



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

**PRODUTIVIDADE DA SOJA EM FUNÇÃO DE ALGUMAS  
PROPRIEDADES DO SOLO SOB PLANTIO DIRETO EM  
UM FERRALSOL DO CERRADO BRASILEIRO**

*Rafael Montanari  
Engenheiro Agrônomo*

A CORUÑA  
JANEIRO - 2011



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

**PRODUTIVIDADE DA SOJA EM FUNÇÃO DE ALGUMAS  
PROPRIEDADES DO SOLO SOB PLANTIO DIRETO EM  
UM FERRALSOL DO CERRADO BRASILEIRO**

*Rafael Montanari*  
*Engenheiro Agrônomo*

A CORUÑA  
JANEIRO - 2011

**FACULDADE DE CIENCIAS**  
**ÁREA DE EDAFOLOGIA E QUÍMICA AGRÍCOLA**

**TESE DE DOUTORADO**

**PRODUTIVIDADE DA SOJA EM FUNÇÃO DE ALGUMAS  
PROPRIEDADES DO SOLO SOB PLANTIO DIRETO EM  
UM FERRALSOL DO CERRADO BRASILEIRO**

**Apresentada por:**

**RAFAEL MONTANARI**

**Diretores:**

**Eva Vidal Vázquez**

**Jorge Paz Ferreiro**

**Marlene Cristina Alves**

**A Coruña - Espanha**

**Janeiro – 2011**

**Dna. Marlene Cristina Alves**, Profesora Titular de la Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus de Ilha Solteira, SP, Brasil, **Dna. Eva Vidal Vázquez**, Investigadora “Parga Pondal” de la Universidade da Coruña (UDC) y **D. Jorge Paz Ferreiro** Investigador “Juan de la Cierva” de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

**CERTIFICAN:**

Que la presente Memoria titulada: **“Produtividade da soja em função de algumas propriedades do solo sob plantío direto em um Ferralsol do Cerrado brasileiro”** que para optar al grado de Doctor por la Universidade da Coruña presenta el Ingeniero Agrónomo **Rafael MONTANARI**, ha sido realizada en el Instituto Universitario de Xeoloxía “Isidro Parga Pondal” de la UDC y en el Campus de Ilha Solteira de la UNESP (Brasil), bajo nuestra dirección y supervisión.

Considerando que constituye trabajo de *Tesis Doctoral*, autorizamos su presentación en el Instituto Universitario de Xeoloxía de la Universidade da Coruña.

Y para que así conste, expedimos el presente certificado en A Coruña, a 12 de Enero de 2011.

Fdo.

Marlene Cristina Alves

Fdo.

Eva Vidal Vázquez

Fdo.

Jorge Paz Ferreiro

## **DEDICO**

### **A DEUS**

Aos meus pais, “DORVAIR MONTANARI e MARIA DO ROSÁRIO ANDRÉ MONTANARI”, que me educaram e me deram a oportunidade para mais esta conquista em minha vida, que nos momentos difíceis, me compreenderam e me incentivaram, demonstrando todo carinho, respeito, confiança e amor que sentem por mim. **Amo vocês!**

### **OFEREÇO**

Ao meu irmão, ALEXANDRE MONTANARI, pelo carinho, incentivo e compreensão, nessa fase importante de minha vida.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, que me permitiu alcançar este enorme sonho em minha vida e por me dar forças para superar as dificuldades.

À Universidade Da Coruña (UDC) e à Universidade de Santiago de Compostela (USC), pelo acolhimento e pelas condições de aprendizado oferecido em meu doutoramento na Espanha.

Ao **Professor Dr. Antonio Paz González**, por ter me aceitado em seu grupo de pesquisa e por dar-me a oportunidade de realizar esta Tese, assim como participar em projetos de pesquisa por todo o tempo de meu estágio – **Muito agradecido...**

Aos meus diretores, Dra. Eva Vidal Vázquez, Dr. Jorge Paz Ferreiro, Dr. Marlene Cristina Alves pela ajuda e conselhos que me proporcionaram para a realização desta Tese.

A **Professora Dra. Marlene Cristina Alves** e ao **Professor Dr. Morel de Passos e Carvalho**, pela orientação, pelos ensinamentos, pelos exemplos, pelos incentivos e, acima de tudo, pelo brilhante profissionalismo e pela amizade demonstrada ao longo do curso.

Ao Prof. Dr. Jorge Dafonte Dafonte, pelo auxílio e orientação quando estive trabalhando na Universidade de Santiago de Compostela (USC/Lugo).

Ao amigo Glécio Machado Siqueira pela hospitalidade na cidade de Lugo e pelas ajudas nas publicações dos trabalhos.

Aos Professores e Técnicos da Universidade Da Coruña – Faculdade de Ciências, área de Edafologia e Química Agrícola pelos ensinamentos e dedicação ao ensino e pesquisa.

Aos professores e funcionários do Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos do Campus de Ilha Solteira e ao técnico Valdivino, por toda a ajuda, paciência e ensinamentos.

A Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, **UEMS** – Unidade de Aquidauana, pela acolhida; instituição esta, que leciono e tenho imenso carinho – **Grato!**

A todos os amigos da **UEMS**, principalmente aos coordenadores dos cursos de Agronomia e Engenharia Florestal, Prof. Dr. Agenor Martinho Correa e Prof. Dr. Norton Rayd Rego, respectivamente.

A todos os amigos que, nos vários dias de sol forte, me ajudaram na coleta de dados de campo; **MUITÍSSIMO OBRIGADO.**

A todos os amigos da Universidade Da Coruña (UDC), pelo acolhimento em minhas estâncias realizadas.

Aos funcionários da Fazenda de Ensino e Pesquisa e do Laboratório de Fertilidade do Solo: Juninho, Alvino, Joãozinho, Buchada, Teginho e Carlinhos, pelo apoio prestado.

Aos amigos do Brasil Zigomar Menezes de Souza, Elza Militão, Igor Malaspina, Renato Franco, Jefferson Anselmo, Hernandes Queiroz, Talles Eduardo Borges dos Santos, Máila Terra Gioia, Edmar Casarin Zambianco, João Henrique Buschin, Rômulo com quem convivi durante o Doutorado, pelas várias experiências e pelos risos de descontração.

Aos meus grandes amigos: Baku Akazawa, Piero Maletta, Simone Tarsitano, Francesco Concia, que partilharam momentos inesquecíveis em minha vida, me ajudando em momentos de dificuldade na Europa.

Às pessoas especiais que partiram, e que agora me auxiliam nos caminhos da vida em estâncias superiores.

A todos os demais profissionais envolvidos nesta pesquisa, bem como àquelas pessoas que por algum motivo tornaram a minha passagem na Universidade da Coruña (UDC) – Campus de A Zapateira, mais prazerosa, presto os meus agradecimentos e reafirmo a certeza que vou, para sempre, tê-los por lembranças.

## RESUMO

Atualmente, no cenário nacional, a cultura da soja no sistema plantio direto é amplamente utilizada na integração agricultura-pecuária. No ano agrícola de 2007/08, no município de Selvíria (MS), foi analisada a produtividade da soja, em plantio direto, em função de alguns atributos físicos e químicos de um Latossolo Vermelho distroférico (Typic Acrustox) local. O objetivo foi selecionar entre os atributos pesquisados do solo aquele que melhor se apresentasse para explicar a variabilidade da produtividade agrícola. Para tanto, foi instalada a malha geoestatística para a coleta dos dados do solo e da planta, contendo 121 pontos amostrais, numa área de 25600 m<sup>2</sup> e declive homogêneo de 0,025 m m<sup>-1</sup>. Do ponto de vista linear e espacial, a elevada produtividade de grãos de soja pôde ser explicada em função do potencial hidrogeniônico. A baixa variabilidade obtida para a maioria dos atributos do solo denotou ser o plantio direto um sistema que proporciona a homogeneização do ambiente físico do solo.

**Termos de indexação:** manejo do solo, qualidade física e química do solo, agricultura de precisão, krigagem, *Glycine max*.

## **ABSTRACT**

Nowadays the soybean crop in no-tillage is widely used in the national crop-livestock integration. The soybean productivity in no-tillage was analysed in Selvíria County (Mato Grosso do Sul State – Brazil), during the 2007/08 agricultural year, in function of some physical and chemical attributes of a Typic Acrustox local. The objective was to select, among the soil attributes, the one that better could stand out in way to explain the variability of the agricultural productivity. Therefore, a geostatistical grid was installed for data collecting regarding the soil and the plant, with 121 sampling station, in an area of 25600 m<sup>2</sup> and homogeneous slope of 0,025 m m<sup>-1</sup>. In the linear and spatial point of view, the high productivity of soybean grains could be explained by reason of hydrogen potential. The low variability of the majority soil attributes showed no-tillage as a system that causes the homogenization of the physical environment of soil.

**Index terms:** soil management, physical and chemical quality of the soil, precision farming, kriging, *Glycine max.*

**LISTA DE FIGURAS**

<b>Figuras</b>		<b>Página</b>
1	Localização do Cerrado no território Brasileiro.....	14
2	Tomógrafo com resolução micrométrica para aplicações em Ciências do Solo e do Ambiente.....	61
3	Três exemplos simples de tensiômetros.....	62
4	Características do semivariograma.....	72
5	Krigagem pontual (A) e krigagem em blocos (B).....	76
6	Exemplo de semivariogramas: (a) não-estacionário, e (b) estacionário.....	78
7	Localizações do Estado de Mato Grosso do Sul e do experimento e também a malha geoestatística estabelecida.....	87
8	Componentes de um penetrômetro de impacto.....	91
9	Curva da resistência à penetração e valores da umidade gravimétrica nas três camadas pesquisadas do solo.....	103
10	Resistência a penetração avaliada em diferentes profundidades e sistemas de uso do solo.....	104
11	Equação de regressão entre alguns atributos da produtividade da soja e de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto no Cerrado em Selvíria (MS-Brasil).....	118
12	Semivariogramas simples da produtividade da soja e de alguns atributos de um Latossolo Vermelho distroférico (PG, DS1, UV2, MO2, pH1 e pH2)....	121
13	Mapas de krigagem da produtividade da soja e da densidade de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto no Cerrado em Selvíria (MS-Brasil).....	123

14	Mapas de krigagem da umidade volumétrica e do teor de matéria orgânica de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto no Cerrado em Selvíria (MS-Brasil).....	124
15	Mapas de krigagem do potencial hidrogeniônico de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto no Cerrado em Selvíria (MS-Brasil).....	125
16	a) Mapa de krigagem da densidade do solo na profundidade de 0,00-0,10 m sob plantio direto para a cultura do feijão do ano agrícola 2006/07 num Latossolo Vermelho distroférico do Cerrado em Selvíria (MS-Brasil); b) Mapa de krigagem da densidade do solo na profundidade de 0,00-0,10 m sob plantio direto para a cultura da soja do ano agrícola 2007/08 num Latossolo Vermelho distroférico do Cerrado em Selvíria (MS-Brasil).....	127
17	Semivariogramas cruzados e mapas de co-krigagem da produtividade da soja em função do pH de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto no Cerrado em Selvíria (MS-Brasil).....	129
18	a) Semivariograma cruzado e Mapa de co-krigagem do potencial hidrogeniônico na profundidade de 0,00-0,10 m sob plantio direto para a cultura do feijão do ano agrícola 2006/07 num Latossolo Vermelho distroférico do Cerrado em Selvíria (MS-Brasil); b) Semivariograma cruzado e Mapa de co-krigagem do potencial hidrogeniônico na profundidade de 0,00-0,10 m sob plantio direto para a cultura da soja do ano agrícola 2007/08 num Latossolo Vermelho distroférico do Cerrado em Selvíria (MS-Brasil).....	130

**LISTA DE QUADROS**

<b>Quadros</b>		<b>Página</b>
1	Valores indicativos de pH e termos usuais para descrever os intervalos de pH.....	67
2	Quadro com as coordenadas cartesianas dos pontos amostrais da malha experimental.....	88
3	Descrição morfológica e dados analíticos do solo estudado.....	101
4	Análise inicial de alguns atributos do solo pesquisado.....	102
5	Análise inicial de alguns atributos químicos para fins de fertilidade do solo pesquisado.....	102
6	Análise descritiva inicial de alguns atributos da produtividade da soja e de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto no Cerrado em Selvíria (MS-Brasil).....	106
7	Matriz de correlação linear simples entre alguns atributos da produtividade da soja e de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto no Cerrado em Selvíria (MS-Brasil).....	115
8	Parâmetros dos semivariogramas simples e cruzados de alguns atributos da produtividade da soja e de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto no Cerrado em Selvíria (MS-Brasil).....	120

**LISTA DE APÊNDICES**

<b>Apêndice</b>		<b>Página</b>
A	(a) Área experimental antes da dessecação/semadura da soja; (b) Vista da coleta das amostras indeformadas do solo; (c) Detalhe da coleta da resistência à penetração, e (d) Coleta de amostras deformadas do solo.....	158
B	(a) e (b) Instalação do experimento; (c) Emergência das plântulas, 5 dias após a semeadura (DAS); (d) 12 DAS; (e) 18 DAS, e (f) 40 DAS.....	159
C	(a) e (b) Florescimento, 53 DAS; (c) e (d) 70 DAS; e (e) e (f) 86 DAS.....	160
D	(a) 96 DAS; (b) Estaqueamento da malha, 104 DAS; (c) Dia da colheita, 111 DAS; (d) Área colhida de 3,24m <sup>2</sup> ; (e) Experimento colhido.....	161
E	(a) e (b) Detalhe da sonda na coleta da umidade do solo; (c) Detalhe da coleta da resistência mecânica; (d) e (e) Vista da coleta das amostras indeformadas do solo; e (f) Detalhe das amostras indeformadas do solo.....	162
F	Dados climatológicos coletados durante a condução do experimento.....	163
G	Dados das coordenadas cartesianas e dos atributos estudados.....	164

---

**SUMÁRIO**

	<b>Página</b>
1 JUSTIFICATIVA.....	2
2 INTRODUÇÃO.....	7
2.1 Os solos.....	7
2.2 O Cerrado Brasileiro.....	12
2.3 Aspectos gerais da cultura da soja.....	15
2.4 Sistemas de preparo do solo utilizados para a cultura da soja.....	26
2.4.1 Sistema plantio direto.....	27
2.4.2 Preparo reduzido.....	38
2.4.3 Preparo convencional.....	43
2.5 Atributos do solo.....	44
2.5.1 Solo agrícola ideal.....	44
2.5.1.1 Densidade do solo.....	44
2.5.1.2 Resistência mecânica à penetração e umidade.....	48
2.5.1.2.1 Métodos de determinação de umidade do solo e breve descrição de alguns deles.....	59
2.5.1.2.1.1 Reflectometria no domínio do tempo.....	59
2.5.1.2.1.2 Tomógrafo de resolução micrométrica para estudos de solos.....	60
2.5.1.2.1.3 Determinação da umidade do solo pela sonda de nêutrons.....	61
2.5.1.2.1.4 Tênsiômetros.....	61
2.5.1.3 Teor de matéria orgânica.....	63
2.5.1.4 Potencial hidrogeniônico.....	66
2.6 A estatística clássica e a geoestatística na pesquisa agrônoma.....	68
2.6.1 Métodos estatísticos para análise das variáveis da cultura e do solo.....	69
2.6.1.1 Estatística descritiva.....	69
2.6.1.2 Geoestatística.....	69
2.6.1.2.1 Semivariograma.....	70
2.6.1.2.2 Krigagem.....	74
2.6.1.2.3 Semivariograma cruzado.....	76
2.6.1.2.4 Co-krigagem.....	77
2.6.1.2.5 Exclusão da tendência quando da não-formação da estacionariedade.....	77

2.6.1.2.6 Variabilidade espacial aplicada à cultura da soja e aos solos.....	80
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	85
3.1 Caracterização do local de origem dos dados.....	85
3.2 Avaliações.....	86
3.2.1 Análises físicas.....	89
3.2.1.1 Determinação da densidade aparente ou global do solo.....	89
3.2.1.2 Determinação da resistência à penetração das raízes.....	90
3.2.1.3 Determinação da umidade do solo.....	92
3.2.1.4 Determinação do teor de matéria orgânica.....	92
3.2.1.5 Determinação do potencial hidrogeniônico.....	96
3.3 Avaliações estatísticas e geoestatísticas.....	97
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	100
4.1 Caracterização inicial do solo.....	100
4.2 Análise descritiva dos dados.....	105
4.2.1 Variabilidade dos atributos.....	105
4.2.1.1 Atributos da planta e solo.....	105
4.2.2 Distribuição de frequência dos atributos pesquisados.....	109
4.2.2.1 Atributos da planta e solo.....	109
4.2.3 Valores médios dos atributos pesquisados.....	110
4.2.3.1 Atributos da planta e solo.....	110
4.3 Análise de regressão entre os atributos pesquisados.....	114
4.3.1 Regressão linear simples.....	114
4.3.1.1 Matriz de correlação linear simples entre os atributos pesquisados.....	114
4.3.1.1.1 Atributos da planta <i>versus</i> atributos do solo.....	114
4.3.1.1.2 Atributos do solo <i>versus</i> atributos do solo.....	116
4.3.1.2 Regressão linear simples entre os atributos pesquisados.....	116
4.3.2 Análise geoestatística dos atributos pesquisados.....	119
4.3.2.1 Análise semivariográfica simples.....	119
4.3.2.1.1 Ajuste dos semivariogramas simples dos atributos pesquisados.....	119
4.3.2.1.2 Mapas de krigagem dos atributos pesquisados.....	122
4.3.2.2 Análise semivariográfica cruzada.....	128
4.3.2.2.1 Ajuste dos semivariogramas cruzados e mapas de co- krigagem dos atributos pesquisados.....	128

*Sumário*

---

5 CONCLUSÕES.....	132
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	135
7 APÊNDICE.....	157

# **JUSTIFICATIVA**

## **1 JUSTIFICATIVA**

Sabendo-se que a agricultura atual necessita de elevadas produtividades para um crescimento contínuo, a tecnologia com uso da Agricultura de Precisão é de suma importância para o crescimento da mesma. Este procedimento de gerenciamento da agricultura serve para diminuir perdas e custos, elevar a produtividade e aumentar a qualidade dos produtos (MONTANARI, 2009). Mas para isso, conhecer o solo é muito importante para aplicação destas tecnologias, pois este sofre inúmeras variações ao longo do tempo, devido aos fatores de formação do solo como, clima, relevo, organismo e material de origem, que variam muito e de forma significativa, causando assim aos solos uma elevada heterogeneidade, ou seja, uma grande variação espacial. Para quantificar estas variações são utilizadas ferramentas da pedologia, da estatística descritiva e da geoestatística.

Os altos índices de produtividade e a maior rentabilidade agrícola dependem especificamente da manutenção da capacidade produtiva dos solos. Assim práticas agrícolas, tal como o plantio direto, objetiva proporcionar modificações nos teores de nutrientes, estrutura, porosidade, agregação e densidade do solo, bem como na infiltração e disponibilidade de água, com vistas a proporcionar o adequado crescimento radicular das culturas (WUTKE et al., 2000). As raízes são imprescindíveis no processo de absorção de água e nutrientes. Os estudos sobre o crescimento radicular, sua concentração, distribuição e atividade (taxa de crescimento e longevidade) no perfil do solo são de extrema importância à produtividade vegetal (TAYLOR e ARKIN, 1981). Camadas compactadas de subsuperfície são mais prejudiciais ao desenvolvimento radicular das plantas do que perfis homogêneos com elevados valores de resistência mecânica à penetração. Existem ainda, outros fatores inter-relacionados que influem no desenvolvimento radicular, como a continuidade dos poros,

fertilidade, presença de microorganismos patogênicos ou simbióticos, oxigenação e quantidade de água disponível no solo. Com o intenso cultivo utilizado na agricultura, a compactação do solo vem surgindo sistematicamente no Cerrado Brasileiro, onde os sistemas convencionais de preparo do solo pulverizam em excesso a camada arável causando a formação de crostas superficiais sobre o horizonte Ap, assim como camadas coesas e compactadas, tendo como solução para tal compactação o uso de cobertura vegetal sobre a superfície do solo, utilizando-se do sistema plantio direto (SPD) (MONTANARI, 2009).

A cultura da soja, com evidência econômica na agricultura brasileira, tem se apresentado como umas das principais alternativas de cultivo quando no SPD. Contudo, pela escassa diversificação dos sistemas de rotação, normalmente com a soja na primavera/verão e o milho na safrinha, o solo, pela deficitária exploração do sistema radicular dessas culturas, aliado ao tráfego intenso do maquinário, tende à compactação (JOHANN et al., 2004; MELLO FILHO et al., 2006; REICHERT et al., 2008; ANDREOTTI et al., 2010). Como resultado dessa compactação, cada vez mais ocorre o menor crescimento radicular das culturas, com reflexo na queda da produtividade e perda de valor monetário (TORMENA et al., 1998; REICHERT et al., 2008).

Quando a compactação começa a limitar o desenvolvimento vegetal é necessário que medidas corretivas sejam adotadas, com a finalidade de quebrar a camada compactada, o que melhorará em curto prazo, as condições nas quais as plantas estão se desenvolvendo. Algumas práticas utilizadas no preparo do solo podem atenuar a sua compactação, dentre elas a aração e a gradagem profundas, a subsolagem e a rotação de culturas incluindo, se possível, plantas descompactadoras do solo (HANKANSSON et al., 1988). Na prática, tem sido adotados o sistema plantio direto, o cultivo mínimo, a rotação de culturas, a sucessão de culturas e a adubação verde, como formas de resgatar a auto-sustentabilidade da exploração agrícola e, por conseguinte, a preservação do meio ambiente (WUTKE et al., 2000). Por outro lado, como no sistema convencional o perfil de compactação do solo é distinto do plantio direto, tal fato faz com que o agricultor seja obrigado a movimentá-lo pela aração e/ou gradagem, podendo ocasionar uma heterogeneidade do solo.

A heterogeneidade é uma propriedade inerente do solo que tipifica sua anisotropia. Numa paisagem natural, os solos apresentam ampla variabilidade dos seus atributos, tanto no sentido espacial como no volumétrico, resultante da interação dos processos que comandam os fatores de sua formação. Ademais, o solo cultivado possui fontes adicionais de heterogeneidade, originadas exclusivamente do efeito antrópico da agricultura (BECKETT e

WEBSTER, 1971). Assim, tem-se, como postulado universal, que o uso do solo, com o passar do tempo, causa-lhe acentuada heterogeneidade. Esse aspecto foi observado, entre outros, para o desmatamento do solo (SANTOS e VASCONCELOS, 1987); para a sistematização da terra, desencadeada por meio do nivelamento, visando-se aumentar a eficácia da irrigação (KNIGHTON e JAMES, 1985); para a prática agrícola que envolve o plantio direto e a rotação de culturas (O'HALLORAN et al., 1985); para os locais onde os fertilizantes têm sido aplicados a lanço e/ou na linha de cultivo (MELSTED e PECK, 1973) e em diferentes usos e manejos do solo (MONTANARI, 2009).

Segundo os princípios básicos da experimentação estabelecidos pelo método estatístico clássico, a variabilidade do solo ocorre de forma inteiramente aleatória, admitindo-se que seus atributos possuam distribuição de frequência do tipo normal (BECKETT e WEBSTER, 1971; O'HALLORAN et al., 1985; SANTOS e VASCONCELOS, 1987). Entretanto, vários estudos têm relatado que os atributos do solo apresentam intensa dependência espacial (VIEIRA et al., 1983; TRANGMAR et al., 1985; WARRICK e NIELSEN, 1980; JOURNEL e HUIJBREGTS, 1991; GOOVAERTS, 1999; LÓPEZ, 1999; SOUZA et al., 2001; MONTANARI, et al., 2005; ALMEIDA, 2007; MONTANARI et al., 2008) necessitando, portanto, de uma análise geoestatística.

A presença da dependência espacial nos atributos do solo foi a mola propulsora que alavancou o desenvolvimento da geoestatística como ciência. Dessa forma, foi observado que para os dados de concentração de ouro, originados das minerações de Johannesburgo (África do Sul), não havia solução de continuidade às suas variâncias se não fosse considerada a distância entre as amostras. Baseado nestas observações, Matheron (1962) desenvolveu a teoria das Variáveis Regionalizadas, a qual contém os princípios da geoestatística. Segundo tal teoria, os valores de um atributo do solo estão de alguma forma, relacionados com a sua distribuição espacial. Sendo assim, observações tomadas a curtas distâncias devem ser mais semelhantes em magnitude do que aquelas mais distantes.

Atualmente, a pesquisa da ciência do solo tem-se apoiado intensamente na utilização da geoestatística, que, juntamente com a estatística clássica, formaram uma dupla de extraordinária importância agrônoma devido às inúmeras respostas dadas às mais variadas questões existentes que, até então, eram ignoradas. Dentre a importância da geoestatística, podem ser destacados, entre outros, os seguintes aspectos: 1) determinação da dimensão da parcela experimental de campo, dada pelo poder de alcance do semivariograma; 2) estimativa de um atributo do solo de difícil determinação, a partir de outro qualquer cuja determinação

---

seja fácil, por meio do semivariograma cruzado e da co-krigagem, e 3) viabilização da agricultura de precisão.

Neste sentido, nas dependências da Fazenda de Ensino e Pesquisa da FEIS/UNESP/Campus de Ilha Solteira, durante o ano agrícola 2007/2008 o presente trabalho objetivou avaliar, com recursos da estatística clássica e da geoestatística, a dependência linear e espacial da produtividade e componentes de produção da soja com atributos físicos e químicos do solo em plantio direto, visando-se implementar os seus aspectos de manejo e conservação, com vistas a proporcionar zonas específicas de manejo.

# **INTRODUÇÃO**

## **2 INTRODUÇÃO**

### **2.1 Os solos**

Conforme Bigarella et al. (1994), o termo solo é, às vezes, aplicado erroneamente a qualquer tipo de alteração. Refere-se apenas à parte do manto de intemperismo que sofreu decomposição e modificações intensas, tornando-o capaz de comportar o desenvolvimento de vegetais superiores. O solo é constituído direta ou indiretamente de produtos de intemperização das rochas. Em menor escala, resulta da ação de organismos e de detritos orgânicos decompostos da cobertura vegetal.

No sentido mais restrito, solo é um material e/ou inconsolidado, poroso, finamente granulado, com natureza e propriedades particulares, herdadas da interação de processos pedogenéticos com fatores ambientais, envolvendo as variáveis: material de origem, clima, organismos vivos, relevo e tempo. Desse modo, os solos são capazes de dar sustentação à vida de vegetais terrestres superiores.

O desenvolvimento pleno do solo constitui um processo muito lento. Inicialmente, a parte superior do manto, seja residual ou transportada, decompõe-se o suficiente para liberar nutrientes às plantas, possibilitando o crescimento de vegetais pioneiros e de pequeno porte. Nesse estágio, o solo é incipiente e de má qualidade agrícola, contendo grande quantidade de rocha desagregada e pouco alterada, tratando-se de um solo imaturo. À medida que são incorporados detritos orgânicos mortos parcialmente decompostos, o solo passa a fornecer nutrientes, ou seja, húmus (colóides orgânicos), os quais contêm carbono extraído do ar durante o desenvolvimento de plantas.

A matéria vegetal em decomposição produz ácidos húmicos que auxiliam na alteração das partículas do manto, bem como na lixiviação de algumas substâncias, translocando-as para níveis inferiores. Com a continuidade do processo, a composição do solo muda de forma progressiva, embora muito lentamente.

No caso de a erosão não perturbar a formação do solo, e haver pluviosidade suficiente para manter a decomposição química e a vegetação, o seu desenvolvimento é acelerado durante certo tempo. Gradualmente, o solo torna-se mais profundo, atingindo o estágio de maturidade ao perder grande parte do material mineral.

Quando um solo inicia sua evolução sobre o manto residual, ele é considerado incipiente, esquelético ou imaturo (predominam partículas grosseiras) refletindo o caráter da rocha subjacente. Por exemplo: na alteração de um granito, um solo imaturo é rico em argila formada pela intemperização do feldspato, além de conter ainda numerosos fragmentos de quartzo e de outros grãos minerais constituintes dessa rocha, os quais se encontram desintegrados, porém não alterados. O ferro derivado da biotita ou da hornblenda foi oxidado e confere à argila coloração amarelada. A argila contém absorvidas ainda certas substâncias bastante solúveis (p.ex. compostos de potássio).

As influências externas, no entanto, modificam o caráter original do solo e podem ser acentuadas ao ponto de imprimem características mais marcantes do que aquelas herdadas da rocha ou material original. Como fatores externos mais importantes, destacam-se o clima e a vegetação a ele relacionados. A pluviosidade é um fator externo de grande importância na determinação do tipo de solo. Lobeck (1939), citado por Bigarella et al. (1994), destaca o fato de que os solos da porção oriental úmida dos Estados Unidos pertencem a uma classe Pedalfer e que praticamente todos aqueles do oeste semi-árido a outra classe (Pedocal), apesar da diversidade das rochas das quais derivam. Os solos de uma região tendem, portanto, em longo prazo, a se adaptarem às condições, diminuindo as diferenças entre eles.

Independentemente de origem, passado e história geológica, os solos que atingem maturidade num ambiente são mais similares do que aqueles que procedem da mesma fonte, mas que permanecem imaturos por força de fatores locais.

Segundo Meurer (2000), no desenvolvimento da Ciência do Solo, o solo tem sido estudado e interpretado diferentemente à medida que os conhecimentos sobre a sua complexidade evoluíram. Destacam-se alguns conceitos que contribuíram significativamente

para o conhecimento: a) o solo como produto de alteração das rochas e como corpos naturais organizados; b) o solo como meio para o desenvolvimento das plantas; c) o solo como meio capaz de armazenar e transformar resíduos, assim descritos:

a) solos como produto de alteração das rochas e como corpos naturais organizados - No final do século XVIII, com o desenvolvimento da ciência da geologia, os solos passaram a ser considerados como produtos de alteração das rochas, empregando-se métodos geológicos para a sua classificação. Surgiu, assim, a classificação dos solos de acordo com as rochas que lhes deram origem: solos graníticos, solos calcários, solos sedimentares, e assim por diante. A partir dos trabalhos realizados pelo geólogo russo Dokuchaev, na metade do século XIX, os solos passaram a ser reconhecidos como corpos naturais organizados, com características morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas, relacionadas aos processos e fatores que lhes deram origem;

b) solo como meio para o desenvolvimento das plantas – Desde a antiguidade, os povos preocupavam-se com a capacidade dos solos em produzir alimentos, pois deles dependia a sua sobrevivência. A classificação dos solos quanto a sua produtividade agrícola já era utilizada há mais de 4.000 anos, na China, para avaliar as posses individuais e os impostos a pagar ao governo. O conceito agrícola de solos e a qualificação das terras também já eram conhecidos no Império Romano.

Nesse sentido, o solo deveria prover um ambiente no qual as plantas pudessem se desenvolver em função da reserva de água e dos elementos minerais presentes no solo. Assim, as raízes poderiam ancorar-se e crescer em um ambiente poroso, com oxigênio, ausência de elementos tóxicos, entre outros.

Pelo menos 16 elementos são considerados como essenciais para o crescimento das plantas. O carbono, o oxigênio e o hidrogênio, combinados na reação fotossintética, são obtidos do ar e da água. Eles constituem 90 % ou mais da massa produzida pelo vegetal.

Os restantes 13 elementos são obtidos do solo. Nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre são necessários em maiores quantidades e são denominados de macronutrientes. Os nutrientes requeridos pelas plantas em pequenas quantidades e, por isso, denominados de micronutrientes, são o boro, o cobre, o cloro, o ferro, o manganês, o molibdênio e o zinco;

c) o solo como meio capaz de armazenar e transformar resíduos – Nos últimos anos, tem aumentado o interesse na utilização do solo como meio alternativo para auxiliar no controle da poluição ambiental. Dessa forma, o solo vem sendo utilizado para descarte de resíduos com potencial poluente, como compostos de lixo, lodos de estações de tratamento, efluentes industriais, entre outros. Essa prática tem sido viável devido à capacidade do solo de inativar diversos íons e compostos orgânicos por adsorção, complexação ou precipitação. Os microorganismos do solo podem, também, decompor compostos e resíduos orgânicos e ter ação sobre organismos patogênicos. Assim, considerando a evolução histórica do conceito sobre solo e sua importância dentro da Ciência do Solo, um conceito de solo mais adequado e mais abrangente na atualidade pode ser: *“Solo: corpo natural da superfície terrestre, constituído de materiais minerais e orgânicos resultantes das interações dos fatores de formação (clima, organismos vivos, material de origem e relevo) com o passar do tempo, contendo matéria viva e em parte modificado pela ação humana, capaz de sustentar plantas, de reter água, de armazenar e transformar resíduos e suportar edificações”*.

Conforme Bigarella et al. (1994), junto à superfície, as rochas sofrem a ação contínua dos agentes atmosféricos e biológicos. Nos primeiros estágios da alteração, tem lugar uma fragmentação por meio de processos físicos, bem como pela hidratação dos minerais, além da ação de outros processos químicos mais complexos. A ação conjunta desses processos em si não daria origem a um solo propriamente dito, se não fosse a atividade de organismos como líquens, crustáceos e microorganismos. Torna-se acentuada devido ao desenvolvimento de maior complexidade biológica que afeta cada vez mais o manto de alteração, com o acúmulo de detritos minerais e orgânicos.

Na alteração da rocha, verifica-se a remoção de elementos facilmente solúveis (Cl, S, Ca, Na), os quais são utilizados pelas plantas, ou lixiviados. Ao mesmo tempo, ocorre aumento relativo de minerais menos solúveis (Mg, Si, Fe, e Al) no material fino da parte superior do manto de alteração, onde também aumentam os teores de matéria orgânica.

A maior influência da atividade biológica do solo verifica-se na porção superior do manto que é muito susceptível aos fatores climáticos, os quais determinam o tipo de intemperismo, bem como as condições de vida (biótipo) dos seres envolvidos (biocenose) na formação dos solos, sejam eles microorganismos ou seres mais desenvolvidos (plantas e/ou animais).

Nos estágios iniciais, os líquens crustáceos podem colonizar a superfície da rocha preparada pelas algas e pelos fungos. Contribuem para a desagregação da rocha, tanto física como quimicamente. Dessa forma, incrementam o fornecimento de água na rocha, contribuindo também para a formação de uma cobertura de matéria orgânica morta que favorece a colonização posterior das plantas maiores. As transformações químicas que ocorreram na formação dos minerais de argila fazem com que certas substâncias minerais sejam disponíveis às plantas mais simples, as quais retiram carbono do CO<sub>2</sub> do ar e eliminam uma série complexa de reações. Não existe um solo verdadeiro sem a presença de matéria orgânica.

As plantas, ao morrerem, são parcialmente decompostas para formar húmus, o qual confere coloração escura às camadas superficiais de muitos solos. O húmus contribui para a alimentação das plantas e com a água forma ácidos que percolam no solo para promover mudanças químicas. As bactérias multiplicam-se intensamente com o desenvolvimento do solo, sendo que algumas exercem funções importantes, como a de retirar nitrogênio do ar, fixando-o da forma N, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, fato que ocorre também em processos de simbiose com fungos (micorrizas) e nas raízes de leguminosas. Nos processos de decomposição desses organismos na nitrificação, atuam bactérias especializadas (*Nitrobacter* e *Nitrossomonas*) que transformam o amônio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) em nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), tornando o nitrogênio disponível a uma diversidade maior de organismos vegetais.

As raízes de algumas plantas atingem grandes profundidades facilitando a entrada de ar e a circulação de água no subsolo. Essa ação também é facilitada pelos vermes (minhocas) e outros pequenos animais, os quais auxiliam igualmente as transformações químicas ao passarem grande quantidade de solos pelos seus organismos. A atuação complexa dos fatores físicos, químicos e biológicos, originam o desenvolvimento da estrutura e o arranjo das partículas sólidas do solo. Os produtos do intemperismo, assim como os resíduos orgânicos, especialmente os colóides minerais (argila) e orgânicos (húmus), por meio de processos de agregação que aglomeram as partículas primárias do solo (grãos de silte e areia) originam os agregados do solo. Estes, por sua vez, podem compor estruturas maiores, conhecidas como estruturas do solo (blocos, prisma, colunas, lâminas, etc.). Da ação diferenciada desses fatores ao longo do perfil, resultam os vários horizontes do solo, os quais se tornam mais claramente desenvolvidos e diferenciados em sua morfologia com o decorrer do tempo.

Em decorrência dos fatores acima mencionados, desenvolvem-se muitos tipos distintos de solos, considerando-se o grande número de minerais e rochas, bem como as condições variadas de intemperização. Provavelmente não existem dois solos de regiões razoavelmente separadas que sejam iguais, causando assim a enorme heterogeneidade dos atributos do solo.

## 2.2 O Cerrado Brasileiro

É a segunda maior formação vegetal brasileira. Estendia-se originalmente por uma área de 2 milhões de km<sup>2</sup>, abrangendo dez estados do Brasil Central. Hoje, restam apenas 20% desse total. Típico de regiões tropicais, o cerrado apresenta duas estações bem marcadas: inverno seco e verão chuvoso. Com solo de savana tropical, deficiente em nutrientes e rico em ferro e alumínio, abriga plantas de aparência seca, entre arbustos esparsos e gramíneas, e o cerradão, um tipo mais denso de vegetação, de formação florestal. A presença de três das maiores bacias hidrográficas da América do Sul (Tocantins-Araguaia, São Francisco e Prata) na região favorece sua biodiversidade.

Estima-se que 10 mil espécies de vegetais, 837 de aves e 161 de mamíferos vivam ali. Essa riqueza biológica, porém, é seriamente afetada pela caça e pelo comércio ilegal. O cerrado é o sistema ambiental brasileiro que mais sofreu alteração com a ocupação humana. Atualmente, vivem ali cerca de 20 milhões de pessoas. Essa população é majoritariamente urbana e enfrenta problemas como desemprego, falta de habitação e poluição, entre outros. A atividade garimpeira, por exemplo, intensa na região, contaminou os rios de mercúrio e contribuiu para seu assoreamento. A mineração favoreceu o desgaste e a erosão dos solos. Na economia, também se destaca a agricultura mecanizada de soja, milho e algodão, que começa a se expandir principalmente a partir da década de 80. Nos últimos 30 anos, a pecuária extensiva, as monoculturas e a abertura de estradas destruíram boa parte do cerrado. Hoje, menos de 2% está protegido em parques ou reservas.

Pequenas árvores de troncos torcidos e recurvados e de folhas grossas, esparsas em meio a uma vegetação rala e rasteira, misturando-se, às vezes, com campos limpos ou matas de árvores não muito altas – esses são os Cerrados, uma extensa área de cerca de 200 milhões de hectares, equivalente, em tamanho, a toda a Europa Ocidental. A paisagem é agressiva, e por isso, durante muito tempo, foi considerada uma área perdida para a economia do país.

Entre as espécies vegetais que caracterizam o Cerrado estão o barbatimão, o pau-santo, a gabioba, o pequi, o araçá, a sucupira, o pau-terra, a catuaba e o indaiá. Debaixo dessas

---

árvores crescem diferentes tipos de capim, como o capim-flecha, que pode atingir uma altura de 2,5m. Onde corre um rio ou córrego, encontram-se as matas ciliares, ou matas de galeria, que são densas florestas estreitas, de árvores maiores, que margeiam os cursos d'água. Nos brejos, próximos às nascentes de água, o buriti domina a paisagem e forma as veredas de buriti.

Os Cerrados apresentam relevos variados, embora predominem os amplos planaltos. Metade do Cerrado situa-se entre 300 e 600m acima do nível do mar, e apenas 5,5% atingem uma altitude acima de 900m. Em pelo menos 2/3 da região o inverno é demarcado por um período de seca que se prolonga por cinco a seis meses. Seu solo esconde um grande manancial de água, que alimenta seus rios. A presença humana na região data de pelo menos 12 mil anos, com o aparecimento de grupos de caçadores e coletores de frutos e outros alimentos naturais. Só recentemente, há cerca de 40 anos, é que começou a ser mais densamente povoada. Na Figura 1 pode ser observado a localização no território brasileiro de todo o Cerrado (HUNGRIA et al., 2008).

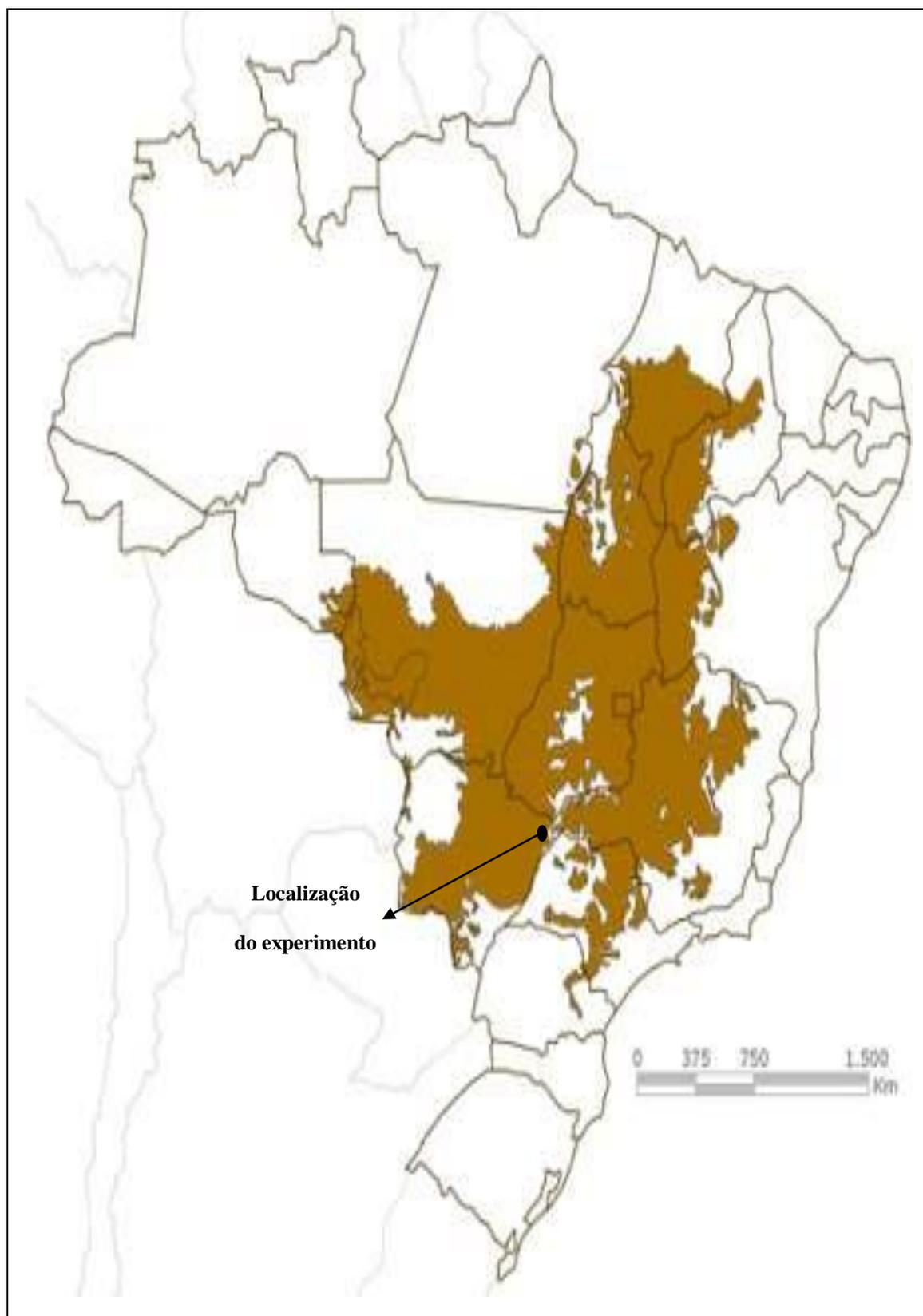


Figura 1. Localização do Cerrado no território Brasileiro

### 2.3 Aspectos gerais da cultura da soja

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) que hoje é cultivada em todo o mundo, é muito diferente dos ancestrais que lhe deram origem: espécies de plantas rasteiras que se desenvolviam na costa leste da Ásia, principalmente ao longo do Rio Amarelo, na China. Sua evolução começou com o aparecimento de plantas oriundas de cruzamentos naturais, entre duas espécies de soja selvagem, que foram domesticadas e melhoradas por cientistas da antiga China. Sua importância na dieta alimentar da antiga civilização chinesa era tal, que a soja, juntamente com o trigo, o arroz, o centeio e o milheto, era considerada um grão sagrado, com direito a cerimoniais ritualísticos na época da sementeira e da colheita (EMBRAPA, 2010).

Apesar de conhecida e explorada no Oriente há mais de cinco mil anos (é reconhecida como uma das mais antigas plantas cultivadas do Planeta), o Ocidente ignorou o seu cultivo até a segunda década do século vinte, quando os Estados Unidos (EUA) iniciaram sua exploração comercial (primeiro como forrageira e, posteriormente, como grão). Em 1940, no auge do seu cultivo como forrageira, foram cultivados, nesse país, cerca de dois milhões de hectares com tal propósito (EMBRAPA, 2010).

A partir de 1941, a área cultivada para grãos superou a para forragem, cujo cultivo declinou rapidamente, até desaparecer em meados dos anos 60, enquanto a área cultivada para a produção de grãos crescia de forma exponencial, não apenas nos EUA, como também no Brasil e na Argentina (EMBRAPA, 2010). Em 2003, o Brasil figura como o segundo produtor mundial, responsável por 52, das 194 milhões de toneladas produzidas em nível global ou 26,8% da safra mundial.

#### **Introdução no Brasil**

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 introduzidas 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). Assim como nos EUA, a soja no Brasil dessa época era estudada mais como cultura forrageira - eventualmente também produzindo grãos para consumo de animais da propriedade - do que como planta produtora de grãos para a indústria de farelos e óleos vegetais (EMBRAPA, 2010).

Em 1900 e 1901, o Instituto Agrônomo de Campinas, SP, promoveu a primeira distribuição de sementes de soja para produtores paulistas e, nessa mesma data, têm-se registro do primeiro cultivo 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 (sul dos EUA) dos materiais genéticos existentes no País, com as condições climáticas predominantes no extremo sul do Brasil (EMBRAPA, 2010).

Com o estabelecimento do programa oficial de incentivo à triticultura nacional, em meados dos anos 50, a cultura da soja foi igualmente incentivada, por ser, desde o ponto de vista técnico (leguminosa sucedendo gramínea), quanto econômico (melhor aproveitamento da terra, das máquinas/implementos, da infra-estrutura e da mão de obra), a melhor alternativa de verão para suceder o trigo cultivado no inverno (EMBRAPA, 2010).

### **Produção**

O primeiro registro de cultivo de soja no Brasil data de 1914 no município de Santa Rosa, RS. Mas foi somente a partir dos anos 40 que ela adquiriu alguma importância econômica, merecendo o primeiro registro estatístico nacional em 1941, no Anuário Agrícola do RS: área cultivada de 640 ha, produção de 450t e rendimento de 700 kg/ha. Nesse mesmo ano instalou-se a primeira indústria processadora de soja do País (Santa Rosa, RS) e, em 1949, com produção de 25.000t, o Brasil figurou pela primeira vez, como produtor de soja nas estatísticas internacionais (EMBRAPA, 2010).

Mas foi a partir da década de 1960, impulsionada pela política de subsídios ao trigo, visando auto-suficiência, que a soja se estabeleceu como cultura economicamente importante para o Brasil. Nessa década, a sua produção multiplicou-se por cinco (passou de 206 mil toneladas, em 1960, para 1,056 milhão de toneladas, em 1969) e 98% desse volume era produzido nos três estados da Região Sul, onde prevaleceu a dobradinha, trigo no inverno e soja no verão. Apesar do significativo crescimento da produção no correr dos anos 60, foi na década seguinte que a soja se consolidou como a principal cultura do agronegócio brasileiro, passando de 1,5 milhões de toneladas (1970) para mais de 15 milhões de toneladas (1979). Esse crescimento se deveu, não apenas ao aumento da área cultivada (1,3 para 8,8 milhões de hectares), mas, também, ao expressivo incremento da produtividade (1,14 para 1,73t/ha) graças às novas tecnologias disponibilizadas aos produtores pela pesquisa brasileira. Mais de

80% do volume produzido na época ainda se concentrava nos três estados da Região Sul do Brasil (EMBRAPA, 2010).

Nas décadas de 1980 e 1990 repetiu-se, na região tropical do Brasil, o explosivo crescimento da produção ocorrido nas duas décadas anteriores na Região Sul. Em 1970, menos de 2% da produção nacional de soja era colhida no centro-oeste. Em 1980, esse percentual passou para 20%, em 1990 já era superior a 40% e em 2003 está próximo dos 60%, com tendências a ocupar maior espaço a cada nova safra. Essa transformação promoveu o Estado do Mato Grosso, de produtor marginal a líder nacional de produção e de produtividade de soja, com boas perspectivas de consolidar-se nessa posição. A soja foi a única cultura a ter um crescimento expressivo na sua área cultivada ao longo das últimas três décadas (EMBRAPA, 2010).

### **Causas da Expansão**

Muitos fatores contribuíram para que a soja se estabelecesse como uma importante cultura, primeiro no sul do Brasil (anos 60 e 70) e, posteriormente, nos Cerrados do Brasil Central (anos 80 e 90). Alguns desses fatores são comuns a ambas as regiões, outros não. Dentre aqueles que contribuíram para seu rápido estabelecimento na Região Sul, pode-se destacar:

- \* semelhança do ecossistema do sul do Brasil com aquele predominante no sul dos EUA, favorecendo o êxito na transferência e adoção de variedades e outras tecnologias de produção;
- \* estabelecimento da “Operação Tatu” no RS, em meados dos anos 60, cujo programa promoveu a calagem e a correção da fertilidade dos solos, favorecendo o cultivo da soja naquele estado, então o grande produtor nacional da oleaginosa;
- \* incentivos fiscais disponibilizados aos produtores de trigo nos anos 50, 60 e 70 beneficiaram igualmente a cultura da soja, que utiliza, no verão, a mesma área, mão de obra e maquinaria do trigo cultivado no inverno;
- \* mercado internacional em alta, principalmente em meados dos anos 70, em resposta à frustração da safra de grãos na Rússia e China, assim como da pesca da anchova no Peru, cuja farinha era amplamente utilizada como componente proteico na fabricação de rações para animais, para o que os fabricantes do produto passaram a utilizar-se do farelo de soja;

- 
- \* substituição das gorduras animais (banha e manteiga) por óleos vegetais, mais saudáveis ao consumo humano;
  - \* estabelecimento de um importante parque industrial de processamento de soja, de máquinas e de insumos agrícolas, em contrapartida aos incentivos fiscais do governo, disponibilizados tanto para o incremento da produção, quanto para o estabelecimento de agro-indústrias;
  - \* facilidades de mecanização total da cultura;
  - \* surgimento de um sistema cooperativista dinâmico e eficiente, que apoiou fortemente a produção, a industrialização e a comercialização das safras;
  - \* estabelecimento de uma bem articulada rede de pesquisa de soja envolvendo os poderes públicos federal e estadual, apoiada financeiramente pela indústria privada (Swift, Anderson Clayton, Samrig, etc.); e
  - \* melhorias nos sistemas viário, portuário e de comunicações, facilitando e agilizando o transporte e as exportações.

Com relação à região central do Brasil, considerada a nova e principal fronteira da soja, podemos destacar as seguintes causas para explicar o espetacular crescimento da sua produção:

- \* construção de Brasília na região, determinando uma série de melhorias na infra-estrutura regional, principalmente vias de acesso, comunicações e urbanização;
- \* incentivos fiscais disponibilizados para a abertura de novas áreas de produção agrícola, assim como para a aquisição de máquinas e construção de silos e armazéns;
- \* estabelecimento de agro-indústrias na região, estimuladas pelos mesmos incentivos fiscais disponibilizados para a ampliação da fronteira agrícola;
- \* baixo valor da terra na região, comparado ao da Região Sul, nas décadas de 1960/70/80;
- \* desenvolvimento de um bem sucedido pacote tecnológico para a produção de soja na região, com destaque para as novas cultivares adaptadas à condição de baixa latitude da região;

- \* topografia altamente favorável à mecanização, favorecendo o uso de máquinas e equipamentos de grande porte, o que propicia economia de mão de obra e maior rendimento nas operações de preparo do solo, tratamentos culturais e colheita;
- \* boas condições físicas dos solos da região, facilitando as operações da maquinaria agrícola e compensando, parcialmente, as desfavoráveis características químicas desses solos;
- \* melhorias no sistema de transporte da produção regional, com o estabelecimento de corredores de exportação, utilizando articuladamente rodovias, ferrovias e hidrovias;
- \* bom nível econômico e tecnológico dos produtores de soja da região, oriundos, em sua maioria, da Região Sul, onde cultivavam soja com sucesso previamente à sua fixação na região tropical; e
- \* regime pluviométrico da região altamente favorável aos cultivos de verão, em contraste com os freqüentes veranicos ocorrentes na Região Sul, destacadamente no RS (EMBRAPA, 2010).

### **Impactos**

A revolução socioeconômica e tecnológica protagonizada pela soja no Brasil Moderno pode ser comparada ao fenômeno ocorrido com a cana de açúcar, no Brasil Colônia e com o café, no Brasil Império/República, que, em épocas diferentes, comandou o comércio exterior do País. A soja responde (2003) por uma receita cambial direta para o Brasil de mais de sete bilhões de dólares anuais (superior a 11% do total das receitas cambiais brasileiras) e cinco vezes esse valor, se considerados os benefícios que gera ao longo da sua extensa cadeia produtiva (EMBRAPA, 2010).

Abrindo fronteiras e semeando cidades, a soja liderou a implantação de uma nova civilização no Brasil Central, levando o progresso e o desenvolvimento para uma região despovoada e desvalorizada, fazendo brotar cidades no vazio dos Cerrados e transformando os pequenos conglomerados urbanos existentes, em metrópoles (EMBRAPA, 2010).

