

**COMPORTAMENTO DE ATRIBUTOS
FÍSICOS DE UM LATOSSOLO SUBMETIDO
A DIFERENTES TIPOS DE MANEJO**

FABRÍCIO DE MENEZES TELO SAMPAIO

2008

FABRÍCIO DE MENEZES TELO SAMPAIO

**COMPORTAMENTO DE ATRIBUTOS FÍSICOS DE
UM LATOSSOLO SUBMETIDO A DIFERENTES
TIPOS DE MANEJO**

Tese apresentada à Universidade Federal de
Lavras como parte das exigências do Programa
de Pós-Graduação em Ciência do Solo, para a
obtenção do título de “Doutor”.

Orientador

Prof. Dr. Mozart Martins Ferreira

LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL
2008

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca Central da UFLA**

Sampaio, Fabrício de Menezes Telo.

Comportamento de atributos físicos de um Latossolo submetido a diferentes tipos de manejo / Fabrício de Menezes Telo Sampaio. -- Lavras : UFLA, 2008. 95 p. : il.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 2008.

Orientador: Mozart Matins Ferreira.

Bibliografia.

1. Plantio direto. 2. Física do solo. 3. Manejo do solo. 4. Geoestatística. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD- 631.58

FABRÍCIO DE MENEZES TELO SAMPAIO

**COMPORTAMENTO DE ATRIBUTOS FÍSICOS DE
UM LATOSSOLO SUBMETIDO A DIFERENTES
TIPOS DE MANEJO**

Tese apresentada à Universidade Federal de
Lavras como parte das exigências do Programa
de Pós-Graduação em Ciência do Solo, para a
obtenção do título de “Doutor”.

APROVADA em 25 de junho de 2008.

Professor Carlos Alberto Silva - UFLA

Professor Marcelo Silva de Oliveira - UFLA

Professor Stélio Maia Menezes - UFLA

Pesquisador Elifas Nunes de Alcântara - EPAMIG

Professor Mozart Martins Ferreira
UFLA
(Orientador)

LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL

A DEUS,

OFEREÇO.

A minha esposa, Cyntia Azevedo Sampaio, pelo companheirismo e apoio.

Ao meu filho, Luiz Felipe, minha fonte de amor e alegria.

Aos meus pais, Paulo e Vera, por minha vida e crença em meus estudos.

À minha querida avó, Francisca; ao meu avô, Carlos (Carlito, *in memoriam*) e avós paternos (Sílvio e Flauzina, *in memoriam*), por todos os ensinamentos.

A toda minha família,

Aos amigos, especialmente ao Marcelo Barbosa Furtini, Stélio Maia Menezes e Alberto Cardoso Almeida,

A todos que colaboraram e acreditaram.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela saúde e por guiar meus passos.

À Universidade Federal de Lavras, por toda a minha formação profissional.

Ao Professor Dr. Mozart Martins Ferreira, pela orientação, apoio e amizade ao longo do curso.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapemig), pela concessão da bolsa de estudos e pelo apoio financeiro para a pesquisa.

Ao Engenheiro Agrônomo Marcos Roveri José, por ceder a área para a pesquisa e acompanhar o desenvolvimento da mesma.

Aos professores que participaram diretamente da minha formação, enriquecendo meus conhecimentos.

Aos membros da banca examinadora, pelas críticas e sugestões.

Aos funcionários do Departamento de Ciência do Solo, especialmente a Dulce Claret Monteiro Moraes e Delanne Ribeiro.

Aos amigos e colegas, especialmente ao Marcelo, Cezar, Kátia, Ayeska, Ivoney, Marcos, Amanda, Bruno, Eduardo, Vico e Ricardo.

A minha família.

A todos que contribuíram para a realização desta pesquisa.

SUMÁRIO

RESUMO GERAL	i
ABSTRACT	ii
1 INTRODUÇÃO GERAL	1
2 REFERENCIAL TEÓRICO	3
2.1 Manejo do solo	3
2.2 Plantio Direto.....	5
2.3 Variabilidade do solo.....	9
2.4 Geoestatística.....	10
2.5 Variabilidade espacial de atributos físicos no plantio direto	15
3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	21
CAPÍTULO 1 - Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo de Lavras-MG submetido à semeadura direta.	31
RESUMO.....	31
SUMMARY	32
INTRODUÇÃO	32
MATERIAL E MÉTODOS	34
RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
CONCLUSÕES	49
LITERATURA CITADA.....	49
CAPÍTULO 2 - Variabilidade espacial da umidade de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob plantio direto.....	54
RESUMO.....	54
ABSTRACT.....	55
INTRODUÇÃO	55
MATERIAL E MÉTODOS	57
RESULTADOS E DISCUSSÃO	59

CONCLUSÕES	66
REFERÊNCIAS.....	66
CAPÍTULO 3 – Atributos físicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo submetido a diferentes sistemas de manejo	68
RESUMO	68
SUMMARY	68
INTRODUÇÃO	69
MATERIAL E MÉTODOS	72
RESULTADOS E DISCUSSÃO	75
CONCLUSÕES	85
LITERATURA CITADA.....	85
ANEXOS.....	90

RESUMO GERAL

SAMPAIO, Fabrício de Menezes Telo. **Comportamento de atributos físicos de um Latossolo submetido a diferentes tipos de manejo.** 2008. 95p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.*

Os diferentes sistemas de manejo do solo induzem a alterações nos seus atributos em relação às condições preservadas. A agricultura moderna, que se fundamenta no desenvolvimento sustentável, utiliza práticas de cultivo conservacionista, dentre as quais se destaca o plantio direto, para manter a qualidade física do solo. Assim, o conhecimento do comportamento dos atributos físicos do solo tem grande importância na definição das ações a serem adotadas. Objetivou-se estudar a variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo, por meio de semivariogramas e mapas de superfície gerados pela krigagem, além de realizar a análise comparativa de atributos físicos do solo cultivado com milho sob plantio direto e preparo convencional. O estudo foi realizado em uma área com diferentes sistemas de manejo, localizada no município de Lavras (MG). O solo estudado foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) textura argilosa. Os sistemas de manejo consistiram de plantio direto (PD), implantado há dez anos com rotação de culturas, tendo o milho como cultura principal; preparo convencional do solo cultivado com milho (PC), com uma aração e gradagem anual, durante nove anos e mata nativa (MT), a qual serviu de testemunha. Foram coletadas, em cada área, amostras de solo deformadas e indeformadas em dez pontos de amostragem, nas camadas de 0-7,5 e 7,5-15 cm. Para o estudo da variabilidade espacial na área sob plantio direto, foi implantada uma malha experimental com dimensões iguais a 90 x 90 m (0,81 ha de área) e espaçamento entre os pontos de leitura de 15 x 15 m. Para obter um maior detalhamento da dependência espacial dos dados, realizou-se a implantação de mais duas malhas (zoom) dentro de um quadrante da grande malha, com espaçamentos de 5 x 5 m e 1,67 x 1,67 m, totalizando 73 pontos de leitura.

* Comitê Orientador: Mozart Martins Ferreira - UFLA (Orientador), Marcelo Silva de Oliveira - UFLA (Co-orientador).

ABSTRACT

SAMPAIO, Fabrício de Menezes Telo. **Behavior of physical attributes of a Latosol subjected to different types of management.** 2008. 95 p. Thesis (Doctorate in Soil Science) - Federal University of Lavras, Lavras.*

The different soil management systems to induce changes in soil attributes to the preserved areas. Modern agriculture, which is based on sustainable development, uses conservation practices, such as no-tillage, to maintain physical quality of the soil. Thus, knowledge of the behaviour of physical attributes of soil gives great importance in defining the actions to be adopted in the management. In this search, it was aimed to study the spatial variability of physical attributes of a Red-Yellow Latosol through semivariograms and maps of surface generated by kriging, in addition to conducting a comparative analysis of physical attributes of soil with maize grown under no-tillage and conventional tillage. The study was conducted in an area with different management systems, located in the city of Lavras (MG). The soil study was classified as Red-Yellow Latosol clayey texture. The management systems consisted of no-tillage (PD), established ten years ago with rotation of crops having the maize as main crop, conventional tillage of maize (PC), with an annual plowing plus disking, for nine years, and native forest (MT), used as reference. Were collected, in each area, samples of soil under layers of 0-7.5 cm and 7.5-15 cm, being ten samples per layer. For the study of spatial variability in the no-tillage, it implemented an experimental grid with the dimensions of 90 x 90 m (0.81 ha of area) and spacing between the points of reading of 15 x 15 m. For a more detailed spatial dependence of data, made up the deployment of two more grids (zoom) in a quadrant of the great grid, totaling 73 points.

* Guidance Committee: Mozart Martins Ferreira - UFLA (Major Professor), Marcelo Silva de Oliveira - UFLA.

1 INTRODUÇÃO GERAL

O solo é o sustentáculo de todas as formas de vida terrestre, tendo papel muito importante em vários segmentos. Por isso, ele deve ser manejado com o objetivo de manter ou melhorar a sua qualidade e, assim, evitar sua degradação e aumentar a sua produtividade. Mas, as ações antrópicas geraram uma série de mudanças neste bioma, sendo os aspectos físico-hídricos uns dos mais sujeitos a mudanças, devido ao manejo do solo.

O conceito de agricultura sustentável visa à proteção dos recursos naturais, com a adoção de sistemas de produção que permitam eficiência no uso e conservação ambiental. O sistema de plantio direto é um tipo de manejo conservacionista no qual se tem menor revolvimento do solo, possibilitando a manutenção dos resíduos vegetais na superfície e, conseqüentemente, um aporte de matéria orgânica ao solo. A matéria orgânica do solo, por sua vez, é responsável pela manutenção e a melhoria das propriedades físicas do solo.

Os atributos físicos do solo podem ser alterados de forma temporária ou permanentemente, em função das condições de uso e manejo do solo. Estas alterações afetam, positiva ou negativamente, o crescimento e a produtividade das plantas, devendo-se, assim, buscar um ambiente físico favorável ao crescimento e à funcionalidade das raízes, para se maximizar a produção das culturas. O conhecimento do comportamento desses atributos físicos, portanto, é de fundamental importância para o monitoramento da qualidade do solo, pois eles estão diretamente relacionados com a sustentabilidade agrícola.

O estudo comparativo entre diferentes sistemas de manejo utilizando métodos estatísticos que não consideram a estrutura de dependência espacial ainda é importante na área agrônômica. Isto porque estes métodos permitem verificar as alterações que ocorrem nas práticas agrícolas, baseando-se em áreas preservadas.

A análise da estrutura de dependência espacial dos atributos físicos auxilia o refinamento das práticas de manejo e a avaliação dos efeitos da agricultura sobre a qualidade ambiental, pela possibilidade de mapeamento dos atributos estudados e a definição da intensidade de amostragem do solo para a sua caracterização, reduzindo os custos de produção.

Com o auxílio da Geoestatística, ferramenta estatística essencial para o estudo da dependência espacial de dados dentro de um intervalo de amostragem, podem ser realizadas a análise e a descrição detalhada da variabilidade espacial dos atributos do solo.

