do trevo, na rotação aveia + trevo/milho, após pastejo intensivo. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v. 15, n. 1, p. 105-111, 1991.

UNIVERSIDADE DE RIO VERDE – ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DA FESURV. **Latitude: 17° 48'S; longitude: 50° 55' W**. Rio Verde – GO, 2006.

VIEIRA, S. R.; CASTRO, O. M.; TOPP, G. C. Spatial variability of some soil physical properties in the three soils of São Paulo, Brazil. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v. 27, n. 2, p. 333-341, 1992.

VIEIRA, S. R.; LOMBARDI NETO, F. Variabilidade espacial do potencial de erosão das chuvas do estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 54, n. 2, p. 405-412, 1995.

VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de argila, silte e atributos químicos de uma parcela experimental de um latossolo roxo de Campinas - SP. **Bragantia**, Campinas, v. 1, n. 56, p. 181-190, 1997.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudo de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F. de.; ALVARES V., V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: SBCS, 2000. v. 1, p. 1-54.

WALTER, M. T. M. T. Bases de dados bibliográficos dos cerrados brasileiros: um projeto interinstitucional. **Comunicações: ciência da informação**, v. 24, n. 2, 1995. Disponível em: <www.ibict.br/cionline/include/getdoc.php?id=970&article=608&mode=pdf>. Acesso em: 30 abr.2006.

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

WIETHÖLTER, S. Manejo da fertilidade do solo no sistema plantio direto no sul do Brasil. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO, 24., 2000, Santa Maria. **Reuniões...** Santa Maria: UFSM, 2000. 1 CD-ROM.