O explosivo crescimento da produção de soja no Brasil, de quase 260 vezes no transcorrer de apenas quatro décadas, determinou uma cadeia de mudanças sem precedentes na história do País. Foi a soja, inicialmente auxiliada pelo trigo, a grande responsável pelo

surgimento da agricultura comercial no Brasil. Também, ela apoiou ou foi a grande responsável pela aceleração da mecanização das lavouras brasileiras, pela modernização do sistema de transportes, pela expansão da fronteira agrícola, pela profissionalização e pelo incremento do comércio internacional, pela modificação e pelo enriquecimento da dieta alimentar dos brasileiros, pela aceleração da urbanização do País, pela interiorização da população brasileira (excessivamente concentrada no sul, sudeste e litoral do Norte e Nordeste), pela tecnificação de outras culturas (destacadamente a do milho), bem como impulsionou e interiorizou a agro-indústria nacional, patrocinando a expansão da avicultura e da suinocultura brasileiras (EMBRAPA, 2010).

### **Perspectivas**

Embora as estimativas que se faz do futuro, tomando como referência as tendências dos cenários presentes, dificilmente se realizarão com a precisão prospectada, suas indicações são úteis, mesmo quando os novos cenários não apresentam aderência total com os projetados. Em realizando uma análise prospectiva sobre o dinâmico agronegócio da soja brasileira e tomando como referência a realidade atual, parece pertinente afirmar que:

- \* crescerá o consumo e conseqüentemente a demanda por soja no mundo, pois a população humana continuará aumentando;
- \* o poder aquisitivo dessa população continuará incrementando-se, destacadamente na Ásia, onde está o maior potencial de consumo da oleaginosa;
- \* o temor da doença da vaca louca manterá em alta o consumo de carne suína e de frango, cuja alimentação é feita com rações à base de farelo de soja, cuja demanda crescerá, também em razão da proibição, na Europa, do uso de farinha de carne nas rações para bovinos;
- \* os usos industriais não tradicionais da soja, como biodiesel, tintas, vernizes, entre outros, aumentarão a demanda do produto;
- \* o consumo interno de soja deverá crescer, estimulado por políticas oficiais destinadas a aproveitar o enorme potencial produtivo do País, que está excessivamente dependente do mercado externo;

- \* o protecionismo e os subsídios à soja, patrocinados pelos países ricos, tenderão a diminuir pela lógica e pressão dos mercados e da Organização Mundial do Comércio, aumentando, conseqüentemente, os preços internacionais, que estimularão a produção e as exportações brasileiras;
- \* a produção dos nossos principais concorrentes (EUA, Argentina, Índia e China) tenderá a estabilizar-se por falta de áreas disponíveis para expansão em seus territórios;
- \* a cadeia produtiva da soja brasileira tenderá a desonerar-se dos pesados tributos sobre ela incidentes, para incrementar a sua competitividade no mercado externo, de vez que o País precisa “exportar ou morrer”; e
- \* pode-se estimar, também, pelas tendências do quadro atual da agricultura brasileira, que a produção da oleaginosa no País se concentrará cada vez mais nas grandes propriedades do centro-oeste, em detrimento das pequenas e médias propriedades da Região Sul, cujos proprietários, por falta de competitividade na produção de grãos, tenderão migrar para atividades agrícolas mais rentáveis (produção de leite, criação de suínos e de aves, cultivo de frutas e de hortaliças, ecoturismo, entre outros), porque são mais intensivas no uso de mão de obra, “mercadoria” geralmente abundante em pequenas propriedades familiares, onde o recurso escasso é a terra (EMBRAPA, 2010).

Feitas essas considerações, parece racional acreditar positivamente no futuro da produção brasileira de soja, de vez que, dentre os grandes produtores mundiais da oleaginosa, o Brasil figura como o país que apresenta as melhores condições para expandir a produção e prover o esperado aumento da demanda mundial. Este País possui, apenas no ecossistema dos Cerrados, mais de 50 milhões de hectares de terras ainda virgens e aptas para a sua imediata incorporação ao processo produtivo da soja. Com exceção, talvez, da Argentina, que ainda poderá crescer até um máximo de dez milhões de hectares, a área cultivada com soja nos EUA, na China e na Índia, que juntos com o Brasil produzem mais de 90% da soja mundial, só crescerá se diminuírem as áreas de outros cultivos. Sua fronteira agrícola está quase ou totalmente esgotada (EMBRAPA, 2010).

Em última análise, o futuro da soja brasileira dependerá da sua competitividade no mercado global, para o que precisará, além do empenho do produtor, o apoio governamental, destacadamente na abertura e na integração de novas e mais baratas vias de escoamento da

produção. Iniciativas nesse sentido já estão sendo tomadas com a implementação dos Corredores de Exportação Noroeste, Centro-Norte, Cuiabá-Santarém e Paraná-Paraguai, integrando rodovias, ferrovias e hidrovias aos sistemas de transporte da produção agrícola nacional. Esse esforço do governo é indispensável para que o País possa reduzir a importância desse item na composição dos custos totais da tonelada de produto brasileiro que chega aos mercados internacionais (EMBRAPA, 2010).

O custo médio do transporte rodoviário é muito mais alto que o ferroviário e este mais alto que o hidroviário. Apenas para ilustrar, 16% da soja americana é transportada por rodovias, contra 67% da brasileira. Em contrapartida, 61% da soja americana viaja por hidrovias, contra 5% da brasileira. Mesmo assim, o Brasil não precisa ter medo de competir. Já alcançou a produtividade americana e tem condições de alcançá-los, também, na produção. Estima-se que, antes de terminar a presente década, o Brasil figurará como líder mundial na produção dessa leguminosa. Só precisará de tratamento equânime, o que implica na eliminação dos subsídios e do protecionismo, práticas abusivas que distorcem o livre comércio, enfaticamente condenadas por quem, cinicamente, mais as pratica: os países ricos (EMBRAPA, 2010).

### **Pesquisa**

O crescimento da produção e o aumento da capacidade competitiva da soja brasileira sempre estiveram associados aos avanços científicos e à disponibilização de tecnologias ao setor produtivo. Até o final dos anos 60, a pesquisa com a cultura da soja no Brasil era incipiente e se concentrava na Região Sul do País, atuando, fundamentalmente, na adaptação de tecnologias (variedades, principalmente) introduzidas dos EUA. O primeiro programa consistente de pesquisa com a soja estabeleceu-se na década de 1950, no Instituto Agrônomo de Campinas, SP. Mas foi no RS, uma década mais tarde, que a cultura encontrou condições para se estabelecer e expandir como lavoura comercial, para o que foi fundamental a boa adaptação que as cultivares introduzidas dos EUA tiveram para as condições do sul do Brasil (EMBRAPA, 2010).

O rápido desenvolvimento do cultivo da soja no País, a partir dos anos 60, fez surgir um novo e agressivo setor produtivo, altamente demandante por tecnologias que a pesquisa ainda não estava estruturada para oferecer na quantidade e qualidade desejadas. Conseqüentemente, os poucos programas de pesquisa com soja existentes na região foram

fortalecidos e novos núcleos de pesquisa foram criados no sudeste e centro oeste, principalmente (EMBRAPA, 2010).

De todas as iniciativas para incrementar e fortalecer a pesquisa com soja no País, implementadas a partir dessa época, merece destaque a criação da Embrapa Soja em 1975, que patrocinaria, já a partir do ano seguinte, a instituição do Programa Nacional de Pesquisa de Soja, cujo propósito foi o de integrar e potencializar os isolados esforços de pesquisa com a cultura espalhados pelo sul e sudeste (EMBRAPA, 2010).

Além do programa de pesquisa da Embrapa Soja, localizado no Paraná, outros programas de pesquisa com a cultura estabeleceram-se nessa mesma década pelo Brasil afora: Universidade Federal de Viçosa e Epamig, em Minas Gerais; Emgopa, em Goiás; Embrapa Cerrados, no Distrito Federal; Coodetec, Indusem e FT-Sementes, no Paraná; Fundacep, no RS, e Embrapa Agropecuária Oeste e Empaer, no Mato Grosso do Sul. Além de novos programas oficiais, programas já existentes na Embrapa Trigo e Secretaria da Agricultura, no RS e IAC, em SP, foram fortalecidos. Com o advento da Lei de Proteção de Cultivares, em 1997, novos programas de pesquisa privados estabeleceram-se no País, dentre os quais merecem destaque os da Monsoy, Fundação Mato Grosso, Fundação Chapadão, Syngenta, Pioneer e Milênia (EMBRAPA, 2010).

Até 1970, a preocupação maior dos programas de pesquisa de soja brasileiros era com a produtividade. Com menor ênfase, também buscavam a altura adequada da planta para a colheita mecânica, a resistência ao acamamento e resistência à deiscência das vagens. Os problemas fitossanitários não preocupavam muito os pesquisadores da época. Foi somente a partir dos anos 80 que resistência a doenças como a Pústula Bacteriana, o Fogo Selvagem e a Mancha Olho-de-Rã passaram a se constituir em características necessárias para a recomendação de uma nova cultivar. Posteriormente, problemas fitossanitários maiores surgiram, como o Cancro da Haste, o Nematóide de Cisto e o Oídio, ampliando a lista de exigências para a recomendação de novas cultivares (EMBRAPA, 2010).

É conquista da pesquisa brasileira o desenvolvimento de cultivares adaptadas às baixas latitudes dos climas tropicais. Até 1970, os cultivos comerciais de soja no mundo restringiam-se a regiões de climas temperados e subtropicais, cujas latitudes estavam próximas ou superiores aos 30°. Os pesquisadores brasileiros conseguiram romper essa barreira, desenvolvendo germoplasma adaptado às condições tropicais e viabilizando o seu cultivo em

qualquer ponto do território nacional e transformando, somente no Ecossistema do Cerrado, mais de 200 milhões de hectares improdutivos em área potencial para o cultivo da soja e de outros grãos. A Embrapa Soja tem tido participação decisiva no avanço da cultura rumo às regiões tropicais, em função do modelo de parcerias - principalmente com associações de produtores de sementes - utilizado em seu programa de melhoramento genético. Esses parceiros incrementaram enormemente a capacidade de desenvolvimento de novas cultivares da Embrapa, Brasil afora, dando sustentação financeira e, conseqüentemente, agilizando o processo. Fruto desse modelo, as “cultivares Embrapa” respondem por mais de 50% do mercado nacional de sementes de soja. A oferta de cultivares foi acompanhada pela incorporação, tanto nas “velhas” quanto nas novas cultivares, de resistência às principais doenças que atacam a cultura no País (EMBRAPA, 2010).

O desenvolvimento de técnicas de manejo integrado de invasoras e de pragas possibilitaram redução sensível na quantidade de pesticidas utilizados no seu controle. Estudos sobre a nutrição da soja possibilitaram melhor manejo da adubação e da calagem e a seleção de estirpes eficientes de *Bradyrhizobium* spp, enriqueceram os inoculantes, substituindo completamente a adubação nitrogenada. Pesquisas com micronutrientes indicaram a necessidade de sua utilização, particularmente nos Cerrados, para obter-se máximos rendimentos, assim como, trabalhos sobre manejo de solos e rotação de culturas, resultaram na substituição quase total da semeadura convencional pela direta, com reflexos positivos na sustentabilidade dos sistemas produtivos (EMBRAPA, 2010).

O zoneamento agroclimático desenvolvido pela Embrapa Soja permitiu indicar as áreas mais aptas para a produção de soja no País, onde, produzir sementes de qualidade sempre foi um desafio, superado com tecnologias como o Diagnóstico Completo (Diacom), evoluindo princípios de vigor e patologia de sementes (EMBRAPA, 2010).

A caracterização dos principais fatores responsáveis por perdas no processo de colheita e a conscientização dos produtores sobre o volume dessas perdas e suas causas, possibilitaram a sua redução média de, aproximadamente, quatro para dois sacos/ha. Estudos sobre características nutricionais da soja têm promovido a sua incorporação à dieta alimentar da população brasileira (EMBRAPA, 2010).

No Brasil, a soja responde por 94,5% das oleaginosas cultivadas, constituindo-se numa das mais tecnificadas culturas, e também o principal produto agrícola de exportação. Nos

últimos anos ocorreu um aumento considerável da sua área cultivada, inclusive com a abertura de novas fronteiras agrícolas, como é o caso do Cerrado e da Amazônia. Por outro lado, a sua crescente utilização, na recuperação do solo degradado, por meio do seu emprego na rotação de culturas com a pastagem, atualmente designado com integração agricultura-pecuária, constitui-se numa excelente alternativa para o uso agrícola, sobretudo por explorar o desejado aspecto da capacidade de fixação simbiótica do nitrogênio atmosférico. O grão da soja constitui-se numa excelente fonte de proteína e óleo vegetal, atendendo satisfatoriamente as exigências alimentares humanas e animais. Atualmente, dos pontos de vista alimentar e econômico, é a mais importante oleaginosa cultivada no mundo (ROSA FILHO, 2008).

Com a área a ser plantada estimada em 24 milhões de hectares, 2,6% (610 mil hectares) superior à da safra 2009/10, a previsão para a produção de soja no País indica um volume de 69 milhões de toneladas. O atraso do início das chuvas influenciado pelo fenômeno La Niña, atrasou o plantio, principalmente nos Estados da região Centro-Oeste. Em Mato Grosso, mais precisamente na região Centro-Norte, onde o plantio tem início logo após o término do vazio sanitário, ou seja, a partir de 15 de setembro, a semeadura só iniciou a se normalizar em meados do mês de outubro. O plantio no Estado do Paraná, também sofreu atrasos, mas com menos intensidade. As chuvas iniciaram-se logo nos primeiros dias de outubro, permitindo o início do plantio. No final de novembro, praticamente em todos os Estados, o percentual plantado se situava igual ou até superior ao mesmo período da safra anterior. Nos Estados da região Nordeste (oeste da Bahia, sul do Maranhão e sul do Piauí), as chuvas começaram mais cedo, permitindo a antecipação do plantio. As perspectivas de boas condições meteorológicas nesta safra, aliadas aos bons preços, propiciam otimismo aos produtores que estão ampliando a área de plantio. A expansão da área na região é de 3,6%, passando para 1,9 milhões de hectares, com maior destaque para o Estado do Piauí com crescimento de 9,9%, para uma área de 377 mil hectares. O Estado da Bahia que detém a maior área da região, 1,0 milhão de hectares, apresenta crescimento de 0,7%.

A Conab estima que a produção nacional de soja para a temporada 2010/11, deve situar-se ligeiramente abaixo da temporada 2009/10. Os preços médios no mercado internacional seguem a trajetória de alta iniciada na última semana de agosto, sustentados pelo aumento da demanda externa, em particular, da China. Diante dos atuais patamares dos preços externos, a comercialização antecipada da safra 2010/11, vem atingindo níveis recordes. Até dezembro de 2010, foram comercializadas cerca de 33% da produção nacional, frente aos 18% de igual período do ano anterior. Assim, para uma safra brasileira estimada em 68 milhões de toneladas equivale a 22 milhões de toneladas. O Estado do Mato Grosso já

comercializou aproximadamente 51% da sua produção estimada para a safra 2010/11, em 20 milhões de toneladas frente aos 42% em igual período do ano anterior (CONAB, 2010).

A cultura da soja teve um grande desenvolvimento nas últimas três décadas no Brasil, sendo uma das principais fontes de exportação agrícola, responsável pelo superávit da balança comercial do país. O crescimento de sua produção, com implicação direta no aumento de sua capacidade competitiva comercial, está associado aos avanços científicos e à disponibilidade de elevados níveis tecnológicos (MERCANTE, 2003).

O levantamento da variabilidade espacial da produção das culturas pode ser entendido como uma etapa fundamental do gerenciamento da produção por meio de técnicas de agricultura de precisão. Embora existam inúmeras possibilidades para se tratar as áreas produtivas de acordo com suas limitações, somente com o conhecimento da variabilidade da produção é possível determinar quais práticas agrícolas utilizadas são eficazes para elevar tal produção, com a redução dos custos. As informações obtidas por meio do mapeamento da produtividade podem ser utilizadas para uma série de análises e interferências na área. Por meio da coleção de mapas de produtividade é possível identificar como a variabilidade ocorre em termos de distribuição espacial, temporal e em termos quantitativos (ROSA FILHO et al., 2009; ANDREOTTI et al., 2010). Estudar a variabilidade espacial da produtividade da soja correlacionados com atributos do solo e folhas data desde décadas passadas, como Vieira et al. (2010) que estudaram a produtividade da soja nos anos de 1986 e 1988 correlacionados com atributos químicos de tecido foliar, que encontraram dependência espacial para os atributos pesquisados, originando assim, mapas de krigagem, advindos de um semivariograma escalonado com objetivo de promover adubação a taxa variada e localizada, gerando dessa forma, maior produtividade das culturas, com redução de gastos com insumos.

#### **2.4 Sistemas de preparo do solo utilizados para a cultura da soja**

No Brasil, os sistemas de preparo do solo para o estabelecimento da cultura da soja são o convencional, o preparo reduzido e o plantio direto. Atualmente, o sistema mais utilizado ainda é o convencional, caracterizado pela excessiva mobilização do solo, acarretando muitas vezes numa elevada erosão. Diante do aumento da fronteira agrícola nacional na última década, caracterizada pelo cultivo dos solos do Cerrado Brasileiro, o preparo convencional vem perdendo área de cultivo, em benefício do sistema plantio direto, caracterizado por apresentar menores taxas de erosão do solo.

Para a referida cultura, deve ser considerado também o clima da região para a definição da melhor época de semeadura, bem como as condições de solo necessárias para

permitirem a adequada deposição das sementes e adubos, e que proporcionem melhor emergência e desenvolvimento das plantas, resultando em maiores produtividades, dentre outros fatores (EMBRAPA, 2001). Apesar de o potencial genético de uma planta ser limitado, o seu comportamento de desenvolvimento está diretamente relacionado com o meio em que se desenvolve e, portanto, é de se esperar que diferentes condicionamentos do solo, impostos pelos mais variados sistemas e métodos de seu preparo, tendam a modificar as condições de desenvolvimento das culturas.

A escolha de um determinado sistema de preparo do solo deve levar em consideração as respostas ao aumento das produtividades das culturas agrônômicas que, sobretudo, visem à diminuição das perdas por erosão, proporcionem o controle das plantas daninhas, aumentem a capacidade de retenção e a movimentação de água e recuperem suas propriedades físicas, químicas e biológicas (HENKLAIN, 1997). Neste sentido, Siqueira (1999) relatou que a principal exigência para o bom desenvolvimento de uma cultura agrônômica é a existência de um solo com ótimas condições físicas, ou seja, com boa estruturação. Esta condição, quando obtida, fornece uma distribuição adequada da porosidade, otimizando a disponibilidade de água, nutrientes e as trocas gasosas às plantas.

O uso inadequado de equipamentos de preparo do solo e as severas práticas de manejo adotadas pelos agricultores são os principais fatores da sua degradação. Dependendo do grau de alteração das propriedades físicas, podem ser produzidas condições de extrema limitação ao desenvolvimento das culturas e, conseqüentemente, implicar no decréscimo da produtividade agrícola. Formas alternativas de manejo do solo, que empregam uma mínima mobilização, ou à sua ausência total, que mantêm quantidades consideráveis de resíduos vegetais na superfície e que favorecem a sua conservação, vêm se destacando no Brasil (SILVA, 2000).

#### **2.4.1 Sistema plantio direto**

O manejo do solo consiste num conjunto de operações realizadas com objetivos de propiciar condições favoráveis à sementeira, ao desenvolvimento e à produção das plantas cultivadas, por tempo ilimitado. Para que esses objetivos sejam atingidos, é imprescindível a adoção de diversas práticas, dando-se prioridade ao uso do sistema plantio direto, visto que envolve, simultaneamente, todas as boas práticas conservacionistas. Alternativamente justificado, poderão ser utilizadas práticas racionais de preparo do solo. Trata-se de 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.

### **Requisitos para a implantação**

Para a implantação do Sistema Plantio Direto (SPD) é necessário que sejam atendidos alguns requisitos relativos aos recursos humanos, técnicos e de infra-estrutura, como os listados a seguir.

### **Conscientização**

O sistema de produção de soja na região central do Brasil, algumas vezes ainda, tem como forma de preparo do solo o uso continuado de grades de discos, com várias operações anuais. Como resultado, ocorre degradação de sua estrutura, com formação de camadas compactadas, encrostamento superficial e perdas por erosão.

O SPD pode ser a melhor opção para diminuir a maioria dos problemas antes apontados, pois, o uso contínuo das tecnologias que compõem o SPD, proporcionam efeitos significativos na conservação e na melhoria do solo, da água, no aproveitamento dos recursos e insumos como os fertilizantes, na redução dos custos de produção, na estabilidade de produção e nas condições de vida do produtor rural e da sociedade.

Para que esses benefícios aconteçam, tanto os agricultores, como a assistência técnica, devem estar predispostos a mudanças, conscientes de que o sistema é importante para alcançar êxito e sustentabilidade na atividade agrícola.

### **Levantamento dos recursos**

O conhecimento detalhado da propriedade agrícola é essencial para obtenção de sucesso no SPD. Para tanto, é necessário o levantamento dos seguintes recursos:

*Solos:* Coletar e organizar informações referentes ao tipo de solo, à fertilidade, à presença de camadas compactadas, à distribuição e espécies de plantas daninhas, à topografia, à ocorrência de erosão, às práticas conservacionistas existentes, às vias de acesso, à drenagem, aos córregos, aos açudes, etc.

*Plantas daninhas:* O levantamento e o mapeamento da ocorrência de plantas daninhas será muito útil, para definir o herbicida a ser utilizado e a programação das aplicações dos mesmos.

*Máquinas e equipamentos:* No SPD, é essencial a existência de pulverizador de herbicidas devidamente equipado com bicos adequados para as diferentes condições e

controladores de pressão. O uso de equipamentos de avaliação das condições climáticas é também muito útil nesse caso. Quanto às semeadoras, existem disponíveis no mercado vários modelos específicos para o SPD. No entanto, na fase inicial de implantação do sistema, podem-se utilizar semeadoras tradicionais com adaptações, fazendo com que os agricultores reduzam as despesas.

*Humanos:* Para a execução do SPD, a mão-de-obra deverá estar conscientizada dos princípios do sistema e adequadamente informada quanto ao uso das tecnologias que o compõem. São necessários treinamentos, especialmente para os operadores de máquinas, quanto ao uso de semeadoras e pulverizadores e tecnologia de aplicação (características de bicos, horário de aplicação, etc.) de defensivos, além de conhecimentos sobre plantas daninhas e herbicidas. O treinamento da mão-de-obra deve ser planejado de forma que, no momento de realizar as operações, haja conhecimento suficiente para realizar as ações de forma adequada. A participação do produtor e da assistência técnica em associações ou grupos de troca de informações e experiências como Grupo de Plantio Direto, Clube Amigos da Terra, etc, são importantes para facilitar e impulsionar a adoção do SPD (EMBRAPA, 2010). O manuseio de tais informações deve gerar mapas e/ou planilhas de uso e da situação atual da propriedade, a serem utilizados como base, para o planejamento das atividades a serem implementadas.

### **Planejamento**

Em qualquer atividade, o planejamento é fator importante para reduzir erros e riscos e aumentar as chances de sucesso. São etapas do planejamento: a) análise dos resultados e produtos do levantamento dos recursos humanos e materiais; b) elaboração e interpretação de mapas, croquis e esquemas de trabalho; c) divisão da fazenda em glebas e a seleção cronológica das mesmas para adoção do SPD, tendo a rotação de culturas como tecnologia essencial. Para isso, deve-se dividir a propriedade em glebas ou talhões, tomando como base as informações obtidas nos levantamentos, principalmente de fertilidade, topografia, vias de acesso, etc. Não existem padrões estabelecidos de tamanho das áreas, devendo o critério técnico prevalecer nessa decisão. É importante, ao adotar o SPD, fazê-lo apenas em parte da propriedade, iniciando pelas melhores glebas, para familiarizar-se com as novas tecnologias e elevar as chances de sucesso. Incluir novas glebas de forma gradual, até abranger o total da propriedade, mesmo que vários anos sejam necessários; e d) elaboração de cronograma de ações, onde devem ser organizadas, para cada gleba, as ações para correções de acidez e

fertilidade, operações de incorporação de adubos e corretivos, descompactação, pulverizações, manejo de coberturas vegetais, semeadura, sucessão de culturas, etc.

O cultivo da soja em SPD, em áreas de campo bruto, com correções superficiais e sem incorporação, embora haja alguns exemplos de sucesso no Rio Grande do Sul e no Paraná, ainda não está indicada para as condições dos Cerrados, estando em fase de estudos e experimentações.

### **Cobertura do solo**

O Sistema de Plantio Direto pressupõe a cobertura permanente do solo que, preferencialmente, deve ser de culturas comerciais ou, quando não for possível, culturas de cobertura do solo. Tal cobertura deverá resultar do cultivo de espécies que disponham de certos atributos, como: produzir grande quantidade de massa seca, possuir elevada taxa de crescimento, ter certa resistência à seca e ao frio, não infestar áreas, ser de fácil manejo, ter sistema radicular vigoroso e profundo, ter elevada capacidade de reciclar nutrientes, ser de fácil produção de sementes, apresentam elevada relação C/N, entre outras.

A pequena produção de palha pela soja, principal cultura dos Cerrados, aliada à rápida decomposição dos seus resíduos, pode tornar-se grande à viabilização do SPD, especialmente quando essa leguminosa é cultivada como monocultura. Para contornar essa dificuldade, a soja deve compor sistemas de rotação de culturas adequadamente planejados. Com isso haverá permanente cobertura e suficiente reposição de palhada sobre a superfície do solo, viabilizando o SPD.

### **Espécies para a cobertura do solo**

As indicações das espécies a serem cultivadas para cobertura e produção de palha devem ser regionalizadas o máximo possível.

#### **\* Centro-Sul de Mato Grosso do Sul**

Nessa região, as condições climáticas são favoráveis ao cultivo o ano todo, incluindo várias culturas de inverno, possibilitando um bom número de opções para a cobertura do solo, atendendo satisfatoriamente a um programa de rotação de culturas no SPD.

Outono - a semeadura das culturas de outono/inverno, em sucessão às culturas de verão, vai do início de abril até meados de maio, podendo ir até o final de maio, se houver boa disponibilidade de água no solo. São indicadas a aveia, o nabo forrageiro, a ervilhaca peluda, o centeio, a ervilha forrageira e outras produtoras de grãos como o trigo, o milho (safrinha), o

sorgo, o triticale, a aveia branca, o girassol, o feijão e a canola. Resultados de pesquisa apontam melhores rendimentos com as seguintes sucessões, por ordem preferencial: soja após aveia, trigo, triticale, ou centeio; e milho após nabo forrageiro, ervilhaca peluda, canola, aveia.

Primavera - neste caso indica-se o uso de espécies, principalmente para cobertura viva e produção de palha (milheto comum, milheto africano, sorgo e *Crotalaria juncea*). Em pequena escala, é possível cultivar o girassol, visando à produção de grãos. O milheto destaca-se como uma das principais culturas, devido ao seu rápido desenvolvimento vegetativo, pois atinge 5 a 8 t/ha de matéria seca aos 45 a 60 dias após a semeadura, proporcionando excelente cobertura do solo. O uso dessas alternativas, e principalmente do milheto, visa à reposição de palhada em área de plantio direto com deficiência de cobertura. Essa opção exige uma programação, visto que, em seqüência, vem a cultura da soja cuja semeadura ocorrerá já em final da sua época indicada (final de novembro a início de dezembro), praticamente inviabilizando a semeadura da safrinha de milho. Em sucessão ao girassol e à *Crotalaria juncea*, é indicada a semeadura de milho.

Safrinha - consiste na semeadura em época imediatamente posterior à indicada para a cultura, na safra normal, resultando geralmente em produtividades inferiores às normalmente obtidas. A principal cultura utilizada é o milho, que, nesse caso, deve ser semeado logo após a colheita da soja até, no máximo, 15 de março, quando se esperam produções relativamente razoáveis de grãos e boa quantidade de palha. O girassol também pode ser cultivado nesse período, visando produção de grãos e supressão de plantas daninhas, podendo ser semeado até o final de março.

A "safrinha", mesmo que feita com espécie diferente da cultivada anteriormente, na época normal, deve ser utilizada com cuidado, visto que pode transformar-se em meio de propagação e disseminação de doenças e pragas, inviabilizando a própria cultura comercial principal. O cultivo do sorgo para grãos ou forragem, também é viável, mas para a produção de grãos, a semeadura vai até o final de fevereiro. O milheto é semeado nessa época, principalmente para produção de sementes, e sua semeadura vai até 20 de março.

Verão - o cultivo de leguminosas solteiras no verão apresenta excelentes resultados na recuperação e/ou no melhoramento do solo, mas isso geralmente implica na impossibilidade de cultivar soja ou milho em sua melhor época. Algumas tentativas de consorciação de leguminosas (mucuna-preta, calopogônio, feijão-bravo, crotálarias, etc.) com milho, arroz e girassol foram desenvolvidas na região e adaptam-se perfeitamente para consórcio com milho: mucuna preta, guandú, feijão-bravo do ceará e feijão de porco. O arroz com

calopogônio também é uma forma de consórcio tecnicamente viável. Os consórcios não têm despertado interesse dos agricultores, devido algumas dificuldades de manejo e condução das culturas consorciadas, mas são perfeitamente viáveis nas pequenas propriedades. O milho com guandú ou calopogônio são consórcios que permitem a mecanização normal das culturas envolvidas, adaptando-se para áreas maiores, como pode ser visto no capítulo sobre rotação de culturas (EMBRAPA, 2010).

Pastagens - a semeadura de soja sobre pastagem dessecada vem destacando-se como uma interessante forma de adoção do SPD, pois a pastagem apresenta excelentes coberturas viva e morta, contribui para aumentar a matéria orgânica do solo e permite a rotação de culturas. Essa tecnologia consiste na implementação da integração entre lavoura e pastagem, num sistema de elevada produtividade. Já existem alguns resultados de pesquisa disponíveis e experiências de sucesso com produtores na região, que dão suporte à indicação desse sistema de produção. O sistema é indicado para áreas de pastagem ainda com razoável capacidade de suporte de animais e fertilidade do solo, compatível com o cultivo de soja.

\* Centro-Norte do Mato Grosso do Sul, Chapadões (MS, GO, MT) e Sul do MT

Em função das condições climáticas nessas regiões, a semeadura de espécies para cobertura e produção de palha fica muito limitada. Pode-se, no entanto, utilizar as fases inicial e final das chuvas para a semeadura de espécies visando a cobertura do solo. Em geral, são viáveis as semeaduras realizadas após a colheita das culturas de verão, soja ou milho, aproveitando as últimas chuvas do período e a umidade do solo. Tais semeaduras são chamadas de “safrinha”, e as espécies possíveis de serem cultivadas são: o milheto, sorgo, milho, girassol, nabo forrageiro, guandu e outros.

Eventualmente, com a ocorrência de chuvas antecipadas, no final de setembro, parte da área poderá ser semeada com milheto ou sorgo, a serem dessecados antes da semeadura de soja.

\* Médio-Norte, Centro-Leste do Mato Grosso

A partir de alguns resultados disponíveis para a região de Lucas do Rio Verde, indica-se a semeadura de milheto, sorgo ou milho imediatamente após a colheita da soja (cultivar precoce, de preferência), de modo a permitir um bom estabelecimento das culturas de cobertura com as últimas chuvas do período.

### **Manejo de restos de culturas e da cobertura do solo**

Qualquer que seja o sistema adotado para a implantação da cultura principal, a queima dos restos culturais ou das vegetações de cobertura do solo deve ser evitada. Além de reduzir a infiltração de água e aumentar a suscetibilidade à erosão, contribui para a diminuição do teor de matéria orgânica do solo e, conseqüentemente, influi na capacidade da retenção de cátions trocáveis.

Na colheita, o picador deve ser regulado de modo a promover uma trituração mínima dos resíduos. Faz-se, no entanto, indispensável uma perfeita distribuição da palha através da adequada regulagem do espalhador de palha, para facilitar as operações de semeadura e o controle de invasoras através de herbicidas. Para a cultura do milho, no caso de não se usar o picador de palha, e se a palha dificultar a semeadura da cultura posterior haverá necessidade de uma operação complementar para picar melhor os resíduos. Para tanto, indica-se a utilização da roçadora, da segadeira, do tarup, do rolo-faca ou triturador.

O manejo das culturas destinadas à proteção, à recuperação do solo e à adubação verde deve ser realizado através do uso da roçadora, da segadeira, do tarup, do rolo-faca ou de herbicidas, durante a fase de florescimento. Embora o rolo-faca seja usado e indicado, deve-se ter em mente que é um implemento que pode causar compactação, devendo ser utilizado quando a umidade do solo for baixa.

O manejo da cobertura do solo, mecânico ou químicos, se constitui em operação que objetiva matar as plantas, mantendo os restos culturais (palha) sobre a superfície do solo, formando a camada de palha que protege o solo e permite aumentar a eficiência do SPD. As diferentes espécies indicadas apresentam particularidades de manejo, que devem ser conhecidas e utilizadas de modo a obter os melhores resultados, quanto à cobertura do solo, ao controle de ervas, à reciclagem de nutrientes e à facilidade de semeadura da soja. A cultura da aveia preta normalmente pode ser manejada no final da floração e início de formação das primeiras sementes. Se o manejo da aveia for mecânico, principalmente nos anos de maior precipitação, pode ocorrer rebrota e maturação de muitas plantas, fazendo que a mesma seja infestante no ano seguinte, caso seja cultivado o trigo. O nabo forrageiro deve ser manejado na fase final de floração e quando apresentar a formação das primeiras sementes. Essa cultura apresenta elevada taxa de decomposição (relação C/N baixa). Assim, as formas de manejo que fragmentam mais intensamente a massa verde e proporcionam maior contato com o solo resultarão na decomposição mais rápida. Nesse caso, a cobertura do solo será menos duradoura, porém a disponibilização dos nutrientes reciclados se dará antecipadamente. O manejo químico deverá ser efetuado com os herbicidas específicos.

### **Sucessão e rotação de culturas**

A escolha do melhor sistema, para compor um programa de rotação de culturas, deve levar em conta vários fatores, dentre os quais, o principal objetivo do sistema. Para cobertura do solo e/ou suprimento inicial de palha, optar por espécies e cultivares que produzam quantidades elevadas de massa seca de relação C:N elevada e que permitam manejo que retarde a decomposição. Considerar também o custo das sementes e o possível retorno financeiro na comercialização dos grãos. Sendo o objetivo minimizar a ocorrência de pragas, nematóides e doenças, considerar o ciclo e os hábitos destes, o tipo de patógeno e o sistema de culturas implantado.

Algumas sucessões, além de melhorar o rendimento da cultura principal, proporcionam condições específicas:

- Aveia preta - Milheto - Soja (para produção de palha).
- Aveia - Soja - Nabo forrageiro - Milho (para elevada reciclagem de nutrientes K e N para o milho).
- Rotação Soja-soja-milho ou soja (2/3) e milho (1/3) (para controle de doenças na soja).
  - Nabo forrageiro-milheto na primavera - Soja (boa descompactação superficial do solo, alta produção de palha reciclagem de potássio e controle de invasoras).
  - Soja-girassol safrinha - Milho (bom para produtividade do milho e estruturação do solo).

O esquema de rotação deve permitir flexibilidade na mudança das culturas envolvidas, pois além dos aspectos técnicos conhecidos, os aspectos econômicos influenciam e podem variar num curto espaço de tempo.

### **Preparo do solo**

Primeiramente, considerar que SPD é o sistema mais adequado. Em caso de impossibilidade de adotá-lo, considerar que o preparo do solo compreende um conjunto de práticas que, quando usadas racionalmente, podem permitir preservação do solo e boas produtividades das culturas a baixo custo.

Entretanto, quando usadas de maneira incorreta, tais práticas podem levar, rapidamente, o solo às degradações física, química e biológica e, paulatinamente, diminuir o seu potencial produtivo. É necessário que cada operação seja realizada com implementos adequados. O solo deve ser preparado com o mínimo de movimentação, não implicando isso em diminuição da profundidade de trabalho, mas sim na redução do número de operações,

deixando rugosa a superfície do solo e mantendo o máximo de resíduos culturais sobre a superfície.

Em áreas onde o solo foi sempre preparado superficialmente, principalmente no caso de solos distróficos e álicos, o preparo profundo poderá trazer para a superfície a camada de solo não corrigida, contendo alumínio, manganês e ferro em níveis tóxicos e com baixa disponibilidade de fósforo, podendo prejudicar o desenvolvimento das plantas. Nesse caso, é necessário conhecer a distribuição dos nutrientes e o pH no perfil do solo.

O preparo primário do solo (aração, escarificação ou gradagem pesada), deve atingir profundidade adequada ao próprio equipamento. Em substituição à gradagem pesada, deve-se utilizar aração ou escarificação. A escarificação, como alternativa de preparo, substitui, com vantagem, a aração e a gradagem pesada, desde que se reduza o número de gradagens niveladoras. Além disso, possibilita a permanência, do máximo possível, de resíduos culturais na superfície, o que é desejável.

O preparo secundário do solo (gradagens niveladoras), se necessário, deve ser feito com o mínimo de operações e próximo da época de semeadura. As semeadoras, para operarem eficazmente em áreas com preparo mínimo e com resíduos culturais, devem ser equipadas com disco duplo para a colocação da semente e roda reguladora de profundidade para propiciar um pequeno adensamento na linha de semeadura.

O preparo do solo, portanto, deve ser realizado considerando o implemento, a profundidade de trabalho, a umidade adequada e as condições de fertilidade. A condição ideal de umidade para preparo do solo pode ser detectada facilmente a campo: um torrão de solo, coletado na profundidade média de trabalho do implemento, submetido a uma leve pressão entre os dedos polegar e indicador, deve desagregar-se sem oferecer resistência.

Quando for usado o arado e a grade, para preparar o solo, considerar como umidade ideal a faixa variável de 60% a 70% da capacidade de campo, para solos argilosos, e de 60% a 80%, para solos arenosos, ou seja, quando o solo estiver na faixa de umidade friável. Quando for usado o escarificador, visando a quebra de camadas compactadas, a faixa ideal de umidade será de 30% a 40% da capacidade de campo, para solos argilosos (EMBRAPA 2010).

### **Alternância do uso de implementos no preparo do solo**

O uso excessivo de um mesmo implemento no preparo do solo, operando sistematicamente na mesma profundidade e, principalmente, em condições de solo úmido, tem provocado a formação de camada compactada. A alternância de implementos de preparo do solo, que trabalham a diferentes profundidades e possuam diferentes mecanismos de corte,

além da observância do teor adequado de umidade para a movimentação do solo, são de relevante importância para minimizar a sua degradação. Além disso, utilizar alternadamente os implementos de discos e os implementos de dentes.

### **Rompimento da camada compactada**

A compactação do solo é provocada pela ação e pressão dos implementos de preparo do solo, especialmente quando essas operações são feitas em condições de solo muito úmido, continuamente na mesma profundidade, e quando o tráfego de máquinas agrícolas é intenso. A presença de camada compactada no solo pode acarretar baixa infiltração de água, ocorrência de enxurrada, raízes deformadas, estrutura degradada e resistência à penetração dos implementos de preparo, exigindo maior potência do trator.

Após a identificação do problema, a utilização de pequenas trincheiras possibilita a determinação da profundidade de ocorrência de compactação, através da observação do aspecto morfológico da estrutura do solo, ou da verificação da resistência oferecida pelo solo ao toque com um instrumento pontiagudo qualquer. Normalmente, o limite inferior da camada compactada não ultrapassa 0,30m de profundidade.

O rompimento da camada compactada deve ser feito com um implemento que alcance profundidade imediatamente abaixo do seu limite inferior. Podem ser empregados, com eficiência, arado, subsolador ou escarificador, desde que sejam utilizados na profundidade adequada.

O sucesso do rompimento da camada compactada está na dependência de alguns fatores:

\* profundidade de trabalho: o implemento deve ser regulado para operar na profundidade imediatamente abaixo da camada compactada;

\* umidade do solo: no caso de arado, seja de disco ou aiveca, a condição de umidade apropriada é aquela em que o solo está na faixa friável; em solos muito úmidos, há aderência deste nos componentes ativos dos implementos e em solos secos há maior dificuldade de penetração (arado de discos). Para escarificar ou subsolar, a condição apropriada é aquela em que o solo esteja seco. Quando úmido, o solo não sofre descompactação mas amassamento entre as hastes do implemento e selamento dos poros, no fundo e nas laterais do sulco; e

\* espaçamento entre as hastes: quando for usado o escarificador ou o subsolador, o

espaçamento entre as hastes determina o grau de rompimento da camada compactada pelo implemento. O espaçamento entre as hastes deverá ser de 1,2 a 1,3 vezes a profundidade de trabalho pretendida.

A efetividade dessa prática está condicionada ao manejo do solo adotado após a descompactação. São indicadas, em seqüência a essa operação, a implantação de culturas com alta produção de massa vegetativa, com alta densidade de plantas e com sistema radicular abundante e agressivo, além de redução na intensidade dos preparos de solo subseqüentes

O plantio direto é um sistema no qual a semente é depositada diretamente no solo não revolvido, onde os resíduos da cultura anterior permanecem na superfície e as plantas daninhas são controladas quimicamente pela utilização de herbicidas. Comparado aos outros métodos de cultivo, ele se sobressai por apresentar uma elevada atenuação da energia de impacto das gotas de chuva com solo, pelo amortecimento que sua camada de cobertura morta proporciona contra a manifestação da erosão (DERPSCHE et al., 1991).

O sistema plantio direto tem como principal característica o revolvimento do solo exclusivamente na linha de semeadura, mantendo os resíduos vegetais na superfície. Conseqüentemente, são minimizados os efeitos erosivos das chuvas intensas que ocorrem nos climas tropicais (BARIZON, 2001). A camada de cobertura morta, resultante do acúmulo do resíduo vegetal, diminui as oscilações de temperatura e da umidade na camada superficial do solo, contribuindo para a manutenção de um pedo-clima ameno, com maior capacidade de retenção de água nos períodos quentes e/ou de estiagem prolongada (COLOZZI FILHO, 2000).

O plantio direto foi definido por Rego (1999) como um sistema sustentável que tem a capacidade de prover a si próprio, todas, ou quase todas as necessidades químicas e biológicas do solo, de forma que os balanços energéticos sejam positivos ou iguais a zero, indicando uma elevada eficiência no uso de insumos. Segundo o autor, o principal motivo que levou os produtores a adotar este sistema foi o controle da erosão, economia de combustível e de mão-de-obra e melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo.

Segundo Fancelli e Dourado Neto (2000) as pesquisas concernentes ao sistema plantio direto foram iniciadas em 1940 na Inglaterra e 1946 nos Estados Unidos, contudo, foi somente em 1965 que esta prática passou a ser utilizada em lavouras comerciais de milho. Os bons resultados alcançados favoreceram a expansão do sistema. No Brasil, os estudos tiveram início em lavouras de trigo e soja, no Paraná, em 1971.

Os condicionamentos físicos do solo considerados convencionais, como o preparo intensivo com o uso de arados, grades e subsoladores, além de exigir o uso cada vez mais intenso de fertilizantes, corretivos e pesticidas, são os responsáveis pela degradação física, química e biológica do solo (FREITAS e BERNARDI, 2003). Segundo os autores, o sistema plantio direto dispensa a utilização de condicionares, por preservar a atividade microbiológica do solo.

Rodrigues (2002) afirmou que, em relação às técnicas convencionais de condicionamentos físicos do solo, o sistema plantio direto apresenta práticas agrônômicas inovadoras, que movimentam menos o solo e permitem eficiente controle da erosão, pela manutenção da cobertura (palha) sobre o solo. Segundo o autor, a adoção do sistema plantio direto foi uma reação espontânea de agricultores que sentiram a falta de sustentabilidade econômica e física do preparo convencional.

#### **2.4.2 Preparo reduzido**

O preparo do solo é definido como um conjunto de operações agrícolas que envolvem a mobilização mecânica da camada arável (onde se desenvolve a maior fração do sistema radicular das plantas), promovendo o seu rompimento em torrões (agregados) de tamanho adequado, assim como a mistura ou a incorporação de material vegetal ou não, encontrado na superfície. Sendo um dos mais importantes componentes do custo de produção, o preparo do solo está relacionado com a sustentabilidade da agricultura, pois influencia a maioria das propriedades físicas do solo, afeta os processos biológicos e condiciona o estabelecimento, o desenvolvimento e a produção das plantas cultivadas. Para aumentar a produção das plantas, os sistemas de preparo têm de facilitar a conservação do solo e da água, criar condições que estimulem o desenvolvimento do sistema radicular das culturas e manter níveis favoráveis de matéria orgânica no solo.

Não existe uma receita de preparo do solo que possa ser aplicada com sucesso em qualquer situação. Sistemas de preparo do solo apropriados são específicos para o solo, o clima e para a espécie cultivada, sendo as suas adaptações influenciadas por fatores biofísicos e sócio-econômicos. O preparo do solo pode ser decisivo para a produtividade das plantas cultivadas, dependendo do grau de sensibilidade destas às condições de solo. Na prática, com o advento da moto-mecanização no Brasil, observou-se que antes da implantação da maioria das culturas, os agricultores, baseados em recomendações técnicas provenientes de regiões

onde os níveis de precipitação pluvial são mais amenos daqueles observados na maioria das regiões agrícolas do Brasil, utilizam sistemas de preparo que se caracterizam pela intensa mobilização e desagregação da camada superficial do solo, predispondo-o à rápida degradação e à erosão. A partir da tomada de consciência de que o preparo convencional do solo estava acelerando o desgaste do solo, foram desenvolvidos novos sistemas de preparo que levam em conta as características do solo, a pluviosidade da região e a disponibilidade de máquinas e equipamentos nas propriedades rurais. Estes sistemas, denominados conservacionistas, apresentam no plantio direto, onde ocorre à menor mobilização de solo possível, a modalidade de manejo considerada de excelência.

### **Preparo primário**

As operações mais profundas e grosseiras, como aração, escarificação e subsolagem, originam uma superfície irregular e são denominadas preparo primário. Essas operações visam primordialmente descompactar o solo para desfazer danos causados à sua estrutura pelo trânsito de máquinas e pela precipitação pluvial e incorporar materiais.

A aração consiste no corte, na elevação e na inversão de uma leiva de solo e sua utilização em áreas de culturas anuais encontra-se em declínio, devido ao elevado custo, à demanda de tempo por unidade de área e por razões conservacionistas. Ao mobilizar uma camada de solo, os principais efeitos da aração podem ser resumidos em: descompactação do solo, com o conseqüente aumento do volume de poros, mistura de componentes minerais e orgânicos do solo, controle de plantas daninhas, incorporação de restos de culturas, adubos verdes, corretivos e fertilizantes, permitindo a obtenção de um leito de semeadura, através de operações complementares denominadas preparo secundário.

A escarificação é uma operação de mobilização do solo até uma profundidade máxima de 30 cm, através de implementos de hastes, denominados escarificadores. As hastes dos escarificadores rompem a camada superficial do solo sem promover a inversão do perfil mobilizado, mantendo entre 50 e 75 % da cobertura vegetal existente sobre o solo antes do preparo. Para operar em condições de abundante cobertura vegetal (acima de 4 t/ha de matéria seca) devem ser equipados com discos de corte na frente das hastes, sob pena de ocasionar o arraste da palhada (embuchamento). Neste contexto, a sua vantagem é manter uma maior percentagem de cobertura do solo com restos culturais do que os arados, podendo constituir o preparo conservacionista, que será definido mais adiante. Como vantagem da escarificação,

também podem ser apontadas a menor demanda de tempo e o menor consumo de combustível por unidade de área. Por outro lado, os equipamentos de hastes não controlam eficientemente plantas daninhas estabelecidas. Para o preparo de um leito de semeadura através de uma só operação com escarificador, há necessidade de utilizar complementos como cilindros ou rolos destorroadores/niveladores.

A subsolagem, por sua vez, é uma operação que objetiva a descompactação do solo, quando houver uma camada compactada a profundidades que ultrapassam 30 cm. Os equipamentos utilizados também são compostos por hastes, porém são mais reforçados do que os escarificadores e apresentam maior espaçamento entre as ferramentas ativas. A subsolagem é uma operação que implica em elevado consumo de energia e somente se justifica em condições especiais, quando for detectada uma camada impeditiva ao fluxo de água e/ou ao desenvolvimento do sistema radicular das plantas, em profundidades maiores de 30 cm. A implantação de uma cultura após a subsolagem, via-de-regra requer uma ou mais operações complementares, pois a superfície torna-se muito irregular.

### **Preparo secundário**

As operações de preparo secundário são aquelas que têm a finalidade de nivelar e destorroar a camada mais superficial do solo (leito de semeadura), para oportunizar condições favoráveis à implantação e ao desenvolvimento inicial das culturas. O principal objetivo do preparo de um leito de semeadura é a formação de uma camada de agregados, suficientemente finos e úmidos, cuja função é assegurar um bom contato com as sementes a fim de possibilitar uma rápida germinação das plantas cultivadas. Neste sentido, a qualidade desejável de um bom leito de semeadura varia consideravelmente e depende de muitos fatores relacionados com o solo, com a espécie cultivada e com o clima.

O preparo secundário geralmente é necessário para adequar a camada dos 10 a 15 cm superficiais do solo a uma semeadura uniforme em distribuição e profundidade. No entanto, estas operações são responsáveis pela reversão de grande parte dos efeitos positivos do preparo primário, uma vez que tornam a compactar o solo pelos efeitos dos implementos e do tráfego dos rodados dos tratores e reduzem a rugosidade superficial do solo, facilitando a ocorrência da erosão. Outro efeito importante do preparo secundário é o controle de plantas daninhas em germinação ou emergidas após as operações de preparo primário. Por estas razões, o preparo secundário deve ser realizado, sempre que possível, através de uma única

operação e esta deve ocorrer o mais próximo possível da semeadura da cultura a ser conduzida na área.

As operações mais comumente utilizadas com a finalidade de realizar o preparo secundário são as gradagens com grades de discos ou grades de dentes. Também podem ser utilizados as enxadas rotativas e os cultivadores de campo, equipados com rolos destorroadores/niveladores. As grades de discos são os equipamentos predominantes e caracterizam-se pela facilidade de manejo, regulagens e manutenção, porém do ponto de vista conservacionista deixam a desejar, devido aos efeitos de nivelamento e destorroamento da camada superficial acompanhada pela drástica redução dos níveis de cobertura do solo com resíduos. Por sua vez, as enxadas rotativas são acionadas através da tomada de potência do trator, dispensando força de tração. Estas máquinas podem operar com facilidade em condições desfavoráveis ao desenvolvimento de tração (solos de várzeas), assim como em condições normais das demais áreas agrícolas. A gama de regulagens que estes equipamentos apresentam, possibilita obter diferentes distribuições do tamanho dos torrões em uma mesma condição de solo, permitindo adequar o leito de semeadura às necessidades das culturas a serem implantadas. Os cultivadores de campo são equipamentos de hastes, promovem menor destorroamento do solo do que as grades, deixam a desejar no que diz respeito ao controle de plantas daninhas, porém incorporam menores percentagens da cobertura vegetal remanescente após o preparo primário, podendo até mesmo aumentar os níveis de cobertura do solo (desenterrando partes de plantas enterradas no preparo primário).

## **SISTEMAS DE PREPARO DO SOLO**

Entende-se por sistema de preparo do solo um conjunto de operações realizadas segundo uma seqüência pré-estabelecida, buscando atender aos objetivos requeridos para cada situação. Convencionou-se denominar sistema de preparo convencional a todas as modalidades que utilizam operações de preparo primário com inversão das camadas do solo e conseqüente incorporação dos resíduos (sistemas de preparo convencional mantêm menos de 5% da superfície do solo coberta com resíduos), através de arados ou de grades pesadas, seguidas por uma ou mais operações de preparo secundário.

Além de atentarem contra a conservação do solo, os sistemas de preparo convencional caracterizam-se por elevado consumo de energia e demanda de tempo por unidade de área. Em outras palavras, sistemas de preparo convencional do solo apresentam fortes

inconvenientes do ponto de vista da sustentabilidade econômica e ambiental. Em virtude disto, vem sendo desenvolvidos sistemas de preparo do solo alternativos, buscando reduzir os custos de produção e proteger melhor o solo contra a erosão.

Sistemas de preparo do solo constituídos por um número menor de operações do que o sistema convencional e que mobilizam menor volume de solo são denominados de preparo mínimo ou preparo reduzido. Estes sistemas promovem maior rugosidade superficial e porosidade do solo do que o convencional, aumentando a capacidade de armazenamento de água e reduzindo os riscos da formação de uma crosta superficial após chuvas intensas, comuns nos períodos que coincidem com a semeadura das culturas.

Por outro lado, sistemas de preparo que mantenham os restos culturais, total ou parcialmente, sobre a superfície e que favoreçam a permanência da porosidade em valores elevados são adequados para a conservação do solo. O preparo conservacionista tem sido definido como qualquer sistema que reduz as perdas de solo ou água, quando comparado com o preparo convencional. Isso é obtido por meio da presença de palha na superfície do solo e através da manutenção da rugosidade superficial em níveis elevados, ou até mesmo pela combinação de ambas as situações. Especialistas em Ciência do Solo estabeleceram que a diferença fundamental entre preparo convencional e preparo conservacionista é a percentagem da superfície do solo que permanece coberta com resíduos após a semeadura. Qualquer sistema de preparo e semeadura que permita a manutenção de, no mínimo, 30 % da superfície do solo coberta com resíduos após a implantação das culturas é considerado conservacionista. Cabe lembrar que 30 % da superfície do solo coberta com resíduos proporciona 60 % de redução nas perdas de solo por erosão. Verifica-se que, além das vantagens de economia de tempo e de energia que oportunizam, os equipamentos de hastes são aqueles que proporcionam as melhores condições para caracterizar um sistema de preparo conservacionista do solo. Sistemas de manejo conservacionista do solo incluem culturas para cobertura do solo, adubação verde, rotação de culturas, manutenção de cobertura morta, preparo reduzido e plantio direto. Neste sentido, cabe enfatizar que a grande tendência para o manejo do solo em áreas destinadas á pastagens e á culturas produtoras de grãos, é o plantio direto. Os demais sistemas de preparo deverão ficar cada vez mais restritos á condições de clima, solo e culturas impeditivas ao plantio direto, cabendo-lhes, ainda, o papel de sistematização do terreno ou de prática “restauradora” de algumas situações eventualmente decorrentes de anos de manejo sem preparo (BOLLER et al., 2001).