Os sistemas de plantio direto influenciam fortemente a variabilidade espacial de propriedades físicas do solo, devido ao menor revolvimento do solo e ao tráfego aleatório do maquinário agrícola. Neste contexto, este trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar o comportamento físico de um Latossolo Vermelho-Amarelo submetido a diferentes práticas de manejo. Os objetivos específicos do trabalho foram:

- a) estudar a variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado com milho em sistema de plantio direto;
- b) aplicar técnicas da Estatística Clássica e da Geoestatística para estudar a variabilidade espacial da umidade do solo cultivado com milho sob plantio direto, em duas datas de amostragem;
- c) avaliar os atributos físicos do solo cultivado com milho sob plantio direto e preparo convencional, baseando-se em uma área preservada.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Manejo do solo

O solo é um corpo natural complexo e dinâmico, resultante da atuação conjunta de muitos fatores, como clima, organismos vivos, material de origem, relevo e tempo. Dependendo das condições de uso e manejo, os atributos do solo podem sofrer alteração, evoluindo para situações positivas ou negativas ao crescimento das plantas e às produtividades. Essas alterações podem ser permanentes ou temporárias (Bertol et al., 2001).

A agricultura moderna tem como fundamento o desenvolvimento sustentável, que objetiva uma produtividade econômica sem degradar o ambiente. Uma exploração agrícola sustentável requer, entre outros fatores, a manutenção e ou a melhoria da qualidade do solo, porém, a intensificação da exploração agrícola, aliada ao uso e ao manejo inadequado do solo, tem provocado modificações negativas nas suas propriedades físicas (Stone & Silveira, 2001), aumentando a erosão e reduzindo a produtividade das culturas (Schaefer et al., 2001).

As propriedades físicas do solo são sensíveis às alterações provocadas pelo uso agrícola no pedoambiente, servindo como bom indicador da qualidade do solo (D'Andréa et al., 2002). A magnitude dessas mudanças tem sido variável conforme o tipo de solo, as condições climáticas, o tempo de uso e os sistemas de manejo adotados (Kay, 1990).

Os sistemas de preparo convencional aumentam o volume de poros dentro da camada preparada, a permeabilidade e o armazenamento de ar e facilitam o crescimento das raízes das plantas nessa camada (Bertol et al., 2004). No entanto, abaixo da camada preparada, essas propriedades apresentam comportamento inverso ao da superfície (Bertol et al., 2000). Além disso, os aspectos positivos dos preparos convencionais são perdidos, quando o solo,

descoberto pelo efeito do preparo, é submetido às chuvas erosivas, as quais o desagregam na superfície pelo impacto das gotas, diminuem a taxa de infiltração de água (Bertol et al., 2001) e aumentam o escoamento superficial e a erosão hídrica (Bertol et al., 1997), em relação aos outros sistemas de manejo do solo.

A intensidade dos mecanismos do solo sobre a agregação influencia a resistência das unidades estruturais ante as forças desagregantes, que podem ser advindas da abrasão por implementos agrícolas, do impacto das gotas de chuva, bem como do cisalhamento pelo fluxo de água e ou pela entrada de água nos agregados (Kemper & Chepil, 1965). Esses fatores são, em grande parte, alterados pelos sistemas de manejo adotados, por efeito direto do revolvimento mecânico, que favorece sua degradação, principalmente por ação da erosão hídrica e pela modificação do ambiente edáfico pelos sistemas de culturas (Lima et al., 2003).

Um dos principais problemas causados pela ação antrópica está relacionado às mudanças na dinâmica da matéria orgânica. Os preparos convencionais rompem os agregados na camada preparada e aceleram a decomposição da matéria orgânica. Isto porque, quando o solo é manejado, a fração orgânica não apresenta a mesma estabilidade das frações minerais, refletindo negativamente na resistência dos agregados do solo (Carpenedo & Mielniczuk, 1990), já que o material orgânico é o principal responsável na agregação de solos tropicais. Os efeitos dessa perturbação são, geralmente, negativos para as propriedades dos solos.

A presença de restos culturais na superfície do solo, independentemente do manejo adotado, proporciona redução de perda de solo, enquanto a perda de água é mais afetada pela forma de manejo dos resíduos do que pela percentagem de cobertura morta sob o solo (Carvalho et al., 1990). Bertol et al. (1997) destacaram que um manejo com 60 % de cobertura promove redução de 80% nas perdas de solo, em relação ao manejo com ausência de cobertura.

2.2 Plantio Direto

O sistema plantio direto (SPD) é uma das práticas de manejo do solo que têm a função de conservar o solo e o meio ambiente, visando à sustentabilidade da produção agrícola. Este sistema de manejo tem como pilares o mínimo revolvimento do solo, a cobertura vegetal continuada do solo e a rotação de culturas. A cobertura continuada do solo e a rotação de culturas favorecem o acúmulo de material orgânico pela sua menor taxa de decomposição neste sistema, ocorrendo alterações positivas em vários processos químicos, físicos e biológicos (Weirich Neto et al., 2006; Stone et al., 2006).

No Brasil, o sistema de semeadura direta foi implantado, inicialmente, na região Sul, onde as características edafoclimáticas são propícias a este tipo de manejo. Hoje, o SPD ocupa mais de 18.000.000 ha e está em plena expansão no Brasil (Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha - FEBRAPDP, 2007).

O SPD pode ser dividido em duas fases: a de instalação, correspondente aos primeiros quatro ou cinco anos após o início do sistema, e a de estabilidade, em que claramente são observadas alterações nas propriedades químicas, físicas e biológicas do solo (Salet, 1994).

Devido à importância da cobertura do solo no SPD, deve-se utilizar um sistema de rotação adequado e adaptado às condições climáticas da região, ao tipo de solo e ao manejo adotado (Ceretta et al., 2002). Torres et al. (2005) citam que fatores como persistência, quantidade e qualidade dos resíduos produzidos pelas plantas de cobertura estão relacionados à eficácia do sistema de semeadura direta. Assim, o estabelecimento de um esquema racional e compatível de rotação de culturas não deve visar apenas objetivos imediatos, mas, sim, obter efeitos favoráveis ao sistema pela integração das culturas ao longo do tempo, proporcionando maior estabilidade de produção, melhoria da capacidade produtiva do solo e aumento da rentabilidade (Corá, 2006).

Diversas espécies de plantas foram testadas em diferentes rotações, regiões e climas, destacando-se milho, sorgo (Silveira et al., 2005), aveia-preta (Mai et al., 2003) e nabo forrageiro (Crusciol et al., 2005), rotacionando com leguminosas de verão, como mucuna-preta, crotalária, guandu e soja (Carvalho et al., 2004).

Devido às suas características, o plantio direto (PD) aumenta os estoques de carbono orgânico do solo (COT), em comparação ao preparo convencional (PC), sendo este efeito restrito às camadas superficiais e dependente do sistema de cultura adotado (Bayer et al., 2004; Bertol et al., 2004; Silva et al., 2006).

A acumulação de matéria orgânica nos solos sob PD minimiza o efeito estufa, pela retirada de carbono da atmosfera. Segundo estudos de Corazza et al. (1999), enquanto o solo cultivado com grade pesada apresentou perda de 8,3 Mg ha⁻¹, em 12 anos, em relação ao solo sob cerrado nativo, no solo em PD verificou-se, em 15 anos, um aumento de 21,4 Mg ha⁻¹ de C, o que corresponde a uma taxa anual de acúmulo de C no solo de 1,43 Mg ha⁻¹. Estes resultados demonstram que, enquanto o solo sob plantio convencional atua como uma fonte de C para atmosfera, o solo em PD passa a atuar como um dreno de C atmosférico.

A matéria orgânica age também como condicionadora do solo mediante sua estrutura complexa e longas cadeias de carbono, agregando partículas minerais. Além das estruturas complexas, a maior parte da matéria orgânica do solo é pouco solúvel, protegendo os agregados contra o umedecimento e a quebra (Hénin et al., 1976). Sabe-se que a maior parte da fração orgânica no solo apresenta-se na forma estável, chamada de fração húmica, que irá formar agregados estáveis e persistentes no solo (Tisdal & Oades, 1982).

Silva et al. (2006) constataram que, com a adoção do SPD, houve aumento na estabilidade dos agregados da camada superficial do solo em relação

ao PC, mediante a elevação no teor de carbono orgânico. Resultados semelhantes foram obtidos por Bertol et al. (2004), os quais obtiveram diâmetro médio ponderado de agregados menor no PC do que no PD e no campo nativo, com maior diferença encontrada na superfície do solo.

O SPD mostra-se, comprovadamente, eficiente no controle de erosão (Resck, 1999) e adequado para as regiões tropicais (Romeiro, 1998), evitando exposição do solo à intensa ação dos raios solares e da chuva. Mas, o mínimo revolvimento do solo, aliado ao tráfego de máquinas, pode causar alterações negativas na estrutura do solo que, associadas, à reduzida rugosidade superficial, podem ser desfavoráveis à infiltração de água, facilitando o escoamento superficial da água das chuvas (Câmara & Klein, 2005).

No entanto, se o SPD for bem manejado, a maior estabilidade dos agregados e a continuidade dos poros (Albuquerque et al., 1995; Campos et al., 1995; Costa, 2001) favorecem a infiltração de água e dificultam o escoamento superficial (Schick et al., 2000), em relação ao preparo convencional e, muitas vezes, em relação também ao campo nativo.

Além da modificação da dinâmica da água no SPD, outro fato observado é a compactação do solo, principalmente nos primeiros anos após a implantação do sistema (Tormena et al., 1998; Stone & Silveira, 2001; Secco, 2003; Weirich Neto et al., 2006). Embora neste tipo de manejo o solo seja submetido a menor tráfego, como não há revolvimento do solo, a compactação é um processo inerente ao sistema e, portanto, sempre será observada com maior ou menor intensidade.

Entretanto, o SPD possui características que podem ser maximizadas, com vistas a reduzir o processo de compactação e suas conseqüências. Dentre essas, destaca-se a contínua adição superficial de resíduos culturais, que formam uma cobertura morta e enriquecem as camadas superficiais com matéria orgânica (Stone et al., 2006). Esta elevada adição de resíduos culturais tem

mostrado efeitos benéficos ao estado estrutural do solo, em especial na melhoria do espaço poroso do solo no sistema plantio direto (Albuquerque et al., 1995; Campos et al., 1995).

Em algumas áreas de plantio direto, segundo Fidalski et al. (2006), tem sido utilizado o revolvimento por meio da escarificação mecânica superficial, antes da semeadura da safra de verão. A intervenção dessas áreas de plantio direto é atribuída à menor eficiência do sistema radicular das culturas em sucessão. Por outro lado, a rotação de culturas planejada, com a inclusão de espécies, como aveia e nabo forrageiro, cultivadas no inverno, pode ser indicada como alternativa para a manutenção da qualidade física do solo.

É importante ressaltar as diferenças existentes entre alguns manejos conservacionistas, pois, muitas vezes, o termo plantio direto é adotado para outros tipos de manejo do solo. O plantio direto tem como características principais plantio diretamente sobre a palhada, cobertura vegetal continuada, não-revolvimento e rotação de culturas. Já na semeadura direta, não há necessidade de rotação de culturas.

Bertol et al. (2004) citam que as propriedades físicas do solo são alteradas em função da camada estudada. Na camada de 0-10 cm, a densidade do solo é maior na semeadura direta do que no preparo convencional e no campo nativo, enquanto, nas camadas subsuperficiais, esta variável apresenta valores maiores no preparo convencional do que na semeadura direta e campo nativo.

Muitos trabalhos têm evidenciado que, em função do maior estado de compactação e do maior acúmulo de matéria orgânica, no plantio direto, o conteúdo de água do solo é maior do que em áreas cultivadas com preparo convencional (Lal, 1974; Vieira, 1981; Sidiras et al., 1983; Salton & Mielniczuk, 1995).

Sob o aspecto financeiro, o sistema plantio direto propicia economia ao sistema de produção de grãos pelo menor número de operações com máquinas

agrícolas e, manejado corretamente, diminui a erosão do solo das lavouras, em relação ao preparo convencional. Com a não-mobilização do solo, ocorrem aumento no teor de carbono orgânico total (Lovato et al., 2004) e melhoria do estado de agregação e de estabilidade dos agregados (Silva & Mielniczuk, 1997), condição essencial para garantir alta produtividade agrícola.

2.3 Variabilidade do solo

A heterogeneidade é uma propriedade inerente do solo, que tipifica sua anisotropia, sendo conseqüência de complexas interações dos fatores e processos de sua formação. Além desses fatores e processos, práticas de manejo do solo e da cultura são causas adicionais de variabilidade (Seta et al., 1993; Corá, 1997; Carvalho et al., 2003).

O manejo pode alterar atributos químicos, físicos, mineralógicos e biológicos, com impacto, principalmente, nas camadas superficiais do solo (Seta et al., 1993). Como conseqüência, a variabilidade espacial, horizontal e vertical do solo depende do seu manejo (Souza et al., 2001).

O conhecimento da distribuição espacial dos atributos do solo em determinada área é importante para o refinamento das práticas de manejo e avaliação dos efeitos da agricultura sobre a qualidade ambiental (Cambardella et al., 1994), assim como é importante para a definição da intensidade de amostragem do solo para a sua caracterização, possibilitando, dessa maneira, reduzir o erro-padrão da média, maximizando a eficiência da amostragem e reduzindo os custos e a mão-de-obra do trabalho (Webster & Oliver, 2001).

Segundo Libardi et al. (1986), os princípios básicos de experimentação e a variabilidade do solo ocorrem de forma aleatória; no entanto, vários estudos têm demonstrado que a variabilidade das propriedades do solo apresenta

dependência espacial, com exceção da densidade de partículas (Eguchi et al., 2002).

As propriedades físicas e hídricas do solo, estudadas por diversos autores (Vieira, 1981; Nielsen et al., 1983; Sousa et al., 1999; Fietz et al., 1999; Souza et al., 2001), variaram de um local para outro, apresentando continuidade ou dependência espacial, dependendo do manejo adotado e das próprias características de origem dos solos. Solos manejados por diferentes preparos são alterados em profundidade, sendo este, segundo Carvalho et al. (2002), um fator importante no estudo de dependência espacial.

Muitos trabalhos têm sido publicados sobre a variabilidade espacial de propriedades do solo, mas muito pouco se sabe sobre a sua variabilidade temporal (Genro Junior et al., 2004). Apesar disso, nos últimos anos, tem aumentado o interesse pela análise da dinâmica temporal, principalmente da umidade do solo. Recentemente, vários autores têm estudado a variabilidade espaço-temporal da umidade do solo (Gonçalves et al., 1999b; Famiglietti et al., 1998; Gómez- Plaza et al., 2001; Martínez- Fernández & Ceballos, 2003; Rocha et al., 2005).

2.4 Geoestatística

Por ser um corpo tridimensional formado pela ação de vários fatores e processos, o solo apresenta uma variação em suas características, ao longo da paisagem. A subdivisão de grandes extensões de solo em pequenas parcelas experimentais é uma tentativa de reduzir a variabilidade intrínseca do solo. Contudo, para o estudo de áreas maiores, onde há um gradiente de diferenciação no solo, foi necessária a criação de técnicas amostrais e de análise de dados que levassem em consideração a variação espacial que, muitas vezes, está associada à sua formação (Webster, 1985; Goovaerts, 1994). Essas técnicas também são

aplicadas quando o manejo do solo altera a variabilidade espacial de propriedades do solo e da planta.

A variabilidade dos atributos do solo ainda é freqüentemente descrita pela Estatística Clássica, a qual assume que a média de determinada variável em uma unidade amostral é a esperança do valor da variável em toda a unidade, com a estimativa do erro expressa pela variância (Andriotti, 2003). Esta abordagem assume que a variabilidade em relação à média deve-se ao acaso e não contém referência sobre a distribuição no espaço de diferenças dentro de unidades amostrais. Dessa forma, as conseqüências da heterogeneidade espacial sobre a representatividade dos valores médios de amostras são ignoradas.

A Geoestatística, ferramenta estatística utilizada para estudar a variabilidade espacial, possibilita a interpretação dos resultados com base na estrutura da variabilidade natural dos atributos avaliados, considerando a dependência espacial dentro do intervalo de amostragem (Andriotti, 2003). Esta técnica apresenta, como teoria fundamental, a esperança de que, na média, as amostras mais próximas, no tempo e no espaço, sejam mais similares entre si do que as que estiverem mais distantes (Vieira, 2000).

Entretanto, de acordo com Vieira (2000), para que a geoestatística possa ser utilizada, há a necessidade de que pelo menos uma das três hipóteses de estacionariedade de uma função aleatória $Z(x_i)$, a hipótese de estacionariedade de ordem 2, a hipótese intrínseca ou a hipótese de não tendência, seja satisfeita. Uma vez avaliadas as hipóteses envolvidas, Vieira (2000) apresenta o semivariograma clássico de Matheron, o qual desenvolveu a geoestatística como um método gráfico que expressa a estrutura espacial da semivariância $\gamma(h)$.

Os estudos da variabilidade espacial utilizando a geoestatística têm sido realizados por meio da análise de semivariogramas (Enghball et al., 1999). A obtenção de semivariogramas representativos depende, fundamentalmente, do

número de pares de pontos encontrado em determinada direção, para diferentes distâncias (Webster & Oliver, 2001).

O semivariograma é um gráfico que relaciona a semivariância de uma variável qualquer com uma distância (h), sendo estimado pela seguinte equação:

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

em que N(h) é o número de pares de valores medidos Z(x_i), Z(x_i+h), separados pela distância h (Vieira et al., 1983).

O semivariograma é um gráfico que relaciona a semivariância de uma variável qualquer com uma distância (h). Os semivariogramas apresentam três importantes parâmetros: (1) o efeito pepita (C₀), que se refere ao valor da semivariância para a distância zero e representa o componente da variação ao acaso; (2) o patamar (C₀ + C₁), que é o valor da semivariância em que a curva estabiliza sobre um valor constante (é o máximo da semivariância); o patamar é atingido quando a variância dos dados se torna constante com as distâncias entre as amostras e esse parâmetro permite a determinação da distância limite entre a dependência e a independência entre as amostras e (3) o alcance (a), que é a distância da origem até onde o patamar atinge valores estáveis, é considerado o limite da dependência espacial da grandeza medida. Após a seleção do semivariograma da variável em estudo e havendo dependência espacial, podem-se interpolar valores em qualquer posição na área estudada, sem tendência e com variância mínima (Silva et al., 2003).

Um semivariograma experimental, com características muito próximas do ideal, está ilustrado na Figura 1. O seu padrão representa o que, intuitivamente, se espera de dados de campo, isto é, que as diferenças {Z(x_i) - Z(x_i+h)} decresçam à medida que h diminui. É esperado que observações mais

próximas tenham um comportamento mais semelhante entre si do que aquelas separadas por maiores distâncias.

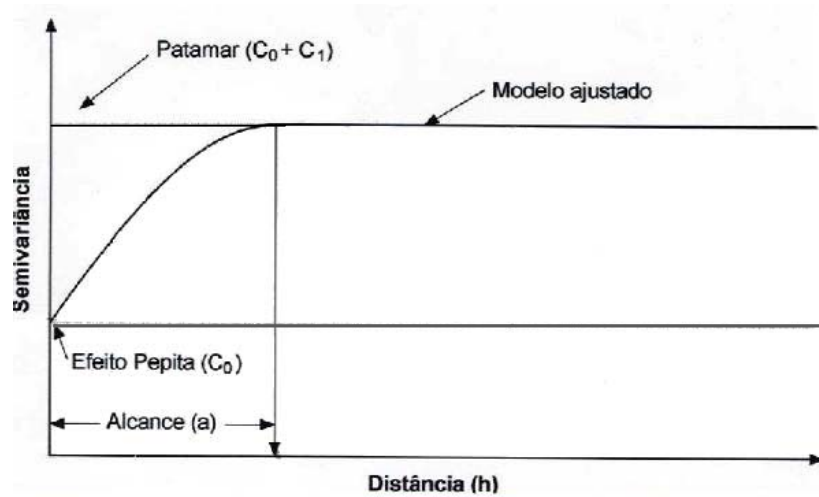


FIGURA 1. Semivariograma teórico típico, com seus principais parâmetros apresentados.

O alcance é um dos parâmetros principais no estudo da variabilidade espacial, pois é a distância limite na escolha do tipo de estatística a ser aplicada. A distâncias menores que o alcance, as variáveis são espacialmente dependentes, devendo ser usada a geoestatística. Já a distâncias maiores que o limite, existe independência entre as variáveis, podendo ser aplicada a estatística clássica (Andriotti, 2003).

Quando o alcance é menor que a menor distância de amostragem, tem-se o chamado efeito pepita puro e o fenômeno tem uma distribuição espacial completamente ao acaso com respeito ao espaço de amostragem, podendo a estatística clássica ser aplicada (Vieira, 2000).

O semivariograma fornece uma medida do grau de dependência espacial entre amostras em uma direção e pode crescer até um valor constante (chamado de patamar) dentro de determinado intervalo ou, então, crescer continuamente, sem apresentar evidências de atingir um patamar (Enghball et al., 1999;

Andriotti, 2003). O grau de dependência espacial pode ser obtido pela porcentagem de C_0 em relação ao patamar; quanto maior for a porcentagem de C_0 , menor é o grau de dependência espacial da variável analisada (Andriotti, 2003).