O preparo reduzido do solo, por possibilitar baixa inversão da leiva de movimentação, menor número de operações e baixa incorporação dos resíduos vegetais, apresenta vantagens em relação aos sistemas tradicionais de mobilização, em função do menor custo de preparo e da redução das perdas de solo e água. Por outro lado, Moraes (1984) afirmou que a redução da erosão é obtida pela existência dos resíduos culturais na superfície do solo, assim como pelo aumento da rugosidade superficial e da porosidade, melhorando, desse modo, a infiltração de água no seu perfil (DALLMEYER, 1994).

O cultivo mínimo, designação também feita ao preparo reduzido, consiste no mínimo revolvimento do solo e na manutenção dos resíduos vegetais, em maior quantidade possível na sua superfície. Ele implica na redução das operações de manejo. Esse sistema já está bastante difundido no país, sendo realizado pelo uso de escarificadores, normalmente equipados com discos de corte na dianteira de cada haste para operações nas quais haja resteva na superfície. Também acompanha o equipamento um rolo destorroador que tem por função diminuir o tamanho dos torrões e nivelar o solo para a semeadura, fazendo com que o equipamento de forma conjugada, realize mais de uma operação de preparo a cada vez que é utilizado (FURLANI, 2000).

#### **2.4.3 Preparo convencional**

O preparo convencional do solo refere-se à denominação dada ao sistema mais utilizado pelos agricultores nacionais, tendo como características o elevadíssimo grau de mobilização e de desagregação. Possui como base o uso do arado e da grade de discos, implicando numa camada de solo desprovida de resíduos vegetais e substancialmente desagregada, com o intuito de facilitar a semeadura e a aplicação dos insumos agrícolas, entre os quais, o adubo e os herbicidas em pré-emergência. Portanto, esta condição é muito favorável à erosão, por apresentar camadas densas e impermeáveis que se formam no perfil, geralmente na profundidade entre 0,15 e 0,25 m, como resultado do uso intenso dos implementos de discos e/ou aivecas, assim como pelo excessivo tráfego das máquinas agrícolas (HOOGMOED e DERPSCH, 1985).

Manejos conservacionistas do solo, quando comparados ao preparo convencional, proporcionam características físicas e químicas distintas no seu perfil. As operações de mobilização empreendidas por tais manejos podem piorar suas propriedades físicas, tais como a densidade do solo, a porosidade e a resistência à penetração. Isto pode afetar a distribuição e a morfologia das raízes de forma muito peculiar, com reflexos negativos ao crescimento da parte aérea do vegetal (KLEPKER e ANGHINONI, 1995).

## **2.5 Atributos do solo**

### **2.5.1 Solo agrícola ideal**

O conceito de qualidade do solo (QS) começou a ser elaborado no início dos anos 90 e percepções diferenciadas surgiram desde que o tema foi proposto. Porém, o principal avanço foi o aceite da sociedade à importância de avaliar a qualidade do solo. O conceito mais simplificado para o termo foi formulado por LARSON e PIERCE (1991), como sendo “apto para o uso”. Já Doran et. al. (1994), sugerem uma definição mais complexa para QS, que envolve a capacidade do solo funcionar dentro dos limites de um ecossistema, sustentando a produtividade biológica, mantendo a qualidade do meio ambiente e promovendo a saúde das plantas e dos animais. Eles propõem em seu ensaio que produção sustentável seja definida em termos de: a) produção de plantas e resistência à erosão; b) qualidade do meio ambiente como função da qualidade do solo, da água e do ar e, c) saúde humana e animal, abrangendo a concepção de qualidade de alimentos, composição nutricional e segurança alimentar.

No Brasil estudos referentes ao assunto, bem como o uso do termo QS, ainda são incipientes. AMADO et al. (1998), estudando áreas arenizadas da fronteira sudoeste do Rio Grande do Sul, encontraram que sistemas de cultivo agrícola nesses solos de alta fragilidade, tiveram como conseqüências a redução de sua qualidade quando comparados ao sistema de campo natural. VEZZANI (2001), avaliando os estados de ordem de sistemas de cultivo, encontrou que a maior proporção de macroagregados e carbono retido caracterizavam estados de ordem em níveis hierárquicos mais altos, gerando, conseqüentemente, propriedades emergentes que habilitavam o solo a exercer suas funções, atingindo excelência de qualidade (CONCEIÇÃO et al., 2002).

#### **2.5.1.1 Densidade do solo**

A densidade do solo (DS), também conhecida como densidade aparente ou densidade global, é uma propriedade física que reflete o arranjo das partículas do solo, que por sua vez define as características do sistema poroso. Por definição, a DS é a relação existente entre a massa de uma amostra de solo seca em estufa, a 110°C, e a soma dos volumes ocupados pelas partículas e poros. Desta forma, todas as manifestações que influenciarem a disposição das partículas do solo, refletirão diretamente nos valores da DS. Essa propriedade é utilizada para se estimar a compactação do solo, de forma mais genérica, pois quanto mais denso um solo, mais compactado ele tende a se apresentar.

Também se pode inferir na sua estruturação que está, intimamente, ligada a compactação, pois geralmente um solo compactado é mal estruturado, tem menor porosidade, menor permeabilidade e menor infiltração, e prejudica o crescimento do sistema radicular,

pois quanto maior a densidade do solo, mais dificultada fica a penetração das raízes, e conseqüentemente, a produção é afetada, podendo causar também a erosão do solo devido ao aumento de selamento superficial (PAULETTO et al., 1989).

Mudanças na densidade do solo são facilmente medidas e podem ser um ótimo indicativo de alterações na qualidade do solo e no funcionamento do ecossistema, aumentos na densidade geralmente implicam em diminuição na qualidade do solo para crescimento radicular, redução da aeração e mudanças indesejáveis no comportamento da água no solo, como redução da infiltração. Pode-se dizer, com certa restrição, que a densidade é a medida quantitativa mais direta da compactação. Dentre os vários métodos usados para a determinação, destacam-se os anéis volumétricos, possuindo bordas cortantes e volume conhecido, normalmente 50 cm<sup>3</sup> (KIEHL, 1979).

A densidade do solo é variável para um mesmo solo, alterando-se conforme sua estruturação e no perfil do solo. Valores mais baixos, geralmente, estão associados a solos ou camadas com estrutura granular, ao passo que os valores mais elevados estão associados à estrutura do tipo em blocos ou similares em situação onde somente o potencial matricial de origem é levado em consideração (FERREIRA, s/d).

O manejo inadequado é fator de importância na desestruturação do solo, ocasionando compactação e, conseqüentemente, aumentando o adensamento das partículas do solo. Segundo Kochhann et al., (2000), a compactação do solo é entendida como o aumento de sua densidade, resultante de complexa interação de processos físicos, químicos e biológicos. Nessa interação, os processos químicos e biológicos atuam apenas como fatores condicionantes da compactação do solo, necessitando de processo físico como agentes diretos e complementares para concretização do fenômeno.

Fisicamente, o processo de compactação é resultado da ação direta de forças mecânicas, oriundas do tráfego de máquinas e/ou do pisoteio de animais sobre o solo, e da ação da percolação de água no perfil do solo, transportando partículas dispersas. Enquanto as forças mecânicas aproximam as partículas unitárias do solo, pela expulsão do ar e água que as matem afastadas, reduzindo o volume total do solo à custa da redução da porosidade, a água de percolação promove essa aproximação mediante dispersão e rearranjo das partículas unitárias, obstruindo a porosidade e, conseqüentemente, concentrando massa de solo por unidade de volume (KOCHHANN et al., 2000).

Corrêa (2002), com objetivo de avaliar o efeito de diferentes sistemas de cultivo na estabilidade de agregados em águas, em um Latossolo Vermelho-Amarelo textura média, observou que ocorreram modificações na estrutura e na matéria orgânica do solo, causadas

pelos diferentes sistemas de cultivo, a partir do preparo da área para o primeiro plantio. Os maiores fracionamentos de agregados ocorreram nas áreas preparadas com grade aradora e grade niveladora, para o monocultivo da soja, durante quatro e seis anos. O plantio direto da soja sobre a palhada do milheto, por dois anos consecutivos, proporcionou maior estabilidade de agregados do solo.

Provavelmente as observações feitas por Corrêa (2002), confirmam um dos processos de descompactação do solo, o “processo biológico”, que está associado à incorporação de matéria orgânica ao solo a partir do sistema radicular das plantas que, enquanto vivo, preenche a macroporosidade do solo e confere estabilidade aos agregados do solo. Quando em decomposição, a matéria orgânica gera compostos orgânicos, com liberação de substâncias cimentantes dos macroagregados do solo (KOCHHANN et al, 2000). Guimarães e Moreira (2001), com objetivo de estudar o efeito de diversas densidades do solo sobre o desenvolvimento do arroz de terras altas, observaram que o crescimento da parte aérea do arroz nesse sistema é diminuído com o aumento da densidade do solo; as raízes na camada compactada (0,00-0,20 m) apresentam engrossamento em função do aumento da densidade do solo; e a compactação do solo na camada superficial diminui a quantidade de raízes presentes nesta camada e na camada inferior não compactada.

Portanto, fica patente a importância do estudo da densidade para se avaliar o nível de compactação do solo. Segundo Guimarães e Moreira (2001), o conhecimento do nível de compactação do solo é fundamental para o bom desenvolvimento das plantas, pois elas desenvolvem-se melhor em solos que não apresentam limitação ao crescimento radicular, portanto com baixa densidade, porém alta o suficiente para oferecer bom contato raízes - partículas de solo, ou seja, boa estruturação do solo. Com base nos dados fornecidos pela literatura, pode-se observar o quanto a densidade do solo é importante para se obter bons resultados nas lavouras e conhecer os solos para fins de preservação.

A resistência do solo à penetração de raízes e a densidade do solo estão relacionadas com o estado de compactação deste, e muitos trabalhos têm buscado valores que causem restrições ao crescimento das raízes das plantas e diminuição da produtividade. A dificuldade está em isolar o efeito desses atributos físicos e da umidade do solo; portanto, dúvidas persistem sobre o atributo que melhor caracterize o estado de compactação e que seja sensível às variações de manejo do solo (SILVA, 2003).

A densidade do solo é considerada um atributo avaliador da qualidade estrutural do solo, sendo muito utilizada como indicadora de sua estrutura e dureza. Desta forma, alterações

dos seus valores refletem em modificações da estrutura do solo, devido à relação que existe entre a densidade e a porosidade total (DORAN et al., 1994).

Segundo Holtz e Kovacs (1981), é definida como sendo o adensamento dos solos pela aplicação de uma energia mecânica, variando num mesmo tipo de solo, e alterando-se, espacial e volumetricamente, conforme a variação da estrutura e da textura. Também tende a aumentar com a profundidade do perfil, sobretudo pela diminuição do teor de matéria orgânica. Desta forma, foram relatados valores gerais desse atributo variando entre 1,40 a 1,80 kg dm<sup>-3</sup>. Por outro lado, nos solos de textura arenosa seus valores variam de 1,20 a 1,40 kg dm<sup>-3</sup>, ao passo que nos de textura argilosa, entre 1,00 a 1,25 kg dm<sup>-3</sup> (KIEHL, 1979). Em relação aos níveis críticos da densidade do solo, Bowen (1981) considerou que valores em torno de 1,55 kg dm<sup>-3</sup> para solos franco-argilosos e argilosos, e de 1,85 kg dm<sup>-3</sup> para solos arenosos, podem afetar o crescimento das raízes e conseqüentemente a produtividade vegetal.

A compactação do solo é resultado do processo físico exercido pela ação das forças mecânicas causadas pelo tráfego de máquinas por ocasião da semeadura, tratos culturais, colheita e transporte, do pisoteio animal em áreas de pastejo, especialmente nos solos argilosos quando úmidos. Tais forças aproximam as partículas unitárias do solo, expulsando o ar e a água do seu interior. Desta forma, ocorre a redução do seu volume total, por diminuir drasticamente a macroporosidade e aumentar levemente a microporosidade. Conseqüentemente há um aumento tanto da densidade global como da resistência à penetração, assim como uma diminuição da taxa de infiltração (KOCHHANN et al., 2000).

O efeito da compactação sobre a planta inicia-se com a restrição ao crescimento radicular, o que implica em conseqüências para o desenvolvimento da parte aérea e sua respectiva produtividade. O sistema radicular talvez seja o primeiro componente da planta a sentir os efeitos da compactação do solo, mesmo quimicamente corrigido. Contudo, estando compactado, as plantas nele estabelecidas não se beneficiam adequadamente dos nutrientes disponíveis, devido ao deficiente desenvolvimento das novas raízes, uma vez que é nelas que ocorre a maior taxa de absorção (REICHERT et al., 2007). Desta forma, Collares (2005) observou que o crescimento radicular do feijão foi menos vigoroso, quando o solo trabalhado (Latosolo Vermelho com 607 g kg<sup>-1</sup> de argila) foi submetido à compactação proporcionada por quatro passadas de um trator de 16,6 t. Também foi observada maior concentração das raízes na sua camada superficial (0,00-0,10 m).

Trabalhos envolvendo a densidade do solo evidenciaram grande importância deste atributo para os estudos agrônômicos, assim como uma estreita relação com outros, permitindo avaliar que com o seu aumento ocorre a diminuição da macroporosidade,

condutividade hidráulica, difusividade do ar, absorção iônica, e conseqüentemente o aumento da microporosidade e da resistência mecânica à penetração do solo, o que poderia contribuir para a diminuição da produtividade agrícola (MONTANARI et al., 2010).

### **2.5.1.2 Resistência mecânica à penetração e umidade**

O solo é constituído de materiais sólidos, líquidos e gasosos. As partículas sólidas formam um arranjo poroso tal que os espaços vazios, denominados poros, tem a capacidade de armazenar líquidos e gases, se constitui de partículas classificadas de acordo com o tamanho médio dos grãos em areia, limo (silte) e argila, cujas proporções determinam a textura do solo. O arranjo das diversas partículas, juntamente com os efeitos cimentantes de materiais orgânicos e inorgânicos, determinam a estrutura do solo. Os materiais orgânicos consistem de resíduos vegetais e animais (incluindo fungos, bactérias, insetos e outros) parte dos quais são vivos e o restante se apresentando em diversos estágios de decomposição, denominados húmus.

A parte líquida do solo constitui-se essencialmente de água, contendo minerais dissolvidos e materiais orgânicos solúveis. Ocupa parte (ou quase todo) do espaço vazio entre as partículas sólidas dependendo da umidade do solo. Esta água é absorvida pelas raízes das plantas ou é drenada para camadas de solo mais profundas e, por isso, precisa ser periodicamente repostada pela chuva ou pela irrigação, para garantir uma produção vegetal adequada. Daí, a importância agrícola do conhecimento deste reservatório de água para as plantas e dos princípios que governam seu funcionamento.

A parte gasosa ocupa os espaços vazios não ocupados pela água. Esta é uma fração importante do sistema solo, pois a maioria das plantas exige certa aeração do sistema radicular. Na prática da irrigação é importante manter-se certo balanço entre a porção dos poros, ocupada pela água, e a ocupada pelo ar. Em um solo homogêneo, para cada valor de umidade volumétrica ( $\theta$ ), existe um valor correspondente de potencial de água no solo ( $\Psi$ ) (SILVA e SILVA, 1984).

A construção de um gráfico, colocando as variáveis ( $\theta$ ) no eixo das abscissas e as variáveis ( $\Psi$ ) no eixo das ordenadas, ou vice-versa, denomina-se curva de retenção de água no solo ou curva característica de água no solo. Esta curva pode ser determinada através do envio de amostras de solo a Laboratórios de Física de Solos. Estas amostras, devem preferencialmente, estarem indeformadas, sendo coletadas por meio de anéis volumétricos que mantenha sua estrutura, apesar da textura (proporções das partículas areia, silte e argila) ser o principal fator que influencia na retenção de água no solo, a estrutura (arranjo das

partículas) também exerce bastante influência, sobretudo na faixa compreendida entre 0 e – 100kPa (REICHARDT, 1990).

Di Bello (2005) relata que a umidade do solo é variável e essencial na hidrologia: ela é a chave que controla a proporção de chuva que infiltra, escoia superficialmente, ou evapora da superfície da Terra. É substância vital para a vegetação. A umidade do solo integra precipitação e evaporação por períodos de dias a semanas e introduz um elemento significante na memória do sistema atmosfera-solo. Existem fortes evidências, tanto climatológicas quanto de modelagens, de que a reciclagem rápida da água através da evapotranspiração e precipitação é o fator primário na persistência de anomalias de secas ou enchentes sobre amplas regiões continentais durante o verão.

Uma meta comum de várias agências e cientistas é o desenvolvimento de um sistema global de observação da umidade do solo (LEESE et al. 2001). Fornecer um produto sobre a umidade global do solo para pesquisas e aplicações significa um grande desafio. Medições *in situ* de umidade do solo são esparsas, e cada valor é representativo apenas para uma pequena área. Sensoriamento remoto, se adquirido com suficiente acurácia e confiabilidade, poderá determinar áreas amplas de solo encharcado ou dados de umidade do solo para estudos hidrológicos sobre grandes regiões continentais (SABOGAL et al. 2008).

Bernardo (1995) considera que um dos métodos comumente usados, para obtenção da umidade do solo aproximado do valor de campo da capacidade de campo ( $C_c$ ) é o método da curva de tensão (curva característica). A tensão considerada como equivalente à  $C_c$  é de 1/10 de atmosfera, para solos de textura grossa e de 1/3 de atmosfera para solos de textura fina, sendo que a tensão geralmente usada é de 1/3 de atmosfera, para qualquer tipo de solo. Esta curva de tensão é determinada em laboratório com “panela” e “membrana” de pressão ou funil de “Bukner”, podendo ser usados solos sem estrutura ou com estrutura natural, sendo este último mais trabalhoso, porém mais preciso.

Entretanto, Reichardt (1988) analisou o conceito de capacidade de campo do ponto de vista teórico e discutiu-o em relação a dados de drenagem interna de um solo considerado homogêneo (Latossolo) e outro heterogêneo (terra roxa estruturada - Argissolo). Foi dada ênfase ao fato de ser a capacidade de campo o resultado de um comportamento dinâmico da água no solo e não uma característica intrínseca de sua matriz. Considerou que o principal fator da redução do fluxo de drenagem é a condutividade hidráulica do solo e não o gradiente de potencial, sendo que o fluxo de drenagem decresce rapidamente com o tempo, mas, praticamente, nunca cessa, o que torna muito subjetiva a escolha do instante para a determinação da capacidade de campo. Cada tempo escolhido leva a um valor diferente dessa

capacidade, cujos métodos de determinação em amostras de laboratório não têm suporte teórico; e seus resultados, porém, podem ser úteis para efeito prático. Nesses casos, considerou que o critério clássico do potencial matricial de  $-33 \text{ kPa}$  ( $-1/3 \text{ atm}$ ) deve ser levado para potenciais maiores, da ordem de  $-10$  a  $-6 \text{ kPa}$  ( $-1/10$  a  $-6/100 \text{ atm}$ ).

Mais além, Reichardt (1990) relacionou os componentes do potencial da água:

- componente gravitacional ( $\Psi_g$ ): tem valor zero no plano de referência, é positiva acima dele e negativa abaixo dele. O plano de referência é o estado padrão para gravidade e o plano mais comumente escolhido é a superfície do solo;

- componente de pressão ( $\Psi_p$ ): a componente de pressão é medida em relação a uma condição padrão, tomada como sendo a da água submetida à pressão atmosférica local e, nestas condições, assume-se  $\Psi_p = 0$ . Nesta componente, considera-se somente a pressão manométrica positivas, isto é, acima da pressão atmosférica;

- componente matricial ( $\Psi_m$ ): este componente se refere aos estados de energia de água devidos à sua interação com as partículas sólidas do solo, também chamadas de matrizes do solo. Esta interação se refere a fenômenos de capilaridade e adsorção e eles conferem à água estados de energia menores do que o estado da água “livre” à pressão atmosférica e, como para este último é atribuído o valor zero (estado padrão), a componente matricial  $\Psi_m$  será sempre negativa. Para um solo saturado, no qual todos os poros estão cheios de água, a adsorção é nula e nestas condições, a componente matricial é nula ( $\Psi_m = 0$ ). Para valores de  $\Psi$  relativamente altos (solos úmidos), a capilaridade é o principal fenômeno que determina  $\Psi_m$ . Para valores de  $\Psi$  relativamente baixos (solos secos), a água apresenta-se na forma de filmes, cobrindo a partículas de solo e o fenômeno de capilaridade deixa de ter importância. Nesta condição, a adsorção é importantíssima e devido a ela,  $\Psi_m$  assume valores bem negativos. A componente matricial  $\Psi_m$  de um solo é, portanto, função de sua umidade  $\theta$ . Na prática,  $\Psi_m$  é medido, não calculado.

Existem alguns métodos disponíveis para se medir a umidade do solo, apresentando todos, limitações, ou de precisão, ou por serem dispendiosos, ou excessivamente morosos. O método termogramétrico, também denominado “gravimétrico padrão”, serve de referência para os demais métodos. É simples, absoluto e utiliza equipamentos não onerosos. Por outro lado, é trabalhoso e demorado (KLAR, 1984).

Conforme EMBRAPA (1997), o método da umidade atual (umidade gravimétrica), tem como princípio a determinação da umidade presente na amostra de solo, transportada em embalagem impermeável e vedada. A determinação da umidade do solo é de vital importância

para promover o manejo adequado do uso da água no solo e de sistemas de irrigação como um todo. Por sua vez o manejo eficiente de sistemas de irrigação favorece o desenvolvimento adequado das planta. Apesar dos contínuos aperfeiçoamentos nas técnicas de moderação de nêutrons para medida de umidade, o trabalho intensivo e a ruptura do sítio de amostragem gravimétrica ainda tornam o método TDR preferível. Existe claramente a necessidade de aperfeiçoar métodos de medida de umidade do solo. O TDR tem mostrado possibilidades atrativas para medidas in situ da umidade. Além disso, o uso do TDR vem sendo proposto recentemente para medidas simultâneas da umidade e condutividade elétrica do solo (TOPP,1987).

Macedo (1997) mostra um tomógrafo, construído a um custo relativamente baixo quando comparado a tomógrafos médicos, de alta resolução, dedicado à pesquisa de solos e meios porosos em geral. Foi possível pela primeira vez, em nível internacional, examinar uma amostra de solo natural, com selamento superficial e encrostamento, além de uma amostra com dupla camada de areia, não apenas fazendo-se uma microscopia de superfície, mas também, investigando-se o seu interior. Sendo possível observar detalhes como regiões com predominância de partículas de alta densidade e camadas com densidades e texturas diferenciadas.

Em trabalho, na Embrapa Instrumentação Agropecuária, Cássaro (1994) desenvolveu e utilizou tomografia de dupla energia simultânea, para a determinação, também simultânea, da densidade global e da umidade do solo. Neste trabalho foram, utilizados uma fonte de raios X e filtros de estanho, de modo a se obterem dois picos distintos de energia.

Trabalhando com dupla energia no minitomógrafo, Biassusi (1996) utilizou a TC para determinar a umidade e densidade de Vertissolos, visando avaliar, em laboratório, sua expansão e contração. Os Vertissolos caracterizam-se por um predomínio de argilominerais em seus horizontes, tornando-os inadequados à agricultura, pois quando secos são extremamente duros e quando úmidos apresentam-se muito plásticos, o que dificulta a drenagem. Batista (2002), em seu estudo de variabilidade espacial da unidade de solo em irrigação por gotejamento sob cultivo protegido relata, ao estudar-se a variabilidade do solo, podem ser utilizados, basicamente, dois enfoques que se diferenciam na forma de análise dos dados. A estatística tradicional, que exige a validade de algumas hipóteses básicas sobre as variáveis, como a independência entre as observações, a variância constante e a distribuição normal dos dados; e a geoestatística, que vem apresentando uma aplicação crescente na avaliação da variabilidade espacial de diversos parâmetros de interesse em ciências agrárias, permitindo a interpretação dos resultados baseados na estrutura da sua variabilidade natural,

levando em consideração a existência da dependência espacial dentro do espaço de amostragem.

Reichardt et al. (1988) revelaram como a variabilidade espacial da umidade do solo pode ser utilizada com vantagem para estudar a influência da umidade sobre outros parâmetros de uma cultura agrícola, como a absorção de nutrientes, produtividade e fixação biológica do nitrogênio.

A resistência mecânica à penetração é um dos atributos físicos mais adotados como indicador da compactação do solo. Apresenta relações diretas com o crescimento das plantas, sendo mais eficiente na identificação da compactação quando acompanhada da umidade e da densidade do solo (FREDDI et al., 2006). Fisicamente estabelecida pela pressão, ela é dada pela razão entre a força necessária para a penetração de uma haste metálica do penetrômetro, provida de um cone na sua extremidade, cuja área basal é conhecida e constante. Sua avaliação deve ser concomitantemente à da umidade do solo, uma vez que elas variam de forma inversamente proporcional. Contudo, varia positivamente com a densidade do solo (MONTANARI et al., 2010).

A resistência mecânica à penetração é um atributo físico relativamente fácil de ser obtido, apresentando, na maioria das vezes, apreciável correlação com a macroporosidade e a densidade do solo. Ela é mais afetada pela variação da umidade do solo no momento da amostragem do que pela sua densidade. Por esta razão, muitos trabalhos, que objetivaram caracterizar o efeito da compactação sobre o desenvolvimento radicular e sobre a produtividade das culturas, utilizaram a densidade do solo como parâmetro auxiliar à referida resistência (TORRES e SARAIVA, 1999).

De acordo com GENRO JUNIOR et al. (2004), a resistência à penetração geralmente é aumentada com a compactação do solo devido ao concomitante incremento da densidade, assim como com o decréscimo da umidade. Seu aumento é indesejável para o crescimento das plantas por causar redução do crescimento radicular. Segundo Libardi et al. (1996), a umidade varia de modo espacial e temporal no solo. Desta forma, pesquisas da resistência mecânica à penetração e da umidade do solo tem mostrado influência positiva sobre a produtividade vegetal (MONTANARI et al., 2010).

Os níveis críticos de resistência mecânica para o crescimento radicular das plantas variam com o tipo de solo e com a espécie cultivada. Assim, conforme revisão efetuada por Reichert et al. (2007), recomenda-se sua avaliação quando o teor de água do solo estiver

próximo do valor da capacidade de campo. Entretanto, quando obtida no momento em que a umidade do solo estiver ao redor de 2/3 da microporosidade (solo friável/macio) (ROSA FILHO, 2008), a maioria dos trabalhos tem adotado a seguinte classificação de resistência à penetração (RP), estabelecida por ARSHAD et al. (1996): a) extremamente baixa:  $RP < 0,01$  MPa; b) muito baixa:  $0,01 \leq RP < 0,1$  MPa; c) baixa:  $0,1 \leq RP < 1,0$  MPa; d) moderada:  $1,0 \leq RP < 2,0$  MPa; e) alta:  $2,0 \leq RP < 4,0$  MPa; f) muito alta:  $4,0 \leq RP < 8,0$  MPa e g) extremamente alta:  $RP > 8,0$  MPa.

A dureza do solo é um atributo que avalia sua resistência à deformação, normalmente avaliada pela raiz da planta, pelos implementos empregados no seu preparo, ou pela ponta cônica de um penetrômetro qualquer. Assim, resistência à penetração, fisicamente estabelecida pela pressão, é a razão entre a força necessária para a penetração de uma haste metálica do penetrômetro, provida de um cone na sua extremidade, cuja área basal é conhecida e constante (BENGOUGH et al., 2001).

Na avaliação da resistência à penetração, comparações entre sistemas de preparo do solo ficam dificultadas devido à extrema variabilidade da umidade que, por ser tomada em concomitância a tal resistência, funciona como variável controle. Este procedimento permite que os valores da resistência, que normalmente apresentam elevada variabilidade, possam ser comparados entre distintos sistemas de preparo. Por outro lado, para um determinado tipo de solo, a resistência à penetração depende intimamente da sua densidade, do grau de umidade e da estrutura, assim como, varia na razão inversa da umidade, e na direta com a densidade (BENGOUGH et al., 2001).

Assim, com o objetivo de poder comparar os dados de resistência, originados das distintas formas de preparo do solo, ou de distintas profundidades, condições nas quais a variabilidade da sua umidade é reinante, procurou-se estabelecer a seguinte metodologia de coleta de dados de campo, a seguir. Para a coleta dos dados de campo da resistência à penetração, deve-se esperar um período contínuo de intensas chuvas (3-4 dias), que ocorre normalmente entre dezembro e fevereiro para as condições do Brasil, o que proporciona a saturação completa da porosidade total do solo. Seguidamente, 3 a 4 dias após o término das chuvas, devem ser coletados concomitantemente os dados, de resistência e umidade, uma vez que o solo estará, muito provavelmente, com seu conteúdo de água preenchendo dois terço da sua microporosidade total (capacidade de campo), grau de umidade tido como ideal para tal procedimento (BENGOUGH et al., 2001).

Os penetrômetros superestimam a taxa de alongamento radicular. Avaliações de campo evidenciaram valores de resistência à penetração de duas a oito vezes maiores do que os das raízes. Assim, valores críticos de resistência, avaliados com o penetrômetro em condições de campo, nos quais o alongamento radicular é cessado, variaram entre 0,8-5,0 MPa, dependendo do solo e da cultura. Por outro lado, a máxima pressão axial, que a raiz pode exercer, pode variar de 0,24 e 1,45 MPa, dependendo da espécie. Desta forma, o alongamento radicular cessa no solo quando a resistência, avaliada pelo penetrômetro, for muito maior do que a máxima pressão que a raiz poderá exercer (BENGOUGH et al., 2001).

Sabe-se que um solo com valores de resistência à penetração variando entre 1,0 e 3,5 MPa (CANARACHE, 1990, MEROTTO e MUNDSTOCK, 1999), ou de 2,0 a 4,0 MPa, segundo Arshad et al. (1996), poderá restringir ou mesmo impedir o crescimento e o desenvolvimento das raízes.

Pauletto et al. (1989) constataram que somente seriam consideradas camadas compactadas aquelas nas quais os valores de resistência à penetração fossem superiores a 1,72 MPa, alertando também para o fato de que o limite superior de 2,32 MPa impediria o desenvolvimento do sistema radicular das plantas de milho. Por outro lado, para o conceito de intervalo hídrico ótimo, Silva et al. (1994) relacionaram o valor de 2,0 MPa como limite para o desenvolvimento radicular. Neste aspecto, Pérez-Gomar et al. (2002) observaram que quando a umidade do solo encontra-se ao redor de  $0,24 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , a resistência à penetração resultou valores superiores ao referido 2,0 MPa, encontrando-se também uma zona mais compactada entre a camada de 0,15 a 0,30m. À medida que a umidade do solo aumentou para valores próximos de  $0,29 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , a resistência à penetração diminuiu, porém a camada resistente persistiu. Também, na condição de solo saturado, foram registrados os menores valores de resistência à penetração, mesmo na zona mais compactada.

O efeito do condicionamento físico do solo sobre o crescimento das plantas ocorre pela atuação de vários de seus atributos, bem como das interações entre eles. A própria sazonalidade climática contribui para a complexidade do sistema. Como exemplo, as variações da umidade do solo promovem alterações da aeração, na condutividade hidráulica, no potencial de água e na resistência à penetração. Desta forma, os atributos físicos do solo relacionados com a produtividade das culturas podem ser divididos em duas categorias. A primeira relaciona aqueles diretamente envolvidos com o desenvolvimento das plantas, a saber, a água, oxigênio, resistência à penetração das raízes e temperatura, os quais afetam diferentes processos fisiológicos tais como a fotossíntese, crescimento radicular e foliar. Já a segunda relaciona os indiretamente, tais como a textura, agregação, porosidade e densidade

do solo, que afetam a produtividade das culturas devido à influência sobre a retenção de água, aeração, temperatura e a resistência do solo à penetração das raízes (SILVA e NOGUEIRA JUNIOR, 2001).

O conhecimento do comportamento físico do solo possibilita adequar as atividades agrícolas à sua aptidão, o que pode reduzir a erosão das camadas superficiais e, por consequência, sua degradação física, química e biológica. A infiltração de água no solo e a espessura do horizonte A fornecem indicativos de sua qualidade, gerando informações que tornam possível verificar a existência de camadas compactadas, a formação superficial de crostas, bem como as consequências dos processos erosivos (BERTOLANI e VIEIRA, 2001).

A resistência do solo à penetração é um atributo físico relativamente fácil de ser obtido e, de certa forma, de ser correlacionado com a densidade e a macroporosidade. Para um mesmo solo, quanto maior a densidade do solo, maior será a resistência à penetração e menor a macroporosidade. Esta última constitui-se no principal espaço para o crescimento das raízes. Deve ser levado em conta, no entanto, que a resistência à penetração do solo é mais afetada pela variação dos conteúdos de sua umidade (MERCANTE et al., 2003).

Do ponto de vista físico-químico coloidal, o solo é um sistema trifásico disperso. Desta forma, exclusivamente com base no volume, o solo considerado ideal, do ponto de vista agrônomo, é aquele que apresenta  $0,50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  de porosidade total ( $0,33 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  de microporosidade, que é responsável pelo armazenamento de água, e  $0,17 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  de macroporosidade, responsável pela aeração do solo) e  $0,50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  de volumes sólidos ( $0,45 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  de matéria mineral e  $0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  de matéria orgânica), conforme preceitos de KIEHL (1979).

O uso e o manejo do solo alteram a sua densidade e, conseqüentemente, a porosidade total e a de aeração. A porosidade de aeração é a razão entre o volume de ar, avaliado quando sua umidade estiver na capacidade de campo, e seu volume total. O ar ocupa o espaço poroso do solo não ocupado pela água. Para um solo seco, todo o espaço vazio (porosidade total) é ocupado pelo ar. A exigência das plantas para com a aeração do solo, isto é, a porosidade livre de água necessária para o seu pleno desenvolvimento, varia entre as espécies e os tipos de solos. Camargo e Alleoni (1997) também mostraram que as trocas gasosas do solo com a atmosfera são importantes para o bom desenvolvimento radicular e aéreo. Essa difusão depende diretamente da porosidade livre de água. A porosidade de aeração é muito importante para a ramificação uniforme das raízes, pois, se ocorre baixa aeração, há uma proliferação das raízes superficiais. Esse aumento da concentração de raízes leva a planta a retirar água apenas superficialmente, podendo causar deficiência hídrica em anos de seca.

O bom crescimento e desenvolvimento das plantas, que promovem a produção de grãos, fibras e outros produtos comerciáveis, dependem de uma série de fatores ambientais e genéticos próprios de cada planta. A absorção dos nutrientes é um dos fatores importantes para a produtividade das culturas e, assim sendo, qualquer tipo de impedimento ao crescimento radicular poderá reduzir tal absorção.

Vários fatores são passíveis de dificultar o desenvolvimento radicular de plantas cultivadas, podendo-se citar: danos causados por insetos e/ou moléstias, deficiências nutricionais, acidez do solo, drenagem insuficiente, baixa taxa de oxigênio, temperatura imprópria do solo e compactação do solo. Dentre estas limitações, a compactação do solo toma, muitas vezes, dimensões sérias, pois ao causar restrição ao crescimento e desenvolvimento radiculares, acarreta uma série de problemas que afetam direta e indiretamente a produção das plantas.

A agricultura moderna deve basear-se na sustentabilidade dos recursos naturais, bem como na otimização do uso do solo, a fim de garantir a produtividade, sem causar degradação ao meio ambiente. Neste sentido, métodos que contribuem para a melhoria da qualidade dos solos favorecem a prática de uma agricultura mais equilibrada.

O conhecimento do comportamento físico do solo possibilita adequar as atividades agrícolas à aptidão do solo, o que pode reduzir a erosão das camadas superficiais e, por conseqüência, as degradações físicas, químicas e biológicas. A infiltração de água no solo e a espessura do horizonte A fornecem indicativos da qualidade do solo, gerando informações com as quais é possível verificar a existência de camadas compactadas, encrostamento superficial, bem como as conseqüências dos processos erosivos (BERTOLANI et al., 2001). O uso intensivo do solo acarreta na degradação das características físicas do mesmo, podendo afetar a infiltração e retenção de água do solo, devido ao aparecimento de camadas compactadas provocada pelo uso excessivo de máquinas agrícolas. Segundo Cavenage (1996) a maioria das lavouras mecanizadas apresentam camadas de compactação do solo abaixo da profundidade de preparo, conseqüência da execução de operações de preparo em condições de excesso de umidade.

A resistência mecânica do solo à penetração de raízes é uma propriedade física relativamente fácil de ser obtida e, de certa forma, de ser correlacionada com a densidade e com a macroporosidade. Para um mesmo solo, quanto maior a densidade do solo, maior será a resistência à penetração e menor será a macroporosidade, que é o principal espaço para o crescimento das raízes (MERCANTE et al., 2003). Deve ser levado em conta, no entanto, que

a resistência do solo é mais afetada pela variação nos conteúdos de umidade do solo no momento da amostragem do que pela densidade do solo.

Os altos valores de produtividade e a maior rentabilidade dependem das características físicas, químicas e biológicas dos solos. Plantas de importância econômica podem produzir em maior quantidade quando cultivado sob práticas agrícolas conservacionistas como: semeadura direta e rotação de culturas, assim como calagem proporcionando modificações nos teores de nutrientes, estrutura, porosidade, agregação, densidade, infiltração e disponibilidade de água, tendo em vista o adequado crescimento radicular da cultura.

A resistência mecânica do solo à penetração de raízes exerce um papel importante, dentre os fatores que interferem no processo de desenvolvimento vegetal. Seu valor aumenta de forma diretamente proporcional com a compactação do solo, restringindo o crescimento radicular quando assume os valores entre 1,5 e 4,0 MPa, ao passo que, especificamente, para o plantio direto, esse fato foi estabelecido como sendo da ordem de 5,0 MPa. Em áreas irrigadas, o maior grau de umidade do solo normalmente favorece as plantas, muito embora proporcione condições para maior compactação. Sendo assim, acarreta em aumento de tal resistência, decorrente da maior coesão entre as partículas sólidas do solo, dificultando a análise dos dados entre os diversos sistemas de manejo utilizados. A resistência mecânica do solo à penetração das raízes é um dos atributos físicos que influenciam diretamente o crescimento das raízes e da parte aérea das plantas.

Vários autores utilizam a resistência do solo à penetração para a avaliação dos efeitos dos sistemas de manejo do solo sobre o ambiente radicular (TORMENA e ROLOFF, 1996). A resistência à penetração, medida com o penetrômetro e expressa como índice de cone, é a relação entre a força exercida para fazer penetrar um cone metálico no solo e sua área basal. O índice de cone tem sido bem correlacionado com medidas de crescimento radicular, que a alongação das raízes varie inversamente com a resistência à penetração. Os valores limitantes ao crescimento radicular variam com o tipo de penetrômetro utilizado, com o tipo de solo e também com a espécie de planta. Alguns autores, no entanto, têm adotado um índice de cone de 1,0 MPa como crítico, mas não impeditivo ao crescimento das raízes no solo. A consequência do aumento na resistência à penetração é um dos fatores que leva ao acúmulo de raízes na superfície dos solos compactados (HENDERSON, 1989).

Daniel et al. (1994) observaram que ferramentas que provocam um maior grau de mobilização do solo, como arado de disco, grade aradora e a enxada rotativa, proporcionaram valores mais elevados de resistência do solo à penetração, favorecendo a presença de camadas compactadas. Comentam ainda, que a compactação ou “dureza” do solo esta intimamente

ligada à umidade, e que uma possível compactação pode ser mascarada pela elevada umidade do solo no momento da amostragem.

Vários autores recomendam que a resistência do solo à penetração de raízes seja medida com teores de água próximos à capacidade de campo, situação em que se consegue uma boa correlação entre a densidade do solo, resistência à penetração e o crescimento radicular. Petter (1990) concluiu que, com a umidade do solo equivalente à tensão de 10 kPa, a densidade do solo de  $1,4 \text{ g cm}^{-3}$  não foi limitante ao desenvolvimento radicular da soja. No entanto, o período em que o solo permanece na capacidade de campo é pequeno, de modo que a resistência do solo pode rapidamente variar de níveis não impedidos para impeditivos com a secagem do solo.

Klein et al. (1998), avaliando a resistência do solo a penetração sob diferentes condições de densidade e teor de água, concluíram que a resistência à penetração foi altamente influenciada pela condição de umidade do solo, e a utilização de penetrômetros para avaliar a resistência mecânica à penetração de raízes no solo é um método considerado apropriado para se estudar a compactação do mesmo, tanto pela facilidade quanto pela rapidez na obtenção de dados.

A resistência mecânica à penetração possui correlação negativa com o crescimento radicular, uma vez que a elongação das raízes varia de forma inversamente proporcional à sua grandeza. As limitações que o crescimento radicular apresenta variam com o tipo de penetrômetro utilizado, tipo de solo e também com a espécie de planta. Outro fator importante e que, com a redução do teor de água no solo, ocorre um aumento da resistência à penetração, decorrente da maior coesão entre as partículas (GERARDI et al., 1972).

A compactação do solo determina, de certa forma, as relações entre ar, água e temperatura, e estas influenciam a germinação, brotação e a emergência das plantas, além do crescimento radicular, ou seja, praticamente todas as fases de seu desenvolvimento. Um exemplo de como a compactação atua sobre a planta seria o de um solo submetido ao tráfego de máquinas e implementos, principalmente quando efetuado em determinada condição de umidade, provocando alterações no arranjo das partículas do solo, diminuindo, geralmente, o volume ocupado por determinada massa de terra e o tamanho dos poros do solo, que permitem livre circulação de ar e água – os chamados macroporos.

Por conseguinte, outros atributos físicos do solo – aeração, temperatura e resistência mecânica à penetração – são modificados, afetando também atributos químicos (disponibilidade de nutrientes para as plantas), biológicos (condição do solo para desenvolvimento de microrganismos) e a região ocupada pelas raízes – a rizosfera.

Pesquisadores têm demonstrado claramente o efeito da compactação nos atributos físicos do solo (ROSA FILHO et al., 2009; ANDREOTTI et al., 2010; MONTANARI et al., 2010). A compactação aumenta a densidade do solo e a sua resistência mecânica (IMHOFF et al., 2000; ROSA FILHO et al., 2009; MONTANARI et al., 2010) e diminui a porosidade total, tamanho e continuidade dos poros.

Ainda hoje o método mais utilizado para eliminar camadas compactadas do solo é a utilização de subsoladores que, por meio de hastes penetrando e se movimentando dentro da camada, conseguem quebrá-la, amenizando, assim, o impedimento ao desenvolvimento das raízes. Uma opção para diminuir a compactação é a sucessão de culturas, utilizando espécies que tenham sistema radicular vigoroso, com capacidade de se desenvolver em solos com alta resistência mecânica à penetração (SILVA e ROSOLEM, 2001). A resistência de um solo à penetração de um instrumento agrícola é função da sua compactação, conteúdo de umidade, textura e tipo de mineral de argila. Além disso, a penetração por unidade de força aplicada varia com o tipo de instrumento utilizado. Segundo Baver (1972), a umidade aparece como fator de maior influência nas leituras de penetração. Para determinar a resistência à penetração foi utilizado o Penetrômetro de Impacto nas profundidades, 0,00–0,10 m e 0,10–0,20m.

#### **2.5.1.2.1 Métodos de determinação de umidade do solo e breve descrição de alguns deles**

Podemos classificar os métodos de determinação de umidade do solo em Diretos e Indiretos, sendo:

- Métodos Diretos: - Umidade Gravimétrica
- Umidade Volumétrica ( $\theta$ )
- Métodos Indiretos: - Elétricos (resistência ou capacitância do solo)
- Térmicos (condutividade térmica)
- Radioativos (atenuação de nêutrons rápidos ou de raios gama)
- Tensiometria (potencial matricial)
- Reflectometria no domínio do tempo (const. dielétrica relativa)

##### **2.5.1.2.1.1 Reflectometria no domínio do tempo**

Oliveira et al (2000), desenvolveu um equipamento para a medição da umidade do solo, baseado na técnica da Reflectometria no Domínio do Tempo, (T.D.R. – Time Domain Reflectometry), que permite a medição da umidade do solo por meio da determinação da

constante dielétrica da matriz solo, além de verificar a correlação entre o valor medido da constante dielétrica e a umidade do solo.

Conclui Oliveira et al (2000), que o método TDR de medida de umidade, mostrou ser um método rápido, prático e não destrutivo para a determinação da umidade do solo e adequado às necessidades de medição de umidade no campo. O método TDR se adequa a sistemas automatizados de monitoração e manejo da irrigação, haja vista, ser a aquisição de dados em tempo real. Além do mais este método permite a determinação simultânea da constante dielétrica e da condutividade elétrica do solo. A constante dielétrica do solo é variável com a umidade do mesmo, ou seja, uma variação da umidade causa, na constante dielétrica aparente do solo, uma variação proporcional na variação de umidade. Portanto a medida da constante dielétrica (permissividade elétrica) é um método adequado de se medir a umidade do solo.

Ficou determinado que com equipamento bem mais simples do que os utilizados pela literatura, osciloscópio de 500 MHz ao invés de 2GHz foi suficiente para a realização das estimativas do teor de umidade. Este fato é indicador da possibilidade de simplificação do aparelho existente.

#### **2.5.1.2.1.2 Tomógrafo de resolução micrométrica para estudos de solos**

Macedo (1997), apresentou um tomógrafo de raios X, visando à obtenção de imagens, de forma não destrutiva, do interior de amostras de solo, com resolução espacial de pelo menos 100  $\mu$ m. Como um exemplo do potencial do método e do equipamento, foi possível detectar a presença de selamento superficial em amostras não deformadas de solo. Na tomografia desta amostra, nota-se, claramente, a formação de três camadas distintas com espessuras de 1000, 500 e 1700  $\mu$ m, respectivamente. Desenvolveu-se, na Embrapa Instrumentação Agropecuária (Figura 2), um tomógrafo de raios X, visando à obtenção de imagens, de forma não destrutiva, do interior de amostras de solo, com resolução espacial de pelo menos 100  $\mu$ m.

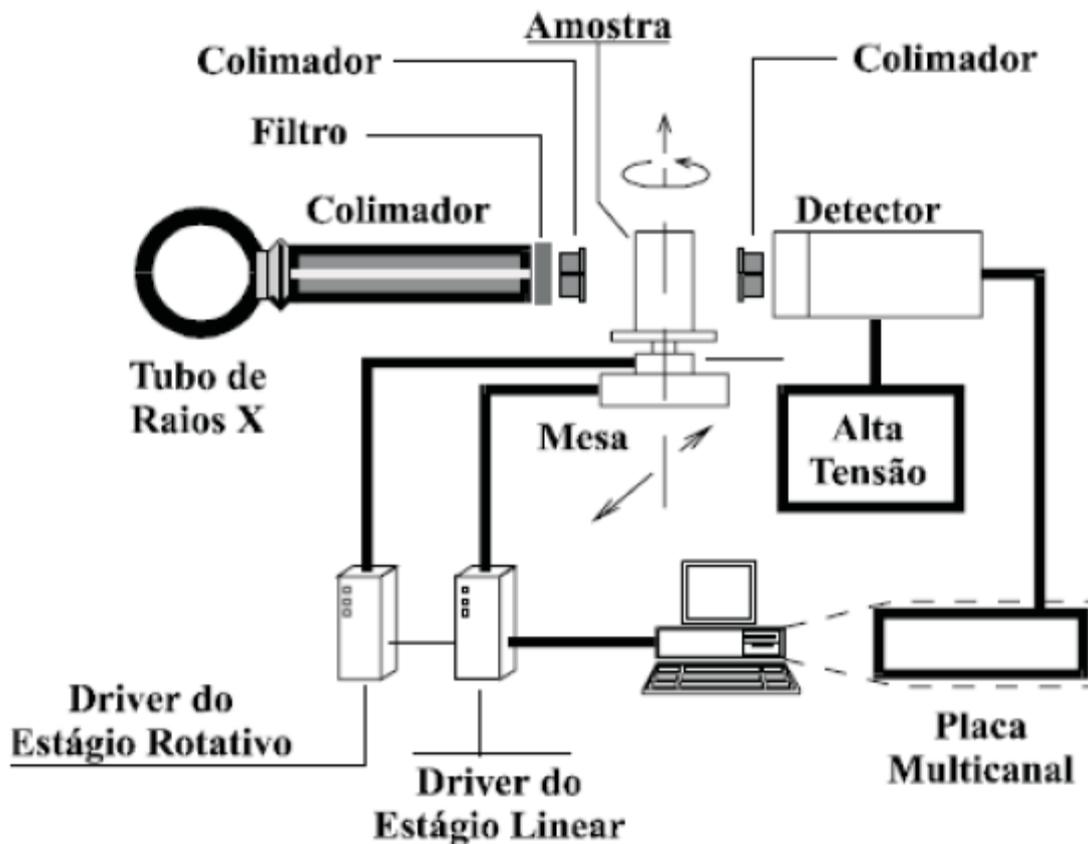


Figura 2. Tomógrafo com resolução micrométrica para aplicações em Ciências do Solo e do Ambiente

#### 2.5.1.2.1.3 Determinação da umidade do solo pela sonda de nêutrons

A técnica de determinação da umidade do solo com a sonda de nêutrons ainda apresenta controvérsias. Por ser uma técnica complexa, que necessita de uma calibração e que abrange um volume esférico de solo, que por sua vez apresenta uma grande variabilidade espacial, ocorrem vários erros que podem prejudicar a confiabilidade dos dados. Para a determinação da umidade volumétrica, estes erros podem ser instrumentais, na calibração e no local. Os maiores erros estimados na determinação da umidade volumétrica do solo pela sonda de nêutrons, neste caso, são os envolvidos na calibração do instrumento (FERREIRA et al, 2003).

#### 2.5.1.2.1.4 Tensiômetros

Existem vários equipamentos, tais como tensiômetros, funis de placa porosa, câmara de pressão de Richards, que medem  $\Psi_m$ . Estes equipamentos baseiam-se na aplicação de uma

tensão  $-h$  ou uma pressão  $+h$  ao solo, resultando uma saída de água do solo. Quanto maior o valor de  $h$  (em termos absolutos) mais água sai. Para cada valor de  $h$ , no equilíbrio, existe um valor de  $\Psi$  no solo. Como  $h$  é o próprio  $\Psi_m$ , variando-se a pressão ou a tensão e medindo-se os correspondentes valores de  $\theta$ , torna-se fácil construir uma curva de retenção de água. Como o potencial matricial varia de ponto a ponto no solo e também em função do tempo, ele precisa ser determinado para cada situação. Uma forma de determinação é o uso da curva de retenção de água do solo; outra forma comum, e direta, é pelo uso do tensiômetro (Figura 3). O tensiômetro é um instrumento de campo utilizado para medir diretamente  $\Psi_m$ .

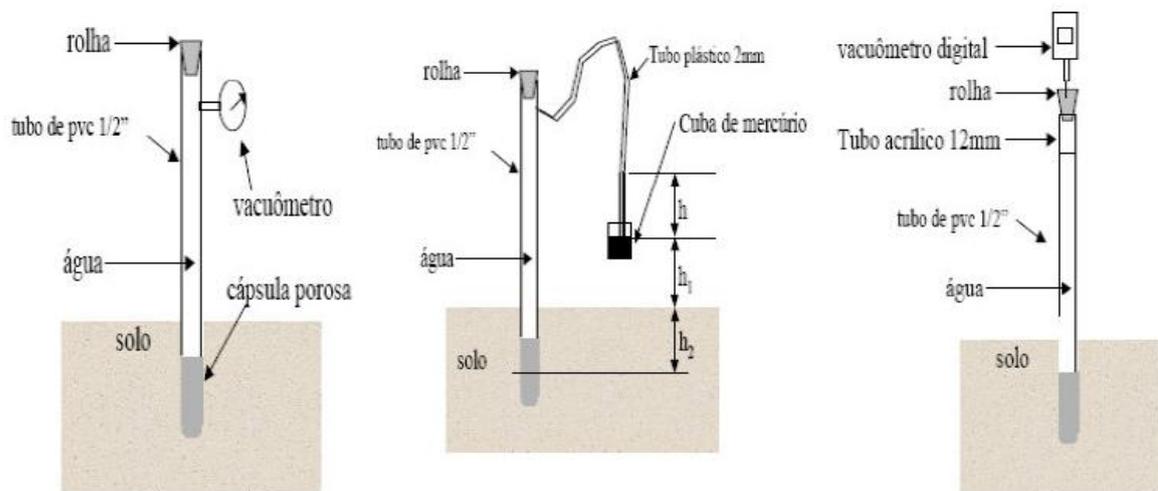


Figura 3. Três exemplos simples de tensiômetros

Ele consiste de uma cápsula porosa de cerâmica conectada a um manômetro por meio de um tubo de plástico. A dimensão dos poros da cápsula é tal que nem com 1 atm de pressão (ou sucção) eles podem ser esvaziados. Quando a cápsula entra em contato com o solo, a água do tensiômetro (que é hermeticamente selado) entra em contato com a água do solo e o equilíbrio tende a estabelecer-se. Inicialmente, isto é, antes de colocar o instrumento em contato com o solo, sua água está à pressão atmosférica e, como o estado padrão é definido pela água à pressão atmosférica,  $\Psi_m = 0$ .

A água do solo, estando sob tensão, exerce uma sucção sobre o instrumento e dele retira certa quantidade de água causando a queda de sua pressão interna. Como o instrumento é vedado, a coluna de mercúrio  $h$  do manômetro cresce, indicando a tensão interna da água. Estabelecido o equilíbrio, o potencial da água dentro do tensiômetro é igual ao potencial da água no solo e assim,  $h$  é uma medida direta de  $\Psi_m$ .

$$\Psi_m = - (13,6 h - h - h_1 - h_2) \text{ cm H}_2\text{O} \text{ ou } \Psi_m = -12,6 h + h_1 + h_2 \text{ -----(01)}$$

onde:

$h$  = leitura em cm de Hg (mercúrio);

$h_1$  = altura do nível de Hg em relação ao solo;

$h_2$  = profundidade de medida.

O fator 13,6 é a densidade do mercúrio que aparece para transformar a leitura  $h$  (dada em cm de Hg) em cm H<sub>2</sub>O. Nota-se que de 13,6  $h$  são descontadas as alturas  $h$ ,  $h_1$  e  $h_2$  e isto acontece por serem elas pressões positivas devidas à água que se encontra dentro do tensiômetro e que atuam sobre a água da cápsula.