O modelo do semivariograma pode assumir muitas formas, dependendo do conjunto de dados e do espaçamento da amostragem. Existe uma infinidade de funções que se ajustam aos semivariogramas experimentais, porém, a prática tem mostrado que alguns modelos, fundamentados nas suposições teóricas das variáveis regionalizadas de Matheron, têm satisfeito a maioria das suas aplicações. Tais modelos podem ser classificados em modelos com patamar e sem patamar. Entre os com patamar, os principais são: modelo esférico, que é o modelo mais comum da geoestatística e apresenta uma estrutura de dependência espacial que aumenta com a distância até certo ponto (alcance), a partir do qual a semivariância se torna constante; modelo exponencial, parecido com o esférico, diferindo por atingir o patamar assintoticamente e modelo gaussiano, utilizado para fenômenos extremamente dependentes espacialmente. Os principais modelos sem patamar são os potenciais (Andriotti, 2003).

Com um modelo de dependência espacial de variáveis do solo e planta, a geoestatística possibilita a estimativa em pontos não amostrados, viabilizando o mapeamento da variável. O método da krigagem, considerado um interpolador ótimo, é utilizado para a geração de mapas de superfície. Este procedimento pode auxiliar na melhor distribuição das parcelas e dos blocos experimentais no campo, assim como o manejo mais racional da água, de fertilizantes e de defensivos agrícolas (Coelho Filho et al., 2001).

2.5 Variabilidade espacial de atributos físicos no plantio direto

Como já mencionado anteriormente, além da variabilidade natural, existem fontes adicionais de heterogeneidade no solo, por causa do manejo exercido pelo homem, das mais variadas formas. Tais variações, mais pronunciadas nos sistemas convencionais de preparo do solo do que nos conservacionistas, influenciam, principalmente, o acúmulo de material orgânico, a infiltração da água no solo e a erosão hídrica (Bertol et al., 2004).

Apesar de o SPD ser um sistema conservacionista, pode haver uma maior variabilidade dos atributos físicos relacionados à estrutura do solo, principalmente na camada superficial. Isto se deve ao não-revolvimento do solo e ao tráfego aleatório do maquinário agrícola, sendo esta variabilidade dependente da forma como é manejado. Com o passar do tempo, a tendência é a de que esta variabilidade diminua, com a estabilização dos atributos do solo. No preparo convencional, o revolvimento da camada superficial homogeneiza mais o solo quanto aos seus atributos físicos.

Na literatura brasileira, existe carência de informações sobre a variabilidade espacial de alguns atributos físicos do solo cultivado com plantio direto. Os trabalhos relacionados a este assunto concentram-se nos estudos da resistência à penetração do solo e do armazenamento de água, talvez pela influência da compactação que ocorre neste sistema de manejo e pela elevada variabilidade espacial encontrada para os atributos relacionados à dinâmica da água no solo.

O estudo da variabilidade espacial de atributos do solo, dessa forma, é particularmente importante em áreas sob diferentes manejos (Souza et al., 2001). A análise geoestatística pode indicar alternativas de manejo, não só para reduzir os efeitos da variabilidade espacial sobre a produção das culturas, como também para estimar respostas das plantas a determinadas práticas de manejo. Nesse

sentido, serão discutidos, a seguir, alguns trabalhos envolvendo a variabilidade espacial de atributos físicos no plantio direto, separados por temas e com ênfase na geoestatística.

2.5.1 Atributos físico-hídricos

De acordo com Warrick & Nielsen (1980), geralmente, as propriedades mecânicas do solo apresentam distribuição normal, enquanto propriedades hidráulicas apresentam distribuição não normal.

Gonçalves et al. (1999b) comentam que o uso da geoestatística se mostrou adequado ao estudo da distribuição espacial de valores de armazenamento de água no solo, embora a krigagem sempre promova uma suavização dos valores em relação aos dados experimentais. Libardi et al. (1986) indicam que o conhecimento da variabilidade espacial da umidade gravimétrica do solo, antes e durante o ciclo da cultura, poderá ser indicativo da variabilidade esperada, quando da determinação de propriedades dependentes da umidade do solo.

Avaliando a variabilidade espacial da umidade do solo de um Latossolo Vermelho eutroférico sob plantio direto, em diferentes datas, Grego et al. (2006) observaram que a dependência espacial da umidade do solo é moderada na profundidade de 60 cm, com alcance variando de 90 a 110 m, e fraca a 30 e 90 cm de profundidade. Estes autores afirmam, ainda, que, quando a umidade do solo apresenta valores mais baixos, a dependência espacial é mais fraca. Uma provável causa desta observação, segundo estes autores, é que, quando o solo começa a secar, algumas fissuras podem aparecer e causar aleatorização da variação espacial. Outra razão é que, quando o solo tem baixos valores de umidade, outras propriedades do solo, como a condutividade hidráulica, podem afetar esta aleatorização, pois, nesse caso, a umidade não é a única variável que controla a perda de água para a atmosfera.

Para a umidade do solo, Veronese Júnior et al. (2006) encontraram alcance entre 8 e 45 m nos solos ricos em ferro, similares aos obtidos por outros autores (Souza et al., 2001; Utset & Cid, 2001).

Nos trabalhos de Veronese Júnior et al. (2006), a variação da umidade gravimétrica foi baixa em todas as profundidades estudadas, com coeficientes de variação entre 5,13% e 9,99%. Estes autores verificaram efeito pepita puro para a umidade na camada mais superficial, indicando que os dados estão completamente aleatorizados na escala de trabalho e fraca dependência espacial para as camadas mais profundas.

Hébrard et al. (2006) não encontraram estrutura de dependência espacial para a distribuição da umidade do solo. Todos os semivariogramas computados da umidade do solo, nas oito datas de medição, exibiram comportamento de efeito pepita puro, para uma das datas estudadas.

Adotando uma malha de amostragem de 10 m, Grego et al. (2006) concluíram que a densidade de amostragem foi insuficiente para expressar a variabilidade espacial da umidade do solo a 30 e 90 cm de profundidade, pois ocorre correlação entre as amostras a distâncias menores que 10 m.

Gonçalves et al. (1999a), estudando a variabilidade temporal da umidade do solo, verificaram que essa não se distribuiu de forma aleatória na área, possuindo dependência espacial bem definida no horizonte A de um Argissolo Vermelho.

Estudos da variabilidade espacial da umidade e do potencial matricial no campo reportam divergências quanto ao seu padrão de variabilidade. Yeh et al. (1986) e Hendrickx et al. (1990), por exemplo, encontraram aumento do coeficiente de variação do potencial com a diminuição da umidade. Contrariamente, Greminger et al. (1985) verificaram redução do coeficiente de variação, quando a umidade foi reduzida.

Vários autores (Famiglietti et al., 1998; Gómez-Plaza et al., 2001; Hébrard et al., 2006) relatam que há nítida diminuição no desvio da umidade do solo quando a quantidade de água no solo diminui. Hébrard et al. (2006) verificaram que a escala da umidade do solo para a condição de solo úmido é maior, 21,5% a 38,6%, do que aquela para o solo mais seco, 8,8% a 15,4%.

Warrick & Nielsen (1980) e Cichota & Jong van Lier (2004) também encontraram valores crescentes para o coeficiente de variação da umidade de acordo com o aumento do potencial para dados obtidos em laboratório. Cichota & Jong van Lier (2004) observaram que a dispersão dos valores de umidade em relação à média, estimada pelo coeficiente de variação, aumenta significativamente com a tensão para as profundidades de 0,075 m e 0,225 m. Verifica-se, ainda, a maior variabilidade espacial da umidade nas amostras mais próximas da superfície, em especial em tensões elevadas, o que se deve, possivelmente, à estrutura mais complexa do solo nestas profundidades.

Os resultados obtidos por Cichota & Jong van Lier (2004) fornecem evidências de que a dependência espacial pode variar com a tensão, pois os padrões de dependência espacial mostraram-se bastante diferentes entre os vários conjuntos. Estes autores não encontraram relação da variabilidade espacial de acordo com a profundidade ou mesmo com a tensão; no entanto, em todas as profundidades estudadas, os semivariogramas experimentais das três maiores tensões apresentaram coeficientes de correlação bastante elevados, maiores que 0,90, contrastando com os dados das demais tensões que, em geral, não exibiram correlação entre si.

2.5.2 Densidade do solo

A variabilidade espacial da densidade do solo é altamente influenciada pelo manejo agrícola, pelo tipo de solo e também pela profundidade de

amostragem, sendo a obtenção do modelo de variação espacial essencial para a precisão de projetos agrícolas (Guimarães, 2000).

A densidade do solo é um atributo físico do solo que está intimamente ligado a alguns fatores, como aeração e condutividade hidráulica, ou seja, tem influência direta no desenvolvimento da planta. Trabalhos, como o de Guimarães (2000), indicam que o atributo densidade do solo apresenta-se, geralmente, uniforme (coeficiente de variação < 20%) e também apresenta uma estrutura de variabilidade espacial definida, ou seja, geralmente apresenta dependência espacial que pode ser representada por meio de semivariogramas.

Em estudos de Fidalski et al. (2006), as análises dos dados da densidade do solo (Ds) nos sistemas de manejo plantio direto e plantio direto com escarificação indicaram que esta variável estava distribuída de forma aleatória no espaço, sem dependência espacial. Estes autores não obtiveram continuidade espacial nas camadas de 0-0,05 m e 0,20-0,30 m, evidenciando que a continuidade espacial na camada de 0,05-0,20m não foi exclusivamente dependente da ação das hastes do escarificador, utilizado a 0,30m de profundidade.

Guimarães (2000) também observou que o sistema em plantio direto não mostrou autocorrelação entre os pontos amostrados para a densidade do solo. Dessa forma, ocorreu independência entre as amostras para distâncias de amostragem maiores ou iguais a 10 m.

2.5.3 Textura e porosidade do solo

As frações granulométricas dos solos apresentam grande diversidade de comportamento espacial não só em relação ao manejo, mas também em relação ao tipo de solo, demonstrando a importância do estudo e do conhecimento do comportamento espacial desses atributos (Souza et al., 1997; Vieira, 1997; Guimarães, 2000).

Guimarães (2000) ajustou diversos modelos aos dados experimentais das frações granulométricas, ressaltando a necessidade de se considerar a dependência espacial dessas variáveis, quando da realização de estimativas e de inferências estatísticas, mesmo que, teoricamente, os valores médios desses atributos não sofram modificações com o tempo ou com o manejo adotado.

Albuquerque et al. (1996) ajustaram modelos esféricos para o teor de argila, com alcance de 39 m. Abreu et al. (2003) encontraram, para as variáveis granulométricas do solo, alcance entre 45 e 67m, citando que os valores de areia e silte apresentaram baixo coeficiente de variação.

A distribuição espacial dos macroporos, segundo Veronese Júnior et al. (2006), mostra-se mais aleatorizada do que a distribuição espacial dos microporos na superfície, indicando que a macroporosidade é mais dependente ao preparo do solo.

As semivariâncias experimentais encontradas por Guimarães (2000) para o volume total de poros (VTP), micro e macroporosidade, no sistema de manejo em plantio direto, revelaram independência entre os pontos amostrados.

Estudando a variabilidade espacial da porosidade total (PT), macro e microporosidade em duas profundidades de solo (0-10 e 10-20 cm), Milani et al. (2005) encontraram efeito pepita puro somente para a PT na profundidade de 10-20 cm. As demais variáveis estudadas ajustaram-se aos modelos exponencial e esférico, apresentando moderada dependência espacial.

Os mapas de contorno permitem melhor visualização da área em estudo, bem como sua variabilidade espacial. Milani et al. (2005) observaram que os mapas de contorno para as variáveis estudadas mostrou sub-regiões em comum nas duas camadas estudadas, o que evidencia a importância da aplicação deste método.

3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, S. L. de; REICHERT, J.M.; SILVA, V. R. da; REINERT, D. J.; BLUME, E. Variabilidade espacial de propriedades físico-hídricas do solo, da produtividade e da qualidade de grãos de trigo em Argissolo Franco Arenoso sob plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 2, p. 275-282, mar./abr. 2003.

ALBUQUERQUE, J. A.; REINERT, D. J.; FIORIN, J. E. Variabilidade de solo e planta em Podzólico Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 20, n. 1, p. 151-157, jan./fev. 1996.

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

ANDRIOTTI, J. L. S. **Fundamentos de estatística e geoestatística**. São Leopoldo: Ed. Unisinos, 2003. 165 p.

BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A. Armazenamento de carbono em frações lábeis da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 7, p. 677-683, jul. 2004.

BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J. A.; LEITE, D.; AMARAL, A. J.; ZOLDAN JUNIOR, W. A. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas às do campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 1, p. 155-163, jan./fev. 2004.

BERTOL, I.; BEUTLER, J. F.; LEITE, D.; BATISTELA, O. Propriedades físicas de um Cambissolo Húmico afetadas pelo tipo de manejo do solo. **Scientia Agricola**, v. 58, n. 3, p. 555-560, jul./set. 2001.

BERTOL, I.; COGO, N. P.; LEVIEN, R. Erosão hídrica em diferentes preparos do solo logo após a colheita de milho e trigo, na presença e ausência de resíduos culturais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, n. 3, p. 409-418, maio/jun. 1997.

BERTOL, I.; SCHICK, J.; MASSARIOL, J. M.; REIS, E. F.; DILLY, L. Propriedades físicas de um Cambissolo Húmico álico afetadas pelo manejo do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 30, n. 1, p. 91-95, jan./mar. 2000.

CÂMARA, R. K.; KLEIN, V. A. Escarificação em plantio direto como técnica de conservação do solo e da água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 4, p. 789-796, jul./ago. 2005.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, Sept./Oct. 1994.

CAMPOS, B. C.; REINERT, D. J.; NICOLODI, R.; RUEDELL, J.; PETRERE, C. Estabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico após sete anos de rotação de culturas e sistemas de manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 19, n. 1, p. 121-126, jan./fev. 1995.

CARPENEDO, V.; MIELNICZUK, J. Estado de agregação e qualidade de agregados de Latossolos Roxos, submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 14, n. 1, p. 99-105, jan./fev. 1990.

CARVALHO, F. L. C.; COGO, N. P.; LEVIEN, R. Eficácia relativa de doses e formas de manejo do resíduo cultural de trigo na redução da erosão hídrica do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 14, n. 1, p. 227-234, jan./fev. 1990.

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

CARVALHO, M. A. C. de; SORATTO, R. P.; ATHAYDE, M. L. F.; ARF, O.; SÁ, M. E. de. Produtividade de milho em sucessão a adubos verdes no sistema plantio direto e convencional. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 1, p. 47-53, jan. 2004.

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

CERETTA, C. A.; BASSO, C. J.; FLECHA, A. M. T.; PAVINATO, P. S.; VIEIRA, F. C. B.; MAI, M. E. M. Manejo da adubação nitrogenada na sucessão aveia preta/milho, no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 1, p. 163-171, jan./fev. 2002.

CICHOTA, R.; JONG VAN LIER, Q. de. Análise da variabilidade espacial de pontos amostrais da curva de retenção da água no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 4, p. 585-596, jul./ago. 2004.

COELHO FILHO, M. A.; COELHO, R. D.; GONÇALVES, A. C. A. Variabilidade espacial de variáveis físico-hídricas do solo em um pomar de lima ácida Tahiti, irrigado por microaspersão. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.5, n. 2, p. 239-246, maio/ago. 2001.

CORÁ, J. E. **Sistema de semeadura direta na região do município de Jaboticabal, SP: efeito em atributos do solo e produtividade de culturas.** 2006. 115 p. Tese (Livre Docência - Ciência do Solo) - Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal.

CORÁ, J. E. **The potential for site-specific management of soil and yield variability induced by tillage.** 1997. 104 p. Tese (Doutorado) - Michigan State University, East Lansing.

CORAZZA, E. J.; SILVA, J. E.; RESCK, D. V. S.; GOMES, A. C. Comportamento de diferentes sistemas de manejo como fonte ou depósito de carbono em relação à vegetação de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 3, p.425-432, maio/jun. 1999.

COSTA, F. S. **Propriedades físicas e produtividade de culturas de um Latossolo Bruno sob sistemas de manejo do solo em experimentos de longa duração.** 2001. 98 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages.

CRUSCIOL, C. A. C.; COTTICA, R. L.; LIMA, E. do V.; ANDREOTTI, M.; MORO, E.; MARCON, E. Persistência de palhada e liberação de nutrientes do nabo forrageiro no plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n. 1, p. 161-168, jan. 2005.

D'ANDRÉA, A. F.; SILVA, M. L. N.; CURTI, N.; FERREIRA, M. M. Atributos de agregação indicadores da qualidade do solo em sistemas de manejo na região

dos Cerrados no Sul do Estado de Goiás. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 4, 1047-1054, jul./ago. 2002.

ENGBALL, B.; HERGERT, G. W.; LESOING, G. W.; FERGUSON, R. B. Fractal analysis of spatial and temporal variability. **Geoderma**, Amsterdam, v. 88, p. 349-362, 1999.

EGUCHI, E. S., SILVA, E. L. da ; OLIVEIRA, M. S. de. Variabilidade espacial da textura e da densidade de partículas em um solo aluvial no Município de Lavras, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 2, p.242-246, maio/ago. 2002.

FAMIGLIETTI, J. S.; RUDNICKI J. W.; RODELL, M. Variability in surface moisture content along a hillslope transect: rattlesnake hill, Texas. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 210, n. 1/4, p. 259-281, Sept. 1998.

FEDERAÇÃO BRASILEIRA DE PLANTIO DIRETO NA PALHA . **Brasil - evolução da área cultivada em plantio direto**. Disponível em <<http://www.febrapdp.org.br>>. Acesso em: 11 Jan. 2007.

FIDALSKI, J.; TORMENA, C. A.; GONÇALVES, A. C. A; OLIVEIRA JÚNIOR, R. S. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração e da taxa de estratificação de carbono orgânico do solo em um Latossolo Vermelho eutroférico. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n. 6, p. 1773-1779, nov./dez. 2006.

FIETZ, C. R.; FOLEGATTI, M. V.; VIEIRA, S. R.; FRIZZONE, J. A. Efeito da variabilidade do armazenamento de água no solo na qualidade da irrigação por aspersão. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 3, n. 2, p. 150-153, maio/ago. 1999.

GENRO JUNIOR, 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, v. 28, n. 3, p. 477-484, maio/jun. 2004.

GÓMEZ-PLAZA, A.; MARTÍNEZ-MENA, M.; ALBALADEJO, J.; CASTILLO, V. M. Factors regulating spatial distribution of soil water content in small semiarid catchments. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 253, n. 1/4, p. 211-226, Nov. 2001.

GONÇALVES, A. C. A.; FOLEGATTI, M. V.; SILVA, A. P. Estabilidade temporal da distribuição espacial da umidade do solo em área irrigada por pivô central. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 1, p. 155-164, jan./fev. 1999a.

GONÇALVES, A. C. A.; FOLEGATTI, M. V.; VIEIRA, S. R. Padrões de amostragem e intensidade de krigeagem em caracterização do armazenamento de água no solo, em área irrigada por pivô central. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 3, p. 485-495, maio/jun. 1999b.

GOOVAERTS, P. Study of spatial relationships between two sets of variables using multivariate geostatistics. **Geoderma**, Amsterdam, v. 62, n. 1/3, p. 93-107, Mar. 1994.

GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R.; ANTONIO, A. M.; DELLA ROSA, S. C. Geostatistical analysis for soil moisture content under the no tillage cropping system. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 63, n. 4, p. 341-350, jul/ago. 2006.

GREMINGER, P. J.; SUD, Y. K.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of field-measured soil- water characteristics. **Soil Science Society American Journal**, v. 49, n. 5, p. 1075-1082, Sept./Oct. 1985.

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 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

HÉBRARD, O.; VOLTZ, M.; ANDRIEUX, P.; MOUSSA, R. Spatio-temporal distribution of soil surface moisture in a heterogeneously farmed Mediterranean catchment. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 329, n. 1/2, p. 110-121, Sept. 2006.

HENDRICKX, J. M. H.; WIERENGA, P. J.; NASH, M. S. Variability of soil water tension and soil water content. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 18, n. 2, p. 135-148, July 1990.

HÉNIN, S.; GRAS, R.; MONNIER, G. **Os solos agrícolas**. Rio de Janeiro: Forense Universitária, 1976. 334 p.

KAY, B. D. Rates of change of soil structure under different cropping systems. **Advances in Soil Sciences**, New York, v. 12, p. 1-41, 1990.

KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C. A.(Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. p. 449-510.

LAL, R. No-tillage effects on soil properties and maize (*Zea mays* L.) production in Western Nigeria. **Plant and Soil**, Amsterdam, v. 40, n.2, p. 321-331, Apr. 1974.

LIBARDI, P. L.; PREVEDELLO, C. L.; PAULETTO, E. A.; MORAES, S. O. Variabilidade espacial da umidade, textura e densidade de partículas ao longo de uma transeção. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 10, n. 2, p. 85-90, mar./abr. 1986.

LIMA, C. L. R.; PAULETTO, E. A.; GOMES, A. S.; SILVA, J. B. Estabilidade de agregados de um Planossolo sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 1, p. 199-205, jan./fev 2003.

LOVATO, T.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; VEZZANI, F. Adição de carbono e nitrogênio e sua relação com os estoques no solo e com o rendimento do milho em sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 1, p. 175-187, jan./fev. 2004.

MAI, M. E. M.; CERETTA, C. A. ; BASSO, C. B. ; SILVEIRA, M. J. da; PAVINATO, A.; PAVINATO, P. S. Manejo da adubação nitrogenada na sucessão aveia-preta/milho no sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 1, p. 125-131, jan. 2003.

MARTINEZ-FERNÁNDEZ, J.; CEBALLOS, A. Temporal stability of soil moisture in a large-field experiment in Spain. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 67, n. 6, p. 1647-1656, 2003.