Deste modo, considerando, segundo Reichardt (1988), o potencial matricial da ordem de  $-6/100$  atm ( $-0,06$  atm) para a determinação do ponto de capacidade de campo, e sabendo-se que 1 atm corresponde a 76cm de Hg (mercúrio) e substituindo o valor de  $\Psi_m$  (potencial matricial) encontrado para  $-0,06$  atm na equação e medindo-se em campo, os valores de  $h_1$  e  $h_2$ , tem-se o valor de  $h$ , que é a leitura da coluna de mercúrio, acusada no tensiômetro. Com o correspondente valor de  $h$  (leitura em cm de Hg), sabe-se, portanto, em que momento o tensiômetro acusará a capacidade de campo. Para um solo saturado, conforme já abordado anteriormente, o  $\Psi_m$  (potencial matricial) é igual a zero, e, conseqüentemente  $h$  é igual a zero também.

### 2.5.1.3 Teor de matéria orgânica

A recuperação e a manutenção dos teores de matéria orgânica do solo, com as devidas repercussões sobre sua capacidade produtiva, podem ser alcançadas pela utilização de pastagens. Também, pelo uso de sistemas agrícolas intensivos, que preconizam o mínimo e/ou nenhum revolvimento, assim como, por sistemas de preparo que exigem a presença de elevadas quantidades de resteva da cultura antecedente (BAYER e MIELNICZUK, 1999).

A matéria orgânica do solo engloba os resíduos vegetais em diversos estágios de decomposição, a biomassa microbiana, as raízes e a fração mais estável denominada húmus (CAMARGO et al., 1999). Possui uma superfície específica variando entre 800 e 900 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup> (MEURER et al., 2006), assim como, uma capacidade de troca catiônica que pode chegar a 1400 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>. Atualmente, com a adoção de sistemas conservacionistas de cultivo, tais como o plantio direto e o reduzido, tem-se evidenciado sobre a necessidade da resteva, que se

constitui no material precursor da futura matéria orgânica humificada, assim como, sobre a importância dessa fase na ciclagem dos nutrientes, no controle da umidade e da temperatura, infiltração de água, erosão e da atividade biológica do solo (CANELLAS et al., 1999).

A acidez potencial corresponde às substâncias ou aos compostos que liberam  $H^+$  para a solução do solo, causando sua acidificação. Estas incluem o  $Al^{3+}$  trocável adsorvido às cargas negativas das argilas e dos grupos funcionais COOH e OH da matéria orgânica (BISSANI et al., 2004). A acidificação do solo pode levar a uma perda significativa da produtividade das culturas (FAGERIA e SANTOS, 2000).

Considerando que um mesmo sistema de cultivo do solo afeta de forma semelhante os regimes de temperatura e umidade, bem como o fracionamento e a incorporação dos resíduos vegetais nos solos, o efeito diferenciado desses sistemas sobre a taxa de decomposição deve-se provavelmente aos aspectos relacionados às diferentes capacidades protetoras da matéria orgânica à ação decompositora dos microrganismos. Nos Latossolos, além da mais alta proteção física da matéria orgânica pela maior capacidade de formação de agregados, a matéria orgânica encontra-se, em grande parte, associada às superfícies minerais dos óxidos de Fe, pouco afetadas pelo preparo do solo devido a elevada estabilidade química que possuem (OAEDES et al., 1989).

A matéria orgânica afeta as características químicas, físicas e biológicas do solo. Entre as características químicas, destacam-se principalmente a disponibilidade de nutrientes às culturas, a capacidade de troca de cátions e a complexação de elementos tóxicos e micronutrientes, fundamentais em solos tropicais, na sua maioria altamente intemperizados e ácidos. Já a principal característica física modificada é a agregação. A partir do seu efeito sobre a agregação do solo, indiretamente são afetadas as demais características físicas do solo, como sua densidade, porosidade, aeração, capacidade de retenção e a infiltração de água, que são fundamentais à sua capacidade produtiva. No tocante às características biológicas, a matéria orgânica as afeta diretamente, uma vez que atua como fonte de carbono, energia e nutrientes aos microrganismos (CAMARGO et al., 1999; BAYER e MIELNICZUK, 2008). Os níveis críticos estabelecidos por Raij et al. (1997), para a matéria orgânica do solo (MO), foram: a) baixo:  $MO < 25,0 \text{ g dm}^{-3}$ ; b) médio:  $25,1 \leq MO \leq 50,0 \text{ g dm}^{-3}$ ; c) alto:  $MO > 50,0 \text{ g dm}^{-3}$ .

Nos solos tropicais altamente intemperizados, a mineralogia oxídica da fração argila representa um importante componente à estabilização da matéria orgânica que, por sua vez,

juntamente com as argilas, contribui substancialmente para melhorar a sua agregação e sua estrutura. O incremento e a manutenção da matéria orgânica nos trópicos, sobretudo no cerrado, tem-se mostrado mais difícil do que na região subtropical sul brasileira. A adoção do sistema plantio direto tem contribuído substancialmente para essa melhoria, tanto quantitativa quanto qualitativa, da matéria orgânica do solo, resultando em melhorias às suas características físicas e químicas (SILVA e MENDONÇA, 2007).

O estudo da matéria orgânica do solo merece uma grande atenção desde o século XIX devido, basicamente, a importância da mesma para o funcionamento dos ecossistemas. Intervenem de forma ativa na formação do solo, condiciona, seu comportamento em relação com o crescimento das plantas e microorganismos, ao influir no armazenamento de água, troca catiónica, e constituir uma fonte de nutrientes, entre outros aspectos (PORTA et al., 2003).

A matéria orgânica de um solo pode proceder da acumulação de restos e resíduos de plantas e animais (biomassa senescente incorporada ao solo, aportes antropogênicos de estiercol e restos de colheitas e produtos orgânicos resultantes da síntese industrial como o caso dos pesticidas), da decomposição de tecidos orgânicos (pela ação mecânica da fauna e dos microorganismos), da degradação ou decomposição de moléculas orgânicas complexas a compostos orgânicos más simples ou bem da reorganização de certos produtos da degradação.

O tipo e a quantidade de matéria orgânica do solo tem um forte variabilidade espacial de alguns ecossistemas para outros e dentro de cada um, tanto vertical quanto horizontalmente. Em solos naturais, concentra-se nos horizontes superficiais, ganhando-lhes uma cor escura ao longo dos horizontes mais profundos, que tendem a acumular-se pequenas quantidades de matéria orgânica. A variabilidade de todo o ecossistema está ligada às mudanças na distribuição das plantas. Assim, em climas úmidos, a vegetação pode cobrir todo o solo, de modo que toda a superfície recebe contribuições. Na vegetação do semi-árido é escassa, de modo que a heterogeneidade espacial será muito pronunciado. A importância atribuída a ele a matéria orgânica resultante da sua participação nos processos de tamanha importância para o comportamento do solo e crescimento de plantas e organismos do solo, tais como: fornecimento a formação e estabilização de agregados, adsorção e troca iônica, energia e nutrientes, capacidade de retenção de umidade, edafogênicos vários processos e proteção contra a degradação do solo por erosão (PORTA et al., 2003). Para a determinação do carbono orgânico do solo, existem vários métodos, neste caso,

também tem sido o método de análise elementar baseado no calor de combustão do carbono orgânico do solo.

#### 2.5.1.4 Potencial hidrogênionico

Em relação aos nutrientes vegetais, o pH do solo influencia as respectivas solubilidades, concentrações na solução e as formas iônicas. Conseqüentemente, também são influenciadas a absorção e a utilização deles. A grande maioria dos solos brasileiros apresenta sérias restrições ao desenvolvimento das culturas agrícolas, decorrentes do efeito nocivo da acidez, impondo severas restrições à produtividade agrícola (McBRIDE e BLASIAK, 1979).

O avanço da agricultura no Brasil tem sido feito principalmente nas áreas do Cerrado, cujos solos têm boas propriedades físicas e topografia favorável à mecanização. Entretanto, apresentam propriedades químicas inadequadas, como elevada acidez e deficiência generalizada de nutrientes, com destaque para o P, Ca e Mg. Solos dessa natureza, quando corrigidos quimicamente, apresentam grande potencial para uma agricultura tecnificada e de elevada produtividade. O conhecimento da relação entre a acidez do solo e o crescimento e desenvolvimento das plantas é fundamental para o estabelecimento das práticas corretivas dessa acidez, que visem à maior eficiência, tanto dos sistemas de produção agrícola como do uso dos recursos naturais (SOUZA et al., 2007).

Ainda, o pH influencia a atividade de microrganismos do solo que estão ligados com a mineralização da matéria orgânica, nitrificação, fixação biológica de nitrogênio e infecção do sistema radicular com micorrizas, que aumentam a disponibilidade de nutrientes. É portanto, uma das propriedades químicas do solo mais importantes para a determinação da produção agrícola (FAGERIA e SANTOS, 2000).

Fageria (2001a) obteve a produtividade máxima de feijão com o pH de 6,2 em solo do cerrado. Já o pH ideal para as culturas de soja, feijão, milho e trigo está em torno de 6,0 (FAGERIA e ZIMMERMANN, 1998) e o pH médio do solo de cerrado está em torno de 5,0 (LOPES, 1983). Para o pH em  $\text{CaCl}_2$  adotam-se os seguintes limites de interpretação de classes segundo Rajj (1991): a) muito alta: até 4,3, b) alta: 4,4 – 5,0, c) média: 5,1 – 5,5, d) baixa: 5,6 – 6,0 e e) muito baixa: > 6,0.

O pH é um número que define a concentração de íons de hidrogênio (logaritmo do inverso da concentração de íons de hidrogênio) e para a classificação da acidez ou alcalinidade das soluções em uma escala de 0 a 14, com 7 sendo soluções neutras. Soluções

ácidas tem pH entre 0 e 7 e soluções básicas (ou alcalino), um pH entre 7 e 14. O conceito de pH foi introduzido em 1915 em ciência do solo e desde então tem sido utilizado internacionalmente em todos os laboratórios de análise de solo. O pH do solo tem grande influência sobre a natureza do desenvolvimento da vegetação e das culturas, bem como os nutrientes assimilados elementos maiores e traços.

Além disso, o pH pode determinar a mobilidade dos diferentes elementos no solo, seja natural ou adicionado por descargas poluentes. Desempenha um papel decisivo na especiação dos metais que aparecem no chão ou em geral apenas na forma de ânions. No caso dos metais pesados nos solos cuja espécie só são cátions, o pH não vê a sua influência de forma decisiva em processos importantes, como a formação de hidroxicomplejos, adsorção em partículas sólidas ou precipitação de hidróxidos e carbonatos (PORTA et al., 2003). O pH de um solo podem ser alteradas como resultado da adição de adubo e água para irrigação e pela decomposição da matéria orgânica.

O pH do solo é frequentemente medido em água e uma solução de cloreto de potássio. A medida de água, o chamado pH atual, expressa a quantidade de  $H^+$  na solução do solo, independentemente de íons de ácido existente, não conta como fixa no complexo de troca (íon  $H^+$  e  $Al^{+3}$ ). Estes são medidos em KCl, pH conhecido potencial para medir a acidez potencial do solo, onde  $K^+$  são trocados no complexo de troca pelo ácido. Por esta razão, existem diferenças entre o pH medido em água e medido em KCl (que foi medido em água é de 0,5 a 1,5 unidade superior ao medido em KCl). No Quadro 1 são apresentados os valores de pH e suas respectivas faixas.

Quadro 1: Valores indicativos de pH e termos usuais para descrever os intervalos de pH.

<b>pH</b>	<b>Avaliação</b>
<4,5	Extremadamente ácido
4,5 – 5,0	Muito fortemente ácido
5,1 – 5,5	Fortemente ácido
5,6 – 6,0	Medianamente ácido
6,1 – 6,5	Ligeramente ácido
6,6 – 7,3	Neutro
7,4 – 7,8	Medianamente básico
7,9 – 8,4	Básico
8,5 – 9,0	Ligeramente alcalino
9,1 – 10,0	Alcalino
>10,0	Fortemente Alcalino

## 2.6 A estatística clássica e a geoestatística na pesquisa agrônômica

As propriedades do solo, em geral, não são aleatoriamente distribuídas no espaço, obedecendo a um arranjo estrutural com uma dimensão característica que é o seu domínio, correspondendo à distância dentro da qual há interdependência dos valores medidos (RUSSO e BRESLER, 1981). Análises estatísticas “clássicas”, independência das observações, são inadequadas para estudos com este enfoque e, devem ser substituídas por análises espaciais nas quais são consideradas as correlações entre observações vizinhas (HAMLETT et al., 1986).

Essas análises são baseadas na teoria das variáveis regionalizadas, base da geoestatística, em que, a variabilidade espacial pode ser caracterizada através de autocorrelogramas, semivariogramas e métodos de interpolação, como por exemplo, a “krigagem” (LIBARDI et al., 1996). A partir destas medidas localizadas espacialmente é definido o grau de dependência espacial do parâmetro avaliado. A estatística clássica, por meio das estatísticas descritivas, não contempla a posição relativa da amostra no terreno e conseqüentemente a distribuição espacial.

Desse modo, o conhecimento da variabilidade do solo subsidia a tomada de decisão para diferentes sistemas de manejo, além de outras aplicações como em levantamentos de solos, conhecimento e inferências nas propriedades físicas, químicas e mineralógicas dos solos, entendimento dos processos geomórficos e pedogênicos, estimativas de densidade amostral dentre outros (BURROUGH, 1986; BERG e KLAMT, 1997; CUNHA, 2000; POCA, 2000; ALMEIDA, 2007; MONTANARI et al., 2008; ANDREOTTI et al., 2010; OLIVEIRA JÚNIOR, et al., 2010; VIEIRA et al., 2010; SANTOS et al., 2010; MONTANARI et al., 2010).

Muitos autores têm estudado a variabilidade espacial dos parâmetros químicos e físicos dos solos (SOUZA et al., 1997; SALVIANO et al., 1998; MONTANARI, 2009; ROSA FILHO et al., 2009; MONTANARI, 2009); outros estudos enfocam a variabilidade dos atributos do solo num contexto pedogeomórfico (LEPSCH, 1975; MARQUES JÚNIOR, 1995; MEIRELLES, 1998; SANCHEZ, 1999; CUNHA, 2000; POCA, 2000; SOUZA et al., 2001; MONTANARI, 2003; SOUZA, 2004, MONTANARI et al., 2005; ALMEIDA, 2007; MONTANARI, 2009; OLIVEIRA JÚNIOR, et al., 2010; VIEIRA et al., 2010).

Recentemente estudos enfocando a variabilidade espacial das propriedades do solo associados aos modelos de paisagem têm auxiliado no mapeamento de locais específicos de

manejo (SANCHES, 1999; CUNHA, 2000; POCAI, 2000; SOUZA et al., 2001; MONTANARI, 2003; SOUZA, 2004; MONTANARI et al., 2005). Estes estudos ajudaram a caracterizar diferentes ambientes, e servem de base para a transferência de conhecimento para locais de mesmo domínio pedogeomórfico.

## **2.6.1 Métodos estatísticos para análise das variáveis da cultura e do solo**

### **2.6.1.1 Estatística descritiva**

A estatística descritiva sempre foi muito utilizada em pesquisas na Ciência do Solo, pois fornece uma indicação inicial do comportamento dos dados, permitindo assim uma análise preliminar da população em estudo (RIBEIRO JÚNIOR, 1995).

Para uso da estatística descritiva em dados oriundos de experimentos de campo, é admitido solo homogêneo. Portanto, área e/ou solos homogêneos são escolhidos muitas vezes, sem um critério bem definido de homogeneidade, onde as parcelas são distribuídas ao acaso para evitar o efeito da irregularidade porventura existente (CARVALHO et al., 2000).

Segundo BUSSAB e MORETTIN (1987), as medidas de dispersão mais utilizados para expressar a variabilidade de um conjunto de dados são a variância, o desvio padrão, o coeficiente de variação e a amplitude total, por serem fáceis de calcular e interpretar. Quando os valores tendem a se concentrarem próximos da média, a variância é pequena. Entretanto, se os valores tendem a se afastar da média a variância é grande. O coeficiente de variação (CV), segundo WEBSTER e OLIVER (1990), indica o grau da variabilidade da variável em estudo, não refletindo o seu significado físico, porém, muito utilizado para comparar atributos que possuem magnitudes diferentes.

Outro parâmetro que a estatística descritiva utiliza com freqüência é a média aritmética, que é um único valor representativo do conjunto de dados. Outra medida é a mediana, a qual representa o valor central da variável em estudo, define exatamente o centro da distribuição.

### **2.6.1.2 Geoestatística**

LIBARDI et al. (1996) relataram que enquanto na estatística clássica as amostras são coletadas ao acaso, na geoestatística os locais de amostragem são definidos. Os autores observaram ainda, que nos dois tipos de coleta pode-se calcular a média e a variância, entretanto, somente por meio da geoestatística, que considera a dependência espacial entre as

medidas, pode-se obter a estrutura da variância, evidenciando aspectos não disponíveis por outros métodos.

As pesquisas no Brasil sobre a variabilidade espacial de atributos do solo, usando técnicas da geoestatística vem sido muito estudada (VIEIRA et al., 1983; VIEIRA et al., 1991; SOUZA, 1992; SOUZA et al. 1997, b; SALVIANO, 1998; CUNHA, 2000; POCAI, 2000; SOUZA et al., 2001; MONTANARI, 2003; SOUZA, 2004; MONTANARI, et al., 2005; MONTANARI, et al., 2008; ROSA FILHO et al., 2009; OLIVEIRA JÚNIOR, et al., 2010; VIEIRA et al., 2010; SANTOS et al., 2010; MONTANARI et al., 2010).

O estudo da variabilidade espacial do solo é muito importante para o planejamento e análise das pesquisas agropecuárias. O uso de técnicas geoestatísticas permite a elaboração de semivariogramas, que quantificam a dependência espacial de parâmetros do solo, possibilitando a obtenção de estimativas da propriedade do solo, em locais não amostrados, com erro mínimo (GUIMARÃES et al., 1992).

A geoestatística é utilizada para o estudo da variabilidade espacial de propriedades do solo, sendo aplicada à Ciência do Solo (BURGESS e WEBSTER, 1980), e auxilia na escolha, locação de experimentos e interpretação dos resultados (VIEIRA et al., 1991). O uso da geoestatística requer coleta de amostras previamente planejada, com a localização espacial de cada ponto de amostragem.

#### **2.6.1.2.1 Semivariograma**

Na geoestatística, a variabilidade espacial é quantificada a partir de correlogramas e semivariogramas, predominantemente que determinam a dependência espacial entre unidades amostrais bem como o alcance da influência de cada ponto amostral (VIEIRA et al., 1981).

O semivariograma nos informa o tipo e a forma da dependência espacial, e segundo VIEIRA et al., (1983), constitui-se na primeira etapa da análise geoestatística, fornecendo dados para o interpolador confeccionar mapas.

O semivariograma experimental é um gráfico da semivariância em função da distância que caracteriza a estrutura de dependência espacial da variável em estudo (Eq. 02), ou seja, o semivariograma é uma função que relaciona a semivariância com o vetor distância, podendo ser representada analítica e/ou graficamente. A semivariância é definida como:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} \{Z(x_i) - Z(x_i + h)\}^2 \text{-----(02)}$$

em que,

$\hat{\gamma}(h)$  = Semivariância estimada;

$N(h)$  = Número de pares de observações  $Z(x_i)$ ,  $Z(x_i + h)$  separados pela distância  $h$ .

O semivariograma é definido por três parâmetros: o patamar ( $C_0 + C_1$ ), o efeito pepita ( $C_0$ ) e o alcance ( $a$ ) (Figura 4). O efeito pepita é a semivariância diferente de zero quando a distância entre as amostras tende a zero, representa a variância que não pode ser detectada pelo semivariograma, seja por necessidade de se coletar amostras a distâncias menores, seja por um erro de alguma etapa do trabalho, o patamar, corresponde ao ponto onde toda a semivariância de amostra é de influência aleatória, correspondendo a variância total, obtida pela estatística descritiva (TRANGMAR et al., 1985). O alcance mede a distância limite da dependência espacial.

Assim, o meio de ligação entre o conjunto de dados e a ferramenta que se pode ser usada (estimadores e simuladores) é a escolha do modelo adequado para o semivariograma. Portanto, a modelagem correta é fundamental, principalmente quando os parâmetros (efeito pepita e alcance) forem determinados com o objetivo de serem usados na estimação de valores da variável aleatória.

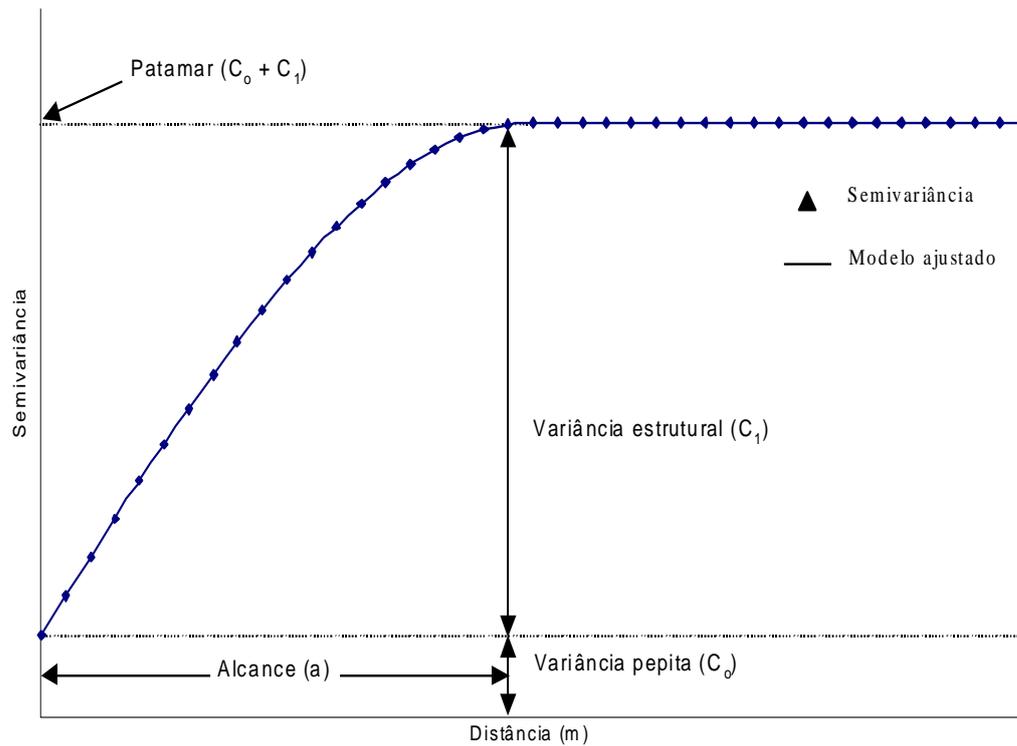


Figura 4. Características do semivariograma

Em estudos relacionados a solos, podem-se ajustar vários modelos de semivariogramas, tais como: esférico, exponencial, gaussiano e linear. O modelo ajustado será aquele cuja função melhor representar as semivariâncias observadas. O ideal é que a semivariância aumente com a distância entre os pontos amostrados até atingir um valor mais ou menos constante. Portanto, um semivariograma ideal é aquele que passa através da origem quando a distância amostral de separação é igual a zero e atinge um patamar a uma determinada distância.

Alguns modelos básicos, usuais em geoestatística, denominados de modelos isotrópicos por ISAACS e SRIVASTAVA (1989), são divididos em dois tipos: modelos com patamar e modelos sem patamar.

Eles são descritos a seguir:

Modelos com patamar:

**(a) Modelo esférico:**

$$\gamma(\mathbf{h}) = \begin{cases} 0 & , |\mathbf{h}| = 0 \\ C_0 + C_1 \left[ \frac{3}{2} \left( \frac{|\mathbf{h}|}{a} \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{|\mathbf{h}|}{a} \right)^3 \right] = C_0 + C_1 [\text{Sph}(|\mathbf{h}|)] & , 0 < |\mathbf{h}| \leq a \\ C_0 + C_1 & , |\mathbf{h}| > a \end{cases} \text{-----(03)}$$

O modelo esférico (Eq. 03) é obtido selecionando-se os valores do efeito pepita ( $C_0$ ) e do patamar ( $C_0 + C_1$ ), depois traçando-se uma reta que intercepte o eixo  $y$  em  $C_0$  seja tangente aos primeiros pontos próximos de  $h = 0$ . Essa reta cruzará o patamar à distância,  $a' = (2/3)a$ . Assim, o alcance ( $a$ ) será  $a = 3a'/2$ . O modelo esférico é linear até aproximadamente  $(1/3)a$  (VIEIRA 2000), sendo este modelo o de maior ocorrência para as propriedades de solo (TRANGMAR et al., 1985).

**(b) Modelo exponencial:**

$$\gamma(\mathbf{h}) = \begin{cases} 0 & , |\mathbf{h}| = 0 \\ C_0 + C_1 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{|\mathbf{h}|}{a}\right) \right] = C_0 + C_1 [\text{Exp}(|\mathbf{h}|)] & , |\mathbf{h}| \neq 0 \end{cases} \text{-----(04)}$$

Uma diferença entre o modelo exponencial (Eq. 04) e o esférico é que este modelo atinge o patamar assintoticamente, com o alcance prático definido como a distância na qual o valor do modelo é de 95% do patamar (ISAAKS e SRIVASTAVA, 1989). Os parâmetros  $C_0$  e  $C_1$ , para o modelo exponencial, são determinados da mesma maneira que para o esférico (VIEIRA 2000).

**(c) Modelo gaussiano:**

$$\gamma(\mathbf{h}) = \begin{cases} 0 & , |\mathbf{h}| = 0 \\ C_0 + C_1 \left[ 1 - \exp \left( -3 \frac{|\mathbf{h}|}{a} \right)^2 \right] = C_0 + C_1 [\text{Gau}(|\mathbf{h}|)] & , |\mathbf{h}| \neq 0 \end{cases} \text{-----(05)}$$

O modelo gaussiano (Eq. 05) é usado muitas vezes para modelar fenômenos extremamente contínuos (ISAAKS e SRIVASTAVA, 1989). Semelhante ao modelo exponencial, o modelo gaussiano atinge o patamar assintoticamente, e o parâmetro é definido como o alcance prático ou distância na qual o valor do modelo é 95% do patamar (ISAAKS e SRIVASTAVA, 1989). O que caracteriza este modelo é seu ponto de inflexão próximo à origem.

Modelo sem patamar:

**(d) Modelo potência:**

$$\gamma(\mathbf{h}) = \begin{cases} 0 & , |\mathbf{h}| = 0 \\ C_0 + c \cdot |\mathbf{h}|^e = C_0 + \text{Pot}(|\mathbf{h}|) & , |\mathbf{h}| \neq 0 \end{cases} \text{-----(06)}$$

O modelo potência (Eq. 06) não atinge o patamar. Em geral, esse tipo de modelo é utilizado para modelar fenômenos com capacidade infinita de dispersão.

O parâmetro ( $e$ ) tem que ser estritamente maior que zero e menor que 2, a fim de garantir que o semivariograma tenha positividade definida condicional. Quando  $e = 1$ , temos o modelo linear.

**2.6.1.2.2 Krigagem**

Muitas vezes o interesse da análise não se esgota em modelar a estrutura de variabilidade. Em diversas situações o interesse está na estimação de valores em pontos não amostrados, seja por interesse local ou pela intenção de obter um detalhamento da área que vai além do permitido pela amostra.

A existência de um modelo de dependência espacial fornece os parâmetros necessários para estimar os valores das propriedades do solo em locais não amostrados. A krigagem usa a

dependência espacial entre amostras vizinhas, modelada no semivariograma, para estimar valores em qualquer posição dentro do campo, sem tendência e com variância mínima.

Krigagem nada mais é do que uma média ponderada dos valores observados de uma propriedade  $Z$  dentro de uma vizinhança. Somente os pontos que estão espacialmente relacionados com o local a ser estimado (dentro da amplitude da dependência espacial) são usados na krigagem. Os vizinhos mais próximos têm maiores pesos ponderadores. Assim, o semivariograma deve ser bem preciso somente nos primeiros lags. Pouco ganho é obtido para grandes distâncias. Existem alguns tipos de krigagem que serão explicitados abaixo:

Krigagem simples: nessa forma de krigagem adota-se uma única média em toda a área;

Krigagem ordinária pontual: nessa forma de krigagem, para cada estimativa é identificada uma média do valor da propriedade naquela vizinhança;

Krigagem em bloco: a krigagem em blocos, fornece um valor médio para uma determinada região no espaço.

Segundo TRANGMAR et al., (1985), a krigagem em blocos se baseia na mesma equação do estimador da krigagem pontual, mudando apenas a forma de se determinar os pesos. No lugar da semivariância entre pontos amostrais e ponto estimado, usa-se a semivariância média entre pontos amostrais e todos os pontos dentro de um bloco. Neste trabalho os dados serão trabalhados com a krigagem em blocos.

Segundo TRANGMAR et al., (1985), uma mudança na forma do semivariograma acarreta diferentes pesos aos valores medidos. Assim, o formato gaussiano diz respeito a fenômenos com forte continuidade espacial, o que gera pesos maiores para os dados mais próximos que o modelo exponencial e esférico.

A magnitude do efeito pepita é importante na krigagem porque estabelece um limite menor para o tamanho da variância de estimação e, portanto, para a precisão da interpolação. Isto é quanto menor o efeito pepita do semivariograma, menor será a variância da estimação, ou, mais precisamente, quanto maior for a diferença do efeito pepita em relação ao patamar do semivariograma, maior a continuidade do fenômeno, menor a variância da estimativa, ou maior a confiança que se pode ter na estimativa.

A mudança do alcance é a que promove o efeito relativamente menor nos pesos. Contudo, o acréscimo tende a promover redução da variância de krigagem. Experiência indica

que krigagem em bloco produz mapas mais refinados que a krigagem pontual. A krigagem em bloco é mais importante quando o efeito pepita é grande. Na Figura 5 são apresentados os mapas construídos utilizando-se a krigagem pontual e a krigagem em blocos.

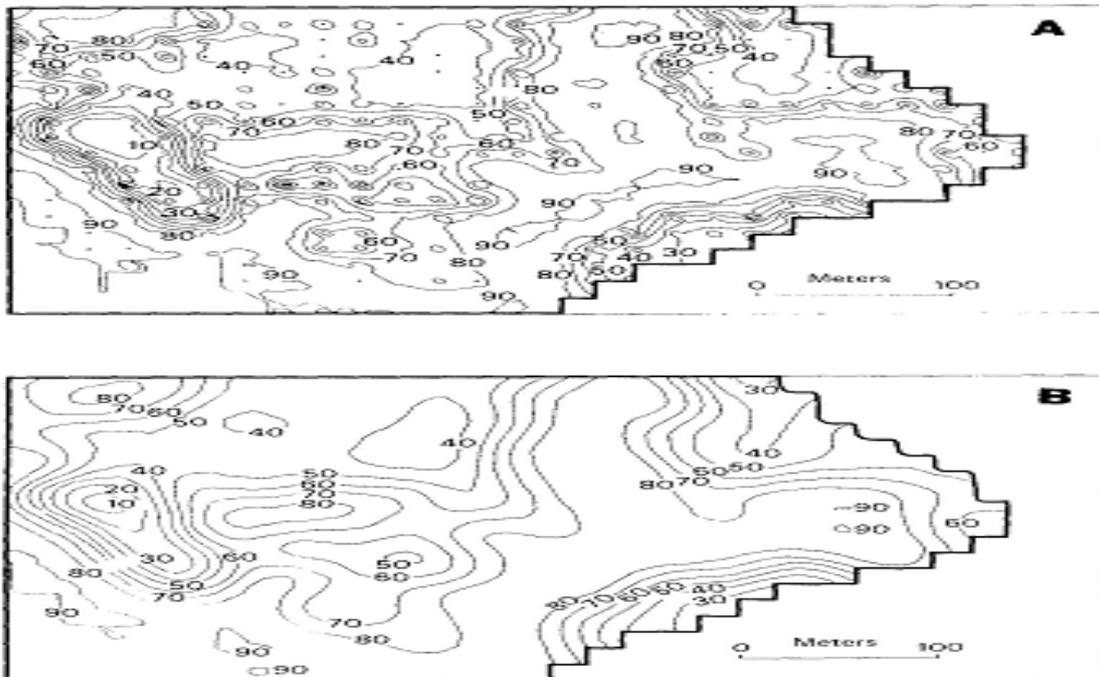


Figura 5. Krigagem pontual (A) e krigagem em blocos (B).

### 2.6.1.2.3 Semivariograma cruzado

O semivariograma cruzado é uma ferramenta geoestatística que permite verificar a continuidade cruzada entre as variáveis regionalizadas, tornando possível avaliar se a variabilidade de uma série é acompanhada pela da outra, de forma direta como indireta. Por exemplo, propriedades do solo e atributos da planta, condutividade hidráulica e retenção de água, as quais são difíceis e caras para se medir, tais como a granulometria da camada superficial do solo. A facilidade de se utilizar os teores granulométricos em estimativas tem atraído o interesse de pesquisadores que utilizam modelos para predição da produtividade das culturas, erosão e potencial de produção. Em situações nas quais há a correlação espacial entre duas propriedades, a estimativa de uma delas pode ser feita usando-se informações de ambas, que são expressas no semivariograma cruzado, sendo o método chamado de co-krigagem, o qual pode ser mais preciso do que o da krigagem em si (VIEIRA et al., 2010).

#### 2.6.1.2.4 Co-krigagem

Algumas variáveis apresentam grande dificuldade de determinação, qual seja quanto ao tempo para a análise, ou quanto ao custo das análises (GUIMARÃES, 2000). O conhecimento das relações entre as variáveis pode contribuir para a realização de estimativas de variáveis em função de outros atributos (KIEHL, 1979), isto quando existir correlação espacial entre duas variáveis, modelada pelo semivariograma cruzado, sendo possível estimar o valor de uma variável para um determinado local não amostrado pela técnica de co-krigagem, com base na correlação espacial de outra variável. A co-krigagem é uma técnica de avaliação geoestatística que permite estimar uma variável primária de interesse por intermédio de uma variável secundária. Para que sua aplicação seja possível é necessário que ambas estejam correlacionadas, para que o variograma cruzado seja representativo (ISAAKS e SRIVASTAVA, 1989). Ela pode ser utilizada para estimar valores de uma propriedade do solo de difícil mensuração (como exemplo, a condutividade hidráulica), com base em uma outra medição mais fácil (por exemplo, o teor de argila), desde que sejam correlacionadas espacialmente. Essa estimativa pode ser até mais precisa do que a krigagem de uma variável simples, quando o semivariograma cruzado mostrar dependência espacial entre duas variáveis (ISAAKS e SRIVASTAVA, 1989; VIEIRA, 2000; MONTANARI et al., 2010; VIEIRA et al., 2010).

#### 2.6.1.2.5 Exclusão da tendência quando da não-formação da estacionariedade

No caso da não-estacionariedade de um atributo qualquer pôde-se efetuar a retirada da tendência dos dados pela técnica do refinamento polinomial. A geoestatística é a ciência que trata da aplicação da teoria das variáveis regionalizadas, utilizada na estimativa de fenômenos geológicos. Dessa forma, uma variável  $Z$ , que é distribuída ordenadamente no espaço  $s$ , é tida como variável regionalizada  $Z(s)$ . Portanto, pode ser representada espacialmente pelo semivariograma, partindo-se do pressuposto de que seja intrínseca, isto é, de que seus incrementos sejam estacionários. Entretanto, em muitos casos ela não satisfaz essa condição, de forma a caracterizar o fenômeno por exibir uma tendência, isto é, de não ser intrínseca e, portanto, não-estacionária. A Figura 6 ilustra tipicamente o semivariograma não-estacionário e o estacionário. Assim, por se tratar de variável não-estacionária, se decompõe em:

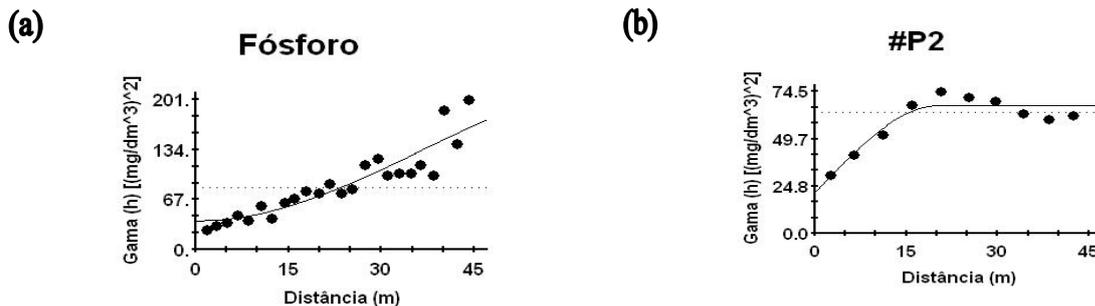


Figura 6. Exemplo de semivariogramas: (a) não-estacionário, e (b) estacionário.

$$Z(s) = m(s) + R(s).....(07)$$

onde: **m(s)** é a tendência ou deriva e **R(s)** é o resíduo (MATHERON, 1962; ARMESTO, 1999).

Segundo Davis (1986), a tendência **m(s)** da variável **Z(s)**, que depende exclusivamente da localização geográfica (coordenadas cartesianas x, y) do ponto amostral, na qual o componente aleatório vai ficar modelado no resíduo, pode ser obtida pela técnica da regressão múltipla polinomial, quando **m(s)** é obtida em função dos valores das coordenadas cartesianas (x, y) do ponto. As expressões testadas são a linear, quadrática e a cúbica, relacionadas a seguir:

$$m(x,y) = a_0 + a_1.x + a_2.y.....(08)$$

$$m(x,y) = a_0 + a_1.x + a_2.y + a_3.x^2 + a_4.y^2 + a_5.xy.....(09)$$

$$m(x,y) = a_0 + a_1.x + a_2.y + a_3.x^2 + a_4.y^2 + a_5.xy + a_6.x^3 + a_7.y^3 + a_8.x^2y + a_9.y^2x.....(10)$$

Dessa forma, a eleição da tendência  $\mathbf{m}(\mathbf{s})$ , efetuada pelo ajuste dos mínimos quadrados para cada modelo, é obtida pela escolha daquele que apresentar o maior coeficiente de determinação. Definido o modelo, pode-se calcular o resíduo  $\mathbf{R}(\mathbf{x},\mathbf{y})$ , a partir da eq. (10), efetuando-se:

$$\mathbf{R}(\mathbf{x},\mathbf{y}) = \mathbf{Z}(\mathbf{x},\mathbf{y}) - \mathbf{m}(\mathbf{x},\mathbf{y}) \dots \dots \dots (11)$$

Portanto, com tais resíduos, poderão ser efetuados os tratamentos necessários aos dados, tais como o ajuste do semivariograma e sua validação. Finalmente, a soma dos resíduos aos respectivos desvios resultará na estimativa da variável  $\mathbf{Z}^*(\mathbf{x},\mathbf{y})$ , com a qual poderá ser efetuada a krigagem, conforme:

$$\mathbf{Z}^*(\mathbf{x},\mathbf{y}) = \mathbf{m}^*(\mathbf{x},\mathbf{y}) + \mathbf{R}^*(\mathbf{x},\mathbf{y}) \dots \dots \dots (12)$$

onde:  $\mathbf{Z}^*(\mathbf{x},\mathbf{y})$  é a estimativa da variável não-estacionária  $\mathbf{Z}(\mathbf{s})$ ,  $\mathbf{m}(\mathbf{x},\mathbf{y})$  é a tendência da variável  $\mathbf{m}(\mathbf{s})$ , e  $\mathbf{R}^*(\mathbf{x},\mathbf{y})$  é a estimativa do resíduo resultante da krigagem. Desta forma, pode-se calcular novamente o semivariograma, com os resíduos obtidos deste procedimento, e a designação dos atributos aos quais foi extraída a tendência é # atributo. Portanto, na interpretação dos mapas de krigagem, para os atributos que apresentaram tendência e indicam na legenda do mapa de krigagem valores variando entre positivos e negativos, devido tais valores serem os resíduos, para que na legenda do mapa de krigagem possa aparecer o valor original do atributo que se está estudando, efetua-se a interpolação do mapa de krigagem com os valores dos resíduos. Assim, quando é realizado este cálculo pelo programa GS<sup>+</sup> (2004), é gerado um arquivo Excel, que possui todas as interpolações calculadas para o número de vizinhos estipulado anteriormente. A partir do número ideal de vizinhos, estipulado pela validação cruzada prévia, pode-se calcular o  $\mathbf{R}^*(\mathbf{x},\mathbf{y})$ . Seguidamente, pode-se calcular o  $\mathbf{m}^*(\mathbf{x},\mathbf{y})$ , a partir dos coeficientes adjuntos calculados pela expressão ajustada anteriormente. A partir do conhecimento do  $\mathbf{R}^*(\mathbf{x},\mathbf{y})$  e do  $\mathbf{m}^*(\mathbf{x},\mathbf{y})$  podem ser calculados os valores do atributo retrotransformado pelo uso da Equação (9). Com isso, retorna-se ao GS<sup>+</sup> e efetua-se a

krigagem com tais valores retrotransformados (atributo), obtendo-se o mapa de krigagem final.

#### **2.6.1.2.6 Variabilidade espacial aplicada à cultura da soja e aos solos**

No geral, o solo mantido em estado natural, sob vegetação nativa, apresenta atributos físicos, tais como a permeabilidade, estrutura, densidade global e a porosidade, de forma adequada ao desenvolvimento das plantas. Nessas condições, o seu volume explorado pelas raízes é relativamente grande. À medida que ele vai sendo submetido ao uso agrícola, seus atributos, sobretudo os físicos, sofrem alterações geralmente desfavoráveis ao vegetal (ANDREOLA et al., 2000).

Vários trabalhos têm demonstrado que o tipo de exploração agrícola afeta peculiarmente alguns atributos físicos do solo (ANDREOTTI et al., 2010; ROSA FILHO et al., 2010 e MONTANARI et al., 2010). Tem sido apregoado que a rotação de culturas, estabelecida no sistema plantio direto, incluindo espécies com sistema radicular agressivo e com diferentes quantidades de fitomassa, pode alterar os atributos físicos do solo, melhorando desta forma, a produtividade das culturas (ALBUQUERQUE et al., 2001). Por outro lado, atributos tais como a macroporosidade, microporosidade, porosidade total e a densidade do solo, têm sido utilizados para indicar restrições ao desenvolvimento das plantas. Assim, Unger e Kaspar (1994) destacaram que a compactação do solo reduz o crescimento vegetal, principalmente quando o suprimento de água e nutrientes é insuficiente, fato verificado quando as raízes se desenvolvem abundantemente sobre as camadas compactadas.

A vegetação natural dos cerrados brasileiros vem gradativamente sendo substituída por culturas anuais, pastagens e reflorestamentos. Os solos deste ecossistema nativo normalmente revelam satisfatórios atributos físicos do ponto de vista agrícola. Entretanto, a partir do momento em que são intensamente utilizados à produção agrícola, sofrem substanciais alterações. De modo geral, verificam-se aumentos da densidade do solo, da resistência mecânica à penetração e da microporosidade e diminuições da porosidade total e da macroporosidade (VERONESE JÚNIOR et al., 2006; LIMA et al., 2007).

A redução do teor de água do solo proporciona aumento da resistência à penetração, decorrente da maior coesão entre as partículas sólidas (SANTOS et al., 2010). Souza et al. (2001) encontraram valores de resistência à penetração do solo entre 2,21 MPa e 2,57 MPa, referentes à umidade de 0,17 kg kg<sup>-1</sup> nas profundidades entre zero – 0,05 m e 0,15 – 0,20 m

respectivamente, estudando a variabilidade espacial dos atributos físicos de um Latossolo Vermelho distrófico estabelecido com a cultura do feijoeiro. Freddi et al. (2005), estudando os sistemas de preparo convencional e o plantio direto para a cultura do feijoeiro, encontraram valores de resistência à penetração de 2,18 MPa para a profundidade de zero – 0,10 m e de 4,26 MPa para a de 0,10 – 0,20 m no plantio convencional, assim como de 6,74 MPa para a profundidade de zero – 0,10 m e 8,27 MPa para a de 0,10 – 0,20 m no plantio direto.

O estudo da variabilidade espacial dos nutrientes no solo é uma fase importante para o estabelecimento da agricultura de precisão. Nesta etapa, a utilização dos semivariogramas permite planejar desenhos ótimos de amostragem do solo, no intuito de capturar a variabilidade em escalas espaciais. A variabilidade espacial dos nutrientes pode não ser igual entre si, ou seja, alguns nutrientes necessitam de números maiores de amostras que outros, para que se possa conhecer seus comportamentos em relação a uma determinada área. Uma maneira de solucionar estes problemas seria a adoção de métodos geoestatísticos para avaliar a variabilidade espacial da fertilidade do solo (DEUTSCH e JOURNAL, 1998).

A variabilidade do solo é conseqüência de complexas interações dos fatores e processos de sua formação, sendo influenciada pelas práticas de manejo e pelas culturas. Áreas pedologicamente similares podem apresentar diferença na variabilidade quando submetidas a diferentes práticas de manejo. E áreas pedologicamente diferentes, quando submetidas ao mesmo manejo, podem apresentar atributos semelhantes (CORÁ et al., 2004).

Dados georreferenciados em estudos da variabilidade espacial de atributos do solo de uma propriedade agrícola permitem a obtenção de mapas de fertilidade de solos e o estabelecimento de estratégias de aplicação de fertilizantes, sendo a análise exploratória dos dados uma etapa de fundamental importância e obrigatória em qualquer tipo de estudo deste tipo (BURROUGH et al., 1986). A variabilidade espacial dos índices de fertilidade do solo aumenta com a adoção do sistema plantio direto, quer no sentido horizontal, pela distribuição irregular na superfície do solo (KLEPKER e ANGHINONI, 1995; COUTO, 1997), quer ainda no sentido vertical, pelas diferenças nos teores de uma camada mais superficial em relação à outra mais abaixo (AMARAL e ANGHINONI, 2001). Neste sistema, os resíduos dos vegetais provocam alterações nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, causando alterações no movimento e na redistribuição de compostos mais solúveis. As freqüentes adubações e calagens em superfície tendem a formar um gradiente de concentração superficial (ELTZ et al., 1989), causando variabilidade dos índices de pH do solo e dos teores de

nutrientes. A matéria orgânica do solo também tem sido amplamente citada como um indicador-chave da qualidade do solo em áreas agrícolas (ZECH et al., 1997), pois exerce um papel fundamental no solo, agindo em sua estrutura pelo fornecimento de substâncias agregantes, no suprimento de macro e de micronutrientes, na capacidade catiônica e no tamponamento do pH (ZANÃO JÚNIOR, et al., 2007).

A adoção do sistema plantio direto vem expandindo-se por toda a região Central do Brasil, sendo uma alternativa para a substituição do sistema convencional de preparo do solo, podendo contribuir para a sustentabilidade de sistemas agrícolas intensivos. Souza (1992) pressupôs que o plantio direto apresentasse maior variabilidade nos teores de matéria orgânica e de nutrientes no perfil do solo, do que o sistema convencional, em decorrência do não-revolvimento da camada superficial do solo, e segundo Thung e Oliveira (1998), solos com uso do cultivo mínimo e do plantio direto podem, ao longo do tempo, ter seus teores de matéria orgânica aumentados.

Zanão Júnior et al. (2007), estudando a variabilidade espacial do teor de matéria orgânica nas profundidades de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0-0,20 m em um Latossolo Vermelho sob semeadura direta, encontraram valores médios de 3,67; 3,38; 3,58 (dag kg<sup>-1</sup>) mostrando baixa variação na área amostrada. Falleiro et al. (2003), mostraram que a semeadura direta promoveu aumento dos teores de matéria orgânica e conseqüentemente dos teores de nutrientes das camadas superficiais dos solos. Avaliando a influência dos sistemas de preparo nas propriedades químicas de um Argissolo Vermelho-Amarelo câmbico nas profundidades 0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 m foram obtidos valores médios de matéria orgânica de 39,74; 28,78; 24,67 (g dm<sup>-3</sup>), respectivamente, e de pH em água de 4,75; 4,62; 4,54, respectivamente.

Oliveira Júnior et al. (2010) pesquisando a variabilidade por meio do coeficiente de variação do pH na Fazenda Experimental do Canguiri, da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, num Latossolo Vermelho-Amarelo encontraram valores baixos de coeficientes de variação de aproximadamente 4%, mostrando baixa variação, indicando assim, possivelmente que possa existir dependência espacial na área amostrada.

Segundo Vieira et al. (2010) o manejo convencional da fertilidade do solo baseia-se na utilização de teores médios de referência dos nutrientes para o cálculo da dose de fertilizante a ser aplicada em glebas selecionadas e separadas por serem as mais homogêneas entre si. Apesar dessa preocupação, é comum a ocorrência de valores extremos de alguns elementos químicos localizados espacialmente, sobretudo daqueles de menor mobilidade no solo, de

modo que a utilização de valores médios pode resultar na aplicação de doses superestimadas em determinadas áreas e insuficientes em outras.

Essas variações nos teores de nutrientes no solo normalmente resultam em “manchas de fertilidade”, que podem conduzir a um estado de nutrição diferenciado nas plantas, incrementando a variação na produção, tendo em vista a relação entre teor de nutrientes no tecido vegetal e o crescimento e desenvolvimento da planta (BERNARDI et al., 2002).

Uma das opções de manejo utilizadas para minimizar os efeitos da variabilidade na produtividade das culturas é a agricultura de precisão, que representa um conjunto de técnicas e procedimentos utilizados para que os sistemas de produção agrícola sejam otimizados, tendo como objetivo principal o gerenciamento da variabilidade espacial (MOLIN, 2000). Para isso, na agricultura de precisão é importante a caracterização e a descrição da variabilidade espacial dos teores foliares de nutrientes e da produtividade das culturas, visando à correlação desses dados para auxiliar o manejo da adubação, sobretudo no que se refere à aplicação localizada e em taxas variáveis de fertilizantes.

Na caracterização dessa variabilidade, a geoestatística tem sido relatada como uma ferramenta eficiente, possibilitando a interpretação dos resultados com base na estrutura da variabilidade obtida nos semivariogramas (VIEIRA et al., 2010). A análise geoestatística permite conhecer a variabilidade espacial dos teores foliares de nutrientes, e seu emprego fornece informações importantes quanto ao planejamento e manejo das áreas cultivadas (RESENDE et al., 2005). Apesar da importância da descrição espacial do conteúdo foliar de nutrientes como ferramenta para caracterizar a fertilidade do solo por meio de cálculos geoestatísticos, poucos estudos foram conduzidos nesse sentido, principalmente ao longo do tempo.

O levantamento da variabilidade espacial da produção agrícola pode ser entendido como uma etapa importante do seu gerenciamento, podendo ser efetuado pelas técnicas da agricultura de precisão. Ainda que existam inúmeras possibilidades para se tratar as áreas produtivas de acordo com suas limitações, somente com o conhecimento da variabilidade da produção é possível determinar quais práticas agrícolas utilizadas são eficazes para elevar tal produção, com a redução dos custos. As informações obtidas por meio do mapeamento da produtividade podem ser utilizadas para uma série de análises e interferências na área. Por meio da coleção de mapas de produtividade é possível identificar como a variabilidade ocorre em termos de distribuição espacial, temporal e em termos quantitativos (VIEIRA et al., 2010).

# **MATERIAL E MÉTODOS**

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Caracterização do local de origem dos dados

O experimento foi realizado na área experimental da Fazenda de Ensino e Pesquisa – Setor de Produção Vegetal, da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FE/UNESP), no ano agrícola 2007/08 localizada no município de Selvíria (MS), entre as latitudes de 20°18'05"S e 20°18'28"S e as longitudes de 52°39'02"W e 52°40'28"W. Sua precipitação média anual é de 1300 mm, enquanto que a temperatura média é de 23,7 °C. O tipo climático é Aw, segundo Koeppen, caracterizado como tropical úmido com estação chuvosa no verão e seca no inverno. O solo no qual a malha experimental foi instalada é um Latossolo Vermelho Distroférico típico argiloso, A moderado, hipodistrófico, álico, caulínítico, férrico, muito profundo, moderadamente ácido (Typic Acrustox), com declive homogêneo de 0,025 m m<sup>-1</sup> (EMBRAPA, 2006). Sua vegetação natural é do tipo Cerrado, caracterizada por apresentar árvores de porte médio (3-5 m) e gramíneas na superfície. O solo no qual foi estabelecida à pesquisa vem sendo utilizado com a sucessão das culturas do milho (verão) e feijão (inverno) há pelo menos vinte anos. Nos primeiros quinze anos foi realizado o preparo convencional para ambas as culturas, ao passo que nos cinco últimos foi o sistema plantio direto.

A planta-teste pesquisada foi à soja (*Glycine max* - L. Merrill), cultivar Conquista, cujo cultivo foi conduzido segundo as instruções agrícolas para as principais culturas econômicas do Estado de São Paulo (FAHL et al., 1998). O espaçamento entre linhas foi de 0,45 m, com uma densidade final de 16 plantas por metro na linha de semeadura. Na

adubação de plantio foram utilizados 250 kg ha<sup>-1</sup> da formulação 8-28-16. Para o tratamento da semente foi utilizado o fungicida carboxina (200 g ia 100 kg<sup>-1</sup> de sementes) e o inoculante líquido (*Rhizobium* sp) contendo 3.10<sup>9</sup> células por grama de semente.

Foram definidas as direções *x* e *y* do sistema de coordenadas cartesianas, num lançante da cultura da soja. Para tanto, foi utilizado o nível ótico comum, efetuando-se o estaqueamento global da malha experimental no final do ciclo da cultura. A grande malha experimental foi constituída de 9 linhas e 9 colunas, de formato quadrado e contendo 81 pontos amostrais, espaçados de 20 em 20m em ambos os eixos. A área global do estudo foi de 25600 m<sup>2</sup>. Entretanto, foram alocadas por sorteio, dentro da grande malha, mais sub-malhas de refinamento, visando detalhar o estudo da dependência espacial dos dados, para condições do espaçamento entre pontos menores do que 8m. Cada sub-malha teve pontos espaçados de 6,67 em 6,67 m, num sub-total de 40 pontos. O total de pontos amostrais da malha foi de 121. Na (Figura 7, Quadro 2 e Apêndice G) são apresentados as localizações do Estado de Mato Grosso do Sul e do experimento e também a malha geoestatística estabelecida e o conjunto de dados coletados.