MILANI, D. I. C.; MILANI, L.; TAVARES, M. H. F.; OPAZO, M. A. U.; VILAS BOAS, M. A. Variabilidade espacial da porosidade do solo em um Latossolo sob plantio direto. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 3., 2005, Sete Lagoas,. **Anais...** Sete Lagoas, Embrapa Milho e Sorgo, 2005.

NIELSEN, D. R.; TILLOTSON, P. M.; VIEIRA, S. R. Analyzing field-measured soil-water properties. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 6, n. 2/3, p. 93-109, May 1983.

RESCK, D. V. S. O plantio direto como alternativa de sistema de manejo e conservação do solo e da água na região dos cerrados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 27., 1999, Brasília. **Resumo expandido...** Brasília, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1999. CD-ROM

ROCHA, G. C.; LIBARDI, P. L.; CARVALHO, L. A.; CRUZ, A. C. R. Estabilidade temporal da distribuição espacial da armazenagem de água em um solo cultivado com citros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 1, p. 41-50, jan./fev. 2005.

ROMEIRO, A. R. **Meio ambiente e dinâmica de inovações na agricultura**. São Paulo: Annablume, 1998. 277 p.

SALET, R. L. **Dinâmica de íons na solução de um solo submetido ao sistema plantio direto**. 1994. 110p. Tese (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J. Relações entre sistemas de preparo, temperatura e umidade de um Podzólico Vermelho Escuro de Eldorado do Sul (RS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 19, n. 2, p. 313-319, mar./abr. 1995.

SCHAEFER, C. E. R.; SOUZA, C. M.; VALLEJOS, M.; VIANA, J. H. M., GALVÃO, J. C. C.; RIBEIRO, L. M. Características da porosidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo submetido a diferentes sistemas de preparo de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 3, p. 765-769, maio/jun. 2001.

SCHICK, J.; BERTOL, I.; BATISTELA, O.; BALBINOT JUNIOR, A. A. Erosão hídrica em Cambissolo Húmico alumínico submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo do solo: I- Perdas de solo e água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 3, p. 427-436, maio/jun. 2000.

SECCO, D. **Estados de compactação e suas implicações no comportamento mecânico e na produtividade de culturas em dois latossolos sob plantio direto**. 2003. 108 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

SETA, A. K.; BLEVINS, R. L.; FRYE, W. W.; BARFIELD, B. J. Reducing soil erosion and agricultural chemical losses with conservation tillage. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 22, p. 661-665, 1993.

SIDIRAS, N.; DERPSCH, R.; MONDARDO, A. Influência de diferentes sistemas de preparo do solo na variação da umidade e rendimento da soja, em Latossolo Roxo distrófico (Oxisol). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 7, n. 1, p. 103-106, jan./fev. 1983.

SILVA, I. F.; MIELNICZUK, J. Avaliação do estado de agregação do solo afetado pelo uso agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, n. 2, p. 313-319, mar./abr. 1997.

SILVA, M. A. S. da; MAFRA, A. L.; ALBUQUERQUE, J. A.; DALLA ROSA, J.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Propriedades físicas e teor de carbono orgânico de um Argissolo Vermelho sob distintos sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 2, p. 329-337, mar./abr. 2006.

SILVA, V. R.; REICHERT, J. M.; STORCK, L.; FEIJÓ, S. Variabilidade espacial das características químicas do solo e produtividade de milho em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 6, p. 1013-1020, nov./dez. 2003.

SILVEIRA, P. M.; BRAZ, A. J. B. P.; KLIEMANN, H. J.; ZIMMERAMANN, F. J. P. Adubação nitrogenada no feijoeiro cultivado sob plantio direto em sucessão de culturas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n. 2, p. 377-381, fev. 2005.

SOUSA, J. R.; QUEIROZ, J. E.; GHEYI, H. R. Variabilidade espacial de características físico-hídricas e de água disponível em um solo aluvial no semi-árido paraibano. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 3, n. 2, p. 140-144, maio/ago. 1999.

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, v. 21, n. 3, p. 367-372, maio/jun. 1997.

SOUZA, Z. M. ; MARQUES JUNIOR, J. ; PEREIRA, G. T. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo Vermelho distrófico sob semeadura direta em Selvíria, MS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.3, p.699-707, maio/jun. 2001.

SOUZA, Z. M.; SILVA, M. L. S.; GUIMARÃES, G. L.; CAMPOS, D. T. S.; CARVALHO, M. P.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo Vermelho distrófico sob semeadura direta em Selvíria

(MS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 4, p. 699-707, jul./ago. 2001.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 2, p.395-401, mar./abr. 2001.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M.; MOREIRA, J. A. A. **Atributos físico-hídricos do solo sob plantio direto**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2006. 39 p. (Embrapa Arroz e Feijão. Documentos, 191).

TISDALL, J. M.; OADES, L. M. Organic matter and water-stable aggregates in soil. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 33, p. 141-163, 1982.

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**, Viçosa, v. 22, n. 2, p. 301-309, mar./abr. 1998.

TORRES, J. L. R.; PEREIRA, M. G.; ANDRIOLI, I.; POLIDORO, J. C.; FABIAN, A. J. Decomposição e liberação de nitrogênio de resíduos culturais de plantas de cobertura em solo de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 4, p. 609-618, jul./ago. 2005.

UTSET, A.; CID, G. Soil penetrometer resistance spatial variability in a Ferrisol at several soil moisture conditions. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 61, p. 193-202, 2001.

VERONESE JÚNIOR, 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 and Tillage Research**, Amsterdam, v. 85, n. 1/2, p. 166-177, 2006.

VIEIRA, M. J. Propriedades físicas do solo. In: IAPAR. **Plantio direto no Estado do Paraná**. Londrina, 1981. p.19-32. (IAPAR. Circular, 23).

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, G. R. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1, p.1-54.

VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de argila, silte e atributos químicos em parcela experimental de um Latossolo Roxo de Campinas (SP). **Bragantia**, Campinas, v. 56, n. 1, p. 181-190, 1997.

VIEIRA, S. R.; HATFIELD, J. L.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Geoestatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, Berkeley, v.51, n. 3, p.1-75, June 1983.

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.

WEBSTER, R. Quantitatives spatial analylis of soil en the field. **Advances in Soil Sciences**, New York, v. 7, p.1-70, 1985.

WEBSTER, R.; OLIVER, M. **Geostatistics for environmental scientists**. Chichester: J. Wiley, 2001. 271 p.

WEIRICH NETO, P. H.; BORGHI, E.; SVERZUT, C. B.; MANTOVANI, E. C.; GOMIDE, R. L.; NEWES, W. L. de C. Análise multivariada da resistência do solo à penetração sob plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 4, p. 1186-1192, jul./ago. 2006

YEH, T. C. J.; GELHAR, L. W.; WIERENGA, P. J. Observations of spatial variability of soil water pressure in a field soil. **Soil Science**, Baltimore, v. 142, n. 1, p. 7-12, July 1986.

CAPÍTULO 1 - Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo de Lavras, MG submetido à semeadura direta.

(Preparado de acordo com as normas da Revista Brasileira de Ciência do Solo)

RESUMO

A variabilidade espacial dos atributos de um solo surge desde a sua formação, sendo o manejo uma fonte adicional de variabilidade. O objetivo da realização deste trabalho foi o de avaliar a variabilidade de atributos físicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo submetido ao plantio direto, na região Sul do estado de Minas Gerais. Foi implementada uma malha experimental com dimensões iguais a 90 x 90 m (0,81 ha de área) e espaçamento entre os pontos de leitura de 15 x 15 m. Para obter um maior detalhamento da dependência espacial dos dados, realizou-se a implantação de mais duas malhas (zoom) dentro de um quadrante da grande malha, com espaçamentos de 5 x 5 m e 1,67 x 1,67 m, totalizando 73 pontos de leitura. Em cada ponto da malha foram coletadas amostras de solo nas camadas de 0-7,5 e 7,5-15 cm, para a determinação da densidade do solo, volume total de poros, macro e microporosidade, estabilidade de agregados, umidade do solo em diferentes tensões (10, 33 e 50 kPa) e teor de carbono orgânico do solo. Após a análise estatística dos dados, observou-se distribuição normal para quase todos os atributos avaliados e coeficiente de variação (CV) baixo, excetuando a macroporosidade, que apresentou CV > 20%, nas duas camadas. Os semivariogramas obtidos apresentaram melhor ajuste pelo modelo exponencial, em grande parte dos atributos. O ajuste pelo modelo esférico só foi observado para o diâmetro médio geométrico, nas duas camadas em estudo. O efeito pepita puro foi observado para alguns atributos, o que reflete a inexistência de correlação espacial entre as variáveis, indicando a ausência total de estruturação do fenômeno estudado na escala de trabalho. Por meio da análise do mapa de krigagem, observou-se que a densidade do solo foi o atributo que demonstrou maior similaridade de distribuição espacial nas duas camadas. Constatou-se pequena correlação espacial entre os mapas obtidos para o teor de carbono orgânico do solo e umidade em diferentes tensões, principalmente na tensão igual a 50 kPa.

Termos de indexação: Manejo do solo, geoestatística, física do solo.

SUMMARY: SPATIAL VARIABILITY OF PHYSICAL ATTRIBUTES OF A LATOSOL OF LAVRAS-MG UNDER NO-TILLAGE

The spatial variability of soil attributes comes from their formation, being the management an additional source of variability. The objective of this study was to evaluate the variability of physical attributes of a red-yellow Latosol submitted to no-tillage, in the southern state of Minas Gerais. It carried out an experimental grid with the dimensions of 90 x 90 m (0.81 ha of area) and spacing between the points of 15 x 15 m. For a more detailed spatial dependence of the data, made up the deployment of two more meshes (zoom) in a quadrant of the great mesh, totaling 73 points. At each point of the mesh were collected samples of soil under layers of 0-7,5 and 7,5-15 cm, to determine the soil density, the total volume of pores, macro and microporosity, stability of aggregates, soil moisture at different tensions (10, 33 and 50 kPa) and organic carbon content of the soil. Through statistical analysis of the data, was observed normal distribution for almost all attributes evaluated and low coefficient of variation, except for macroporosity, which presented CV > 20% in two layers. The best fit model for semivariograms obtained was the exponential model in most of the attributes. The adjustment by the spherical model was observed only for the geometric mean diameter, in the two layers under study. The pure nugget effect was observed for some attributes, reflecting the lack of spatial correlation between variables. Through analysis of the statement of kriging, it was observed that the density of soil was the attribute that showed greater similarity of spatial distribution in the two layers. It was found a correlation between the spatial maps obtained for the organic carbon and soil moisture at different tensions, mainly in tension equal to 50 kPa.

Index terms: Soil management, geostatistic, soil physical.

INTRODUÇÃO

O sistema plantio direto é uma das modalidades de cultivo conservacionista que propiciam um aumento da sustentabilidade do solo, pela manutenção da qualidade física do solo em relação ao preparo convencional (Stone et al., 2006; Weirich Neto et al., 2006; Marcolan et al., 2007).