### 3.2 Avaliações

Os atributos pesquisados do solo e da planta foram todos individualmente coletados no entorno de cada ponto amostral da malha experimental. Os atributos do solo foram: a) densidade do solo (**DS**), b) resistência à penetração (**RP**), c) umidade gravimétrica (**UG**), d) umidade volumétrica (**UV**), e) matéria orgânica (**MO**), e f) potencial hidrogeniônico (**pH**) coletadas em março de 2008 em duas profundidades, a saber: a) 0-0,10 m, e b) 0,10-0,20 m. Os atributos avaliados da cultura da soja foram: a) produtividade de grãos (**PG**), com os valores transformados para as condições padronizadas de 0,13 kg kg<sup>-1</sup> de umidade, representados em kg ha<sup>-1</sup>, b) número de vagens por planta (**NVP**), c) número de grãos por planta (**NGP**), e d) massa de mil grãos (**MM**), em grama. Coletaram-se todas as plantas originadas do entorno do ponto amostral estaqueado. A área representativa dessa coleta foi de 3,20 m<sup>2</sup>, com 4 linhas de plantas (1,80 m x 1,80 m).

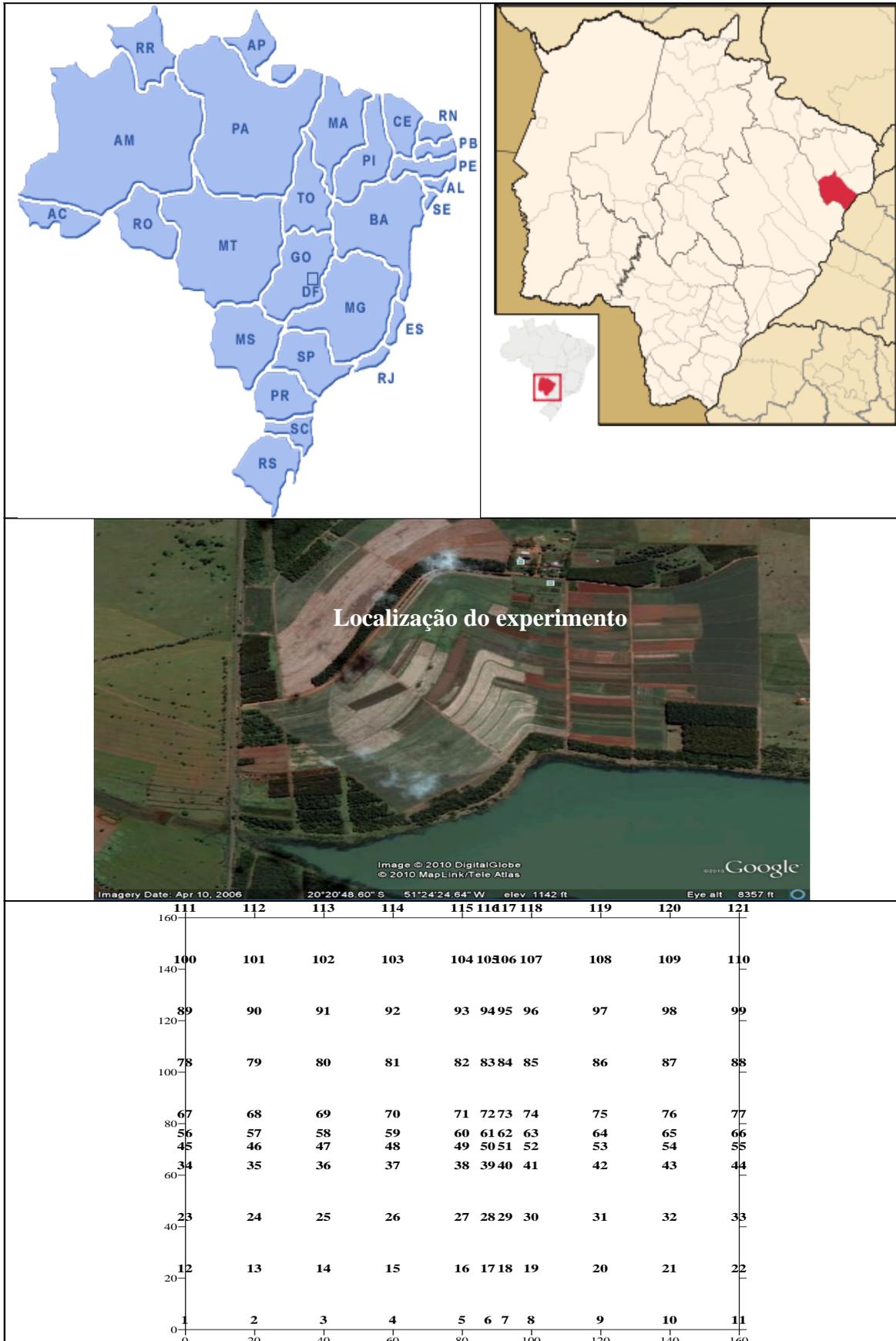


Figura 7. Localizações do Estado de Mato Grosso do Sul e do experimento e também a malha geostatística estabelecida

Quadro 2: Quadro com as coordenadas cartesianas dos pontos amostrais da malha experimental.

<b>ID</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>ID</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>ID</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>
<b>1</b>	0	0	<b>41</b>	100	60	<b>81</b>	60	100
<b>2</b>	20	0	<b>42</b>	120	60	<b>82</b>	80	100
<b>3</b>	40	0	<b>43</b>	140	60	<b>83</b>	87,5	100
<b>4</b>	60	0	<b>44</b>	160	60	<b>84</b>	92,5	100
<b>5</b>	80	0	<b>45</b>	0	80	<b>85</b>	100	100
<b>6</b>	87,5	0	<b>46</b>	20	80	<b>86</b>	120	100
<b>7</b>	92,5	0	<b>47</b>	40	80	<b>87</b>	140	100
<b>8</b>	100	0	<b>48</b>	60	80	<b>88</b>	160	100
<b>9</b>	120	0	<b>49</b>	80	80	<b>89</b>	0	120
<b>10</b>	140	0	<b>50</b>	87,5	80	<b>90</b>	20	120
<b>11</b>	160	0	<b>51</b>	92,5	80	<b>91</b>	40	120
<b>12</b>	0	20	<b>52</b>	100	80	<b>92</b>	60	120
<b>13</b>	20	20	<b>53</b>	120	80	<b>93</b>	80	120
<b>14</b>	40	20	<b>54</b>	140	80	<b>94</b>	87,5	120
<b>15</b>	60	20	<b>55</b>	160	80	<b>95</b>	92,5	120
<b>16</b>	80	20	<b>56</b>	0	87,5	<b>96</b>	100	120
<b>17</b>	87,5	20	<b>57</b>	20	87,5	<b>97</b>	120	120
<b>18</b>	92,5	20	<b>58</b>	40	87,5	<b>98</b>	140	120
<b>19</b>	100	20	<b>59</b>	60	87,5	<b>99</b>	160	120
<b>20</b>	120	20	<b>60</b>	80	87,5	<b>100</b>	0	140
<b>21</b>	140	20	<b>61</b>	87,5	87,5	<b>101</b>	20	140
<b>22</b>	160	20	<b>62</b>	92,5	87,5	<b>102</b>	40	140
<b>23</b>	0	40	<b>63</b>	100	87,5	<b>103</b>	60	140
<b>24</b>	20	40	<b>64</b>	120	87,5	<b>104</b>	80	140
<b>25</b>	40	40	<b>65</b>	140	87,5	<b>105</b>	87,5	140
<b>26</b>	60	40	<b>66</b>	160	87,5	<b>106</b>	92,5	140
<b>27</b>	80	40	<b>67</b>	0	92,5	<b>107</b>	100	140
<b>28</b>	87,5	40	<b>68</b>	20	92,5	<b>108</b>	120	140
<b>29</b>	92,5	40	<b>69</b>	40	92,5	<b>109</b>	140	140
<b>30</b>	100	40	<b>70</b>	60	92,5	<b>110</b>	160	140
<b>31</b>	120	40	<b>71</b>	80	92,5	<b>111</b>	0	160
<b>32</b>	140	40	<b>72</b>	87,5	92,5	<b>112</b>	20	160
<b>33</b>	160	40	<b>73</b>	92,5	92,5	<b>113</b>	40	160
<b>34</b>	0	60	<b>74</b>	100	92,5	<b>114</b>	60	160
<b>35</b>	20	60	<b>75</b>	120	92,5	<b>115</b>	80	160
<b>36</b>	40	60	<b>76</b>	140	92,5	<b>116</b>	87,5	160
<b>37</b>	60	60	<b>77</b>	160	92,5	<b>117</b>	92,5	160
<b>38</b>	80	60	<b>78</b>	0	100	<b>118</b>	100	160
<b>39</b>	87,5	60	<b>79</b>	20	100	<b>119</b>	120	160
<b>40</b>	92,5	60	<b>80</b>	40	100	<b>120</b>	140	160
						<b>121</b>	160	160

### 3.2.1 Análises físicas

#### 3.2.1.1 Determinação da densidade aparente ou global do solo

Para a coleta das amostras indeformadas foram utilizados dois recursos: o “anel volumétrico”, que consiste em um anel de inox com bordas cortantes, o qual foi introduzido no solo, sob pressão, com auxílio de um martelo; e o conjunto de cilindros de Uhland, ou anel de ferro, com volume conhecido. As amostras de solo foram retiradas indeformadas em duas profundidades, 0,00-0,10 m e de 0,10-0,20 m. A determinação da densidade aparente foi realizada no Laboratório de Física do Solo da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Engenharia Campus de Ilha Solteira, e utilizando os seguintes materiais:

- martelo e anel apropriado para retirar amostras de solo com volume conhecido, e com estrutura natural;
- latas com tampa para recolher as amostras;
- fita adesiva para lacrar as latas;
- régua para medir o diâmetro (medida interna) e altura do anel;
- faca afiada;
- pá de corte;
- lápis de cera;
- estufa;
- balança com precisão de 0,1g.

#### **Procedimentos para determinação:**

- introduziu-se o anel (posicionando normalmente à superfície do solo) à profundidade de 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m com o auxílio do martelo apropriado para cada anel;
- retirou-se a amostra de solo com estrutura natural e ajustou-se as bordas livres de amostra à altura do anel (usando a faca);
- colocou-se o anel com a amostra na lata, tampou-se e lacrou-se, a fim de evitar a perda de umidade do solo;
- determinou-se a umidade gravimétrica da amostra;
- determinou-se o volume do cilindro, que foi igual ao volume da amostra extraída.

A densidade do solo ou densidade global da amostra é dada pela seguinte equação:

$$d_s = \frac{m_p}{V_s} \text{ (g.cm}^{-3}\text{)} \text{-----(13)}$$

em que:

$d_s$  = densidade do solo;

$m_p$  = massa da amostra seca;

$V_s$  = volume da amostra.

### 3.2.1.2 Determinação da resistência mecânica a penetração das raízes

O Penetrômetro (Figura 8 e Apêndice E) é um instrumento automatizado para qualificar e quantificar os reais efeitos da compactação do solo. O equipamento é para uso em agricultura de precisão e conservacionista, em laboratório ou no campo. Possibilita a obtenção de medidas estáticas e a transferência de dados de resistência à penetração para a geração de mapas, em computador.

Apresenta benefício econômico e social quanto ao diagnóstico e prognóstico de técnicas de manejo de solo, uma vez que a compactação de solos agrícolas constitui um dos maiores problemas e desafios à práticas sustentáveis e à compactação, devido ao mau uso de máquinas agrícolas ter efeito acumulativo.

O processo de compactação dos solos e a localização de camadas compactadas no perfil do solo são fundamentais para o planejamento da mecanização e determinante na escolha do manejo que economicamente melhor conserve o solo e proporcione produtividade estável. Entre os efeitos nocivos da compactação estão a diminuição da altura das plantas, sintomas de deficiências nutricionais, susceptibilidade a períodos secos de curta duração, formação de camada impermeável, dificultando a infiltração da água e a aeração do solo, e dificuldade para desenvolvimento vertical das raízes.

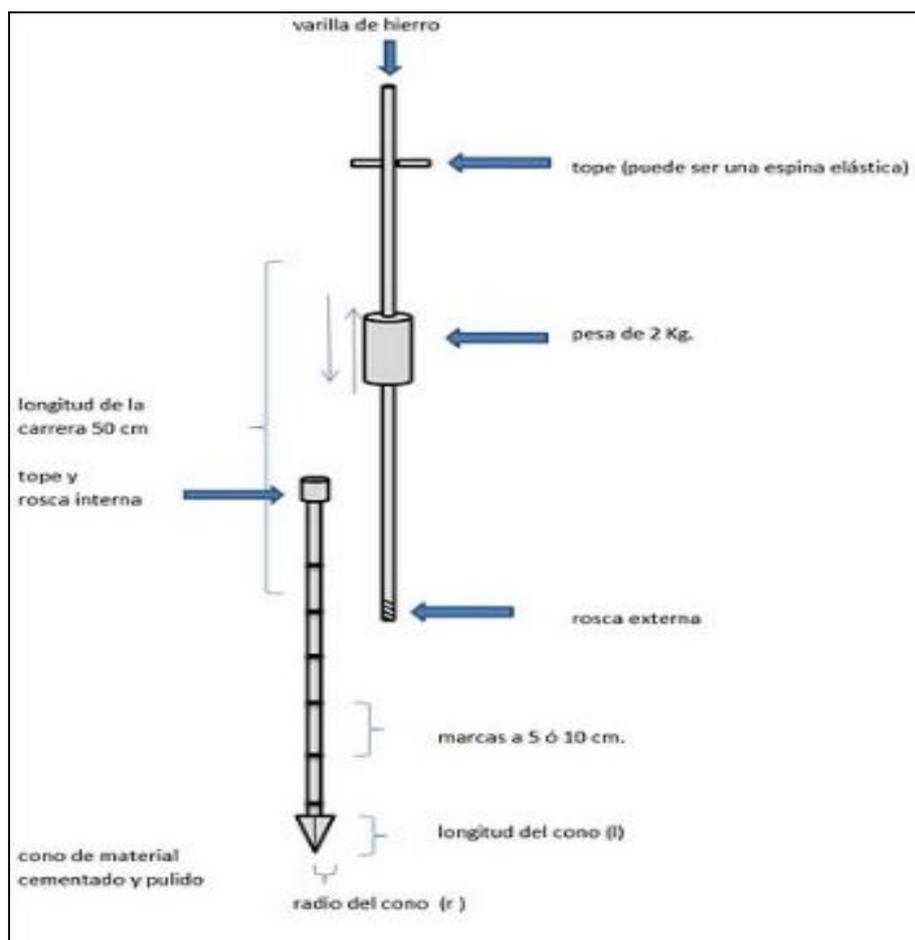


Figura 8. Componentes de um penetrômetro de impacto

A resistência à penetração (RP) foi avaliada com o penetrômetro de impactos (Stolf, 1991) e calculada segundo expressão contida em Rosa Filho et al. (2009):

$$RP = \{5,581 + 6,891 \cdot \{[N/(P-A)] \cdot 10\}\} \cdot 0,0981 \dots \dots \dots (14)$$

onde: RP é a resistência mecânica do solo à penetração (MPa); N é o número de impactos efetuados com o martelo do penetrômetro para obtenção da leitura; A e P as leituras antes e depois da realização dos impactos (cm).

### 3.2.1.3 Determinação da umidade do solo

A amostra deformada do solo para determinação da umidade gravimétrica (UG) foi coletada no mesmo momento que o da resistência mecânica, com um trado de caneca. A umidade volumétrica (UV) foi determinada pelo seguinte cálculo, relacionado em Kiehl (1979):

$$UV = UG \cdot DS \dots\dots\dots(15)$$

onde: **UV** é a umidade volumétrica [ $m^3 m^{-3}$ ], **UG** é a umidade gravimétrica [ $kg kg^{-1}$ ], e **DS** é a densidade do solo [ $kg dm^{-3}$ ]. Para a **UG** foram utilizadas amostras deformadas de solo, coletadas com uma sonda caladora.

#### Procedimento para a determinação da umidade gravimétrica:

Foram coletadas as amostras, para duas profundidades: 0,00 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m. As amostras foram coletadas com estrutura **deformada** em lata de alumínio numerada e de peso conhecido. A seguir, são pesadas e transferidas para estufa a 105-110 ° C, até peso constante. Posteriormente, são retiradas da estufa, colocadas em dessecador, deixadas esfriar e devidamente pesadas em balança de precisão.

A umidade é calculada através da expressão abaixo:

$$UG = 100 (a - b)/b \dots\dots\dots(16)$$

onde:

UG = umidade gravimétrica (%)

a = peso da amostra úmida (g)

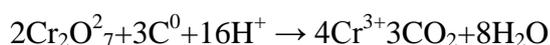
b = peso da amostra seca (g)

Caso a fórmula de UG não seja multiplicada por 100, teremos o resultado em g/g ou kg/kg.

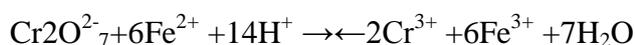
### 3.2.1.4 Determinação do teor de matéria orgânica

A determinação da matéria orgânica foi realizada pelo método colorímetro. A determinação da quantidade de matéria orgânica em solos baseia-se na sua oxidação a  $CO_2$  por íons dicromato, em meio fortemente ácido. Em amostras que requeiram maior precisão, a determinação da quantidade de íons Cr (III) reduzidos é feita indiretamente, por titulação dos íons dicromato em excesso, com íons  $Fe^{2+}$ . Alternativamente, pode-se determinar diretamente

a quantidade de íons Cr (III) por colorimetria, medindo-se a intensidade da cor esverdeada produzida por esses íons em solução. A determinação por colometria, normalmente usada em rotina, requer a montagem de uma curva-padrão de calibração. Essa curva é feita com uma série de amostras de solo, nas quais o teor de matéria orgânica é determinado por titulação, que apresenta maior precisão. Nos dois casos, a oxidação da matéria orgânica dá-se pela reação:



Na reação, considera-se o dicromato reduzido equivalente ao carbono orgânico existente na amostra de solo, e o excesso de dicromato é titulado com íons  $\text{Fe}^{2+}$  obtidos a partir de uma solução padronizada de sulfato ferroso amoniacal.



Na determinação por titulação, a quantidade de carbono orgânico é obtida pela diferença entre a quantidade de  $\text{Fe}^{2+}$  gasta na titulação da prova em branco Cr (VI) total adicionado) e aquela gasta na titulação do dicromato que restou após a oxidação do carbono da amostra. Convém frisar que esse método assume que todo o carbono da matéria orgânica está no estado de oxidação zero (NELSON e SOMMERS, 1996). Basicamente, trata-se de uma modificação do método conhecido por Walkley e Black, proposto para medir a matéria orgânica facilmente oxidável ou decomponível do solo, que inclui húmus e resíduos, mas exclui carvão e carbonatos (WALKLEY, 1947; WALKLEY e BLACK, 1934). A oxidação pela técnica usada é apenas parcial.

A reação, no método Walkley-Black, ocorre sem aquecimento externo, contando somente com o calor despreendido pela diluição do  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Desse modo, a oxidação do carbono da matéria orgânica não é completa; para compensar a oxidação parcial, aplica-se um fator de correção (1,33). Como o método determina o teor de carbono orgânico, a conversão para matéria orgânica é feita pelo fator de van Bemmelen (1,724), com base no pressuposto

de que a matéria orgânica do solo contém 58 % de C orgânico. Outros fatores têm sido propostos, mas este assunto não será discutido aqui.

O método colorimétrico baseia-se na leitura colorimétrica da cor verde do íon Cr (III) reduzido pelo carbono orgânico (QUAGGIO e RAIJ, 1979). Esse método utiliza o dicromato de sódio no lugar do de potássio, devido à maior solubilidade do primeiro. Além disso, a oxidação da matéria orgânica é feita a frio, apenas agitando o solo em uma solução contendo dicromato de sódio e ácido sulfúrico.

Para a execução do método colorimétrico, na determinação da matéria orgânica, seguem listados os aparelhos, materiais e procedimento análítico:

### **Aparelhos e material**

1. Cachimbo para medidas de 1 cm<sup>3</sup> de terra
2. Dispensador para 10 mL de solução
3. Mesa agitadora, com movimento circular horizontal.
4. Bandejas de alumínio, para três bandejas de isopor com dez frascos.
5. Fotocolorímetro ou espectrofotômetro.

### **Soluções e amostras para a curva-padrão**

1. Solução contendo 0,667 mol L<sup>-1</sup> de dicromato de sódio e 5 mol L<sup>-1</sup> de ácido sulfúrico. Dissolver 200 g de Na<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>·2H<sub>2</sub>O comercial em cerca de 600 mL de água destilada. Adicionar, lentamente e com resfriamento, 280 mL de ácido sulfúrico comercial concentrado. Após resfriar, completar o volume a 1 L e homogeneizar.

2. Amostras de solo para curva-padrão. Escolher um conjunto de 12 a 15 amostras de solos que contenham teores de matéria orgânica com ampla variação de valores, bem distribuídos na faixa de teores de maior interesse prático, em geral entre zero e 200 g dm<sup>-3</sup>. Essas amostras são analisadas pelo método volumétrico, descrito anteriormente, e os valores obtidos de matéria orgânica, utilizados para a calibração do método colorimétrico.

### **Procedimento analítico**

1. Transferir 1 cm<sup>3</sup> de terra para frasco cilíndrico de 100 mL. Realizar uma prova em branco completa, sem terra.
2. Adicionar, com dispensador, 10 mL da solução de Na<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> em ácido sulfúrico.
3. Agitar durante 10 minutos, em agitador com movimento circular-horizantal, com velocidade mínima de 180 rpm.

Após um repouso de uma hora, adicionar 50 mL de água, usando dispensador, com um jato forte para promover a mistura das soluções. Deixar decantar durante a noite.

5. No dia seguinte, transferir o líquido sobrenadante para a cela de medida do espectrofotômetro ou colorímetro, com filtro de transmissão máxima de 650 nm. Acertar o zero do aparelho com a prova em branco completa.
6. Calcular os resultados a partir da curva-padrão, preparada com solos analisados pelo método volumétrico.
7. Calibrar o método colorimétrico em relação aos resultados do método volumétrico, conforme descrito a seguir.

### **Calibração do método colorimétrico**

1. Analisar, pelo método colorimétrico, o conjunto de amostras selecionadas, com ampla variação no teor de matéria orgânica.
2. Colocar em gráfico os valores de transmitância ou de absorvância contra os teores de matéria orgânica previamente determinados pelo método volumétrico. A curva-padrão deve ser traçada por um modelo matemático que melhor se ajuste aos resultados obtidos pelas leituras colorimétricas e os teores estabelecidos pelo método de referência.

● *A curva-padrão não precisa ser refeita com muita frequência, desde que as condições do espectrofotômetro ou colorímetro não mudem e os resultados sejam verificados diariamente, através de amostras-controle.*

O carbono orgânico o foi pelo método da combustão úmida, via colorimétrica, resultando no teor de matéria orgânica do solo (MO) pela seguinte expressão (RAIJ et al., 1987):

$$MO = C \cdot 17,24 \dots \dots \dots (17)$$

onde: MO é o teor de matéria orgânica ( $\text{g dm}^{-3}$ ) e C é o teor de carbono ( $\text{g dm}^{-3}$ ).

### 3.2.1.5 Determinação do potencial hidrogeniônico

O pH foi determinado potenciometricamente em solução de  $\text{CaCl}_2$  0,01M (BRASIL, 1979),

Para a execução do método para a determinação do pH em  $\text{CaCl}_2$  segue listados os aparelhos, materiais e procedimentos analíticos:

#### Aparelhos e material

1. Cachimbo para medidas de  $10 \text{ cm}^3$  de terra.
2. Diluidor triplo de 25 mL.
3. Medidor de pH provido de eletrodo combinado de vidro e de referência.
4. Mesa agitadora ou agitador de pH.
5. Bandejas de isopor com 10 frascos plásticos cônicos com tampa ou frascos plásticos utilizados para café.

#### Soluções

1. Soluções-tampão para pH 4,0 e 7,0.
2. Solução de cloreto de cálcio  $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ . Dissolver 1,47 g de  $\text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  em água destilada, diluindo a 1 litro de solução. O pH dessa solução deve estar entre 5,0 e 5,5. Se não estiver, deve ser ajustado com HCL ou  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

### Procedimento analítico

1. Transferir, com cachimbo, 10 cm<sup>3</sup> de terra para frasco plástico.
2. Adicionar 25 mL da solução de CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup>, deixando 15 minutos em contato.
3. Agitar a suspensão por 10 minutos a 220 rpm, usando agitador com movimento circular horizontal ou agitador de pH. Deixar decantar por 30 minutos.
4. Ajustar o medidor de pH com as soluções-tampão de pH ,4,0 e 7,0 e, freqüentemente, com uma dessas soluções, após a determinação de uma série de amostras.
- 5- Sem agitar, mergulhar o eletrodo combinado na suspensão, de modo que a ponta do eletrodo de vidro toque ligeiramente a camada de sedimento e a saída do eletrodo de referência fique submersa. Ler o pH após estabelecido o equilíbrio.

● *O eletrodo deve ser lavado com água e enxugado com papel absorvente, após cada determinação. Isso é especialmente importante quando se passa para uma suspensão de pH muito diferente, ou de solução-tempão para suspensão de solo. Para valores de pH elevados, o equilíbrio leva algumas dezenas de segundos para ser obtido. Movimentos do eletrodo ajudam a estabelecer o equilíbrio, embora não se recomende agitar a suspensão.*

### 3.3 Avaliações estatísticas e geoestatísticas

Para cada atributo estudado, efetuou-se a análise descritiva clássica, com auxílio do software estatístico SAS (SCHLOTZHAVER e LITTELL, 1997), em que foram calculados a média, mediana, valores mínimo e máximo, desvio-padrão, coeficiente de variação, curtose, assimetria e distribuição de frequência. Posteriormente, realizou-se a identificação dos *outliers*, efetuando a substituição dos seus valores pelo valor médio dos circunvizinhos contidos na malha. Para testar a hipótese de normalidade, ou de lognormalidade, realizou-se o teste de Shapiro e Wilk a 1 %. Também, foi montada a matriz de correlação, objetivando efetuar as correlações lineares simples para as combinações, duas a duas, entre todos os atributos estudados. Assim, selecionaram-se aqueles de maior correlação linear e que, portanto, poderiam apresentar semivariograma cruzado e a conseqüente co-krigagem. Isoladamente para cada atributo, foi analisada sua dependência espacial, pelo cálculo do

semivariograma simples. Contudo, para aqueles que apresentaram interdependência espacial, calcularam-se também seus semivariogramas cruzados, com base nos pressupostos de estacionaridade da hipótese intrínseca, pelo uso do pacote *Gamma Design Software* (GS<sup>+</sup>, 2004). Os ajustes dos semivariogramas simples e cruzados, em função de seus modelos, foram efetuados prioritariamente pela seleção inicial de: a) menor soma dos quadrados dos desvios (RSS); b) maior coeficiente de determinação ( $r^2$ ), e c) maior avaliador da dependência espacial (ADE). A decisão final do modelo que representou o ajuste foi realizada pela validação cruzada, assim como para a definição do tamanho da vizinhança que proporcionou a melhor malha de krigagem e, ou, co-krigagem, realizadas por meio da krigagem em blocos. Para cada atributo, foram relacionados o efeito pepita ( $C_0$ ), o alcance ( $A_0$ ) e o patamar ( $C_0 + C$ ). A análise do avaliador da dependência espacial (ADE) foi efetuada conforme a seguinte expressão (GS<sup>+</sup>, 2004):

$$\text{ADE} = [C/(C + C_0)] \cdot 100 \text{ -----(18)}$$

onde: **ADE** é o avaliador da dependência espacial; **C**, a variância estrutural; e **C + C<sub>0</sub>**, o patamar. A interpretação proposta para o ADE foi a seguinte:  $\text{ADE} \leq 25 \%$  indica variável espacial fracamente dependente;  $25 \% < \text{ADE} \leq 75 \%$  indica variável espacial moderadamente dependente; e  $\text{ADE} > 75 \%$  indica variável espacial fortemente dependente. Por outro lado, sabe-se que a validação cruzada é uma ferramenta destinada a avaliar modelos alternativos de semivariogramas simples e cruzados, que efetuarão, respectivamente, a krigagem e a co-krigagem. Na sua análise, cada ponto contido dentro do domínio espacial é removido individualmente, sendo seu valor estimado como se ele não existisse. Dessa forma, pode-se construir um gráfico de valores estimados versus observados, para todos os pontos. O coeficiente de correlação ( $r$ ) entre tais valores reflete a eficiência do ajuste, dado pela técnica da soma dos quadrados dos desvios, representando a equação de regressão linear em questão. Um ajuste perfeito teria o coeficiente de regressão igual a 1 e a linha do melhor ajuste coincidiria com o modelo perfeito, isto é, com o coeficiente linear igual a zero e o angular igual a 1 (GS<sup>+</sup>, 2004). Assim, trabalhando-se na obtenção do número ideal de vizinhos, foram obtidos, por meio da interpolação, os mapas de krigagem e de co-krigagem, para análise da dependência e da interdependência espacial entre os atributos.

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Caracterização inicial do solo

O solo estudado vem há pelo menos vinte anos sendo cultivado com a sucessão de culturas soja/feijão, respectivamente semeadas no verão e inverno. Nos anos de 1998 e 2003, para os dois casos, o solo foi preparado com o arado de aivecas. Contudo, nos demais, as culturas foram implantadas pelo sistema plantio direto. Especificamente antes da semeadura do presente experimento, a área experimental foi cultivada com milho e, após colheita, dessecada com uma aplicação de  $1,8 \text{ kg ha}^{-1}$  (p.a.) do herbicida glyphosate.

Inicialmente, entre julho e agosto de 2007, visando à caracterização do solo antes da instalação do experimento, coletaram-se sessenta amostras deformadas e indeformadas em três profundidades (0,00-0,10 m; 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m), destinadas às análises físicas e químicas, sendo processadas conforme EMBRAPA (1979), Stolf (1991) e Raij et al. (2001). Para tanto, os locais de coleta das amostras simples foram determinados de forma aleatória nas entrelinhas da cultura semeada anteriormente (feijão). Assim, foram efetuadas as seguintes determinações: a) macroporosidade (MA), b) microporosidade (MI), c) porosidade total (PT), d) densidade no solo (DS), e) resistência à penetração (RP), f) umidade gravimétrica (UG), g) umidade volumétrica (UV), h) capacidade de campo (CC), i) análises químicas de rotina para fins de fertilidade: matéria orgânica (MO), pH, P,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{H}^+$ + $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ , soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC), saturação por bases (V%) e saturação por alumínio (m%). O Quadro 3 apresenta a caracterização do solo efetuada em 1980, por ocasião do levantamento taxonômico detalhado (DEMATTÊ, 1980). Nos Quadros 4 e 5 e na Figura 9 estão apresentados as análises iniciais destes atributos físicos e químicos do solo. Assim, sabe-se que em condições de mata virgem os latossolos apresentam,

Quadro 3 Descrição morfológica e dados analíticos do solo estudado

Horizonte	Profundidade (cm)	Descrição
Ap	0-15	bruno avermelhado escuro (2,5 YR 3/4); argila; granular, pequena a média, moderado a forte; duro, firme, plástico e pegajoso; transição plana e gradual.
A <sub>3</sub>	15-30	bruno avermelhado escuro (2,5 YR 3/4); argila; blocos e granular, moderado; friável, plástico e pegajoso; transição plana e difusa.
B <sub>21</sub>	30-100	vermelho escuro acinzentado (10 R 3/4); franco-argilo arenoso; maciço, poroso, muito fraco; macio, friável, plástico e ligeiramente pegajoso; transição plana e difusa.
B <sub>22</sub>	100-170+	vermelho escuro acinzentado (10 R 3/6); franco-argilo arenoso; maciço, muito fraco; macio, muito friável, plástico e pegajoso.

Horizonte		Composição granulométrica da TFSA			Relação	Densidade
Símbolo	Profundidade	areia	silte	argila	silte/argila	do solo
	cm	g kg <sup>-1</sup>				kg dm <sup>-3</sup>
Ap	0-15	230	120	650	0,185	1,30
A <sub>3</sub>	15-30	210	120	670	0,179	1,20
B <sub>21</sub>	30-100	160	130	710	0,183	1,20
B <sub>22</sub>	100-170+	160	120	720	0,167	1,10

Horizonte		Complexo sortivo										
Símbolo	Profundidade	P	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	SB	Al <sup>3+</sup>	H <sup>+</sup>	CTC	V%	m%	MO
	cm	mg dm <sup>-3</sup>	mmolc dm <sup>-3</sup>									g dm <sup>-3</sup>
Ap	0-15	1,0	17,0	15,4	0,8	33,2	1,0	40,0	74,2	45	3	16,6
A <sub>3</sub>	15-30	0,0	1,5	1,6	0,5	3,6	8,0	33,0	4,46	8	69	13,6
B <sub>21</sub>	30-100	1,0	0,5	0,4	0,4	1,3	5,0	32,0	3,83	3	79	10,2
B <sub>22</sub>	100-170+	0,0	1,0	0,8	0,5	2,3	2,0	28,0	3,23	7	47	4,1

Horizonte		pH			Ataque sulfúrico				Ki	Kr
Símbolo	Profundidade	H <sub>2</sub> O	KCl	ΔpH	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>		
	cm	dag kg <sup>-1</sup>								
Ap	0-15	5,1	4,8	-0,3	20,60	15,17	28,21	4,06	2,31	1,05
A <sub>3</sub>	15-30	4,9	4,3	-0,6	21,35	16,98	26,18	4,03	2,13	1,07
B <sub>21</sub>	30-100	4,9	4,2	-0,7	23,58	32,28	28,30	3,61	1,14	0,75
B <sub>22</sub>	100-170+	5,3	4,6	-0,7	22,59	16,84	27,89	3,67	2,28	1,10

Quadro 4: Análise inicial de alguns atributos físicos do solo pesquisado

Atributo físico <sup>(a)</sup>									
Profundidade	Porosidade				Resistência à penetração/umidade			Capacidade de campo	
	MA	MI	PT	DS	RP	UG	UV	UG	UV
m	-----m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> -----			kg dm <sup>-3</sup>	MPa	kg kg <sup>-1</sup>	m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	kg kg <sup>-1</sup>	m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>
0 – 0,10	0,102	0,403	0,505	1,337	1,060	0,228	0,305	0,250	0,334
0,10 – 0,20	0,090	0,420	0,510	1,444	2,008	0,231	0,334	0,250	0,361
0,20 – 0,30	0,092	0,408	0,500	1,429	3,246	0,220	0,314	0,250	0,357

<sup>(a)</sup> MA = macroporosidade, MI = microporosidade, PT = porosidade total, DS = densidade do solo, RP = resistência à penetração, UG = umidade gravimétrica, UV = umidade volumétrica.

Quadro 5: Análise inicial de alguns atributos químicos para fins de fertilidade do solo pesquisado

Atributo químico <sup>(a)</sup>												
Profundidade	Complexo sortivo											
	MO	pH CaCl <sub>2</sub>	P	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	H <sup>+</sup> +Al <sup>3+</sup>	Al <sup>3+</sup>	SB	CTC	V%	m%
M	g dm <sup>-3</sup>		mg dm <sup>-3</sup>	-----mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----								-----%-----
0 – 0,10	26	5,0	23	2,5	21	13	38	1,5	36,5	74,5	49,0	4,0
0,10 – 0,20	22	5,1	15	2,7	21	13	36	1,0	36,7	72,7	50,5	2,7
0,20 – 0,30	25	5,2	11	3,0	21	14	35	1,0	38,0	73,0	52,1	2,6

<sup>(a)</sup> MO = matéria orgânica, V% = índice de saturação por bases, m% = índice de saturação por alumínio.

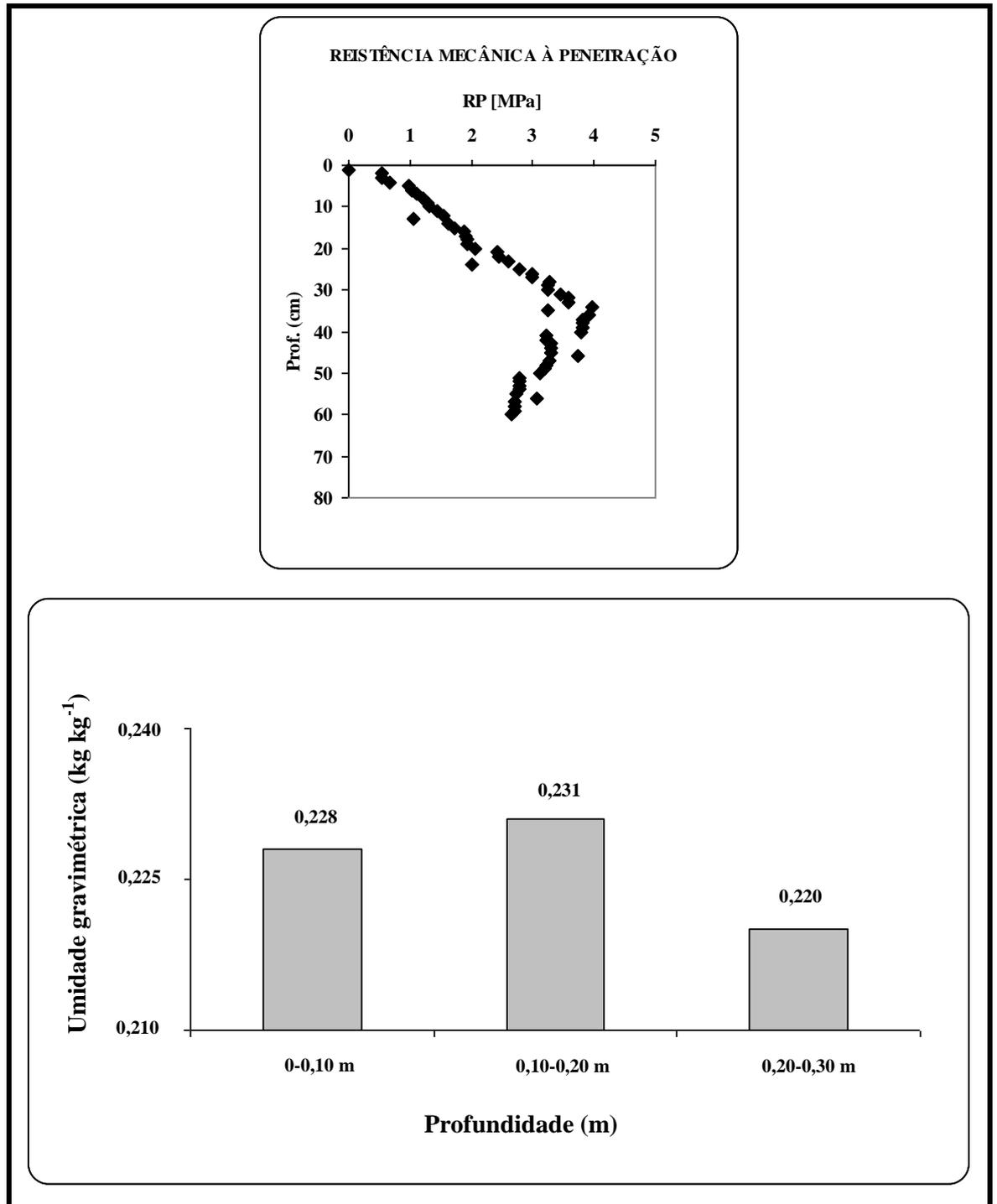


Figura 9. Curva da resistência à penetração e valores da umidade gravimétrica nas três camadas pesquisadas do solo

na camada entre 0,00-0,30m, valores da densidade do solo entre 0,90 e 1,10 kg dm<sup>-3</sup> (OLIVEIRA e MONIZ, 1975). Por outro lado, nessa camada concentra-se a maior parte do sistema radicular da soja, que é substancialmente sensível à compactação do solo (FAHL et al., 1998).

Avaliando-se fisicamente o solo antes da realização do experimento foi observado uma macroporosidade prejudicada, com valores de 0,102; 0,090 e 0,092 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, para as camadas de 0,00-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30m, respectivamente (Quadro 4), indicando assim uma diminuição no oxigênio do solo, podendo restringir o desenvolvimento das raízes que segundo Lima et al. (2007) valores abaixo de 0,10 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, já reduz o desenvolvimento das vegetal. Já em relação a densidade do solo, foi observado valores de 1,337; 1,444 e 1,429 kg dm<sup>3</sup>, para as profundidades de 0,00-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30m, respectivamente (Quadro 4). Oliveira e Moniz (1975) estudaram que valores acima de 1,10 kg dm<sup>3</sup>, são problemáticos para o crescimento vegetal. Com relação à resistência a penetração foram encontrados valores de 1,060; 2,008 e 3,246 MPa, para as profundidades de 0,00-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30m, respectivamente (Quadro 4 e Figura 8), no qual segundo Montanari et al. (2010) relata que valores acima de 2 MPa já é maléfico para o desenvolvimento vegetal. Roque et al. (2003) que estudaram a resistência a penetração num Latossolo numa mata, na cana-de-açúcar e no algodão, encontraram para mata baixa resistência a penetração (1 MPa), já para cana-de-açúcar e algodão alta resistência a penetração (3 e 4 MPa), na Figura 10 pode ser observado os resultados encontrados por Roque et al. (2003).

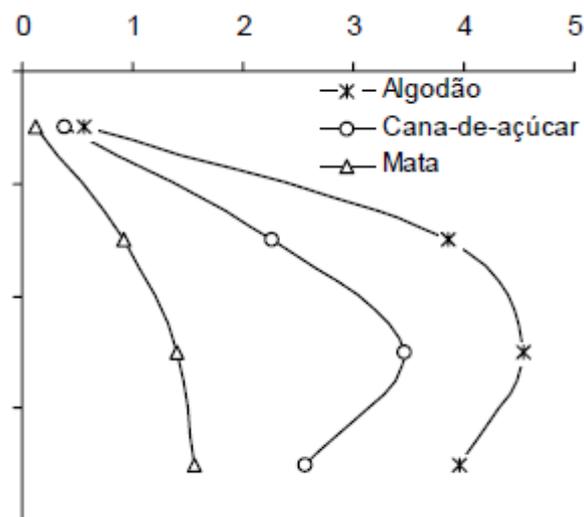


Figura 10. Resistência à penetração avaliada em diferentes profundidades e sistemas de uso do solo (extraído de ROQUE et al., 2003).

Avaliando-se quimicamente o solo antes da realização do experimento se observou uma fertilidade (P, K, Ca, Mg, e V%), considerando-se o sistema plantio direto, praticamente ideal para a cultura da soja (FAHL et al., 1998). Para o teor de matéria orgânica foi observado valores de 26; 22 e 25 g dm<sup>-3</sup>, considerados médios para as camadas de 0,00-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30m, respectivamente (Quadro 5). Resultados semelhantes foram encontrados por Dalchiavon (2010) que estudou a cultura do arroz sobre plantio direto num Latossolo de Selvíria (MS-Brasil), com valores de 25 e 21 g dm<sup>-3</sup> para as profundidades de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente.

Dessa forma, com base nesses fatos e nas análises efetuadas, observa-se que o solo encontrava-se com boa qualidade química para o desenvolvimento ideal da cultura da soja, porém, compactado por isso, foi decidido estudar uma malha geoestatística, correspondentes a um tratamento, no qual o solo permaneceu nas condições do cultivo da época (sistema plantio direto) procurou-se efetuar o mesmo, isto é, trabalhou-se com o sistema plantio direto (PD).

## **4.2 Análise descritiva dos dados**

### **4.2.1 Variabilidade dos atributos**

#### **4.2.1.1 Atributos da planta e solo**

No Quadro 6 está apresentada a análise descritiva inicial dos atributos pesquisados. Segundo Pimentel Gomes e Garcia (2002), a variabilidade de um atributo pode ser classificada segundo a magnitude de seu coeficiente de variação (CV). Suas classes foram determinadas como baixa ( $CV \leq 10\%$ ), média ( $10\% < CV \leq 20\%$ ), alta ( $20\% < CV \leq 30\%$ ) e muito alta ( $CV > 30\%$ ). Assim sendo, no Quadro 6 a produtividade de grãos (PG) apresentou média variabilidade, com coeficiente de variação de 12%. Deste modo, esse dado foi menor que o de Johann et al. (2004), que os apresentaram com alta variabilidade (23%), quando trabalharam num Latossolo Bruno Distrófico na cidade de Cascavél (Paraná, Brasil), mas corrobora com os dados de Rosa Filho et al. (2009) que trabalharam em um Latossolo Vermelho Distroférico de Selvíria que encontraram média variabilidade para a produtividade de grãos de soja que foi de 14% e também com Vieira et al. (2010) que pesquisaram num Latossolo Vermelho distroférico e obtiveram média variabilidade para a produtividade da soja, sendo de 19%. Por outro lado, o número de vagens por planta (NVP) e número de grãos por planta (NGP) resultaram em altas variabilidades, respectivamente de 26 e 27% de forma a concordar com Montanari (2009) que obteve para a cultura do feijão, valores de 28%, tanto para NVP e NGP. Já para massa de mil grãos o coeficiente de variação foi tido como baixo, de 6%, corroborando com Rosa Filho (2008), que também foi de 6%.

Quadro 6: Análise descritiva inicial de alguns atributos da produtividade da soja e de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto no Cerrado em Selvíria (MS-Brasil)

Atributo <sup>(a)</sup>	Medidas estatísticas descritivas								Probabilidade do teste <sup>(b)</sup>	
	Média	Mediana	Valor		Desvio Padrão	Coeficiente			Pr<w	DF
			Mínimo	Máximo		Variação (%)	Curtose	Assimetria		
	<i>Atributos da planta</i>									
<b>PG (kg/ha)</b>	4108	4052	2955	5474	483,0	11,7	0,249	0,479	0,0930	NO
<b>NVP</b>	48	47	23	80	12,7	26,3	-0,339	0,392	0,0460	NO
<b>NGP</b>	98	97	45	183	26,7	27,3	0,326	0,531	0,0560	NO
<b>MM (g)</b>	192	192	152	220	11	6,2	0,571	-0,321	0,3210	NO
<i>Densidade do solo</i>										
<b>DS1</b>	1,486	1,505	1,157	1,736	0,126	8,4	-0,188	-0,486	0,0268	TN
<b>DS2</b>	1,515	1,516	1,319	1,727	0,072	4,8	0,584	-0,063	0,1254	NO
<i>Resistência à penetração</i>										
<b>RP1 (MPa)</b>	3,246	2,981	1,224	7,082	1,299	40,0	-0,698	0,063	0,164	LN
<b>RP2 (MPa)</b>	3,695	3,590	2,055	6,546	0,929	25,2	-0,391	0,107	0,810	LN
<i>Umidade gravimétrica</i>										
<b>UG1 (kg/kg)</b>	0,186	0,182	0,114	0,256	0,024	13,2	0,595	0,448	0,0018	TN
<b>UG2 (kg/kg)</b>	0,189	0,186	0,115	0,256	0,022	11,8	0,772	0,262	0,0480	NO
<i>Umidade volumétrica</i>										
<b>UV1 (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)</b>	0,278	0,271	0,193	0,388	0,039	14,0	0,043	0,371	0,112	LN
<b>UV2 (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)</b>	0,285	0,282	0,173	0,368	0,032	11,3	0,717	0,017	0,0609	NO
<i>Matéria Orgânica</i>										
<b>MO1(g/dm<sup>3</sup>)</b>	30,9	30,3	19,1	54,4	5,924	19,1	1,210	0,525	0,0139	TN
<b>MO2(g/dm<sup>3</sup>)</b>	23,1	22,5	16,8	34,4	3,816	16,5	-0,195	0,394	0,022	TL
<i>pH</i>										
<b>pH1</b>	6,0	6,0	5,0	6,6	0,306	5,1	0,428	-0,550	0,0343	TN
<b>pH2</b>	5,7	5,7	4,7	6,4	0,378	6,5	-0,432	-0,351	0,0932	NO

<sup>(a)</sup> PG = produtividade de grãos, NVP = número de vargens por planta, NGP = número de grãos por planta, MM = massa de mil grãos; DS, RP, UG, UV, MO e pH<sub>1</sub> e pH<sub>2</sub> são respectivamente a densidade do solo, resistência à penetração, umidade gravimétrica, umidade volumétrica, matéria orgânica e o potencial hidrogeniônico do solo; <sup>(b)</sup> DF = distribuição de frequência, sendo NO, TN, LN e TL respectivamente do tipo normal, tendendo à normal, lognormal e tendendo à lognormal.

A resistência à penetração (RP) apresentou-se com muito alta variabilidade para a camada de 0,00-0,10 m, sendo de 40%, enquanto que para a camada de 0,10-0,20 m o coeficiente de variação foi tido como alto, sendo de 25%. Esses dados discordaram com aqueles de Mercante et al. (2003), Johann et al. (2004), Freddi et al. (2006) e Rosa Filho et al. (2009), respectivamente, de 15% obtido num Latossolo Vermelho Distroférico, 16% num Latossolo Bruno Distrófico, de 14% num Latossolo Vermelho Distrófico e de 15% em um Latossolo Vermelho sob plantio direto em Selvíria (MS). Contudo, concordaram de Imhoff et al. (2000), Souza et al. (2001, 2006) e Carvalho et al. (2002), os quais variaram entre alto e muito alto, respectivamente com valores de 71% obtidos num Nitossolo Vermelho eutrófico, 21-38% e de 51-110% num Latossolo Vermelho distrófico. Almeida (2007) também encontrou muito alta variabilidade para a resistência a penetração quando estudou a produtividade do milho num Latossolo Vermelho, para as camadas de 0,00-0,15 e 0,15-0,30 m, sendo de 47,3% e 42,3%, respectivamente. Esta alta variabilidade para a resistência mecânica a penetração das raízes pode ser atribuída ao efeito antrópico dado ao manejo do solo, com uso de máquinas e implementos que incrementam esta variabilidade (Quadro 6). Siqueira (2009) estudando um Cambissolo de Galícia (Espanha), até a profundidade de 0,90 m também encontrou uma alta variabilidade para a resistência a penetração de 27%.

Em relação à densidade do solo (DS), todos apresentaram baixa variabilidade, com coeficientes de variação entre 5-9%. Assim, tais dados concordaram com aqueles de Imhoff et al. (2000), Souza et al. (2001), Carvalho et al. (2002), Mesquita et al. (2003), Johann et al. (2004), Secco et al. (2005), Santos et al. (2006), Rosa Filho et al. (2009) e Andreotti et al. (2010), os quais variaram entre 4-9%, quando respectivamente trabalharam com um Nitossolo Vermelho eutrófico, Latossolo Vermelho distrófico, Latossolo Vermelho distroférico, Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, Latossolo Bruno distrófico, Latossolo Vermelho distrófico e Latossolo Vermelho distroférico, Latossolo Vermelho eutroférico e Latossolo Vermelho distroférico (Quadro 6). Quando se compara os valores da resistência a penetração antes da realização do experimento para as profundidades 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente, (1,060 e 2,008 MPa) e da densidade do solo para as respectivas camadas (1,337 e 1,444 kg dm<sup>-3</sup>) (Quadro 4) com os valores médios dos mesmos atributos durante o desenvolvimento da cultura; resistência a penetração (3,246 e 3,695 MPa) e densidade do solo (1,486 e 1,515 kg dm<sup>-3</sup>) (Quadro 6), verifica-se um aumento dos dois atributos estudados, ocorrido talvez pela mecanização realizada para a semeadura direta e tratos culturais, sendo que isto não afetou o crescimento da soja.

Em relação à umidade gravimétrica (UG) e a umidade volumétrica (UV), todos apresentaram variabilidade média, com coeficientes de variação entre 11-14%. Esses dados concordam com aqueles de Carvalho et al. (2002), em um Latossolo Vermelho distrófico sob preparo convencional, Santos et al. (2005), em um Latossolo Vermelho distrófico sob preparo convencional e Freddi et al. (2006), estudando um Latossolo Vermelho distrófico sob preparo convencional que variaram entre 10 -16%. Porém, estes resultados discordam dos obtidos por Siqueira et al. (2009) que estudaram um Cambissolo em Castro de Ribeiras de Lea (Lugo) e encontraram alta variabilidade para a umidade do solo, de 26%. Almeida (2007) também encontrou média variabilidade para a umidade gravimétrica quando estudou a produtividade do milho num Latossolo Vermelho, para as camadas de 0,00-0,15 e 0,15-0,30 m, sendo de 16,6% e 13,6%, respectivamente (Quadro 6).

A matéria orgânica (MO) apresentou-se com média variabilidade, sendo de 19 e 17%, nas camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente. Esses dados concordaram com aqueles de Silveira e Cunha (2002), de 15% e 17% na profundidade de 0-0,05 m e de 15 e 16% na profundidade de 0,05-0,20 m, respectivamente para os tratamentos: arado de aveica e grade aradora, analisado em um Latossolo Vermelho perférrico. Porém, discorda de Almeida (2007) que encontrou alta variabilidade para o teor de matéria orgânica quando estudou a produtividade do milho num Latossolo Vermelho, para as profundidades de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m, sendo de 23% e 27%, respectivamente (Quadro 6). Siqueira (2009) estudando um Cambissolo de Galícia (Espanha), para a profundidade de 0,00-0,30 m observou baixa variabilidade para o teor de matéria orgânica de 8%.