Os atributos físicos do solo desempenham importante papel no estabelecimento de uma cultura. Para o refinamento das práticas de manejo e a

avaliação dos efeitos sobre a qualidade ambiental (Cambardella et al., 1994), é fundamental o conhecimento da distribuição espacial dos atributos do solo em áreas de plantio direto, a fim de minimizar os erros de amostragem e no manejo do solo (Warrick & Nielsen, 1980). Estudos têm mostrado que, geralmente, os atributos do solo não ocorrem de maneira aleatória no espaço, uma vez que possuem arranjo estrutural com uma dimensão característica (Trangmar et al., 1985; Vieira, 2000).

A variabilidade espacial dos atributos físicos do solo, que é um corpo tridimensional, surge desde a sua formação, pela ação de vários fatores e processos. Além da variabilidade natural do solo, as práticas agrícolas de manejo são fontes adicionais que a implementam (Vieira, 2000; Webster & Oliver, 2001).

O conhecimento da variabilidade espacial de atributos do solo subsidia a agricultura de precisão (Corá & Beraldo, 2006), cujo objetivo principal é manejar todo o conjunto de uma área particular cultivada de modo ótimo, de tal forma que os lucros agrícolas sejam maximizados e o impacto da agricultura no meio ambiente seja minimizado.

Atualmente, a pesquisa em Ciência do Solo tem se apoiado na Geoestatística, ferramenta estatística utilizada para estudar a variabilidade espacial, possibilitando a interpretação dos resultados com base na estrutura da variabilidade natural dos atributos avaliados, considerando a dependência espacial dentro do intervalo de amostragem (Andriotti, 2003). A Geoestatística, aliada à Estatística Clássica, adquire importância agronômica, decorrente das inúmeras respostas dadas às mais variadas questões existentes que, até então, eram ignoradas (Carvalho et al., 2003).

Na literatura, existe carência de informações sobre a variabilidade espacial de alguns atributos físicos do solo cultivado com plantio direto (Souza et al., 2001; Abreu et al., 2003; Veronese Júnior et al., 2006) , além de estudos

da aplicação deste sistema de manejo na região Sudeste do Brasil. Neste contexto, este trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar a variabilidade de atributos físicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo submetido ao plantio direto, na região Sul do estado de Minas Gerais.

MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido no município de Lavras, localizado ao sul do estado de Minas Gerais, em uma área de cultivo de milho manejado com o sistema de plantio direto desde outubro de 1998. A propriedade onde se localiza a área experimental possui 27 ha de área total, com as seguintes coordenadas: 21°16'15'' de latitude Sul e 44°57'22'' de longitude Oeste.

O tipo climático da região é Cwb, segundo a classificação de Köppen, com chuvas concentradas entre novembro e março. O solo onde a malha experimental foi instalada, classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) com textura argilosa, encontra-se na área mais plana da propriedade, a 950 m de altitude.

O manejo de plantas daninhas foi realizado com o auxílio dos herbicidas glifosate, aplicado antes do plantio do milho e após a colheita e atrazina, aplicado em pré-emergência, entre 15 e 20 dias após o plantio. As culturas escolhidas para a cobertura de inverno, após três anos de testes com várias espécies, foram o nabo forrageiro e o tremoço-branco, pois estas apresentaram melhor associação entre si e maior adaptabilidade às condições edafoclimáticas da propriedade. Apenas o tremoço-branco exigiu novos plantios anuais, realizando-se a semeadura de 25 kg ha⁻¹ em cada inverno, após a aplicação de glifosate, acompanhando o espaçamento da cultura do milho (0,8 m entre linhas). O último plantio do milho, antes da coleta das amostras, foi realizado em

2006, com o híbrido simples Pioneer 30F33. A colheita foi realizada com colhedora automotriz na primeira semana de março de 2007.

A grande malha experimental apresenta dimensões iguais a 90 x 90 m (0,81 ha de área). O espaçamento entre os pontos de leitura adotados foi de 15 x 15 m, com um subtotal de 49 pontos. Visando a um maior detalhamento da dependência espacial dos dados, realizou-se a implantação de mais duas malhas (“zoom”) dentro de um quadrante da grande malha escolhido por meio de sorteio, excetuando aqueles das bordas (Figura 1). Os espaçamentos utilizados para as malhas do “zoom” foram de 5 x 5 m e 1,67 x 1,67 m, totalizando mais 24 pontos de leitura no total.

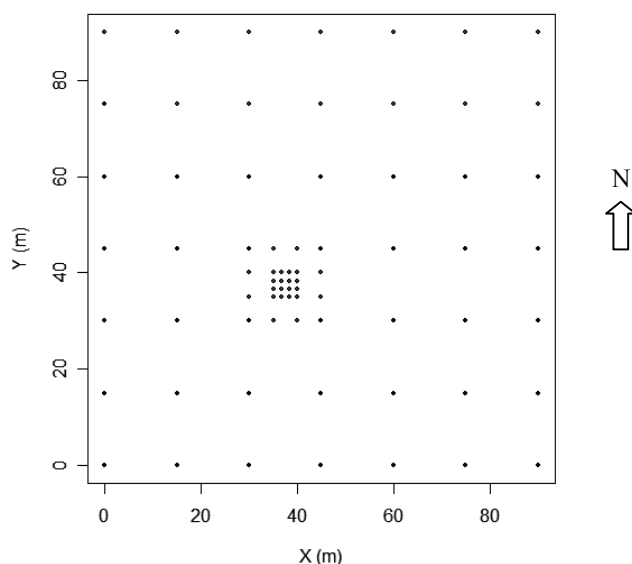


Figura 1. Grid de amostragem utilizado para a obtenção da umidade do solo.

A coleta do solo foi realizada nos meses de março e abril de 2007, após a colheita do milho (safra 2006/2007). Em cada ponto do grid de amostragem, foram coletadas amostras deformadas e indeformadas de solo em duas profundidades (0-7,5 cm e 7,5-15 cm).

Com as amostras indeformadas, determinou-se a densidade do solo (D_s) pelo método do anel volumétrico, obtendo-se também o volume total de poros (VTP), a macro e a microporosidade (Embrapa, 1997).

Os torrões de solo coletados foram desmanchados manualmente, tomando-se o cuidado de não destruir os agregados, sendo tamisados a seguir em peneiras de 8 mm e 4 mm, dispostas em seqüência. Os agregados retidos na menor peneira foram selecionados e submetidos à análise laboratorial via úmida, para a determinação da estabilidade dos agregados, expressa pelo diâmetro médio geométrico dos agregados (DMG).

No estudo da retenção de água no solo, foram utilizadas amostras deformadas passadas em peneira com 2 mm de abertura, determinando-se a umidade do solo submetido a três tensões diferentes (0,50, 0,33 e 0,10 atm), utilizando-se o extrator de placa porosa de Richards. As amostras foram colocadas em contato direto com a placa porosa, alocadas dentro de cilindros de PVC. Todas as amostras, após serem preparadas, foram saturadas diretamente na placa porosa por 24 horas e submetidas à sucção desejada posteriormente.

A densidade de partículas (D_p) foi determinada pelo método do balão volumétrico, por meio da relação entre a massa de solo seco e o volume ocupado pelos sólidos do solo seco (Embrapa, 1997). Já a textura foi obtida pelo método da pipeta, com separação da areia em peneiras de 0,053mm e secagem em estufa da suspensão de argila coletada com pipeta, descontando-se o peso de hidróxido de sódio presente na amostra.

O teor de carbono orgânico nas amostras foi determinado pelo método proposto por Yeomans & Bremner (1988), cujo princípio é a oxidação a quente com dicromato de potássio e titulação do dicromato remanescente com sulfato ferroso amoniacal.

Os dados foram analisados no programa Sisvar v 4.3, utilizando-se princípios da Estatística Clássica para descrever adequadamente a tendência central e avaliar a hipótese de normalidade dos dados (Ferreira, 2000).

A dispersão dos dados e a variabilidade espacial foram analisadas usando a Geoestatística, por meio de parâmetros obtidos pelo programa GeoR v. 2.4.1 (Ribeiro Jr. & Diggle, 2001) do software R. Os modelos de semivariograma que apresentaram menor soma de quadrados pelo método dos mínimos quadrados ordinários foram os utilizados. Calculou-se também, conforme fórmula apresentada a seguir, a razão de dependência espacial (RD), que é a proporção em percentagem do efeito pepita (C_0) em relação ao patamar (C_0+C) que, de acordo com Cambardella et al. (1994), apresenta a seguinte proporção: (a) dependência forte ≤ 25 %; (b) dependência moderada de 25% a 75 % e (c) dependência fraca > 75 %.

$$RD = \left(\frac{C_0}{C_0 + C} \right) * 100$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A avaliação dos dados por meio da Estatística Descritiva, apesar de considerá-los espacialmente independentes, tem a função de analisar o comportamento geral desses dados e auxiliar na etapa da análise com base nos conceitos da geoestatística. Os resultados desta análise (Quadro 1) indicam que a maior parte dos atributos estudados apresenta assimetria e curtose compatíveis com a distribuição normal, o que pode ser confirmado também pelos valores semelhantes de média e de mediana. Valores próximos de zero para assimetria e próximos de três para a curtose, a qual mede o grau de achatamento, caracterizam a distribuição normal de frequências (Ferreira, 2000).

Quadro 1. Parâmetros estatísticos para os atributos do Latossolo Vermelho-Amarelo.

Atributo	Prof. (cm)	μ	Med.	σ	CV (%)	Máx	Mín	AS	K
Ds (kg dm ⁻³)	0-7,5	1,11	1,12	0,07	6,62	1,24	0,92	-0,59	3,03
	7,5-15	1,12	1,13	0,05	4,74	1,23	0,97	-0,46	3,09
VTP (cm ³ cm ⁻³)	0-7,5	0,554	0,548	2,85	5,15	0,626	0,485	0,49	3,05
	7,5-15	0,547	0,542	2,65	4,84	0,617	0,498	0,65	3,12
Macro (cm ³ cm ⁻³)	0-7,5	0,163	0,155	4,93	30,26	0,309	0,078	0,71	3,19
	7,5-15	0,160	0,145	4,14	25,89	0,274	0,076	0,76	3,50
Micro (cm ³ cm ⁻³)	0-7,5	0,389	0,393	2,59	6,67	0,427	0,265	-1,91	6,14
	7,5-15	0,387	0,388	1,87	4,83	0,429	0,335	-0,36	3,43
Retenção 10 kPa (g ¹ g ⁻¹)	0-7,5	0,354	0,349	2,31	6,53	0,412	0,315	0,77	3,07
	7,5-15	0,350	0,346	2,05	5,83	0,407	0,318	0,53	2,78
Retenção 33 kPa (g ¹ g ⁻¹)	0-7,5	0,306	0,304	1,29	4,22	0,339	0,283	0,42	2,70
	7,5-15	0,301	0,298	1,62	5,39	0,346	0,231	-0,35	7,22
Retenção 50 kPa (g ¹ g ⁻¹)	0-7,5	0,302	0,302	1,19	3,96	0,345	0,280	0,57	4,06
	7,5-15	0,297	0,297	1,24	4,16	0,326	0,264	-0,06	2,87
DMG (mm)	0-7,5	4,52	4,59	0,30	6,62	5,01	3,68	-0,77	2,93
	7,5-15	4,28	4,36	0,35	8,27	4,79	3,24	-0,88	3,58
COT (dag kg ⁻¹)	0-7,5	3,42	3,39	0,26	7,52	3,98	2,70	-0,05	2,94
	7,5-15	2,76	2,84	0,27	9,75	3,32	1,77	-0,69	4,15

μ = média; Med = mediana; σ = desvio padrão; CV = coeficiente de variação; AS = assimetria; K = curtose; Ds = densidade do solo; VTP = volume total de poros; Macro = macroporosidade; Micro = microporosidade; DMG = diâmetro médio geométrico; COT= carbono orgânico total.