A variabilidade do potencial hidrogeniônico (pH) nas duas camadas de solo estudadas foi baixa, com coeficientes de variação entre 5-7%. Desse modo, resultados semelhantes foram conseguidos por Freddi (2003) e Bezerra (2008), quando trabalharam em um Latossolo Vermelho distroférico sob preparo convencional e Latossolo Vermelho distrófico sob plantio direto, respectivamente, com coeficientes de variação entre 4-7% (Quadro 6). Morales e Ferreira (2009) também encontraram resultados semelhantes quando estudaram um arrozal ácido em Corrientes na Argentina em um Argissolo com valores médios de pH na faixa de 6,0 com coeficiente de variação classificados como baixo (1,6 – 3,6%). Oliveira Júnior et al. (2010) também obtiveram resultados próximos quando estudaram um Latossolo Vermelho-Amarelo com valores médios de pH na faixa de 5,6 com coeficiente de variação classificados como baixo (5 – 6%). Almeida (2007) também encontrou baixa variabilidade para pH quando estudou a produtividade do milho num Latossolo Vermelho, para as profundidades de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m, sendo de 5 e 6%, respectivamente (Quadro 6). Siqueira (2009) estudando

um Cambissolo de Galícia (Espanha), para a profundidade de 0,00-0,30 m observou baixa variabilidade para o potencial hidrogeniônico de 6%.

#### 4.2.2 Distribuição de frequência dos atributos pesquisados

##### 4.2.2.1 Atributos da planta e solo

Quando uma variável estatística qualquer possuir distribuição de frequência do tipo normal, a medida de tendência central mais adequada para representá-la deve ser a média. Em contrapartida, ou será pela mediana, ou pela média geométrica, caso possua distribuição de frequência do tipo lognormal (SPIEGEL, 1985). Portanto, para os atributos, produtividade de grãos (PG), número de vagens por planta (NVP), número de grãos por planta (NGP), massa de mil grãos (MM), densidade do solo (DS2), umidade gravimétrica (UG2), umidade volumétrica (UV2) e potencial hidrogeniônico (pH2), as respectivas medidas de tendência central deverão ser representadas pelos valores médios. Isso por que, todos eles apresentaram distribuição de frequência do tipo normal, com coeficientes de assimetria positiva entre 0,017 e 0,531, assim como a negativa entre -0,351 e -0,063. Já os coeficientes de curtose positiva ficaram entre 0,249 e 0,772, assim como as negativas entre -0,432 e -0,391. Contudo, e independentemente de tais coeficientes, todos foram significativos a 5% de probabilidade pelo teste de normalidade de Shapiro e Wilk, uma vez que a respectiva probabilidade variou entre 0,046 e 0,320 (Quadro 6). Dessa forma, a distribuição de frequência do tipo normal, obtida para os atributos estudados pelo presente, ficou de acordo com os seguintes autores, classificados conforme o atributo: a) PG (SANTOS et al., 2005; MARINS, 2006; CARVALHO et al., 2006; ROSA FILHO et al., 2009), b) DS2 (MESQUITA et al., 2003; MARINS, 2006 e SANTOS et al., 2006; ALMEIDA, 2007; ROSA FILHO et al., 2009; ANDREOTTI et al., 2010), c) UG2 (CARVALHO et al., 2006; FREDDI et al., 2006; ROSA FILHO et al., 2009), d) UV2 (MARINS, 2006; ROSA FILHO et al., 2009), e e) pH2 (REICHART et al., 2008; MONTANARI, 2009).

Porém, os atributos DS1, UG1, MO1 e pH1, apresentaram distribuição de frequência do tipo tendendo a normal, já RP1, RP2 e UV1 obtiveram distribuição de frequência do tipo lognormal e MO2 apresentou distribuição de frequência do tipo tendendo a lognormal (Quadro 6). Resultados distintos para DS1 foram encontrados por Santos et al. (2006), que obtiveram distribuição de frequência do tipo normal estudando um Latossolo Vermelho Distroférrico de Selvíria. Já para UG1, discorda de Veronese Júnior et al. (2006) que encontraram uma distribuição de frequência do tipo normal num Latossolo Vermelho. Agora, a MO1 concorda com os obtidos por Corá et al. (2004). Para RP1, RP2 e UV1 concordam

com os resultados obtidos por Santos et al. (2005) que encontraram distribuição de frequência o tipo lognormal num Latossolo Vermelho distrófico. A MO2 discorda dos resultados obtidos por Souza et al. (1997), no qual foi lognormal num Latossolo Vermelho (Quadro 6).

Esses dados mostram que o solo possui grande heterogeneidade na distribuição da matéria orgânica do solo na área estudada, o que, provavelmente, influencia a capacidade de infiltração e retenção de água, drenagem, aeração, temperatura e penetração radicular (SILVA et al., 1999). Essa heterogeneidade, também influencia a distribuição dos nutrientes no solo. O N é influenciado diretamente pela dinâmica da matéria orgânica do solo, parte do P disponível às plantas também é influenciado pela distribuição da matéria orgânica do solo. O K, apesar de não formar qualquer composto de moléculas orgânicas, está presente nos tecidos das mesmas e pode se disponibilizar quando da decomposição da mesma. Assim, essa dinâmica pode se refletir nas relações de equilíbrio entre compostos orgânicos e inorgânicos nos diferentes ciclos de perdas e ganhos de nutrientes no solo.

Portanto, a decomposição da matéria orgânica do solo pode influenciar na disponibilidade de nutrientes para as plantas. Na prática, a decomposição de resíduos orgânicos, exsudação de raízes e metabolismo de microorganismos, poderá proporcionar maiores teores de nutrientes contidos na matéria orgânica do solo, disponível às plantas (AZEVEDO, 2003). Segundo Oliveira Júnior (2004) nos solos brasileiros onde predominam óxidos de ferro e alumínio e baixo poder de troca catiônica, a matéria orgânica assume papel importante na manutenção da sua fertilidade. O P é um dos elementos mais importantes para o metabolismo vegetal, mas é exigido em menores quantidades que o N e o K (BRAGA et al., 1997).

### **4.2.3 Valores médios dos atributos pesquisados**

#### **4.2.3.1 Atributos da planta e solo**

No Quadro 6, o valor médio da PG foi de 4108 kg ha<sup>-1</sup>, ficando próximo daquele de Secco et al. (2004), que foi de 3373 kg ha<sup>-1</sup>, quando utilizados seis cultivares de soja submetida a diferentes estados de compactação no sistema plantio direto. Porém, ficou longe daqueles obtidos por Rosa Filho et al. (2009); Andreotti et al. (2010) e Vieira et al. (2010), que foram de 3330, 3200 e 3135 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Portanto, no presente trabalho ele ficou 31,6% acima da média nacional, que foi de 2809 kg ha<sup>-1</sup> para a safra de 2008/09 (EMBRAPA, 2009). Por outro lado, Oliveira e Moniz (1975) efetuaram o levantamento pedológico detalhado dos solos da Estação Experimental do Instituto Agrônomo do Estado

de São Paulo, localizada em Ribeirão Preto. Dessa forma, foram relatados, para um Latossolo Vermelho distroférico e nas condições de solo virgem e sob mata natural, valores da porosidade total e da densidade do solo originados da secção de controle do perfil do solo, respectivamente entre 0,582 a 0,671  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  e de 0,98 e 1,13  $\text{kg dm}^{-3}$ . Portanto, com base nessa caracterização, os valores médios da densidade do solo do presente, 1,486  $\text{kg dm}^{-3}$  (DS1) e 1,515  $\text{kg dm}^{-3}$  (DS2), apresentaram uma magnitude que indicou compactação do solo nas camadas estudadas. Outrossim, no sistema plantio direto tal compactação é originada pelo trânsito das máquinas e implementos agrícolas, assim como ao tempo de adoção deste sistema, sem que, contudo, seja efetuada uma prática conservacionista do solo que venha a reverter esse problema. Dessa forma, tais dados ficaram de acordo com aqueles da pesquisa de Secco et al. (2004), que encontraram valores de densidade do solo semelhantes e/ou superiores a 1,45  $\text{kg dm}^{-3}$ , também para um Latossolo Vermelho distroférico. Para os atributos componentes de produção da soja dados pelo número de vagens por planta (NVP), número de grãos por planta (NGP) e a massa de mil grãos (MM) apresentaram os seguintes valores médios: a) NVP (48), b) NGP (98) e MM (192 g). Estes resultados corroboram com os de Rosa Filho (2008) estudando um Latossolo Vermelho sob plantio direto.

Bengough et al. (2001) relataram que a condição ideal de umidade do solo, para a coleta dos dados de resistência à penetração, deve ser quando ela estiver variando entre a capacidade de campo e até com um terço a menos de água, isto é, quando o solo ideal, conceituado por Kiehl (1979), apresentar uma umidade volumétrica na microporosidade variando entre 0,33 e 0,22  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ . Portanto, uma vez que a capacidade de campo do solo em questão foi de 0,351  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ , deve-se salientar que os dados da presente pesquisa foram coletados em ótimas condições de umidade volumétrica do solo, uma vez que seus valores ficaram entre 0,278  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  (UV1) e 0,285  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  (UV2). Por outro lado, quando utilizada a classificação de Arshad et al. (1996), os altos valores da resistência à penetração do solo (3,246 e 3,695 MPa, respectivamente para RP1 e RP2) corroboraram que o solo estudado encontrava-se compactado, de forma a suscitar que a produtividade de soja do presente estudo pôde também não ter atingido seu máximo potencial, uma vez que pôde ter ocorrido um alto impedimento mecânico ao desenvolvimento de suas raízes (Quadro 6).

Diversos autores citam diferentes valores de resistência do solo a penetração como limitantes para o desenvolvimento das culturas. Taylor e Gardner (1963) descrevem que valores de RP maiores que 2 MPa inibem o crescimento vegetal. Taylor e Burnett (1964) estudando o desenvolvimento de distintas culturas (*Gossypium jirsutum*, *Sesamum indicum*, *Cyamopsis tetragonolobus*, *Sesbania exaltata*, *Phaseolus aureus*, *Vigna sinensis* var. Chinese

Red y *Sorghum vulgare*) com diferentes sistemas de manejo, descrevem que valores a partir de 2,8 MPa começaram a restringir o crescimento das raízes. Observaram que ocorria enraizamento considerável quando as camadas do solo estavam com valores próximos de 1,9 MPa com o solo estando na capacidade de campo e densidade de 1,73 t m<sup>-3</sup>.

Taylor et al. (1966) num segundo experimento com quatro tipos de solos de textura média e arenosa com algodão (*Gossypium jirsutum*), comprovaram que valores de RP entre 0,3 e 1,5 MPa provocaram diminuição do crescimento radicular das plantas. Camargo e Alleoni (1997) descrevem que valores entre 1 e 2,5 MPa devem ser considerados baixos e oferecem pouca limitação ao crescimento radicular e que valores acima de 2,5 MPa começam a limitar o desenvolvimento vegetativo. Ehlers et al. (1983) estudando o crescimento radicular da aveia (*Avena sativa* L.) na camada de 0,00-0,25 m comprovaram que o crescimento radicular cessava quando a RP alcançava valores entre 3,6-4,9 MPa, segundo os autores o crescimento radicular da aveia em campo dependeu principalmente da umidade do solo e do grau de RP.

Beutler et al. (2006) analisaram a produtividade da cultura da soja (cv. Conquista) em função do grau de compactação de um Latossolo Vermelho distrófico de Jaboticabal (SP). Foi observada uma produtividade máxima de 1326 kg ha<sup>-1</sup>, equivalente a um valor da resistência à penetração do solo de 2,95 MPa. Por outro lado, Beutler et al. (2007) também analisaram a produtividade da cultura da soja (cv. IAC Foscarim 31) em função do grau de compactação de um Latossolo Vermelho Eutroférico de Jaboticabal (SP). Foi observada uma produtividade máxima de 3175 kg ha<sup>-1</sup>, equivalente a um valor da resistência à penetração do solo de 1,30 MPa, assim como de 3261 kg ha<sup>-1</sup>, equivalente ao valor da densidade do solo de 1,26 kg dm<sup>-3</sup>. Portanto, em relação aos dois referidos trabalhos, os dados da PG, RP e da DS do presente estudo (Quadro 6) tiveram as seguintes performances. A PG média obtida (4108 kg ha<sup>-1</sup>) foi 3 vezes superior àquela de Beutler et al. (2006), assim como 1,3 vezes superior àquela de Beutler et al. (2007). Já a RP média obtida (3,470 MPa) foi 1,17 vezes superior àquela de Beutler et al. (2006), assim como 2,70 vezes superior àquela de Beutler et al. (2007). Também, a DS média obtida (1,500 kg dm<sup>-3</sup>) foi 1,19 vezes superior àquela de Beutler et al. (2007). Portanto, na presente pesquisa, obteve-se uma PG média de grãos de soja superior àsquelas de Beutler et al. (2006, 2007), em condições físicas do solo mais severas. Assim, uma vez que o solo pesquisado encontrava-se substancialmente mais compactado do que nas duas referidas condições, pode-se inferir que outros fatores, que não a RP e a DS, limitaram de forma decisiva as produtividades de soja obtidas por Beutler et al. (2006, 2007).

A unidade gravimétrica (Quadro 6) apresentou valores de 0,186 kg kg<sup>-1</sup> (UG1) e de 0,189 kg kg<sup>-1</sup> (UG2), concordando com os estudos de Carvalho et al. (2002) e Freddi et al. (2006), que apresentaram aumento destes valores em profundidade do solo. Por outro lado, ficou diretamente relacionada com o aumento da UV, as quais foram de 0,278 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> (UV1) e de 0,285 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> (UV2).

O valor médio do teor de matéria orgânica no solo da área de estudo para as profundidades de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m foi de 30,3 e 23,1 g dm<sup>-3</sup>; respectivamente (Quadro 6). Lema (1998) descreve que a matéria orgânica como fator de qualidade do solo, contribuindo indiretamente para sua fertilidade. Siqueira (2009) estudando um Cambissolo de Galícia (Espanha), para a profundidade de 0,00-0,30 m encontrou uma média de 82 g dm<sup>-3</sup> para o teor de matéria orgânica. Esta discrepância entre os valores médios dos teores de matéria entre o solo da presente pesquisa e a encontrada por Siqueira (2009), se trata do fato da taxa de decomposição da matéria orgânica que é maior em solos de países tropicais (Brasil) quando comparando com países temperados (Espanha). Isto mostra a importância da contribuição do plantio direto em solos de países tropicais, que possibilita por meio da restevras de outras culturas proteger o solo contra erosão. De acordo com Ulloa Guitián (2002), a quantidade de matéria orgânica no solo varia em função do balanço entre a taxa de decomposição dos resíduos e produtos orgânicos e a taxa de mineralização do carbono por biota (depende das interações entre os distintos fatores de formação do solo), dependendo do teor de matéria orgânica do solo não natural (de uso agrícola ou florestal) de seu manejo, o qual pode induzir bruscas mudanças no equilíbrio do teor de matéria orgânica, que apresentaria um solo em condições naturais e sem alterar, que anulam completamente a influencia dos fatores de formação do solo. Portanto, a importância relativa da influencia dos fatores de formação da matéria orgânica do solo pode ser do seguinte modo: manejo > clima > biota > (vegetação e organismos do solo) > topografia = material de origem > tempo (BALDOCK e NELSON, 2000).

Fuentes Yague (2002) descreve que não é o teor de matéria orgânica no solo o que mais importa, se não a velocidade com a qual ela se transforma. Um bom solo agrícola é aquele onde os processos de mineralização e humidificação se desenvolvem em equilíbrio e com relativa rapidez, ocorrendo que a velocidade e rapidez dos processos de transformação da matéria orgânica dependem da atividade dos microorganismos encarregados destas transformações, que a sua vez vem condicionada por diversos fatores, entre os que se destacam são os seguintes: origem dos produtos orgânicos, temperatura, umidade, aeração do solo, teor de nitrogênio e acidez do solo.

O valor médio do potencial hidrogeniônico da área de estudo para as camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m foi de 6 e 5,7 (pH em CaCl<sub>2</sub>); respectivamente (Quadro 6). Siqueira (2009) estudando um Cambissolo de Galícia (Espanha), para a profundidade de 0,00-0,30 m encontrou uma média de 4,9 para o pH.

### **4.3 Análise de regressão entre os atributos pesquisados**

#### **4.3.1 Regressão linear simples**

##### **4.3.1.1 Matriz de correlação linear simples entre os atributos pesquisados**

###### **4.3.1.1.1 Atributos da planta *versus* atributos do solo**

No Quadro 7, a correlação entre a PG e os atributos do solo apresentou significância exclusivamente para o par PG x UG2 ( $r = -0,182^*$ ). Esta correlação inversa indica que com aumento da UG2 ocorrerá à diminuição da produtividade da soja, provavelmente desencadeada pela menor respiração radicular que a compactação do solo proporcionou, diminuindo dessa forma a absorção de nutrientes, provocando uma diminuição da produtividade. Portanto, em relação à UG, esse fato ficou em desacordo com os trabalhos Santos et al. (2005), de Carvalho et al. (2006) e de Rosa Filho et al. (2009), os quais, trabalhando com a produtividade de grãos de feijão e soja num Latossolo Vermelho distrófico de Selvíria (MS), obtiveram correlação não significativa com a umidade gravimétrica, respectivamente de -0,043; 0,070 e 0,050. de Selvíria (MS). Já as correlações entre os componentes de produção da soja *versus* atributos do solo apresentaram significância para os pares MM x DS2 ( $r = 0,183^*$ ), MM x UG1 ( $r = -0,231^*$ ), MM x UG2 ( $r = -0,217^*$ ) e NVP x UG2 ( $r = -0,221^*$ ), havendo, para o primeiro caso uma correlação direta entre eles, indicando que com o incremento da densidade do solo ocorrerá um aumento da massa de mil grãos da soja, isso ocorre talvez pelo fato, de que com a ampliação do contato solo-raiz, aumente a absorção de nutrientes pela cultura (ANDREOTTI et al., 2010). Contudo, para os três últimos casos, ocorreu uma correlação indireta, ou seja, com a diminuição da umidade gravimétrica ocorrerá um acréscimo na massa de mil grãos e também no número de vagens por planta. O par PG x UG2 foi uns dos que apresentou maior coeficiente de correlação, portanto, de elevado interesse agrícola.

Quadro 7: Matriz de correlação linear simples entre alguns atributos da produtividade da soja e de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto no Cerrado em Selvíria (MS-Brasil)

Atributos <sup>(a)</sup>	Coeficientes de correlação <sup>(b)</sup>														
	PG	NVP	NGP	MM	DS1	DS2	RP1	RP2	UG1	UG2	UV1	UV2	MO1	MO2	pHI
NVP	<b>0,267**</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NGP	<b>0,313**</b>	<b>0,881**</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MM	0,139	<b>0,222*</b>	0,130	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DS1	0,069	0,118	0,069	0,151	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DS2	0,095	0,046	-0,004	<b>0,183*</b>	<b>0,439**</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
RP1	-0,064	-0,107	-0,053	0,059	0,151	0,074	-	-	-	-	-	-	-	-	-
RP2	-0,097	-0,051	-0,031	-0,089	0,123	-0,076	<b>0,629**</b>	-	-	-	-	-	-	-	-
UG1	-0,132	-0,083	-0,083	<b>-0,231*</b>	-0,171	<b>-0,186*</b>	0,002	0,024	-	-	-	-	-	-	-
UG2	<b>-0,182*</b>	<b>-0,221*</b>	-0,160	<b>-0,217*</b>	<b>-0,309**</b>	<b>-0,188*</b>	-0,032	-0,111	<b>0,398**</b>	-	-	-	-	-	-
UV1	-0,021	-0,001	-0,045	-0,128	<b>0,441**</b>	0,132	0,071	0,100	<b>0,740**</b>	0,167	-	-	-	-	-
UV2	-0,149	-0,148	<b>-0,193*</b>	-0,097	-0,179	0,106	-0,029	-0,170	<b>0,312**</b>	<b>0,826**</b>	<b>0,182*</b>	-	-	-	-
MO1	-0,106	<b>-0,198*</b>	-0,122	-0,172	-0,125	-0,167	0,094	0,005	0,110	<b>0,302**</b>	-0,008	0,141	-	-	-
MO2	-0,002	0,027	0,041	-0,099	-0,086	-0,165	0,007	-0,101	0,168	<b>0,204*</b>	0,053	<b>0,198*</b>	<b>0,232*</b>	-	-
pHI	0,027	-0,011	0,035	-0,020	0,058	0,025	0,105	0,022	0,098	0,064	0,120	0,010	<b>0,219*</b>	0,035	-
pH2	0,063	0,146	<b>0,195*</b>	0,029	<b>0,243**</b>	0,053	0,075	-0,125	-0,076	-0,032	0,099	-0,008	0,025	0,175	<b>0,384**</b>

<sup>(a)</sup> PG = produtividade de grãos, NVP = número de vagem por planta, NGP = número de grãos por planta, MM = massa de mil grãos; DS, RP, UG, UV, MO e pH<sub>1</sub>, de 1 a 2, são respectivamente a deidade do solo, resistência à penetração, umidade gravimétrica, umidade volumétrica, matéria orgânica e o potencial hidrogeniônico do solo; <sup>(b)</sup> \* Significativo ao nível de 5% de probabilidade, \*\* Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

#### 4.2.1.1.2 Atributos do solo *versus* atributos do solo

No geral, as correlações entre os pares de atributos do solo (Quadro 7) apresentaram-se, quando analisados, com o sinal positivo (correlação direta) ou negativo (correlação indireta). Os de correlação direta, com os respectivos valores do coeficiente de correlação, foram o DS1 x UV1 (0,441\*\*), UG1 x UV1 (0,740\*\*), UG2 x UV2 (0,826\*\*), UG2 x MO2 (0,204\*), UV2 x MO2 (0,198\*) e MO1 x pH1 (0,219\*). Já o de correlação indireta foi DS2 x UG2 (-0,188\*).

No Quadro 7, o par DS1 x UV1 apresentou correlação direta entre seus atributos. Assim, com o aumento da DS ocorrerá um aumento da UV, e vice-versa. Tal fato concordou com aquele de Rosa Filho (2008), o qual, trabalhando com a produtividade de grãos de soja num Latossolo Vermelho Distróférrico de Selvíria (MS), também obteve correlação direta entre eles ( $r = 0,695^{**}$ ). Já os pares UG2 x MO2 e UV2 x MO2 também apresentaram correlação direta entre causa e efeito, ou seja, com o aumento da umidade do solo, tanto gravimétrica, como volumétrica, proporciona em um aumento da matéria orgânica. Resultados semelhantes foram obtidos por Montanari (2009), trabalhando num Latossolo Vermelho distroférrico sob plantio direto para a cultura do feijão, no qual, também obteve correlação direta entre eles. Para o par MO1 x pH1 ocorreu também correlação positiva, em que Montanari (2009) encontrou correlação direta entre eles ( $r = 0,507^{**}$ ), isso pode ter ocorrido devido o aumento da quantidade de matéria orgânica, aumentando assim, a capacidade de troca de cátions e conseqüentemente poderá ocorrer uma elevação do potencial hidrogeniônico do solo.

Já o par DS2 x UG2 apresentou correlação indireta entre seus atributos. Assim, com o aumento da DS ocorrerá uma diminuição da UG, e vice-versa apresentando um coeficiente de correlação de (-0,188\*\*). Tal fato concordou com aquele de Rosa Filho et al. (2009), o qual, trabalhando com a produtividade de grãos de soja num Latossolo Vermelho distróférrico de Selvíria (MS), também obteve correlação indireta entre eles ( $r = -0,184^{**}$ ).

#### 4.2.1.2 Regressão linear simples entre os atributos pesquisados

As principais equações de regressão linear simples entre os atributos pesquisados, no âmbito das correlações estabelecidas entre planta *versus* planta e planta *versus* solo, estão apresentados na Figura 11. Deste modo, os modelos foram exclusivamente apresentados para os pares de atributos que proporcionaram correlações significativas, assim como também apresentaram coeficientes adjuntos significativos para as variáveis independentes.

No âmbito da correlação entre atributos da planta *versus* planta Figura 11 foi observado: a) a equação de regressão da PG em função da NGP foi representada por um modelo linear direto (Figura 11a), com um baixo, entretanto, significativo, coeficiente de correlação ( $r = 0,313^{**}$ ). Seu baixo valor foi dado pelo elevado número de observações utilizado no presente estudo ( $n = 121$ ). Com isso, a variabilidade da produtividade de grãos de soja (PG) em questão pôde ser explicada por 31,3% da variabilidade dos dados do número de grãos por planta (NGP). Dessa forma, quando a NGP variar entre 45 a 183, a PG aumentará de 3809 a 4590 kg/ha. Já quando tomado o valor médio de 98 da NGP poderá ser estimada a PG média de 4110 kg/ha; b) a PG apresentou também uma variação linear direta com o NVP (Figura 11b). Desse modo, a variabilidade da produtividade de grãos de soja (PG) em questão pôde ser explicada por 26,7% da variabilidade dos dados do número de grãos por planta (NVP). Com, quando a NVP variar entre 23 a 80, a PG aumentará de 3851 a 4427 kg/ha. Já quando utilizado o valor médio de 48 da NVP poderá ser estimada a PG média de 4099 kg/ha. Assim, pode-se inferir que a produtividade do presente estudo foi maior que a média nacional (2900 kg/ha) citada pela CONAB (2010) e maior que as encontradas por Rosa Filho et al. (2009) e Andreotti et al. (2010) que estudando a produtividade da soja em Latossolo Vermelho sobre plantio direto encontraram médias de 3318 kg/ha e 3270 kg/ha, respectivamente. Montanari (2009) estudando a produtividade de grãos de feijão num Latossolo Vermelho sobre plantio direto encontrou as mesmas e significativas correlações entre atributo de planta *versus* planta [PG = f(NVP, NGP)].

No âmbito da correlação dos atributos da planta *versus* solo houve apenas uma única e significativa regressão da PG em função da UG2. Foi verificado que a PG apresentou uma variação linear indireta com a UG2 (Figura 11c). Portanto, quando ocorrer o mínimo do valor da UG2 (0,115 kg/kg) implicará num valor máximo estimado da PG igual a 4402 kg/ha. Assim, para o máximo da UG2 (0,256 kg/kg), o valor mínimo da PG de 3847 kg/kg. Este resultado discorda de Rosa Filho (2008) que encontrou uma relação direta entre PG x UG2.

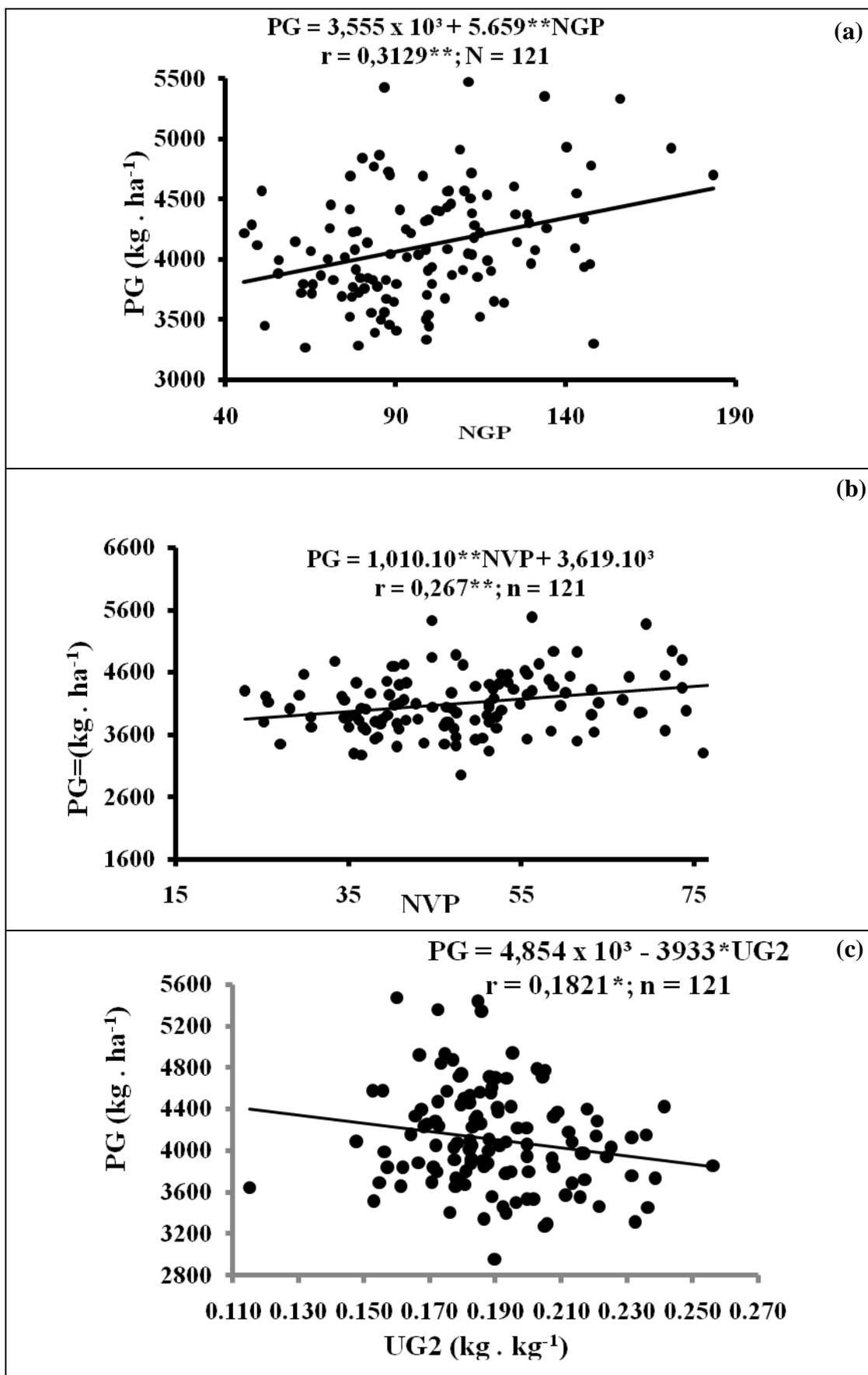


Figura 11. Equação de regressão entre alguns atributos da produtividade da soja e de um Latossolo Vermelho distroférrico sob plantio direto no Cerrado em Selvíria (MS-Brasil)

### 4.3 Análise geoestatística dos atributos pesquisados

#### 4.3.1 Análise semivariográfica simples

##### 4.3.1.1 Ajuste dos semivariogramas simples dos atributos pesquisados

No Quadro 8 e Figura 12 estão apresentados os parâmetros dos semivariogramas simples ajustados para a produtividade da soja e de alguns atributos físicos e químicos de um Latossolo Vermelho distroférico de Selvíria (MS) sob plantio direto. Assim, ficou atestado que, com exceção da NGP, NVP, MM, DS2, UG1, UG2, UV1 e MO1 que apresentaram efeito pepita puro, todos os demais atributos apresentaram dependência espacial (Quadro 8). No tocante ao desempenho dos semivariogramas, a relação decrescente deles, analisada pela grandeza do coeficiente de determinação espacial ( $r^2$ ), foi a seguinte: 1) UV2 (0,883); 2) pH2 (0,821); 3) PG (0,749); 4) MO2 (0,735); 5) pH1 (0,634) e 6) DS1 (0,296). Assim, em relação aos seis primeiros, que tiveram razoáveis coeficientes de determinação espacial, observou-se o seguinte.

Para o primeiro (UV2), seu  $r^2$  (0,883), que indicou ser tal atributo o de melhor ajuste semivariográfico, concordou com aqueles observados por Montanari (2009) no sistema plantio direto que foi de 0,897. Em relação ao ADE, o alto valor observado (96,7%) discordou com o referido autor, no qual o ADE foi de 50,2%. O modelo exponencial ajustado para o UV2 ficou de acordo com o observado por Montanari (2009).

Para o segundo (pH2), seu  $r^2$  (0,821), concordou com aqueles observados por Freddi (2003) no sistema de preparo convencional que foi de 0,991, Montanari (2009) no sistema plantio direto que foi de 0,979 e Morales e Ferreiro (2009), que também encontraram resultados semelhantes quando estudaram um arrozal ácido em Corrientes na Argentina em um Argissolo com um  $r^2$  de 0,938. Em relação ao ADE, o moderado valor observado (60,0%) não concordou com os referidos autores, nos quais os ADEs variaram entre 91,2 a 84,2%, respectivamente. O modelo gaussiano ajustado para o pH2 ficou em desacordo com o observado por Freddi (2003), Almeida (2007) e Morales e Ferreiro (2009). Esta alta dependência espacial atribuída ao pH já foi muito encontrada pelos pesquisadores, talvez devido à proximidade dos valores absolutos do potencial hidrogeniônico.

Para o terceiro (PG), seu  $r^2$  (0,749), concordou com aqueles observados por Andreotti et al. (2010) no sistema plantio direto que foi de 0,821. Em relação ao ADE, o valor observado (87,9%) também concordou com o respectivo autor, no qual o ADE foi de 74,1%. O modelo exponencial ajustado para a PG ficou em desacordo com o observado por Andreotti et al. (2010) que encontraram o modelo gaussiano.

Quadro 8: Parâmetros dos semivariogramas simples e cruzados de alguns atributos da produtividade da soja e de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto no Cerrado em Selvíria (MS-Brasil)

Atributo <sup>(a)</sup>	Parâmetros							Classe de dependência espacial
	Modelo <sup>(b)</sup>	Efeito Pepita (C <sub>0</sub> )	Patamar (C <sub>0</sub> +C)	Alcance (m)	r <sup>2</sup>	SQR <sup>(c)</sup>	ADE <sup>(d)</sup>	
<b>γ (h) simples dos atributos da planta e do solo</b>								
PG (kg ha <sup>-1</sup> )	exp	2,690.10 <sup>4</sup>	2,224.10 <sup>5</sup>	23,4	0,749	7,400.10 <sup>8</sup>	87,9	alta
DS1 (kg dm <sup>-3</sup> )	exp	2,330.10 <sup>-3</sup>	1,626.10 <sup>-1</sup>	14,7	0,296	2,366.10 <sup>-5</sup>	85,7	alta
UV2 (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	exp	2,500.10 <sup>5</sup>	7,540.10 <sup>4</sup>	28,8	0,883	1,818.10 <sup>-8</sup>	96,7	alta
MO2 (g dm <sup>-3</sup> )	exp	6,140	1,335.10	52,8	0,735	8,86	52,8	moderada
pH1	gau	4,520.10 <sup>-2</sup>	9,050.10 <sup>-2</sup>	29,8	0,634	8,699.10 <sup>-4</sup>	50,1	moderada
pH2	gau	6,020.10 <sup>-2</sup>	1,504.10 <sup>-1</sup>	44,8	0,821	2,441.10 <sup>-3</sup>	60,0	moderada
<b>γ (h) cruzados entre os atributos da planta e do solo</b>								
PG=f(pH1) (kg ha <sup>-1</sup> )	gau	1,000.10 <sup>-2</sup>	3,121.10 <sup>1</sup>	33,6	0,922	6,670.10 <sup>1</sup>	99,9	alta
PG=f(pH2) (kg ha <sup>-1</sup> )	gau	1,000.10 <sup>-2</sup>	2,580.10 <sup>1</sup>	39,1	0,841	1,180.10 <sup>2</sup>	99,9	alta

<sup>(a)</sup> PG = produtividade de grãos; DS, UV, MO e pH , de 1 a 2, são respectivamente a densidade do solo, umidade volumétrica, potencial hidrogeniônico do solo; <sup>(b)</sup> exp = exponencial, gau = gaussiano; <sup>(c)</sup> SQR = soma dos quadrados dos resíduos; <sup>(d)</sup> ADE = avaliador da dependência espacial.

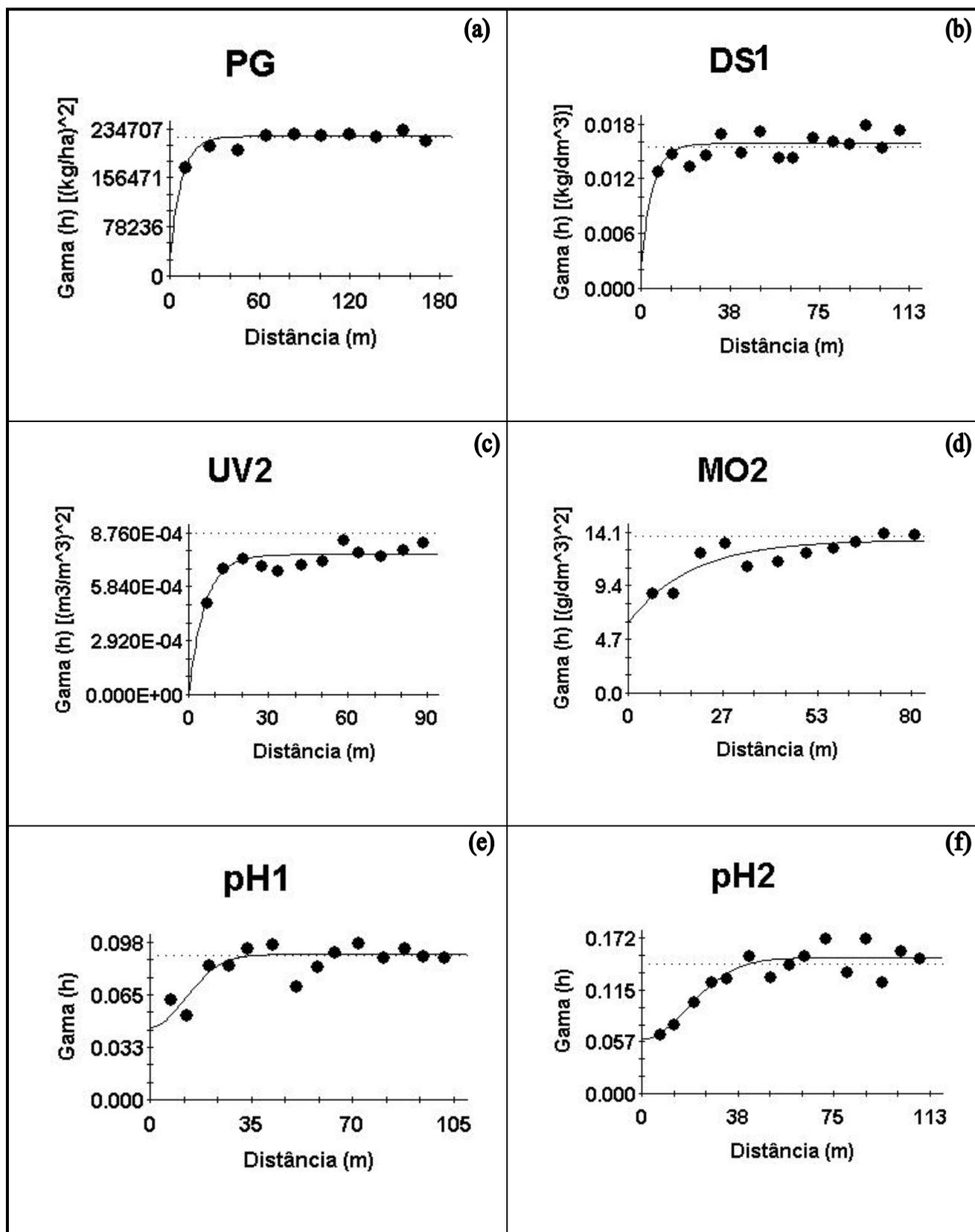


Figura 12. Semivariogramas simples da produtividade da soja e de alguns atributos de um Latossolo Vermelho distroférico (PG, DS1, UV2, MO2, pH1 e pH2)

Para o quarto (MO2), seu  $r^2$  (0,735) apresentando um ADE (50%), considerada dependência espacial moderada discordou daquele observado por Bezerra (2008) que estudando um Latossolo cultivado com milho que foi semeado sobre pastagem irrigada não encontrou variabilidade espacial para a matéria orgânica, apresentando efeito pepita. Mas corroborando com Montanari (2009), que pesquisando um Latossolo sob plantio direto cultivado com feijão observou para o teor de matéria orgânica dependência espacial, com  $r^2$  (0,912) e ADE (60%).

Para o quinto (pH1), seu  $r^2$  (0,634), divergiu com o observado por Montanari (2009) que foi de 0,851. Em relação ao ADE, o moderado valor observado (50,1%) também discordou com o referido autor, no qual o ADE foi de 89,5%. O modelo gaussiano ajustado para o pH1 ficou em desacordo com o modelo esférico observado por Montanari (2009).

Para o sexto (DS1), seu  $r^2$  (0,296), discordou com aqueles observados por Santos et al. (2006) e Lima et al. (2007), nos quais variaram entre 0,819 e 0,906. Em relação ao ADE, o alto valor observado (85,7%) concordou com os referidos autores, nos quais os ADEs variaram entre 50,1 a 72,2%. Já Rosa Filho et al. (2009) e Andreotti et al. (2010) que estudaram a densidade do solo para a produtividade da soja sob plantio direto, não encontraram dependência espacial para DS1, talvez devido ao efeito da botinha existente no implemento durante a semeadura na camada de 0,00-0,10 m que aumenta a heterogeneidade do solo, conferindo-lhe um efeito pepita. O modelo exponencial ajustado para o DS1 ficou em desacordo com o modelo gaussiano observado por Lima et al. (2007), e também com modelo esférico obtido por Santos et al. (2006).

No Quadro 8, a relação decrescente dos alcances foi a seguinte: 1) MO2 (52,8 m), 2) pH2 (44,8 m), 3) pH1 (29,8 m), 4) UV2 (28,8 m), 5) PG (23,4 m) e 6) DS1 (14,7 m). Portanto, nas condições da presente pesquisa, assim como, visando auxiliar pesquisa futura, nas quais os mesmos atributos estejam envolvidos, os valores dos alcances a serem utilizados nos pacotes geoestatísticos, que alimentarão os pacotes computacionais empregados na agricultura de precisão, no geral, não deverão ser menores do que 14,7 m. Por outro lado, exclusivamente para o atributo da planta, não menores do que 23,4 m. O importante de se ressaltar é que o alcance dado pelo semivariograma é dependente do tamanho do grid estabelecido no estudo.

#### **4.3.1.2 Mapas de krigagem dos atributos pesquisados**

Nas Figuras 13a, 13b, 14a, 14b, 15a e 145, podem ser observados os mapas de krigagem da produtividade de grãos da soja e de alguns atributos de um Latossolo Vermelho

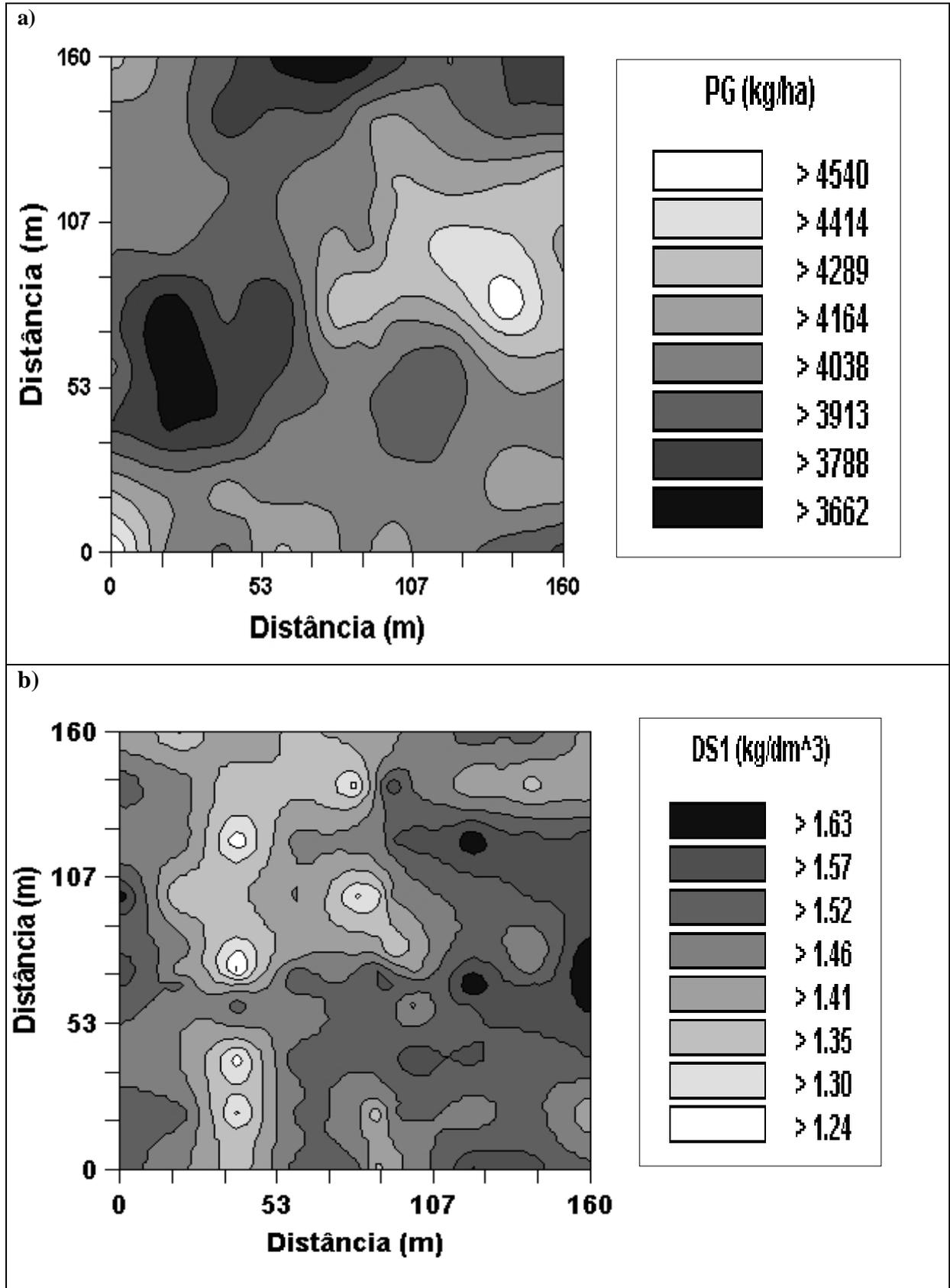


Figura 13. Mapas de krigagem da produtividade da soja e da densidade de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto no Cerrado em Selvíria (MS-Brasil)

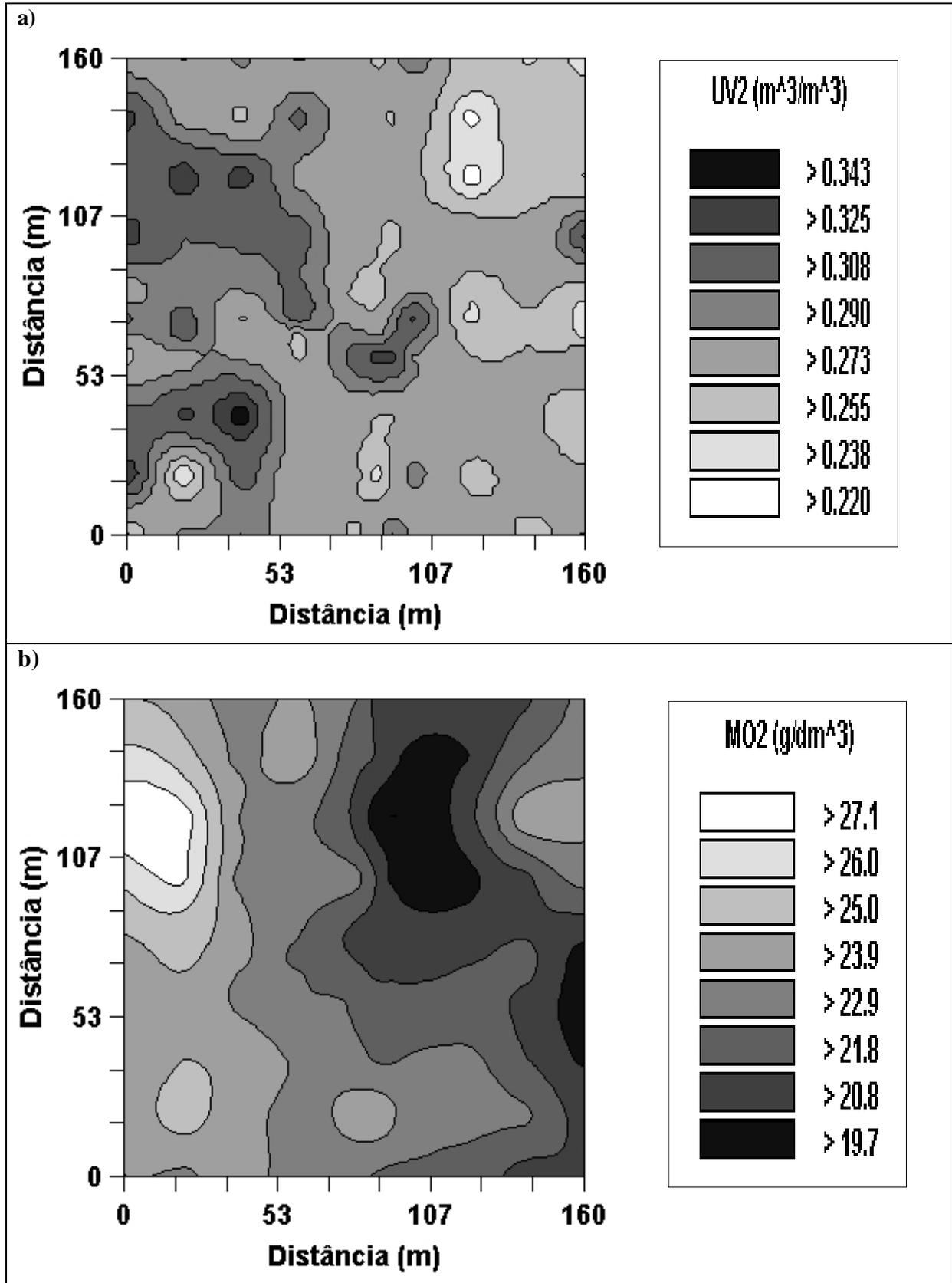


Figura 14. Mapas de krigagem da umidade volumétrica e do teor de matéria orgânica de um Latossolo Vermelho distroférrico sob plantio direto no Cerrado em Selvíria (MS-Brasil)

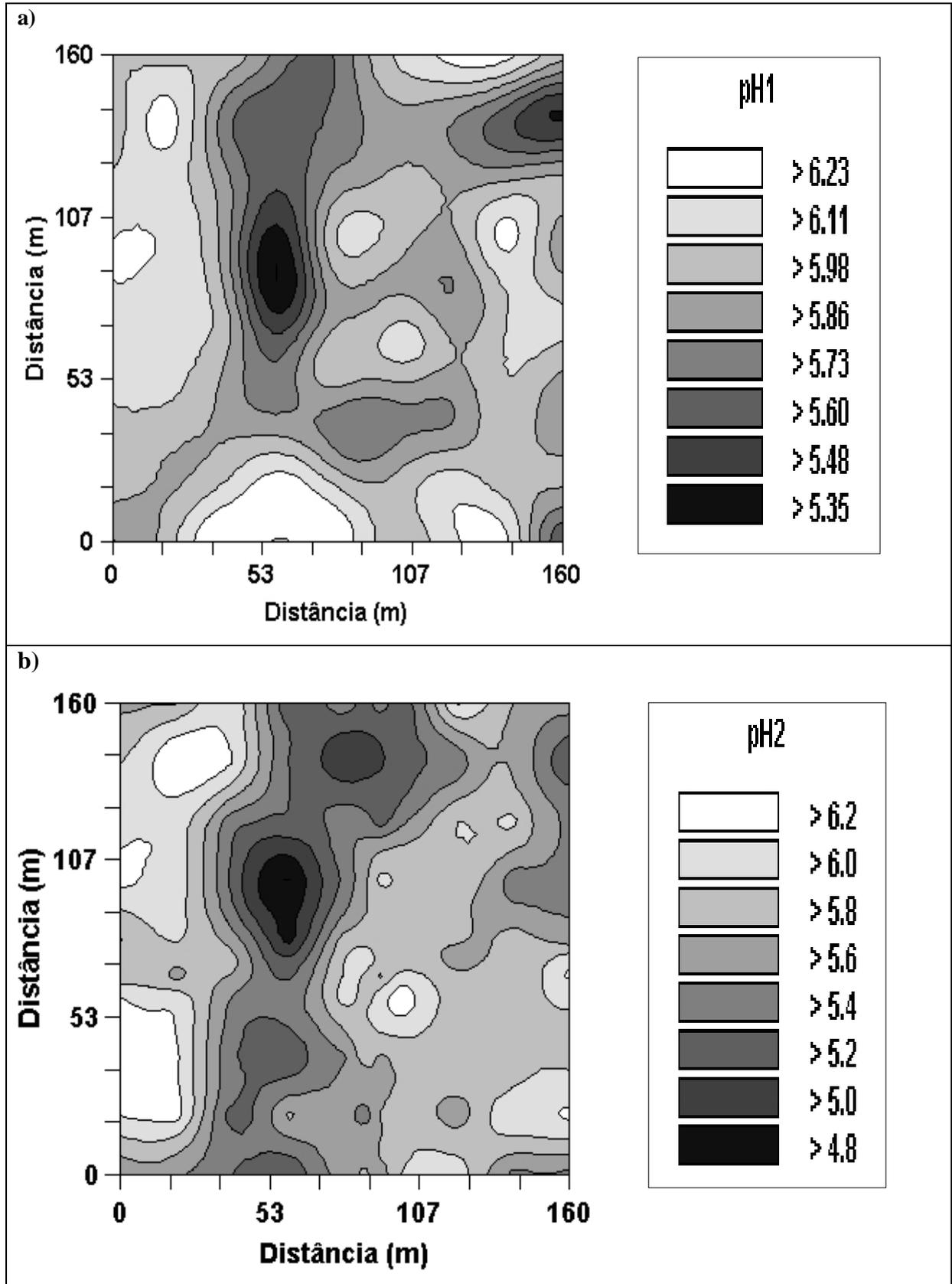


Figura 15. Mapas de krigagem do potencial hidrogeniônico de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto no Cerrado em Selvíria (MS-Brasil)

distroférico de Selvíria (MS). A região sudeste dos mapas sugerem uma maior produtividade da soja nesta região com cifras de 4414 a 4540 kg ha<sup>-1</sup>, mesmo apresentando uma maior densidade do solo na camada superficial (1,52 a 1,63 kg dm<sup>-3</sup>), tendo também uma menor umidade volumétrica (0,220 a 0,238 kg kg<sup>-1</sup>) e quantidade de matéria orgânica (19,7 a 20,8 g dm<sup>-3</sup>) na segunda camada, condição esta considerada natural, devido ser a camada subsuperficial do solo, ou seja, como se trata de plantio direto, a maior quantidade de água e matéria orgânica geralmente se concentra na profundidade de 0 – 0,10 m.

Já o potencial hidrogeniônico na região sudeste da área estão em níveis ideais para a cultura da soja sendo variando entre 6,11 a 6,23 para a profundidade de 0 – 0,10 m, e de 6,0 a 6,2 para a profundidade de 0,10 – 0,20 m, que segundo Raij et al. (1991) valores de pH entre 5,0 e 6,5 são considerados ideais para as culturas agrícolas.

Quando se compara o mapa de krigagem para a DS1 do presente estudo, observa-se muita semelhança com o mapa de krigagem da DS1 (Figura 16a) encontrado no estudo de Montanari (2009), que pesquisou a cultura do feijoeiro sob plantio direto no ano agrícola 2006/07, na mesma área de estudo o qual foi estabelecida a presente pesquisa. Observa-se para ambos os mapas (Figura 16) que as regiões nordeste são as que apresentam os menores de densidade do solo ( $\mu=1,22$  kg dm<sup>-3</sup>). Já as regiões periféricas do mapa são as que indicam os maiores valores do referido atributo ( $\mu=1,55$  kg dm<sup>-3</sup>). Com isto, pode-se inferir que a utilização de zonas específicas de manejo, com vistas a diminuir os valores da densidade do solo, caberia as regiões de maiores valores, sendo isso a agricultura de precisão.

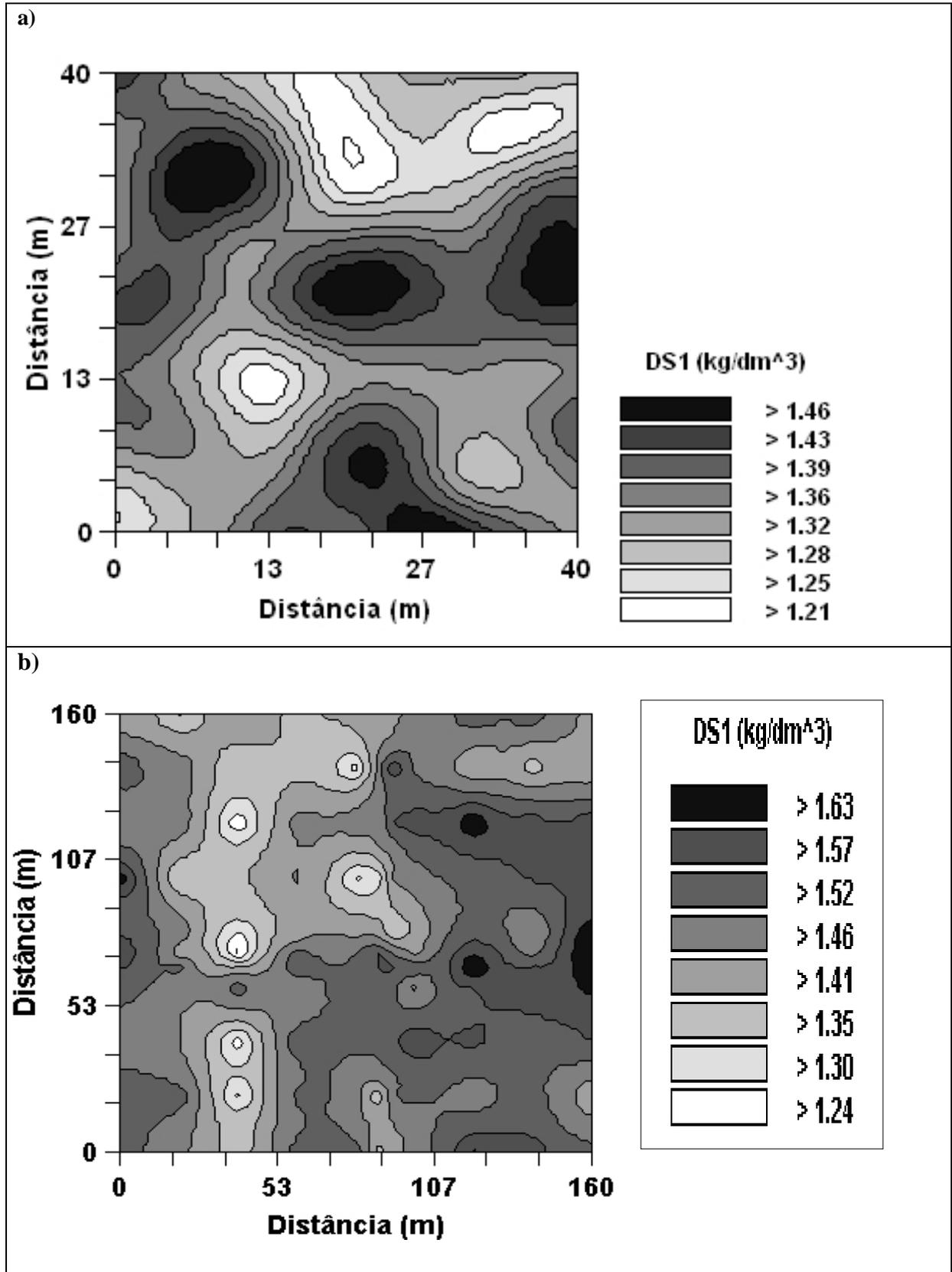


Figura 16. a) Mapa de krigagem da densidade do solo na profundidade de 0,00-0,10 m sob plantio direto para a cultura do feijão do ano agrícola 2006/07 num Latossolo Vermelho distroférico do Cerrado em Selvíria (MS-Brasil); (extraído de MONTANARI, 2009); b) Mapa de krigagem da densidade do solo na profundidade de 0,00-0,10 m sob plantio direto para a cultura da soja do ano agrícola 2007/08 num Latossolo Vermelho distroférico do Cerrado em Selvíria (MS-Brasil)

### 4.3.2 Análise semivariográfica cruzada

#### 4.3.2.1 Ajuste dos semivariogramas cruzados e mapas de co-krigagem dos atributos pesquisados

A análise geoestatística das co-krigagens (Quadro 8 e Figura 17a, b, c e d) indicou que os dois existentes semivariogramas cruzados foram para os atributos  $PG = f(pH1)$  e  $PG = f(pH2)$ , respectivamente com coeficientes de determinação espacial 0,922 e 0,841, revelando também ajuste gaussiano para ambos semivariogramas, cujos alcances foram de 33,6 e 39,1 m, assim como com elevado ADE para todos (99,9). Assim, espacialmente, em relação ao atributo  $PG = f(pH1)$  e  $PG = f(pH2)$  cujas krigagens simples estão representadas nas figuras 15a e 14b, onde ocorreu substancial elevação do potencial hidrogenionico (região sudeste), com valores entre 6,11 a 6,23 para a profundidade de 0 – 0,10 m, e de 6,0 a 6,2 para a profundidade de 0,10 – 0,20 m, a produtividade de grãos da soja variou entre 4414 a 4540 kg ha<sup>-1</sup>. Reichart et al. (2008) estudando a cultura da soja num Planossolo Hidromórfico distrófico sob preparo convencional encontraram que os atributos físicos e químicos do solo, que mais estiveram associados à produtividade da soja foram o pH e a saturação por bases.

Montanari (2009) estudando a produtividade do feijão num Latossolo sobre plantio direto obteve um semivariograma cruzado de  $PRG=f(pH1)$  com um coeficiente de determinação de 0,438. Quando se compara o mapa de co-krigagem para o pH1 do presente estudo, observa-se muita semelhança com o mapa de co-krigagem do pH1 (Figura 18a), encontrado nos estudos de Montanari (2009), que pesquisou a cultura do feijoeiro sob plantio direto no ano agrícola 2006/07, na mesma área de estudo o qual foi estabelecida a presente pesquisa. Observa-se para ambos os mapas (Figura 18) que as regiões centrais são as que apresentam os maiores valores da produtividade da respectiva cultura em estudo em função do potencial hidrogenionico na profundidade de 0,00-0,10 m. Já as regiões periféricas do mapa são as que indicam os menores valores do referido atributo. Pode se observar por meio dos mapas de krigagem da DS1 e do mapa de co-krigagem do pH1, que existe uma correlação espacial e temporal do solo pesquisado quando se comparam os estudos.

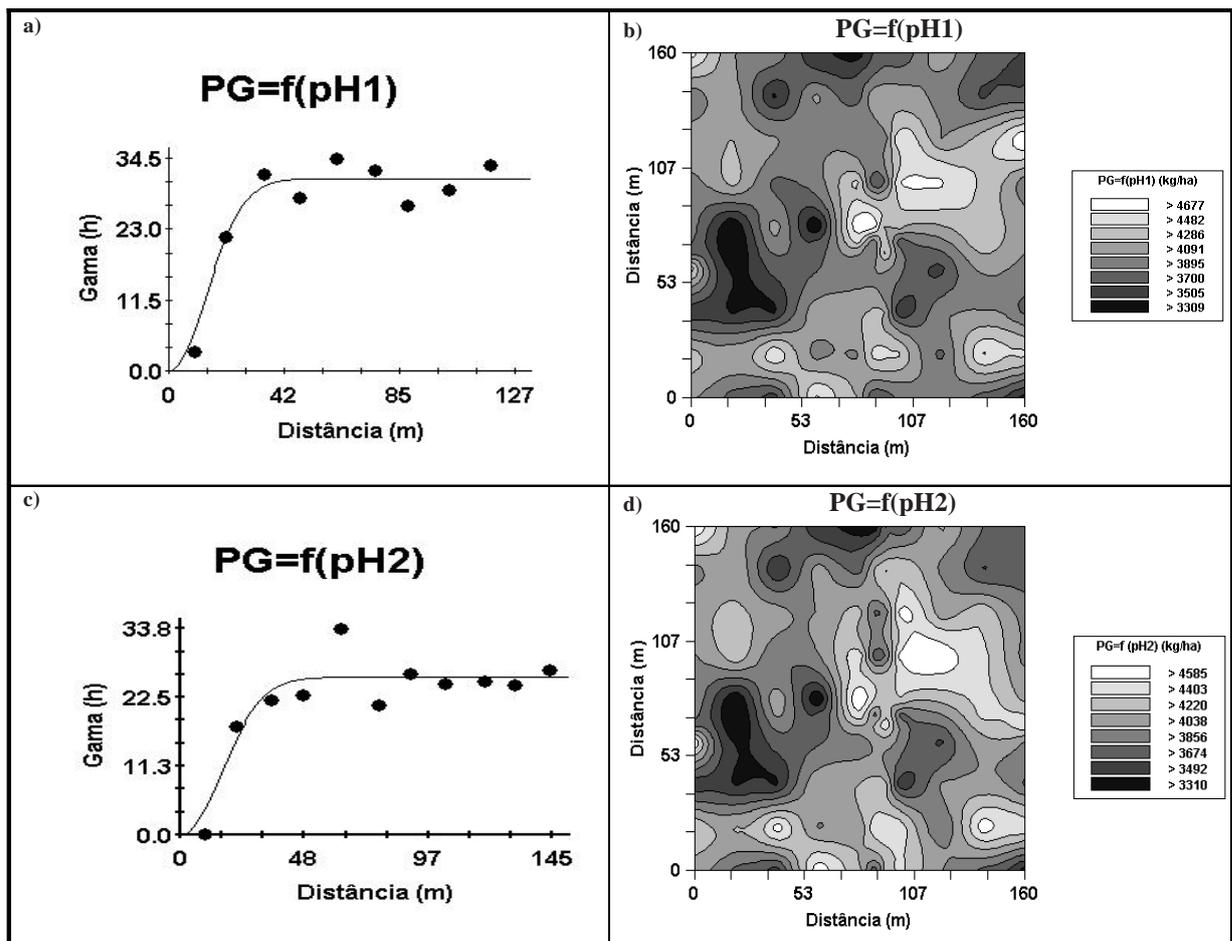


Figura 17. Semivariogramas cruzados e mapas de co-krigagem da produtividade da soja em função do pH de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto no Cerrado em Selvíria (MS-Brasil)

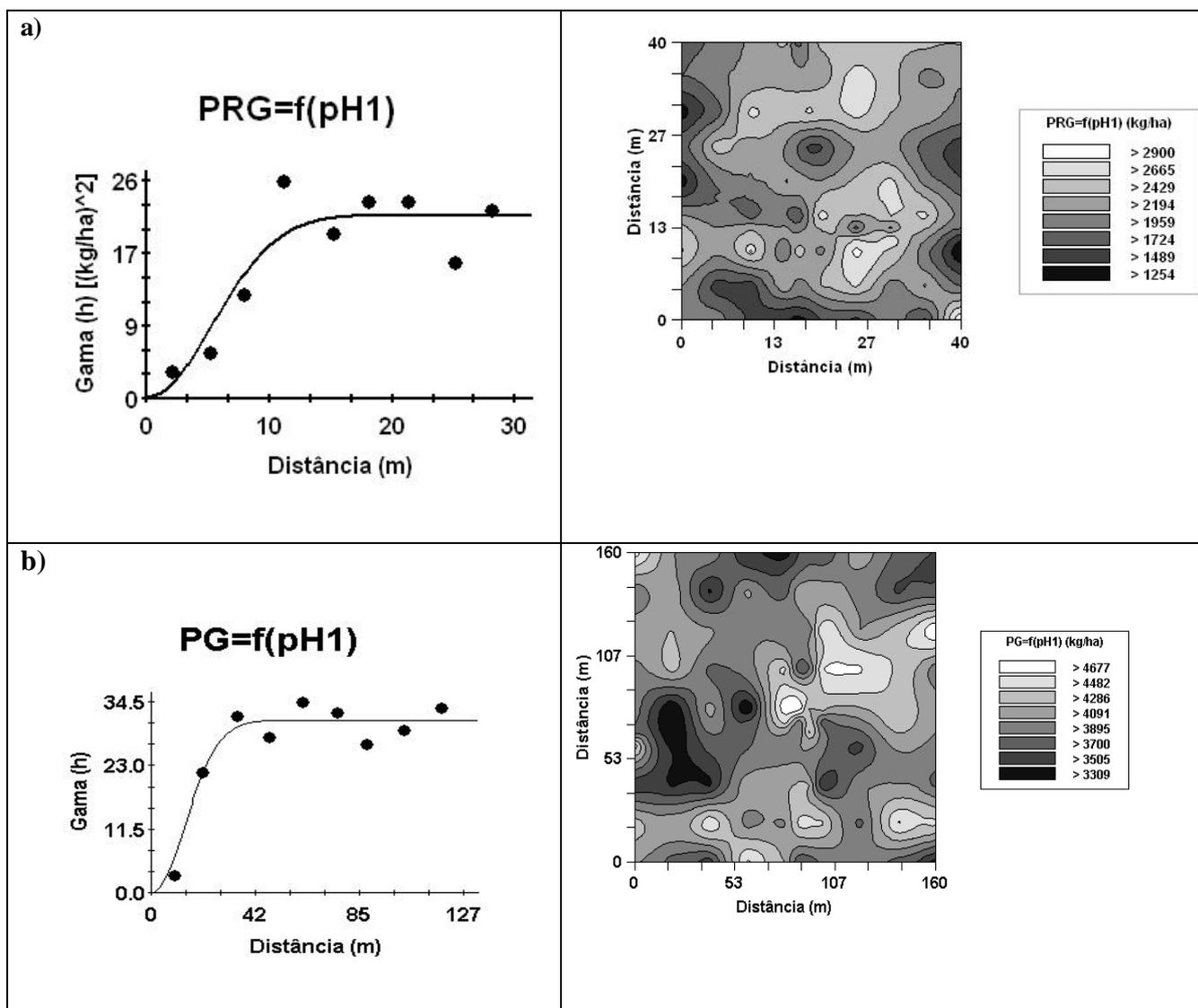


Figura 18. a) Semivariograma cruzado e Mapa de co-krigagem do potencial hidrogenionico na profundidade de 0,00-0,10 m sob plantio direto para a cultura do feijão do ano agrícola 2006/07 num Latossolo Vermelho distroférico do Cerrado em Selvíria (MS-Brasil); (extraído de MONTANARI, 2009); b) Semivariograma cruzado e Mapa de co-krigagem do potencial hidrogenionico na profundidade de 0,00-0,10 m sob plantio direto para a cultura da soja do ano agrícola 2007/08 num Latossolo Vermelho distroférico do Cerrado em Selvíria (MS-Brasil)

# **CONCLUSÕES**

## 5 CONCLUSÕES

- 1) O Latossolo Vermelho distroférico estudado sob o sistema plantio direto estabelecido com a cultura da soja, apresentou distintos padrões de variabilidade linear detectadas pelo coeficiente de variação dos atributos químicos e físicos do solo.
- 2) O Latossolo Vermelho distroférico estudado sob o sistema plantio direto estabelecido com a cultura da soja, apresentou distintos padrões de variabilidade espacial detectadas pela dependência espacial para os atributos químicos e físicos do solo.
- 3) A densidade do solo seguiu a distribuição de frequência do tipo normal sob o sistema plantio direto estabelecido com a cultura da soja, para as profundidades 0,00-0,10 e 0,10-0,20m.
- 4) A resistência mecânica a penetração das raízes seguiu a distribuição de frequência do tipo log-normal sob o sistema plantio direto estabelecido com a cultura da soja, para as profundidades 0,00-0,10 e 0,10-0,20m.
- 5) A umidade do solo seguiu a distribuição de frequência do tipo tendendo a normal e normal sob o sistema plantio direto estabelecido com a cultura da soja, para as camadas 0,00-0,10 e 0,10-0,20m, respectivamente.
- 6) O teor de matéria orgânica seguiu a distribuição de frequência do tipo tendendo a normal e tendendo a log-normal sob o sistema plantio direto estabelecido com a cultura da soja, para as profundidades 0,00-0,10 e 0,10-0,20m, respectivamente.

- 7) O potencial hidrogeniônico seguiu a distribuição de frequência do tipo tendendo a normal e normal sob o sistema plantio direto estabelecido com a cultura da soja, para as profundidades 0,00-0,10 e 0,10-0,20m, respectivamente.
- 8) A produtividade de grãos de soja obtida foi consideravelmente elevada para os padrões nacionais, apresentando média variabilidade. Contudo, na maioria dos atributos físicos do solo, tal variabilidade foi de média a baixa, denotando ser o plantio direto um sistema que desencadeou a homogeneização do ambiente.
- 9) A produtividade da soja apresentou correlação espacial com o potencial hidrogeniônico para as profundidades de 0,00 – 0,10 e 0,10 – 0,20 m, evidenciado pelos semivariograma cruzados e mapas de co-krigagem.
- 10) No geral os atributos pesquisados não variaram aleatoriamente, seguiram padrões espaciais bem definidos, com alcances da dependência espacial entre 28,8 e 124,5 m.
- 11) No geral, observou-se que mesmo o solo encontrando-se compactado, a cultura da soja obteve uma elevada produtividade, talvez pelo fato da apropriada qualidade química que o mesmo apresentava.
- 12) Do ponto de vista espacial, a produtividade de grãos de soja pôde ser estimada por meio do potencial hidrogeniônico, para as camadas de 0,00 – 0,10 e 0,10 – 0,20 m de profundidade do solo, apresentando-se como satisfatório indicador da produtividade da soja.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBUQUERQUE, J. A.; REINERT, D. J.; FIORIN, J. E.; RUEDELL, J.; PETRERE, C.; FONTANELLI, F. Rotação de culturas e sistemas de manejo do solo: efeito sobre a forma da estrutura do solo ao final de sete anos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, MG, v.19, p.115-119, 1995.
- ALMEIDA, V. P. Variabilidade espacial de propriedades do solo com diferentes usos agrícolas, em uma microbacia de Ilha Solteira, São Paulo, Brasil. La Coruña, 2007. 163p. Tese: (Doutorado em Ciências da Terra e do Meio Ambiente) – Universidade Da Coruña.
- AMADO, T. J. C.; REINERT, D. J.; JÚNIOR, G. G.; PONTELLI, C. B.; ESPÍNDOLA, M. C. G. & PEDRUZZI, C. Qualidade de solos derivados de areias quartzosas da fronteira sudoeste do RS: indicadores químicos. In: REUNIÃO SUL-BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 2, Santa Maria, 1998. Anais, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1998. 275-278.
- AMARAL, A.S.; ANGHINONI, I. Alterações de parâmetros químicos do solo pela reaplicação superficial de calcário no sistema plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, DF, v.36, n.4, p.695-702, 2001.
- ANDREOLA, F.; COSTA, L. M.; OLSZEWSKI, N.; JUCKSCH, I. A cobertura vegetal de inverno e a adubação orgânica e, ou, mineral influenciando a sucessão feijão/milho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, MG, v.24, p.867-874, 2000.
- ANDREOTTI, M.; CARVALHO, M. P.; MONTANARI, R.; BASSO, F. C.; PARIZ, C. M.; AZENHA, M. V.; VERCESE, F. Produtividade da soja correlacionada com a

- porosidade e a densidade de um Latossolo Vermelho do cerrado brasileiro. *Cienc. Rural*, Santa Maria, v.40, n.3, p.520-526, 2010.
- ARMESTO, M. V. Variabilidade espacial e temporal da erosión en solos de cultivo. 1999. 118 f. Tese (Doutoral) – Faculdade de Ciências, Universidade Da Coruña, La Coruña.
- ARSHAD, M. A.; LOWERY, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J. W.; A .J.; (Eds). *Methods for assessing soil quality*. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p.123-141 (SSSA Special publication, 49).
- AZEVEDO, W.R. de. (2003). Disponibilidade de fósforo em diferentes épocas de amostragem para o arroz inundado sob influência de calcário, gesso e esterco de curral. Lavras: UFLA, 2003. 69 pp. (Tese – Doutorado).
- BALDOCK, J. A.; NELSON, P. M. Soil organic matter. En: SUMMER, M. E. (Ed.) *Handbook of Soil Science*. Boca Raton: CPC Press. pp. B25-B84, 2000.
- BARIZON, R.R.M. Calagem na superfície para a cultura da soja, em semeadura direta sobre (*Brachiaria brizantha*). Botucatu, 2001. 88f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.
- BATISTA, I. F., Variabilidade espacial da umidade do solo em irrigação por gotejamento sob cultivo protegido, Botucatu, 2002. 113p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Irrigação e Drenagem) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G.A. e CAMARGO, F.A.O. (Eds.) *Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais*. Porto Alegre: Genesis, 1999. p.9-26.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da material orgânica. In: SATOS, G. A. et al. (Ed.). *Fundamentos da material orgânica de solo*. 2. ed. rev. atual. E ampl. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p. 7-16.
- BAVER, L. D. *Física de suelos*. México: Unión Tipográfica Editorial Hispano-Americana, 1973. 529p.
- BRAGA, M.S.; SUASSUNA, N.D.; PIRES, E.L.; OKASAKI, W.Y.; NASCIMENTO, A. do; FREIRA, F. J. (1997). Dinâmica de fósforo em solos da zona da mata de Pernambuco. II – Relação entre as cracterísticas químicas e físicas que afetam a disponibilidade de fósforo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26, 1997, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro.

- BECKETT, P. H. T., WEBSTER, R. Soil variability: a review. *Soils and Fertilizers*, England, v. 34, n. 1, p. 1-15, 1971.
- BENGOUGH, A. G.; MULLINS, C. E. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. *The Journal of Soil Science*, Oxford, v. 41, p. 341-358, 1990.
- BENGOUGH, A. G.; CAMPBELL, D. J.; O' SULLIVAN, M. F. Penetrometer Techniques in relation to Soil Compaction and Root Growth. In: *Soil and Environmental Analysis: Physical Methods*. 2 ed. Marcel Dekker, Inc. p.377-403, 2001.
- BERG, M. van der; KLAMT, E. Variabilidade espacial de características de solos na região do planalto médio, RS: II. Análise da semivariância e da variância. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.21, p.401-8, 1997.
- BERNARDO, S. Manual de irrigação. 6. ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1995. 657 p.
- BERNARDI, A.C.C.; CARMO, C.A.F.S.; MACHADO, P.L.O.; SILVA, C.A.; VALENCIA, L.I.O. & MEIRELLES, M.S. Variabilidade espacial de teores de nutrientes em folhas de soja como ferramenta para agricultura de precisão. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 2002. 5p. (Comunicado Técnico 17).
- BERTOLANI, F.C.; VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial da taxa de infiltração de água e da espessura do horizonte A, em um Argissolo Vermelho Amarelo, sob diferentes usos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.25, p.987-995, 2001.
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; CENTURION, M. A. P. C; SILVA, A. P. efeito da compactação na produtividade de cultivares de soja em latossolo vermelho. *R. Bras. Ci. Solo*, v.30, p.787-794, 2006.
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; CENTURION, M. A. P. C; LEONEL, C. L.; CÁSSIA, A. G. S. J.; FREDDI, O. S. Intervalo hídrico ótimo no monitoramento da compactação de um Latossolo Vermelho cultivado com soja em. *R. Bras. Ci. Solo*, v.31, p.1232 -794, 2007.
- BEZERRA, C. R. DE F. Variabilidade espacial da produtividade de forragem do milho safrinha em função de atributos químicos do solo. 2008. 70f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Campus de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.

- BIASSUSI, M. Estudo da deformação de um vertissolo através da tomografia computadorizada de dupla energia. Pelotas. 80p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pelotas, 1996.
- BISSANI, C. A.; MEURER, E. J.; BOHNEN, H. Solos ácidos e solos afetados por sais. In: MEURER, E. J. Fundamentos de química do solo. 2. ed. Porto Alegre: Genesis, 2004. Cap. 6, p. 1-290.
- BIGARELLA, J.J.; BECKER, R.D.; SANTOS, G.F. (1994). Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais. Editora U.F.S.C., Florianópolis.vol.I, pp. 454-482.
- BOLLER et al. Cuidados com o solo. Cultivar. 2001. Disponível em: <http://www.grupocultivar.com.br/artigos/artigo.asp?id=232>. Acesso em 20 dez. 2010.
- BOWEN, H. D. Alleviating mechanical impedance. In: ARKIN, G. F.; TAYLOR, H. M. (Comp.). Modifying the root environment to reduce crop stress. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1981. p. 21-57.
- BURROUGH, P. A. Principles of geographical information systems for land resources assessment. Oxford: Claredon Press, 1986. 193p.
- BURGUESS, T. M.; WEBSTER, R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I. The semi-variogram and punctual kriging. Journal of Soil Science, Oxford, v. 31, p. 315-331, 1980.
- BUSSAB, W.; MORETTIN, P. A. Estatística básica. 4. ed. São Paulo: Atual, 1987.
- CAMARGO, O. A., ALLEONI, L. R. F. Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas. Piracicaba: Esalq, 1997. 132 p.
- CAMARGO, F. A. O.; SANTOS, G. A.; GUERRA, J. G. M. Macromoléculas e substâncias húmicas. In: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O. (Eds.). Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistema tropicais e subtropicais. Porto Alegre: Genesis, p.27-40, 1999.
- CANARACHE, A. Penetr-a generalized semi-empirical model estimating soil resistance to penetration. Soil Tillage Research, Amsterdam, v.16, p. 51-70, 1990.
- CANELLAS, L. P.; SANTOS, G. A.; AMARAL, N. M. B. Reações da matéria orgânica. In: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O. (Ed.). Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais. Porto Alegre: Gênese, 1999. p.69-90.
- CARVALHO, M. P.; TAKEDA, E. Y. ; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos físicos e químicos de uma associação de solos sob videira (*Vitis vinifera* – L) de Vitória

- do Brasil (SP). In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E COPNSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 13., 2000, Ilhéus. Anais...Ilhéus: Ed, 2000. 1 CD-ROM.
- CARVALHO, M. P.; SORATTO, R. P. e FREDDI, O. S. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo Vermelho Distrófico sob preparo convencional em Selvíria, estado de Mato Grosso do Sul. *Acta Sci. Agron.*, v.24, p.1353-1361, 2002.
- CARVALHO, G. J., CARVALHO, M. P.; FREDDI, O. S.; MARTINS, M. V. Correlação da produtividade do feijão com a resistência à penetração do solo sob plantio direto. *R. Bras. Eng. Agr. Amb.*, v.10, p.765-771, 2006.
- CÁSSARO, F.A.M. Tomografia de dupla energia simultânea para caracterização física de um meio poroso deformável. São Carlos. 119p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Física e Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1994.
- CAVENAGE, A. Alterações das propriedades físicas e químicas de um Latossolo-Vermelho-Escuro sob diferentes usos e manejos. Ilha Solteira, 1996, 75p.
- COLLARES, G. L. Compactação em Latossolos e Argissolo e relação com parâmetros de solo e de plantas. 2005. 106 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.
- COLOZZI-FILHO, A. Plantio direto: microrganismos e processos. In: ASSOCIAÇÃO DE PLANTIO DIRETO NO CERRADO. Atualização em fertilidade e biodinâmica no sistema plantio direto. Brasília: APDC, 2000. p.29-42.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. SÉRIE histórica da soja: safra 2009/10. Brasília: CONAB, 2010. Disponível em: < <http://www.conab.gov.br>. > Acessado em 20/12/2010.
- CONCEIÇÃO, P. C.; AMADO, T. J. C.; SPAGNOLLO, E.; GRAPEGGIA JÚNIOR, G.; ACOSTA, J. A. A. Indicadores de qualidade do solo visando a avaliação de sistemas de manejo. In: XIV Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água, 2002, Cuiabá (MT). Os (des)caminhos do uso da Água na agricultura brasileira, 2002.
- CORÁ, J. E.; ARAUJO, V.; PEREIRA, G. T.; BERALDO, J. M. G. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do solo*, Viçosa, MG, v.28, p.1013-1021, 2004.
- CORRÊA, J.C. Efeito de sistemas de cultivo na estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho-Amarelo em Querência, MT. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.37, n.2, p.203-209, 2002.

- CORÁ, J. E.; ARAUJO, V.; PEREIRA, G. T.; BERALDO, J. M. G. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do solo*, Viçosa – MG, v.28, p.1013-1021, 2004.
- COUTO, E.G. Variabilidade espacial de propriedades do solo influenciado pela agricultura em escala regional e local no sul do estado do Mato Grosso. 1997. 183 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Curso de Pós-graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- CUNHA, P. Superfícies geomórficas e variabilidade de Latossolos em uma vertente sobre arenito-basalto em Jaboticabal (SP). 149 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2000.
- DALLMEYER, A. U. Avaliação energética e desempenho operacional de equipamentos de preparo do solo. 1994. 168 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1994.
- DALCHIAVON, F. C. Aspectos da produtividade do arroz de terras altas irrigado com atributos químicos do solo sob plantio direto. Ilha Solteira, 2010. 113f. Dissertação: (Mestrado em Sistemas de Produção) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista.
- DANIEL, L.A.; CARVALHO, J.F.; JUNQUEIRA, G.S. Avaliação de camadas de solo compactado: Efeito de diferentes sistemas de preparo e cultivo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 24, Campinas. Anais... Campinas, UNICAMP, 1994.
- DAVIS, J. C. *Statistics and analysis in geology*. 2 ed. New York: John Wiley, 1986. 646 p.
- DEMATTE, J. L. I. Levantamento detalhado de solos do “Campus Experimental de Ilha Solteira”. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 1980. 44p.
- DERPSCH, R.; ROTH, C. H.; SIDIRAS, N.; KOPKE, V. Controle de erosão no Paraná, Brasil: sistemas de cobertura do solo, plantio direto e preparo conservacionista do solo. Eschborn: Deutsche Gesellschaft fur Technische Zusammenarbeit/Instituto Agrônômico do Paraná, 272p., 1991.
- DEUTSCH, C.V.; JOURNAL, A.G. *GSLIB: geostatistical software library and user’s guide*, New York: Oxford University, 1998. 369p. (1 CD-ROM).
- DI BELLO, R. C., Análise do Comportamento da Umidade do Solo no Modelo Chuva-Vazão SMAP II – Versão com Suavização Hiperbólica. Estudo de Caso: Região de Barreiras na Bacia do rio Grande - BA [Rio de Janeiro] 2005 XVII, 225 p. 29,7 cm

- (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil, 2005) Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.
- DORAN, J. W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. (Ed.). Defining soil quality for a sustainable environment. Wisconsin: American Society of Agronomy, 1994.
- ELTZ, F.L.P. et al. Efeitos de sistemas de preparo do solo nas Propriedades físicas e químicas de um latossolo brunoálico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.13, p.259-267, 1989.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – Embrapa. Manual de métodos de análise de solos. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura, 1979.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Manual de métodos de análise do solo. 2.ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1997. (numeração capitulada).
- EMBRAPA. Reunião de Pesquisa de Soja da Região Central do Brasil. Tecnologia de Produção de Soja da Região Central do Brasil 2001. Londrina, 2001. 267 p. (Documentos, 167).
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2006. 306 p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA SOJA. Disponível em: <http://www.cnpso.embrapa.br>. Acesso em 02 abr. 2009.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA SOJA. Disponível em: <http://www.cnpso.embrapa.br/producaosoja/SojanoBrasil.htm>. Acesso em 19 dez. 2010.
- FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; JONES, C. A. Growth and mineral nutrition of field crops. 2.ed. New York: M. Decker, 1997. 624p.
- FAGERIA, N. K.; ZIMMERMANN, F. J. P. Influence of pH on growth and nutrient uptake by crop species in an Oxisol. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, New York, v.29, n.17, p.2675-2682, 1998.
- FAGERIA, N. K. Efeito da calagem na produção de arroz, feijão, milho e soja em solo de cerrado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, DF, v.36, n.11, p.1419-1424, 2001a.
- FAGERIA, N. K.; SANTOS, A. B. Influência do pH na produtividade do feijoeiro no sistema plantio direto em solo do cerrado. [www.cnpfa.embrapa.br/conafe/pdf/conafe2005-0010.pdf](http://www.cnpfa.embrapa.br/conafe/pdf/conafe2005-0010.pdf). acessado em: 29/09/2008.

- FAHL, J. I.; CAMARGO, M. B. P.; PIZZINATO, M. A.; BETTI, J. A.; MELO, A. M. T.; DeMARIA, I. C. e CANGIANI, A. M. (Ed.). Instruções agrícolas para as principais culturas econômicas. Boletim 200. 6.ed. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 1998. 396p.
- FALLEIRO, R. M.; SOUZA, C. M. SILVA, S. W.; SEDYAMA, C. S.; SILVA, A. A.; FAGUNDES, J. L. Influência dos sistemas de preparo nas propriedades químicas e físicas do solo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, MG, v.27, p.1097-1104, 2003.
- FANCELLI, A.L.; DOURADO NETTO, D. Produção de milho. Guaíba: Agropecuária. 2000. 360p.
- FERREIRA, M.M. Física do Solo, Lavras, Ed. Universitária de Lavras, s/d.
- FERREIRA E. J. S, VANZELA L. S, ZOCOLER J. L, HERNANDEZ F. B. T., Estimativa dos erros envolvidos na determinação da umidade do solo pela sonda de nêutrons. XXXII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2003.
- FREDDI, O. S. Variabilidade espacial da produtividade do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) e atributos químicos de um Latossolo Vermelho Distroférrico de Selvíria (MS) sob preparo convencional e plantio direto. Ilha Solteira, Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, 2003. 154p. (Dissertação de Mestrado).
- FREDDI, O. S.; CARVALHO, M. P.; CENTURION, J. F.; BARBOSA, G. F. Variabilidade espacial da produtividade do feijão em um Latossolo Vermelho distroférrico sob preparo convencional e plantio direto. Acta Scientiarum, Maringá, v.27, n.1, p. 61 – 67, 2005.
- FREDDI, O. S.; CARVALHO, M. P.; VERONESI JÚNIOR, V. e CARVALHO, G. J. Produtividade do milho relacionada com a resistência mecânica à penetração do solo sob preparo convencional. Eng. Agríc., v.26, p.113-121, 2006.
- FREITAS, P.L.; BERNARDI, A.C.C. Princípios e critérios para adotar o sistema de plantio direto. In: ENCONTRO DE PLANTIO DIRETO NO CERRADO, 7, 2003, Sorriso. Anais... Cuiabá: EdUFMT, 2003, p.59-64.
- FUENTES YAGUE, J. L. Manual práctico sobre utilización de suelos y fertilizantes. Ministério de Agricultura, Pesca y Alimentación de España. Ediciones Mundi prensa. España. 159p., 2002.
- FURLANI, C. E. A. Efeito do preparo do solo e do manejo da cobertura de inverno na cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*-L.) 2000. 218 f. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômica, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2000.

- GENRO JÚNIOR, S. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Variabilidade temporal da resistência à penetração de um Latossolo argiloso sob semeadura direta com rotação de culturas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, MG, v.28, p.477-484, 2004.
- GERARD, C.J.; MEHTH, H.C.; HINOJOSA, F. Root growth in a clay soil. *Soil Science*, Baltimore, v.114, p.37-49, 1972.
- GOOVAERTS, P. E. Geostatistics in Soil Science. State of the art and perspectives. *Geoderma*, 89, pp. 1-45, 1999.
- GS+: Geostatistics for environmental sciences. 7. ed. Michigan, Plainwell: Gamma Desing Software, 2004. 159p.
- GUIMARÃES, E. C.; AQUINO, L. H.; OLIVEIRA, M. S. A variabilidade espacial do pH e da argila dispersa em água em um Latossolos roxo no município de Lavras, MG. *Ciencia e Pratica*, Lavras, v. 16, n. 1, p. 12-17, 1992.
- GUIMARÃES, E. C. Variabilidade espacial de atributos de um Latossolo Vermelho escuro textura argilosa da região do cerrado, submetido ao plantio direto e ao plantio convencional. 2000. 89 f. Tese (Doutorado em Água e Solo) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.
- GUIMARÃES, C.M.; MOREIRA, J.A.A. Compactação do solo na cultura do arroz de terras altas. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.36, n.4, p.703-707, 2001.
- HAKKANSON, I.; VOORHEES, W.; B., RILEY, H. Vehicle and wheel factors influencing soil compactation and crop response in different traffic regimes. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v.11, p.239-282, 1988.
- HAMLETT, J.M.; HORTON, R., CRESSIE, N.A.C. Resistance and exploraty techniques for use in semivariogram analysis. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.50, p.868-75, 1986.
- HENDERSON, C.W.L. Using a penetrometer to predict the effects of soil compaction on the growth and yield of wheat on uniform, sandy soil. *Australian Journal Agricultural Research*, v.40, p.497-508, 1989.
- HENKLAIN, J. C. Efeito do preparo sobre característica do solo. In PEIXOTO, R. T. G.; AHRENS, D. C.; SAMAHA, M. J. *Plantio Direto: o caminho para uma agricultura sustentável*. Ponta Grossa: Instituto Agrônômico do Paraná, p.206-221, 1997.
- HOLTZ, R. D.; KOVACS, W. D. *An introduction to geotechnical engineering*. New Jersey: Prentice-Hall, 1981. 733p.

- HOOGMOED, W. B.; DERPSCH, R. Chisel ploughing as an alternative tillage systems in Paraná, Brasil. *Soil & Tillage Research*, Amsterdam, v. 6, n.1, p. 53 – 67, 1985.
- HUNGRIA et al. Cerrado – Correção do Solo e Adubação. 2ed. EMBRAPA. 416p.,2008.
- IMHOFF, S.; SILVA, A. P.; TORMENA, C. A. Aplicação da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. *Pesq. Agropec. Bras.*, v.37, p.1493-1500, 2000.
- ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. An introduction to applied geostatistics. New York: Oxford University, 1989. 561p.
- JOURNAL, A.G.; HUIJBREGTS, C.J. Mining geostatistics. 5th ed. London: Academic Press, 1991. 561p.
- JOHANN, J. A.; URIBE-OPAZO, M. A.; SOUZA, E. G. e ROCHA, J. V. Variabilidade espacial dos atributos físicos do solo e da produtividade em um Latossolo Bruno Distrófico da região de Cascavel, PR. *R. Bras. Eng. Agr Amb.*, v.8, p.212-219, 2004.
- KLAR, A.E. O sistema solo-água. In: KLAR, A.E. A água no sistema solo-plantaatmosfera. São Paulo: Nobel, 1984. p.57-81.
- KLEPKER, D.; ANGHINONI, I. Características físicas e químicas do solo afetadas por métodos de preparo e modos de adubação. *Revista Brasileira Ciência do Solo*, Viçosa, MG, v.19, n.3, p.395-401, 1995.
- KLEIN, V.A.; LIBARDI, P.L.; SILVA, A.P. Resistência mecânica do solo a penetração sob diferentes condições de densidade e teor de água. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.18, n.2, p.45-54, 1998.
- KIEHL, E. J. Manual de edafologia: relações solo-planta. Piracicaba: Agronômica Ceres, 1979., 264p.
- KNIGHTON, R.E.; JAMES, D.W. Soil test phosphorus as a regionalized variable in leveled land. *Soil Science Society of American Journal*, Madison, v.49, n.3 p.675-679, 1985.
- KOCHHANN, R. A.; DENARDIN, J. E.; BERTON, A. L. Compactação e descompactação de solos. Passo fundo: Embrapa trigo, 2000. 20p.
- LARSON, W.E.; PIERCE, F.J. Conservation and enhancement of soil quality. In: Evaluation on for Sustainable Land Management in the Developing World. Vol. 2 ISBRAM. Proc. 12(2) Int. Board for Soil Res. And Management. Bangkok, Tailândia-1991.
- LEESE, J., JACKSON, T., PITMNAN, A., et al., 2001, “GEWEX/BAHC International workshop on soil moisture monitoring, analysis and prediction for hydrometeorological 203 and hydroclimatological applications”, *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 82, pp. 1423-1430.

- LEMA, M. L. El análisis de suelos como herramienta de diagnóstico para el abonado racional. Estación Fitopatológica do Areeiro, Servicio Agrario, Diputación Provincial de Pontevedra. 4p. Deposito Legal: PO-215/98), 1998.
- LEPSCH, I.F. Soil landscape relationship in area of the Occidental Plateau of São Paulo State, Brazil. 163f. Thesis (PhD) - North Carolina State University, Raleigh, 1975.
- LIBARDI, P. L.; MANFRON, P. A.; MORAES, S. O.; TUON, R. L. Variabilidade da umidade gravimétrica de um solo hidromórfico. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, MG, v.20, p.1-12, 1996.
- LIMA, C. G. R.; CARVALHO, M. P.; MELLO, L. M. M.; LIMA, R. C. Correlação linear e espacial entre a produtividade de forragem, a porosidade total e densidade do solo de Pereira Barreto (SP). R. Bras. Ci. Solo, v.31, p.1244, 2007.
- LOPES, A. S. Solos sob cerrado: características, propriedades e manejo. Piracicaba: Potafós, 1983. 162p.
- LÓPEZ, J. L. C. Análisis geoestadístico y fractal de la precipitación en Galicia durante 1993 y 1994. La Coruña, 1999. 171p. Tesis de Doctorado: Universidad Da Coruña.
- MACEDO, A. Construção e uso de um tomógrafo com resolução micrométrica para aplicações em Ciências do Solo e do Ambiente. São Carlos. 129p. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos - Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada, 1997.
- MARQUES JÚNIOR, J. Distribuição e atributos dos solos em relação à forma e evolução de uma vertente em Monte Alto, SP. 226 f. Tese (Doutorado em Solos) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 1995.
- MARINS, A. C. Métodos de estimação da função semivariância aplicados a dados simulados e reais de produtividade da soja e de atributos físicos de um Latossolo. Cascavel, 2006. 140p. Dissertação: (Mestrado em Engenharia agrícola) - Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná.
- MATHERON, G. Traite de geostatistique appliquee. Technip: Memories Du Bureau De Recherches Geologiques Et Minières, 1962. Tome 1 and 2.
- McBRIDE, M. B.; BLASIAK, J. J. Zinc and copper solubilty as a function of pH in an acid soil. Soil Science Society of America Journal, Madison, v.43, p.866-870, 1979.
- MELSTED, S.W., PECK, T.R. The principles of soil testing. In: WALSH, L.M. BEATON, J.D. (Ed.) Soil testing and plant analysis. Madison: Soil Society of America, 1973. cap. 2, p. 13-21.

- MERCANTE, E.; URIBE-OPAZO, M. A. e SOUZA, E. G. Variabilidade espacial e temporal da resistência mecânica do solo à penetração em áreas com e sem manejo químico localizado. *R. Bras. Ci. Solo*, v.27, p.1149-1159, 2003.
- MEROTTO, A.; MUNDSTOCK, C. M. Wheat root growth as affected by soil strength. *R. Bras. Ci. Solo*, Viçosa, v. 23, n. 2, p. 197-202, 1999.
- MESQUITA, M. G. B. F.; MORAES, S. O. e CORRENTE, J. E. Caracterização estatística de variáveis físicas do solo. *Acta Sci. Agron.*,v.25, p.35-44, 2003.
- MEURER, E.J. (2000). Fundamentos de química do solo. Editora Gênese, U.F.R.G.S., 174 pp.
- MEURER, E. J.; RHEINHEMEIR, D.; BISSANI, C. A. Fenômeno de sorção em solos. In: MEURER, E. J., ed. Fundamentos de química do solo. 3.ed. Porto Alegre: Evangraf, p.117-162, 2006.
- MOLIN, J.P. Geração e interpretação de mapas de produtividade para agricultura de precisão. In: BORÉM, A., ed. Agricultura de precisão. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 2000. p.237–257.
- MONTANARI, R. Forma da paisagem como critério na otimização amostral de Latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar. 2003. 105 f. Monografia (Trabalho de graduação em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2003.
- MONTANARI, R.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; SOUZA, Z. M. Forma da paisagem como critério para otimização amostral de latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, DF, v.40, n.1, p.69-77, 2005.
- MONTANARI, R.; PEREIRA, G. T.; MARQUES JÚNIOR, J.; SOUZA, Z. M.; PAZETO, R. J.; CAMARGO, L. A. Variabilidade espacial de atributos químicos em Latossolo e Argissolos. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.38, n.5, p.1266-1272, 2008.
- MONTANARI, R. Aspectos da produtividade do feijoeiro correlacionados com atributos do solo sob sistemas de manejo de elevado nível tecnológico. Ilha Solteira, 2009. 172f. Tese: (Doutorado em Sistemas de Produção) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista.
- MONTANARI, R.; CARVALHO, M. P.; ANDREOTTI, M.; DLACHIAVON, F. C.; LOVERA, L. H.; HONORATO, M. A. O. Aspectos da produtividade do feijão correlacionados com atributos físicos do solo sob elevado nível tecnológico de manejo, *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.34, n.6, p.1811-1822, 2010.

- MORAES, W. V. Comportamento de características e propriedades físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro, submetido a diferentes sistemas de cultivos. 1984. 107 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura de Lavras, Universidade Federal de Minas Gerais, Lavras, 1984.
- MORALES, L. A.; FERREIRO, J. P. Geostatistical analysis of pH and Redox Potential (Eh) variability over a rice field in successive crop stages. In: Estudios de la Zona no Saturada del Suelo, ROJAS, O. S.; RAMÍREZ, J. C. Barcelona, v.IX, p.304-311, 2009.
- NELSON, D.L.; SOMMERS, L.E. (1996). Total carbons, organic carbon, and organic matter. In: SPARKS, D.L. et al. Methods of soils analysis. Part 3. Chemical Methods. Madison: American Society of Agronomy. pp. 961-1010.
- OADES, J. M.; GILLMAN, G. P.; UEHARA, G.; HUE, N. V.; van NOORDWIJK, M.; ROBERTSON, G. P., WADA, K. Interactions of soil organic matter and variable-charge clays. In: COLEMAN et al. Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems. Hawaii: University of Hawaii, 1989. p. 69-95.
- O'HALLORAN, I.P.; KACHANOSKI, R.G.; STEWART, J.W.B. Spatial variability of soil phosphorus as influenced by soil texture and management. Canadian Journal of Soil Science, Ottawa, v.65, n.3, p. 475-487, 1985.
- OLIVEIRA, J. B.; MONIZ, A. C. Levantamento pedológico detalhado da estação experimental de Ribeirão Preto, SP. Revista Bragantia, v.34, p.59-114, 1975.
- OLIVEIRA FILHO, D., MANTOVANI, E. C. and PEREIRA, S. Tecnologia de determinação da umidade do solo via reflectometria no domínio do tempo. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 3., 2000, Campinas.
- OLIVEIRA JUNIOR, A.C. de. (2004). Calagem e adubações orgânica e mineral no crescimento de mudas e no teor e rendimento de óleo essencial da arnica [*Lychnophora pinaster* (MART)]. Lavras: UFLA. 55 pp. (Dissertação – Mestrado).
- OLIVEIRA JUNIOR, J. C. de; SOUZA, L. C. P; MELO, V. F. Variabilidade de atributos físicos e químicos de solos da formação guabirotuba em diferentes unidades de amostragem. Rev. Bras. Ciênc. Solo [online], v.34, n.5, pp. 1491-1502, 2010.
- PAULETTO, E.A.; GOMES, A.S.; NACHTIGALL, G.R.; Produtividade do arroz irrigado em sistema de cultivo contínuo e em rotação com soja e milho. In: REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 18, 1989, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: IRGA, 1989, p.150-160.
- PEREZ-GOMAR, E.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Resistência à penetração de vertissolo a diferentes umidades e usos do solo. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE

- MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO, 14, 2002, Cuiabá: Anais... Cuiabá: Sociedade Brasileira de Ciência do solo, 2002 (CD-ROM).
- PETTER, R.L. Desenvolvimento radicular da soja em função da compactação do solo, conteúdo de água e fertilidade em Latossolo. 1990, 144p. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1990.
- PIMENTEL-GOMES, F. P., GARCIA, C. H. Estatística aplicada a experimentos agronômicos e florestais. Piracicaba: FEALQ, 2002. 309p.
- POCAY, V.G. Relações entre pedoforma e variabilidade espacial de atributos de Latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar. 2000. 200f. (Dissertação de mestrado em Ciência do Solo) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2000.
- PORTA, J.; LÓPEZ-ACEVEDO, M. E ROQUERO, C. 2003. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. 3ª Edición. Mundi-Prensa. Madrid. 929 pp.
- QUAGGIO, J.A.; RAIJ, B van. (1979). Comapração de métodos rápidos para a determinação da matéria orgânica em solo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas. v.3, pp. 184-187.
- RAIJ, B. van, et al. Análise química do solo para fins de fertilidade. Campinas: Fundação Cargill, 1987. 170p.
- RAIJ, B. van.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (Ed.). Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo. Campinas: Instituto Agronômico, 1997. 285p.
- RAIJ, B. V. Fertilidade do solo e adubação. Piracicaba: Ceres, Potafos, 1991. 343 p.
- REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: NOVAIS, R.F. et al. (Ed.). Tópicos em ciência do solo. 7. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. Cap. 2, p. 49-135.
- REICHERT, J. M.; DARIVA, T. A.; REINERT, D. J.; Da SILVA, V. R. Variabilidade espacial de Planossolo e produtividade de soja em várzea sistematizada: análise geoestatística e análise de regressão. Ciência Rural, Santa Maria, v.38, n.4, p.981-987, 2008.
- REGO, P.G. Plantio direto: economia e gerência no manejo dos solos. Brasília: FEBRAPDP, 1999. 108p.

- REICHARDT, K. Capacidade de campo. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v.12, p.211-6, 1988.
- REICHARDT, K. O solo como um reservatório de água. In: \_\_\_. *A água em sistemas agrícolas*. Piracicaba: Manole, 1990. p.27-69.
- RESENDE, A.V.; KRAHL, L.L.; SHIRATSUCHI, L.S.; GOEDERT, W.J. & DOWICH, I. Diagnóstico nutricional de uma lavoura de soja a partir de informações georreferenciadas. Planaltina, DF, Embrapa Cerrados, 2005. 30p. (*Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento*, 145).
- RIBEIRO JÚNIOR, P. J. Métodos geoestatísticos no estudo da variabilidade especial de parâmetros do solo. 1995. 99f. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.
- RODRIGUES, W. Tecnologias agrícolas sustentáveis no cerrado. Brasília: Ministério da Integração Nacional / UFG, 2002. 86p. (Coleção Centro-Oeste de Estudos e Pesquisa, 13).
- ROQUE, C.G.; CENTURION, J.F.; ALENCAR, G.V.; BEUTLER, A.N.; PEREIRA, G.T.; ANDRIOLI, I. Comparação de dois penetrômetros na avaliação da resistência à penetração de um Latossolo Vermelho sob diferentes usos. *Acta Scientiarum: Agronomy*, Maringá, v.25, p.53-57, 2003.
- ROSA FILHO, G. Produtividade da soja em função de atributos físicos de um Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio direto. Ilha Solteira, 2008. 89f. Dissertação. (Mestrado em Sistemas de Produção) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.
- ROSA FILHO, G.; CARVALHO, M. P.; ANDREOTTI, M.; MONTANARI, R.; BINOTTI, F. F. S. Variabilidade da produtividade da soja em função de atributos físicos de um latossolo vermelho distroférico sob plantio direto. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, Viçosa, v.33, n.2, p. 283-393, 2009.
- RUSSO, D.; BRESLER, E. Soil hydraulic properties as stochastic processes: I Na analysis of field spacial variability. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.45, p.687, 1981.
- SABOGAL, S. G.; LACRUZ, M. S. P.; SANTOS, J. R. Análisis multitemporal y predicción de cambios en la cobertura vegetal y uso del suelo en el noroccidente de la amazonia colombiana. VIII Seminário Florestal, Curitiba, 2008.

- SALVIANO, A.A.C., VIEIRA, S.R., SPAROVEK, G. Variabilidade espacial de atributos de solo e de Crotalaria juncea (L.) em área severamente erodida. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v.22, p.115-22, 1998.
- SANCHEZ, R.B. Variabilidade espacial de propriedades físicas e químicas de Latossolos em diferentes superfícies geomórficas sob cultivo de café, em Patrocínio, MG. 79f. Monografia (Trabalho de graduação e Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 1999.
- SANTOS, P. A.; CARVALHO, M. P.; FREDDI, O. S.; KITAMURA, A. E.; FREITAS, E. E.; VANZELA, L. S. Correlação linear e espacial entre o rendimento de grãos do feijoeiro e a resistência mecânica à penetração em um Latossolo Vermelho distroférico. R. Bras. Ci. Solo, v.29, p.287-295, 2005.
- SANTOS, M. L.; CARVALHO, M. P.; RAPASSI, R. M. A.; MURAIISHI, C. T.; MALLER, A. e MATOS, F. A. Correlação linear e espacial entre produtividade de milho (*Zea mays* L.) e atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto do Cerrado Brasileiro. Acta Sci. Agron., v.28, p.313-321, 2006.
- SANTOS, H. L.; VASCONCELOS, C. A. Determinação do número de amostras de solo para análise química em diferentes condições de manejo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v.11, n.2, p.97-100, 1987.
- SANTOS, T. E. M.; SILVA, D. D; MONTENEGRO, A. A. A. Temporal variability of soil water content under different surface conditions in the semiarid region of the Pernambuco state. Rev. Bras. Ciênc., vol.34, n.5, pp. 1733-1741, 2010.
- SECCO, D.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; ROS, C. O. Produtividade de soja e propriedades físicas de um Latossolo submetido a sistemas de manejo e compactação. R. Bras. Ci. Solo, v.28, p.797-804, 2004.
- SECCO, D.; DA ROS, C. O; SECCO, J. K, e FIORIN, J. E. Atributos físicos e produtividade de culturas em um Latossolo Vermelho argiloso sob diferentes sistemas de manejo. R. Bras. Ci. Solo, v.29, p.407-414, 2005.
- SCHLOTZHAVER, S. D. e LITTELL, R. C. SAS System for elementary statistical analysis. 2.ed. Cary, 1997. 905p.
- SILVA, A.P.; LIBARDI, P. L.; VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial da resistência a penetração de um Latossolos Vermelho-escuro ao longo de uma transeção. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v.13, p.1-5, 1989.

- SILVA, R.H.; ROSOLEM, C.A. Crescimento radicular de espécies utilizadas como cobertura decorrente da compactação do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.25, n.2, p.253-260, 2001.
- SIQUEIRA, R. Sistema de preparo em diferentes tipos de coberturas vegetais do solo. 1999. 191 f. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1999.
- SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. *Soil Science Society of American Journal*, Madison, v.58, p.1775-1784, 1994.
- SILVA, A. M., SILVA, E. L. Retenção da água pelo solo. In\_\_ *Conceitos básicos para irrigação*. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 1984. p.20-23.
- SILVA, N.F.; FERREIRA, F.A.; FONTES, P.C.R.; SEDYAMA, M.A.N. (1999). Crescimento e estado nutricional de abóbora híbrida em função da adubação orgânica e mineral. *Horticultura Brasileira*, Brasília, v.17, n.3, pp. 193-2000.
- SILVA, A. R. B. Comportamento de variedades/híbridos de milho (*Zea mays* L.) em diferentes tipos de preparo de solo. 2000. 95f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2000.
- SILVA, J.R.; NOGUEIRA JUNIOR, S. Cereais de inverno: entraves e possibilidade no Estado de São Paulo. *Informativo Econômico*, Rio de Janeiro, v. 31, n. 1, p. 51-57, 2001.
- SILVA, V. R. Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação. 2003. 171 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.
- SILVEIRA, P.M.; CUNHA, A.A. Variabilidade de micronutrientes, matéria orgânica e argila de um latossolo submetido a sistemas de preparo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.37, n.9, p.1325-1332, 2002.
- SIQUEIRA, G. M.; DAFONTE DAFONTE, J.; GONZALEZ, A. P. Estimación de La textura y contenido de água en el suelo a partir de datos de conductividad eléctrica utilizando geoestadística multivariante. In.: *Estudios de la Zona no Saturada del Suelo*, ROJAS, O. S.; RAMÍREZ, J. C. Barcelona, v.IX, p.228-235, 2009.
- SIQUEIRA, G. M. Medida de la conductividad eléctrica aparente del suelo por inducción electromagnética y variabilidad espacial de propiedades físicas y químicas del suelo. 2009. 181f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Programa de Doctorado Ingeniería para el desarrollo, Universidade de Santiago de Compostela.

- SOUZA, L.S. Variabilidade espacial do solo em sistemas de manejo. 1992. 162 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Curso de Pós-graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- SOUZA, L. S.; COGO, N. P.; VIEIRA, S. R. Variabilidade de propriedades físicas e químicas do solo em um pomar cítrico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa – MG, v.21, p.367-372, 1997.
- SOUZA, Z. M.; SILVA, M. L. S.; GUIMARÃES, G. L.; CAMPOS, D. T. S.; CARVALHO, M. P. e PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo Vermelho Distrófico sob semeadura direta em Selvíria (MS). *R. Bras. Ci. Solo*, v.25, p.699-707, 2001.
- SOUZA, Z. M. Variabilidade espacial e atributos de um Latossolo sob diferentes formas do relevo. 2004. 153f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2004.
- SOUZA, Z. M.; CAMPOS, M. C. C.; CALVACANTE, I. H. L.; MARQUES JÚNIOR, J.; CESARIN, L. G.; SOUZA, S. R. Dependência espacial da resistência do solo à penetração e do teor de água do solo sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar. *Ci. Rural*, v.36, p.128-134, 2006.
- SOUZA, D. M. G. S.; MIRANDA, L. N.; OLIVEIRA, S. A. V – A acidez do solo e sua correção. In: NOVAIS, R. F. et al. *Fertilidade do solo: a acidez do solo e sua correção*, Viçosa, 2007. Cap. 5, p. 205-274.
- SPIEGEL, M. R. *Estatística*. Tradução e adaptação C. A. Crusius. 2.ed. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1985.
- STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, MG, v.15, p.229-235, 1991.
- TAYLOR, H. M., & GARDNER, H. R. Penetration of cotton seedling taproots as influenced by bulk density, moisture content and strength of soil. *Soil Science*, v.96, p.153-156, 1963.
- TAYLOR, H. M. & BURNETT, E. Influence of soil on the root growth habitat of plants. *Soil Sci.*, 98:174-180,1964.
- TAYLOR, H. M., ROBERSON, G. M.; PARKER, J. J. Jr. Soil strengthroot penetration relations for medium- to coarse-textured soil materials. *Soil Sci.* 102, 18–22, 1966.

- TAYLOR, D.; ARKIN, G. F. Root zone modification fundamentals and alternatives. In: Modifying the root environment to reduce crop stress. St. Joseph: ASAE, 1981. p.3-16.
- THUNG, M. D. T.; OLIVEIRA, I. P. Problemas abióticos que afetam a produção do feijoeiro e seus métodos de controle. Santo Antônio de Goiás: Embrapa-CNPAF, 1998. 172p.
- TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; WADE, M. K.; UEHARA, G. Applications of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Advances in Agronomy*, San Diego, v.38, p.45-94, 1985.
- TORMENA, C. A.; ROLOFF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.20, n.3, p.333-339, 1996.
- TORMENA, C. A.; ROLOFF, G.; SÁ, J. C. M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.22, n.2, p.301-309, 1998.
- TORRES, E.; SARAIVA, O. F. Camadas de impedimento do solo em sistemas agrícolas com a soja. Londrina: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1999. 58 p. (Circular Técnica, 23).
- TOPP, G. C. The Application of Time-Domain Reflectometry (TDR) to Soil Water Content Measurement; International Conference on Measurement of Soil and Plant Water Status; July 6-10, pp. 85-92; 1987.
- ULLOA GUITÍAN, M. Aplicación de la geoestadística al estudio de la fertilidad del suelo. Tesis Doctoral – Universidad Da Coruña, Facultad de Ciencias, 440p., 2002.
- UNGER, W.P.; KASPAR, T.C. Soil compaction and root growth: a review. *Agronomy Journal*, Madison, v.86, p.759-766, 1994.
- VAUCLIN, M. The use of cokring with limited field soil observation. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.47, p.175-84, 1983.
- VERONESE JUNIOR., V.; CARVALHO, M. P.; DAFONTE, J.; FREDDI, O. S.; VIDAL VÁZQUEZ, E.; INGARAMO, O. E. Spatial variability of soil water content and mechanical resistance of Brazilian ferralsol. *Soil e Tillage Research*, Amsterdam, v.85, p.166–177, 2006.
- VEZZANI, F. Qualidade do sistema solo na produção agrícola. Porto Alegre, 2001. 184 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo)- Programa de Pós-graduação em Agronomia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.
- VIEIRA, C. et al. Efeitos das datas de plantio sobre o feijão cultivado no outono-inverno. *Pesq. Agropecu. Bras.*, Brasília, v.26, n.6, p.863-873, 1991.

- VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial de argila, silte e atributos químicos em uma parcela experimental de um Latossolo Roxo de Campinas (SP). *Bragantia*, Campinas, v.56, n.1, p.181-190, 1997.
- VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R. (Ed.). *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. V.1, p.1-53.
- VIEIRA, S. R.; GUEDES FILHO, O.; CHIBA, M. K.; MELLIS, E. V. DECHEN, S. C. F.; DE MARIA, I. C. Variabilidade espacial dos teores foliares de nutrientes e da produtividade da soja em dois anos de cultivo em um latossolo vermelho. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, Viçosa, v.34, n.5, out., 2010.
- WALKLEY, A. (1947). A critical examination of a rapid method for determining organic carbon in soils: Effect of variation in digestion and organic constituents. *Soil Science*, Madison, v.63, pp. 251-264.
- WALKLEY, A.; BLACK, I.A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, Baltimore. v.37, pp.29-38.
- WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). *Applications of soil physics*. New York: Academic Press, 1980. cap. 2, p.319-344.
- WEBSTER, R.; CUANALO, H.E. C. Soil Transect of correlograms of north Oxfordshire and their interpretation. *Journal Soil Science*, Oxford, v.26, p.176-94, 1975.
- WEBSTER, R.; OLIVER, M.A. *Statistical methods in soil and land resourcer survey*. Oxford: Oxford Univesity Press, 1990. 319 p.
- WILDING, L.P., DREES, L.R. Spatial variability and pedology. In: WILDING, L.P. *Pedogenesis and soil taxonomy: I concepts and interactions*. New York: Elsevier, 1983. p.83-116.
- WUTKE, E. B.; ARRUDA, F. B.; FANCELLI, A. L.; PEREIRA, J. C. V. N. A.; SAKAI, E.; FUJIWARA, M.; AMBROSANO, G. M. B. Propriedades do solo e sistema radicular do feijoeiro irrigado em rotação de culturas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, MG, v.24, n.3, p.621-633, 2000.

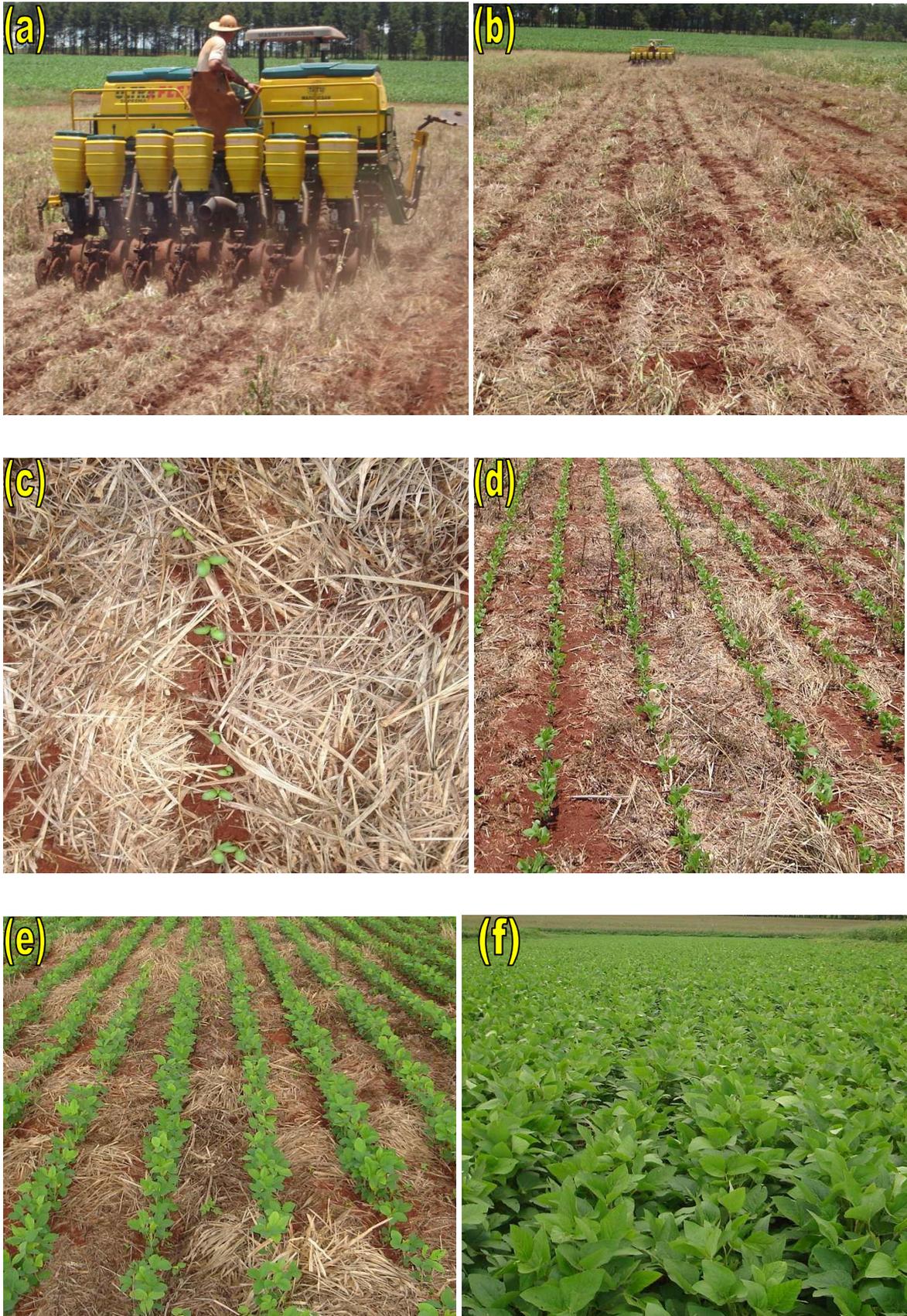
- 
- ZANÃO JÚNIOR, L. A.; LANA, R. M. Q.; GUIMARÃES, E. C. Variabilidade espacial do pH, teores de matéria orgânica e micronutrientes em profundidades de amostragem num Latossolo Vermelho sob semeadura direta. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.37, n.4, p.1000-1007, 2007.
- ZECH, Z. et al. Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics. *Geoderma*, Amsterdam, v.79, n.1, p.69-116, 1997.

# APÊNDICE

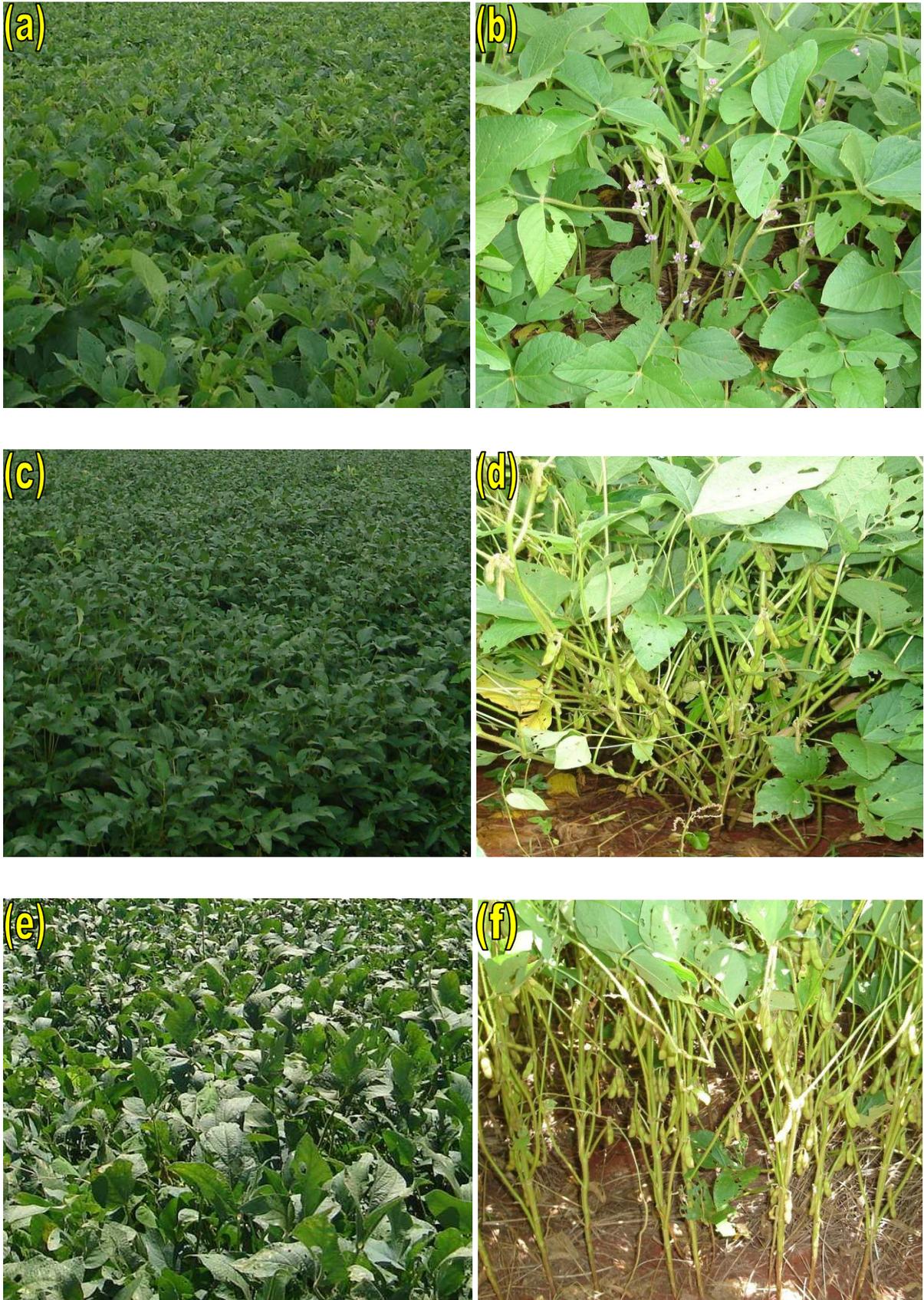
**7 APÊNDICE**



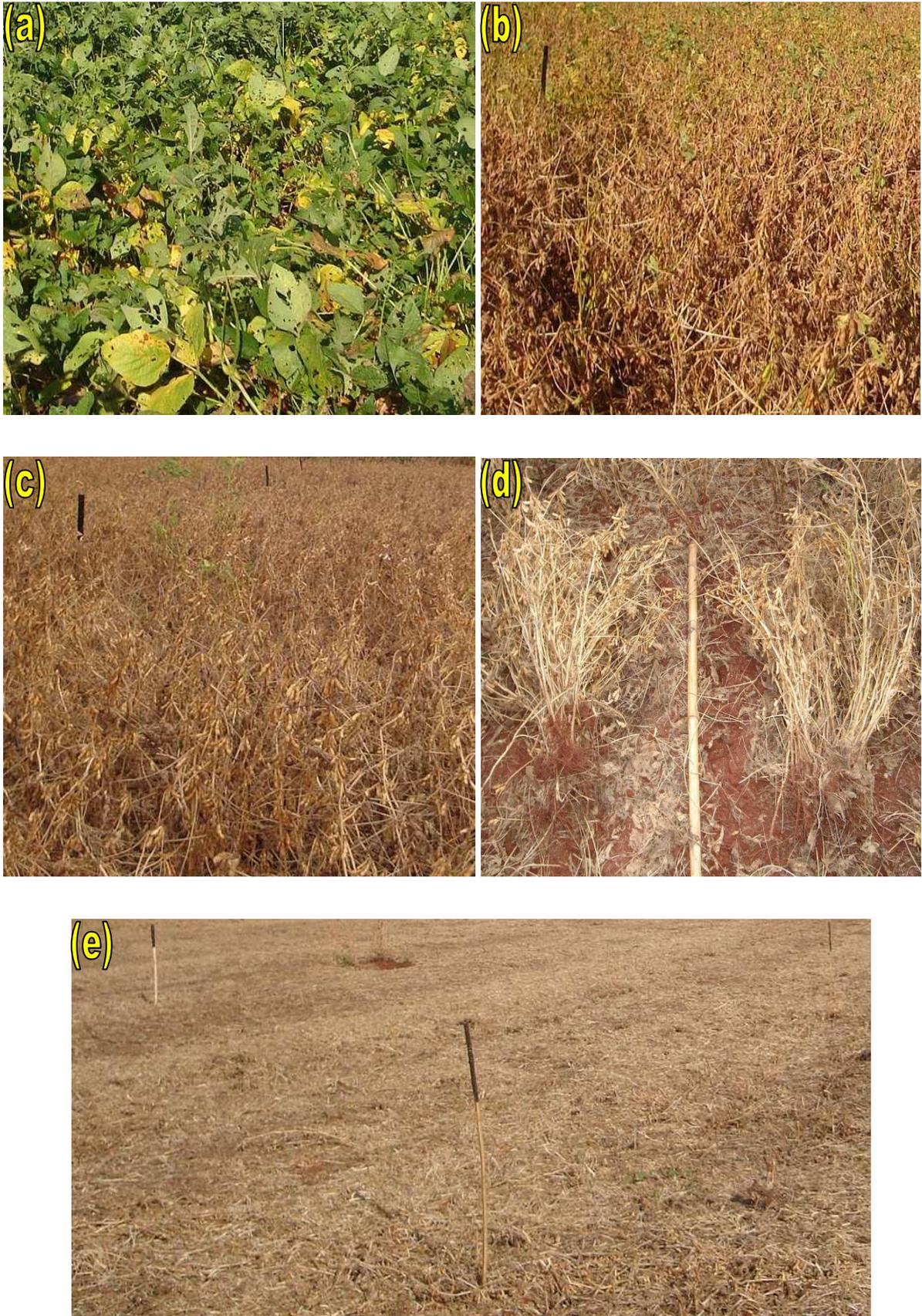
**APÊNDICE A.** (a) Área experimental antes da dessecação/semeadura da soja; (b) Vista da coleta das amostras indeformadas do solo; (c) Detalhe da coleta da resistência à penetração, e (d) Coleta de amostras deformadas do solo.



**APÊNDICE B.** (a) e (b) Instalação do experimento; (c) Emergência das plântulas, 5 dias após a semeadura (DAS); (d) 12 DAS; (e) 18 DAS, e (f) 40 DAS.



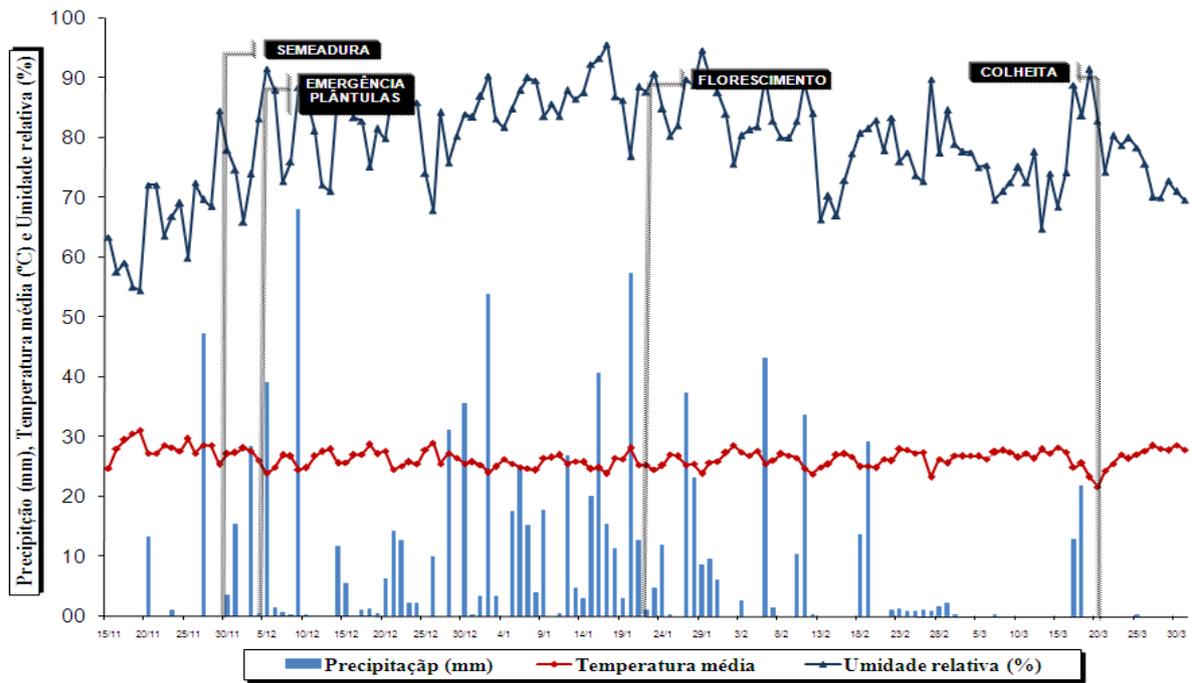
APÊNDICE C. (a) e (b) Florescimento, 53 DAS; (c) e (d) 70 DAS; e (e) e (f) 86 DAS.



**APÊNDICE D.** (a) 96 DAS; (b) Estaqueamento da malha, 104 DAS; (c) Dia da colheita, 111 DAS; (d) Área colhida de 3,24m<sup>2</sup>; (e) Experimento colhido.



**APÊNDICE E.** (a) e (b) Detalhe da sonda na coleta da umidade do solo; (c) Detalhe da coleta da resistência mecânica; (d) e (e) Vista da coleta das amostras indeformadas do solo; e (f) Detalhe das amostras indeformadas do solo.



**Apêndice F.** Dados climatológicos coletados durante a condução do experimento.

<b>ID</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>PG</b>	<b>NVP</b>	<b>NGP</b>	<b>MM</b>
1	0	0	5475.0	56.200	111.400	0.191
2	20	0	3798.2	25.200	62.800	0.186
3	40	0	3565.5	38.400	86.600	0.177
4	60	0	4730.8	41.400	87.800	0.196
5	80	0	4288.1	56.200	113.200	0.186
6	87.5	0	3673.1	37.000	87.200	0.198
7	92.5	0	4321.3	51.720	98.520	0.189
8	100	0	4437.8	53.400	105.000	0.204
9	120	0	4041.8	46.400	96.600	0.191
10	140	0	3800.6	51.200	100.600	0.200
11	160	0	3408.8	47.400	90.200	0.205
12	0	20	4401.6	52.400	103.000	0.187
13	20	20	4237.7	29.400	78.600	0.184
14	40	20	4705.4	48.200	88.200	0.186
15	60	20	4005.5	37.000	70.000	0.202
16	80	20	4045.1	44.800	88.400	0.183
17	87.5	20	4570.5	53.400	105.600	0.187
18	92.5	20	3561.2	47.400	82.800	0.185
19	100	20	4510.3	67.400	112.000	0.188
20	120	20	3832.1	41.600	83.200	0.198
21	140	20	4719.0	57.000	112.200	0.183
22	160	20	4537.3	60.600	116.800	0.220
23	0	40	3544.2	50.600	99.600	0.193
24	20	40	3462.8	43.680	88.120	0.202
25	40	40	3453.7	27.200	51.400	0.179
26	60	40	4228.3	39.800	77.400	0.183
27	80	40	5335.7	77.800	156.000	0.196
28	87.5	40	3526.3	55.600	114.800	0.212
29	92.5	40	4334.0	54.200	99.600	0.204
30	100	40	3501.4	61.400	85.670	0.194
31	120	40	4074.3	40.400	65.000	0.190
32	140	40	4089.7	54.800	105.200	0.204
33	160	40	3831.9	49.600	87.000	0.200
34	0	60	4611.4	55.400	124.800	0.196
35	20	60	2955.8	48.000	93.800	0.183
36	40	60	3794.1	38.200	65.600	0.202
37	60	60	3872.7	52.200	106.600	0.191
38	80	60	3918.5	35.800	78.200	0.182
39	87.5	60	4084.9	51.200	98.800	0.206
40	92.5	60	3726.2	30.800	62.200	0.163

**Apêndice G1a.** Dados das coordenadas cartesianas e dos atributos da planta (PRG, NVP, NGP e MM) (continua...)

(...continuação)

41	100	60	4935.1	58.800	140.200	0.181
42	120	60	3644.8	63.400	121.800	0.207
43	140	60	5357.2	69.400	133.800	0.197
44	160	60	4023.6	36.600	75.000	0.204
45	0	67.5	3774.0	38.800	77.400	0.184
46	20	67.5	3286.0	35.600	79.000	0.180
47	40	67.5	3913.3	39.600	109.800	0.188
48	60	67.5	3690.8	40.800	77.000	0.213
49	80	67.5	4336.2	73.600	145.400	0.203
50	87.5	67.5	3849.5	39.000	79.600	0.192
51	92.5	67.5	4572.5	29.800	50.600	0.181
52	100	67.5	3965.9	69.000	147.200	0.187
53	120	67.5	3871.1	35.000	68.000	0.193
54	140	67.5	4224.0	55.600	114.800	0.196
55	160	67.5	4571.3	52.800	110.200	0.189
56	0	72.5	3938.8	47.600	100.600	0.181
57	20	72.5	4221.2	25.400	45.400	0.180
58	40	72.5	4084.7	40.800	78.000	0.182
59	60	72.5	3722.3	35.000	65.200	0.173
60	80	72.5	4566.5	55.800	105.000	0.185
61	87.5	72.5	3906.0	63.200	118.000	0.182
62	92.5	72.5	4416.7	36.000	76.400	0.198
63	100	72.5	3761.6	40.600	80.800	0.201
64	120	72.5	4925.6	72.400	171.000	0.196
65	140	72.5	4464.8	58.200	106.200	0.193
66	160	72.5	3505.8	49.800	98.800	0.167
67	0	80	3999.8	28.200	55.600	0.201
68	20	80	3305.9	76.000	148.200	0.189
69	40	80	4183.8	51.800	113.000	0.180
70	60	80	3271.2	36.600	63.400	0.177
71	80	80	4843.2	44.600	80.200	0.201
72	87.5	80	4867.7	47.400	85.200	0.215
73	92.5	80	4264.3	37.600	70.600	0.185
74	100	80	4415.2	41.800	91.200	0.190
75	120	80	3652.6	71.600	89.450	0.206
76	140	80	5432.6	44.600	86.600	0.211
77	160	80	4148.4	66.800	125.600	0.196
78	0	100	4024.7	47.000	93.200	0.190
79	20	100	4375.9	49.800	125.200	0.194
80	40	100	3849.7	43.000	81.800	0.175

Apêndice G1b. Dados das coordenadas cartesianas e dos atributos da planta (PRG, NVP, NGP e MM) (continua...)

(...continuação)

81	60	100	4775.8	33.400	83.600	0.190
82	80	100	4549.9	71.600	143.200	0.185
83	87.5	100	3706.5	52.200	99.200	0.207
84	92.5	100	3831.6	36.200	71.600	0.200
85	100	100	4694.3	40.000	76.600	0.199
86	120	100	4703.1	79.800	183.400	0.192
87	140	100	4455.9	39.400	70.800	0.212
88	160	100	3968.3	74.000	129.800	0.212
89	0	120	4152.1	34.600	60.400	0.201
90	20	120	4289.8	23.000	47.600	0.191
91	40	120	4120.0	25.800	49.200	0.185
92	60	120	4041.8	51.200	112.400	0.198
93	80	120	4307.3	63.200	129.200	0.191
94	87.5	120	3798.7	46.400	90.200	0.215
95	92.5	120	3911.0	51.000	99.400	0.205
96	100	120	4696.9	40.400	98.000	0.166
97	120	120	4082.3	42.800	131.000	0.216
98	140	120	4386.1	41.000	112.400	0.192
99	160	120	4913.0	61.400	108.800	0.196
100	0	140	3940.4	68.600	145.400	0.194
101	20	140	4218.8	34.200	94.400	0.152
102	40	140	3448.3	46.200	99.800	0.183
103	60	140	4143.7	41.400	81.600	0.201
104	80	140	3778.3	46.600	84.600	0.194
105	87.5	140	4255.9	47.000	93.000	0.187
106	92.5	140	4408.4	51.400	102.000	0.190
107	100	140	4374.5	58.800	128.600	0.214
108	120	140	3993.0	52.800	117.000	0.184
109	140	140	3654.2	58.400	118.800	0.204
110	160	140	3728.1	46.200	79.200	0.181
111	0	160	4782.2	73.600	147.400	0.197
112	20	160	4099.0	64.000	142.800	0.171
113	40	160	4052.7	59.600	111.200	0.191
114	60	160	3527.0	38.000	76.400	0.192
115	80	160	3392.1	40.600	83.800	0.195
116	87.5	160	3335.5	51.200	99.000	0.166
117	92.5	160	3886.5	30.600	55.400	0.184
118	100	160	3680.0	47.200	104.400	0.176
119	120	160	4260.9	60.200	134.400	0.196
120	140	160	3856.6	34.600	114.000	0.189
121	160	160	3696.1	36.800	74.200	0.192

Apêndice G1c. Dados das coordenadas cartesianas e dos atributos da planta (PRG, NVP, NGP e MM) (continua...)

(...continuação)

<b>ID</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>DS1</b>	<b>DS2</b>	<b>RP1</b>	<b>RP2</b>
1	0	0	1.557	1.562	1.701	2.291
2	20	0	1.464	1.531	2.576	4.435
3	40	0	1.339	1.451	2.894	3.497
4	60	0	1.543	1.570	2.576	4.266
5	80	0	1.577	1.568	2.012	2.434
6	87.5	0	1.356	1.580	4.542	3.603
7	92.5	0	1.194	1.501	1.900	3.026
8	100	0	1.477	1.595	2.425	3.807
9	120	0	1.654	1.648	4.358	4.137
10	140	0	1.618	1.573	5.757	4.720
11	160	0	1.525	1.556	3.616	4.229
12	0	20	1.559	1.601	4.829	3.026
13	20	20	1.564	1.319	2.981	3.136
14	40	20	1.252	1.560	2.928	3.440
15	60	20	1.536	1.511	3.541	4.217
16	80	20	1.505	1.541	2.576	3.026
17	87.5	20	1.311	1.516	1.787	2.826
18	92.5	20	1.540	1.480	3.559	4.409
19	100	20	1.521	1.674	1.690	2.616
20	120	20	1.467	1.552	3.759	3.308
21	140	20	1.530	1.562	2.769	3.181
22	160	20	1.388	1.514	3.207	2.903
23	0	40	1.510	1.449	3.259	3.544
24	20	40	1.460	1.510	1.610	3.000
25	40	40	1.230	1.558	2.286	2.753
26	60	40	1.566	1.505	4.050	4.988
27	80	40	1.526	1.518	5.444	3.825
28	87.5	40	1.157	1.356	2.711	2.947
29	92.5	40	1.552	1.473	3.616	3.757
30	100	40	1.630	1.498	5.787	4.718
31	120	40	1.590	1.627	3.252	4.296
32	140	40	1.444	1.519	2.576	3.139
33	160	40	1.573	1.616	5.762	4.046
34	0	60	1.549	1.385	5.564	6.009
35	20	60	1.445	1.465	4.240	4.021
36	40	60	1.570	1.592	5.280	5.280
37	60	60	1.455	1.483	1.975	3.345
38	80	60	1.561	1.535	1.584	2.830
39	87.5	60	1.657	1.568	2.238	3.759
40	92.5	60	1.327	1.406	2.702	2.932

Apêndice G2a. Dados das coordenadas cartesianas e dos atributos físicos do solo para as profundidades de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m (DS e RP) (continua...)

(...continuação)

41	100	60	1.422	1.490	3.928	3.364
42	120	60	1.562	1.501	2.876	3.337
43	140	60	1.600	1.619	3.083	3.421
44	160	60	1.653	1.670	5.666	4.314
45	0	67.5	1.576	1.527	3.477	3.026
46	20	67.5	1.567	1.567	6.137	5.247
47	40	67.5	1.423	1.574	6.528	3.917
48	60	67.5	1.575	1.558	2.631	3.365
49	80	67.5	1.523	1.496	2.453	3.149
50	87.5	67.5	1.660	1.514	2.453	2.360
51	92.5	67.5	1.594	1.467	4.958	4.925
52	100	67.5	1.568	1.569	1.996	2.404
53	120	67.5	1.720	1.727	2.688	2.716
54	140	67.5	1.583	1.592	5.280	4.593
55	160	67.5	1.662	1.614	3.429	3.344
56	0	72.5	1.634	1.582	4.018	3.237
57	20	72.5	1.395	1.458	2.056	2.532
58	40	72.5	1.179	1.399	4.679	3.988
59	60	72.5	1.539	1.507	1.592	3.559
60	80	72.5	1.515	1.571	3.452	6.431
61	87.5	72.5	1.591	1.493	1.462	2.607
62	92.5	72.5	1.377	1.480	6.245	4.962
63	100	72.5	1.425	1.455	2.936	3.905
64	120	72.5	1.394	1.424	2.230	3.597
65	140	72.5	1.488	1.493	3.837	3.612
66	160	72.5	1.699	1.590	2.207	2.944
67	0	80	1.565	1.438	7.082	5.494
68	20	80	1.528	1.514	4.679	5.880
69	40	80	1.284	1.370	3.638	3.827
70	60	80	1.410	1.521	3.313	4.492
71	80	80	1.435	1.523	2.238	3.005
72	87.5	80	1.458	1.503	1.629	4.029
73	92.5	80	1.323	1.536	2.230	3.766
74	100	80	1.415	1.528	1.803	2.461
75	120	80	1.736	1.578	1.674	2.659
76	140	80	1.429	1.569	1.542	2.055
77	160	80	1.681	1.558	2.768	5.717
78	0	100	1.684	1.519	2.576	3.155
79	20	100	1.319	1.462	3.252	3.252
80	40	100	1.397	1.483	3.689	3.440

Apêndice G2b. Dados das coordenadas cartesianas e dos atributos físicos do solo para as profundidades de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m (DS e RP) (continua...)

(...continuação)

81	60	100	1.470	1.560	3.928	4.266
82	80	100	1.269	1.467	2.745	3.759
83	87.5	100	1.280	1.565	5.505	4.975
84	92.5	100	1.492	1.590	3.102	3.950
85	100	100	1.491	1.557	4.728	4.479
86	120	100	1.538	1.561	1.674	3.179
87	140	100	1.580	1.559	2.012	2.819
88	160	100	1.606	1.552	4.240	3.590
89	0	120	1.466	1.380	2.576	2.125
90	20	120	1.510	1.538	3.436	3.067
91	40	120	1.220	1.468	2.305	2.389
92	60	120	1.491	1.513	1.874	3.548
93	80	120	1.501	1.497	5.476	4.468
94	87.5	120	1.437	1.465	3.026	3.730
95	92.5	120	1.590	1.562	1.224	3.116
96	100	120	1.603	1.510	4.679	5.035
97	120	120	1.705	1.483	3.734	3.128
98	140	120	1.613	1.536	4.296	4.180
99	160	120	1.625	1.507	3.162	3.191
100	0	140	1.581	1.508	2.778	2.523
101	20	140	1.504	1.422	3.477	4.855
102	40	140	1.330	1.380	1.824	3.953
103	60	140	1.384	1.426	2.440	2.421
104	80	140	1.238	1.503	3.348	4.372
105	87.5	140	1.473	1.533	2.576	4.007
106	92.5	140	1.656	1.406	2.035	4.130
107	100	140	1.491	1.525	5.666	4.262
108	120	140	1.389	1.432	2.813	4.963
109	140	140	1.357	1.523	1.975	2.543
110	160	140	1.396	1.490	1.701	2.605
111	0	160	1.411	1.386	2.576	4.266
112	20	160	1.319	1.450	2.305	3.583
113	40	160	1.460	1.505	1.984	2.576
114	60	160	1.371	1.352	3.145	3.165
115	80	160	1.415	1.505	2.576	3.729
116	87.5	160	1.410	1.411	3.356	5.137
117	92.5	160	1.537	1.394	4.137	6.546
118	100	160	1.247	1.469	1.562	2.817
119	120	160	1.569	1.543	3.446	4.354
120	140	160	1.562	1.716	3.408	3.675
121	160	160	1.435	1.559	3.613	3.820

Apêndice G2c. Dados das coordenadas cartesianas e dos atributos físicos do solo para as profundidades de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m (DS e RP) (continua...)

(...continuação)

ID	X	Y	UG1	UG2	UV1	UV2
1	0	0	0.163	0.160	0.254	0.250
2	20	0	0.174	0.195	0.255	0.298
3	40	0	0.193	0.211	0.259	0.307
4	60	0	0.220	0.180	0.339	0.282
5	80	0	0.166	0.172	0.261	0.269
6	87.5	0	0.160	0.180	0.217	0.285
7	92.5	0	0.162	0.208	0.193	0.312
8	100	0	0.178	0.179	0.263	0.286
9	120	0	0.173	0.172	0.286	0.283
10	140	0	0.165	0.172	0.267	0.270
11	160	0	0.141	0.176	0.215	0.274
12	0	20	0.191	0.218	0.297	0.349
13	20	20	0.158	0.173	0.247	0.228
14	40	20	0.188	0.204	0.236	0.319
15	60	20	0.188	0.182	0.289	0.275
16	80	20	0.160	0.183	0.241	0.282
17	87.5	20	0.204	0.155	0.267	0.236
18	92.5	20	0.178	0.189	0.274	0.279
19	100	20	0.168	0.181	0.256	0.302
20	120	20	0.149	0.171	0.219	0.266
21	140	20	0.160	0.179	0.245	0.280
22	160	20	0.178	0.182	0.247	0.276
23	0	40	0.254	0.216	0.383	0.312
24	20	40	0.182	0.221	0.265	0.334
25	40	40	0.193	0.236	0.237	0.368
26	60	40	0.190	0.183	0.298	0.276
27	80	40	0.173	0.186	0.265	0.282
28	87.5	40	0.203	0.202	0.235	0.273
29	92.5	40	0.179	0.184	0.277	0.271
30	100	40	0.178	0.196	0.291	0.294
31	120	40	0.174	0.178	0.276	0.290
32	140	40	0.172	0.182	0.248	0.277
33	160	40	0.165	0.157	0.260	0.254
34	0	60	0.177	0.189	0.275	0.261
35	20	60	0.192	0.190	0.277	0.278
36	40	60	0.196	0.181	0.308	0.288
37	60	60	0.194	0.182	0.282	0.271
38	80	60	0.175	0.207	0.273	0.318
39	87.5	60	0.208	0.213	0.345	0.334
40	92.5	60	0.213	0.238	0.283	0.335

Apêndice G3a. Dados das coordenadas cartesianas e dos atributos físicos do solo para as profundidades de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m (UG e UV) (continua...)

(...continuação)

41	100	60	0.164	0.195	0.233	0.291
42	120	60	0.180	0.115	0.281	0.173
43	140	60	0.174	0.172	0.355	0.279
44	160	60	0.233	0.177	0.385	0.296
45	0	67.5	0.199	0.193	0.314	0.295
46	20	67.5	0.218	0.205	0.342	0.322
47	40	67.5	0.191	0.178	0.271	0.280
48	60	67.5	0.153	0.171	0.241	0.266
49	80	67.5	0.178	0.166	0.271	0.248
50	87.5	67.5	0.185	0.186	0.307	0.282
51	92.5	67.5	0.215	0.175	0.343	0.257
52	100	67.5	0.199	0.216	0.312	0.339
53	120	67.5	0.182	0.188	0.314	0.324
54	140	67.5	0.150	0.168	0.238	0.267
55	160	67.5	0.217	0.152	0.360	0.246
56	0	72.5	0.188	0.199	0.307	0.315
57	20	72.5	0.179	0.197	0.250	0.287
58	40	72.5	0.191	0.193	0.225	0.270
59	60	72.5	0.214	0.217	0.329	0.327
60	80	72.5	0.179	0.185	0.271	0.291
61	87.5	72.5	0.244	0.186	0.388	0.277
62	92.5	72.5	0.182	0.241	0.251	0.357
63	100	72.5	0.156	0.232	0.222	0.337
64	120	72.5	0.176	0.174	0.245	0.248
65	140	72.5	0.176	0.172	0.262	0.257
66	160	72.5	0.144	0.153	0.245	0.243
67	0	80	0.181	0.188	0.283	0.270
68	20	80	0.239	0.232	0.365	0.352
69	40	80	0.192	0.212	0.246	0.291
70	60	80	0.217	0.205	0.306	0.312
71	80	80	0.179	0.173	0.257	0.264
72	87.5	80	0.187	0.177	0.272	0.266
73	92.5	80	0.114	0.184	0.270	0.283
74	100	80	0.183	0.194	0.260	0.297
75	120	80	0.184	0.161	0.320	0.254
76	140	80	0.176	0.184	0.251	0.289
77	160	80	0.182	0.164	0.306	0.255
78	0	100	0.206	0.225	0.347	0.342
79	20	100	0.244	0.209	0.322	0.306
80	40	100	0.228	0.208	0.318	0.308

Apêndice G3b. Dados das coordenadas cartesianas e dos atributos físicos do solo para as profundidades de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m (UG e UV) (continua...)

(...continuação)

81	60	100	0.189	0.205	0.278	0.320
82	80	100	0.220	0.188	0.279	0.276
83	87.5	100	0.215	0.179	0.276	0.280
84	92.5	100	0.162	0.162	0.242	0.257
85	100	100	0.197	0.190	0.294	0.296
86	120	100	0.173	0.188	0.267	0.294
87	140	100	0.177	0.182	0.279	0.284
88	160	100	0.148	0.217	0.237	0.337
89	0	120	0.214	0.236	0.314	0.325
90	20	120	0.206	0.221	0.311	0.340
91	40	120	0.236	0.232	0.288	0.340
92	60	120	0.179	0.191	0.267	0.289
93	80	120	0.162	0.184	0.243	0.275
94	87.5	120	0.176	0.200	0.253	0.293
95	92.5	120	0.185	0.183	0.294	0.285
96	100	120	0.179	0.193	0.286	0.217
97	120	120	0.151	0.148	0.257	0.219
98	140	120	0.147	0.168	0.237	0.257
99	160	120	0.230	0.167	0.374	0.252
100	0	140	0.187	0.224	0.296	0.338
101	20	140	0.219	0.200	0.329	0.284
102	40	140	0.195	0.192	0.260	0.265
103	60	140	0.196	0.221	0.271	0.315
104	80	140	0.215	0.193	0.267	0.290
105	87.5	140	0.177	0.186	0.260	0.284
106	92.5	140	0.197	0.191	0.326	0.268
107	100	140	0.194	0.191	0.290	0.291
108	120	140	0.176	0.156	0.245	0.224
109	140	140	0.158	0.178	0.215	0.271
110	160	140	0.157	0.178	0.219	0.265
111	0	160	0.178	0.203	0.252	0.281
112	20	160	0.191	0.188	0.252	0.272
113	40	160	0.190	0.199	0.277	0.300
114	60	160	0.207	0.199	0.284	0.270
115	80	160	0.179	0.193	0.254	0.291
116	87.5	160	0.207	0.186	0.292	0.263
117	92.5	160	0.176	0.167	0.271	0.232
118	100	160	0.256	0.213	0.319	0.313
119	120	160	0.163	0.169	0.256	0.261
120	140	160	0.202	0.256	0.315	0.250
121	160	160	0.172	0.155	0.246	0.241

Apêndice G3c. Dados das coordenadas cartesianas e dos atributos físicos do solo para as profundidades de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m (UG e UV) (continua...)

(...continuação)

ID	X	Y	MO1	MO2	pH1	pH2
1	0	0	24.602	23.493	5.745	5.615
2	20	0	34.965	21.306	6.056	5.630
3	40	0	33.596	26.570	6.543	5.405
4	60	0	24.324	22.668	6.150	5.130
5	80	0	32.693	22.942	6.600	5.724
6	87.5	0	37.127	22.394	6.077	5.886
7	92.5	0	27.139	21.171	6.300	5.610
8	100	0	19.962	22.258	5.618	6.053
9	120	0	28.430	22.394	6.177	6.151
10	140	0	27.854	18.633	6.480	5.510
11	160	0	28.430	21.985	5.330	5.537
12	0	20	29.444	24.602	6.114	6.234
13	20	20	27.854	28.863	5.920	6.350
14	40	20	33.596	23.355	6.067	5.253
15	60	20	36.505	21.985	6.447	5.929
16	80	20	40.612	24.741	6.028	5.710
17	87.5	20	32.096	30.615	5.923	5.418
18	92.5	20	19.561	23.217	6.090	5.864
19	100	20	20.229	22.805	5.943	6.015
20	120	20	31.501	24.185	6.304	5.670
21	140	20	27.425	26.287	5.920	6.270
22	160	20	22.121	21.036	6.147	6.301
23	0	40	32.920	22.805	6.086	6.350
24	20	40	37.752	25.530	6.063	6.271
25	40	40	28.719	26.287	5.950	5.405
26	60	40	29.299	24.463	5.802	5.200
27	80	40	28.719	23.631	5.770	5.517
28	87.5	40	38.697	21.036	5.640	6.006
29	92.5	40	25.723	21.171	5.650	5.728
30	100	40	30.174	23.631	5.870	5.890
31	120	40	23.493	24.324	5.680	5.820
32	140	40	32.693	21.171	6.209	5.849
33	160	40	30.321	18.897	5.722	5.907
34	0	60	40.290	30.762	6.150	6.295
35	20	60	29.299	19.828	6.280	6.233
36	40	60	31.649	21.849	5.944	5.570
37	60	60	30.321	21.036	5.630	5.100
38	80	60	29.153	23.769	6.350	6.181
39	87.5	60	37.596	21.577	6.146	5.886
40	92.5	60	34.354	30.321	5.996	6.147

**Apêndice G4a.** Dados das coordenadas cartesianas e dos atributos químicos do solo para as profundidades de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m (MO e pH) (continua...)

(...continuação)

41	100	60	28.286	18.106	6.079	6.441
42	120	60	19.962	21.713	6.017	5.970
43	140	60	24.463	20.095	6.180	5.890
44	160	60	21.849	18.237	6.070	6.070
45	0	67.5	36.815	21.000	6.440	5.800
46	20	67.5	27.998	31.353	5.950	5.600
47	40	67.5	34.965	22.668	6.000	5.790
48	60	67.5	31.947	26.287	6.118	5.365
49	80	67.5	34.507	26.287	6.608	6.420
50	87.5	67.5	36.660	20.229	5.701	5.526
51	92.5	67.5	27.711	23.907	6.101	5.640
52	100	67.5	34.202	26.287	6.380	6.140
53	120	67.5	31.057	22.394	6.042	5.954
54	140	67.5	28.430	24.185	5.856	5.768
55	160	67.5	26.287	21.985	5.579	6.292
56	0	72.5	45.379	22.531	5.846	5.952
57	20	72.5	29.590	26.429	6.230	5.910
58	40	72.5	41.581	26.287	6.177	5.940
59	60	72.5	26.146	18.369	5.563	5.249
60	80	72.5	22.805	21.036	5.930	6.030
61	87.5	72.5	30.174	18.633	6.091	6.190
62	92.5	72.5	29.153	18.897	6.050	5.990
63	100	72.5	34.354	17.843	6.233	5.750
64	120	72.5	29.153	18.633	5.760	5.570
65	140	72.5	33.144	24.046	6.520	5.820
66	160	72.5	39.810	16.799	6.277	6.210
67	0	80	39.650	19.030	6.390	5.760
68	20	80	32.394	34.354	6.140	6.040
69	40	80	32.843	24.602	5.985	5.710
70	60	80	29.736	23.907	5.083	4.840
71	80	80	30.468	18.897	6.170	5.920
72	87.5	80	39.173	21.713	5.816	5.304
73	92.5	80	30.174	19.295	5.833	5.831
74	100	80	35.732	22.121	5.963	5.861
75	120	80	31.205	28.574	5.860	5.921
76	140	80	31.947	25.582	5.919	5.950
77	160	80	34.202	20.095	6.162	5.610
78	0	100	31.205	24.741	6.281	6.328
79	20	100	34.659	31.649	6.277	6.160
80	40	100	30.321	19.962	5.950	5.331

Apêndice G4b. Dados das coordenadas cartesianas e dos atributos químicos do solo para as profundidades de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m (MO e pH)  
(continua...)

(...continuação)

81	60	100	29.736	23.769	5.204	4.720
82	80	100	30.468	29.444	6.276	5.451
83	87.5	100	39.970	23.493	6.305	5.740
84	92.5	100	27.425	17.059	5.900	6.139
85	100	100	28.430	19.428	6.238	5.944
86	120	100	23.355	18.237	5.857	5.940
87	140	100	25.582	18.369	6.526	5.433
88	160	100	27.711	25.723	5.750	5.565
89	0	120	39.332	31.649	6.163	6.100
90	20	120	38.066	32.245	6.181	6.123
91	40	120	38.856	21.577	5.906	5.439
92	60	120	33.445	22.121	5.550	5.410
93	80	120	30.615	22.258	5.252	5.541
94	87.5	120	23.493	18.106	6.371	5.517
95	92.5	120	23.769	17.059	5.866	5.225
96	100	120	42.396	18.897	6.090	5.560
97	120	120	19.162	22.258	5.980	6.030
98	140	120	29.590	31.501	5.900	6.110
99	160	120	21.849	25.021	6.158	6.122
100	0	140	36.815	26.712	5.970	6.009
101	20	140	32.843	25.200	6.474	6.470
102	40	140	26.570	20.901	5.640	6.260
103	60	140	34.659	29.444	5.551	5.359
104	80	140	27.568	20.632	5.770	4.973
105	87.5	140	39.173	24.324	5.811	5.172
106	92.5	140	29.736	21.036	5.416	5.145
107	100	140	27.568	19.030	6.302	5.350
108	120	140	30.762	18.633	5.812	5.390
109	140	140	20.363	22.531	5.570	5.790
110	160	140	28.286	23.631	5.183	5.157
111	0	160	30.762	25.021	6.150	5.770
112	20	160	32.096	25.161	6.021	5.730
113	40	160	24.324	21.442	6.180	6.242
114	60	160	32.843	25.301	5.750	5.167
115	80	160	22.258	25.863	5.590	5.658
116	87.5	160	29.299	18.765	6.420	5.184
117	92.5	160	29.882	18.501	6.143	5.677
118	100	160	29.882	22.942	6.090	5.090
119	120	160	39.970	33.596	6.400	6.350
120	140	160	38.066	20.095	6.424	5.790
121	160	160	30.028	24.463	6.122	5.736

Apêndice G4c. Dados das coordenadas cartesianas e dos atributos químicos do solo para as profundidades de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m (MO e pH)