De acordo com Warrick & Nielsen (1980), geralmente, as propriedades mecânicas do solo apresentam distribuição normal, enquanto propriedades hidráulicas apresentam distribuição não normal.

Os resultados referentes ao teste Kolmogorov-Smirnov, utilizado quando o conjunto de observações é grande ($N > 50$), indicaram normalidade para todas as variáveis, exceto para microporosidade e retenção de água a 10 kPa, na camada mais superficial. A normalidade para atributos físicos também foi verificada em outros trabalhos (Souza et al., 2001; Carvalho et al., 2003; Souza et al., 2004).

A normalidade dos dados não é uma exigência da geoestatística; é conveniente apenas que a distribuição não apresente caudas muito alongadas, o que poderia comprometer as análises (Cressie, 1991).

Quando se analisam as amplitudes entre os valores mínimos e máximos, pode-se ter uma noção da variabilidade dos dados. Entre os atributos avaliados, destaca-se a macroporosidade, a qual apresentou grande amplitude de valores nas duas camadas.

O coeficiente de variação é adimensional e permite a comparação de valores entre diferentes atributos do solo. Valores elevados de CV podem ser considerados como os primeiros indicadores da existência de heterogeneidade nos dados. Em relação aos coeficientes de variação dos dados, observaram-se, nas duas camadas em estudo, valores acima de 20 % para a macroporosidade, sendo estes valores considerados altos, segundo Pimentel-Gomes (1984). Os demais atributos apresentaram valores baixos ($CV < 10\%$), segundo a mesma classificação.

Trabalhos, como o de Guimarães (2000), indicam que o atributo densidade do solo (D_s), geralmente, apresenta-se uniforme, com baixo coeficiente de variação. Silva (1988) obteve $CV = 6,3\%$ para D_s , em um solo argiloso.

Gomes (2005) observou pequena variação para o VTP em Latossolos, tendo valores entre 0,52 e 0,58 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$. No entanto, para porosidade drenável e

matéria orgânica, o mesmo autor constatou elevados valores de CV, indicando a alta sensibilidade desses atributos na área estudada.

Analisando os coeficientes de variação para a umidade nas diferentes tensões, verifica-se menor valor de CV para maiores tensões aplicadas. Greninger et al. (1985) também constataram redução do coeficiente de variação quando a umidade foi reduzida.

Souza et al. (2004) encontraram valores de CV baixos na profundidade de 0-20 cm e médio na profundidade de 0-40 cm, para a matéria orgânica. Em relação ao diâmetro médio geométrico (DMG), estes mesmos autores obtiveram coeficientes elevados.

Por meio do estudo dos semivariogramas, efetuou-se a análise geoestatística dos atributos do solo (Quadro 2). Contradizendo Sanchez et al. (2005) e Novaes Filho (2007), que afirmam que o modelo esférico é o mais adequado para descrever o semivariograma de propriedades do solo, este modelo foi melhor ajustado apenas para o DMG e a retenção de água a 30 kPa, na camada de 7,5-15 cm. O modelo exponencial foi o que se adaptou melhor aos atributos estudados, de forma geral. Kraemer (2007) também verificou melhor ajuste pelo modelo exponencial de atributos do solo, ressaltando que não existe uma regra sobre qual modelo consegue explicar melhor a correlação ou a dependência espacial dos atributos do solo.

Quadro 2. Valores do efeito pepita (Co), patamar (Co+C1), alcance (a) e classificação dos modelos ajustados para os atributos do Latossolo Vermelho-Amarelo

Prof. (cm)	Atributo	Modelo	Co	Co+C ₁	a (m)	GD (%)
0-7,5	Ds	Exponencial	0,002	0,006	64,6	33,3
	VTP	Exponencial	5,190	6,500	34,1	79,8
	Macro	Exponencial	15,530	20,340	39,6	76,3
	Micro	Exponencial	3,32	8,93	84	37,2
	Ret. 10 kPa	EPP	5,422	5,422	-	-
	Ret. 33 kPa	EPP	1,637	1,637	-	-
	Ret. 50 kPa	Exponencial	0,689	1,435	94,6	48,0
	DMG	Esférico	0,041	0,089	9,9	46,1
	COT	Exponencial	0,042	0,059	12,8	71,2
	7,5 – 15	Ds	Exponencial	0,001	0,004	51,5
VTP		EPP	7,215	7,212	-	-
Macro		EPP	17,241	17,241	-	-
Micro		EPP	3,452	3,452	-	-
Ret. 10 kPa		Linear	3,52	-	-	-
Ret. 33 kPa		Esférico	0,878	1,209	12,7	72,7
Ret. 50 kPa		Exponencial	0,813	1,033	37,2	78,7
DMG		Esférico	0,034	0,125	9,5	27,2
COT		Exponencial	0,024	0,073	38,7	32,9

EPP = Efeito pepita puro.

Ds = densidade do solo; VTP = volume total de poros; Macro = macroporosidade; Micro = microporosidade; DMG = diâmetro médio geométrico; COT= carbono orgânico total.

Foi observado o efeito pepita puro (EPP) para alguns atributos, o que resulta em atribuir os mesmos pesos a todos os pontos de amostragem, ou seja, pontos mais próximos não têm maior influência no valor estimado, o que se resume em desconsiderar a correlação espacial (Andriotti, 2003). Este ajuste, portanto, indica a ausência total de estruturação do fenômeno estudado (Cressie, 1991). Nessa situação, os resultados obtidos pela Geoestatística serão os mesmos indicados pela Estatística Clássica, a qual assume que as variações das características do solo dentro das unidades amostrais não são correlacionadas e que o valor médio constitui o melhor estimador das mesmas em qualquer local da unidade amostral.

O efeito pepita (C_0) é um parâmetro do semivariograma que indica variabilidade não explicada, que pode ser devido a erros de medição ou à variação não detectada pela escala de amostragem (Andriotti, 2003), além de ser influenciada pelas características extrínsecas ao solo ocasionadas pela ação antrópica (Webster & Oliver, 2001). Desse modo, conforme a classificação de Cambardella et al. (1994), o grau de dependência espacial para a maior parte dos atributos demonstrou estrutura espacial moderada para os mesmos (entre 25 e 75%). Somente a D_s na camada de 7,5-15 cm apresentou forte grau de dependência espacial. Observou-se também que a estrutura espacial tende a ser mais fraca na camada mais superficial, talvez devido à maior ação antrópica nesta por ocasião de operações de plantio e de colheita.

Para a D_s , Guimarães (2000) não obteve estrutura de dependência espacial no plantio direto, ajustando o modelo exponencial aos dados da área sob preparo convencional, o que mostra que os pontos vizinhos apresentam valores mais semelhantes nesse tipo de manejo. Siqueira et al. (2008) verificaram dependência espacial moderada para a D_s em um Latossolo, ajustando-se o modelo esférico aos dados.

Os resultados obtidos neste trabalho indicaram baixa estrutura de dependência espacial para a macroporosidade. Stone et al. (2006) citam que no plantio direto existe um tráfego aleatório de máquinas, gerando compactação diferenciada na área, tendo como consequência maior variabilidade da macroporosidade. Simões (2004) verificou pequeno alcance para a porosidade drenável, atributo altamente correlacionado com a macroporosidade, podendo estar relacionado, segundo ao autor, à presença de raízes.

Siqueira (2006) observou dependência espacial moderada para a microporosidade e baixa para a macroporosidade, concordando com os resultados obtidos. A distribuição espacial dos macroporos, segundo Veronese Júnior et al. (2006), mostra-se mais aleatorizada do que a distribuição espacial dos microporos na superfície, indicando que a macroporosidade é mais dependente em relação ao preparo do solo.

No estudo dos semivariogramas, deve-se destacar o parâmetro alcance, o que determina a distância máxima que uma variável está correlacionada espacialmente (Andriotti, 2003). Dessa forma, determinações realizadas a distâncias maiores que o alcance têm distribuição aleatória e, por isso, são independentes entre si. O alcance é uma medida importante para planejamento e avaliação experimental, podendo auxiliar na definição de procedimentos amostrais (Webster & Oliver, 2001).

Em uma parcela experimental, Grego & Vieira (2005) encontraram alcances de 11 e 10 m, para as profundidades de 15 e 25 cm, respectivamente. Simões (2004) observou ajuste esférico para as áreas estudadas, obtendo alcance de 52 m para a área em pousio e de 98 m no café recém-plantado. Já Andrade et al. (2005) obtiveram alcance para a D_s igual a 46 m, na camada de 0-30 cm, distância próxima aos valores de alcance encontrados neste trabalho.

Para o COT, obteve-se moderada dependência espacial dos dados analisados, com alcance igual a 12,8 m na camada mais superficial. Cavalcante

et al. (2007) constataram forte dependência espacial para a matéria orgânica do solo em área sob plantio direto, ajustando-se o modelo esférico ao semivariograma que acusou, para as camadas de 0-10 e 10-20 cm, alcances de 5 e 13 m, respectivamente.

O atributo que apresentou maior similaridade nas duas camadas estudadas, em relação aos parâmetros geoestatísticos, foi o DMG. Este atributo ajustou-se melhor pelo modelo esférico, mostrando alcance próximo de 10 m, nas duas camadas. Souza et al. (2004) também verificaram ajuste esférico para o DMG, obtendo alcance de 34 m na camada de 0-20 cm.

É possível, ainda, fazer uma analogia entre os valores obtidos por meio da análise descritiva dos atributos analisados e dos parâmetros de ajuste do semivariograma, conforme demonstrado no Quadro 3.

Quadro 3. Relação entre desvio padrão, coeficiente de variação (CV) e efeito pepita (Co) obtidos para os atributos físicos do Latossolo Vermelho-Amarelo

Prof. (cm)	Atributo	Desvio padrão	CV (%)	Co
	Ds	0,07	6,62	0,002
	VTP	2,85	5,15	5,190
	Macro	4,93	30,26	15,530
	Micro	2,59	6,67	3,325
0 - 7,5	Retenção 10 kPa	2,31	6,53	5,422
	Retenção 33 kPa	1,29	4,22	1,637
	Retenção 50 kPa	1,19	3,96	0,689
	DMG	0,30	6,62	0,041
	COT	0,26	7,52	0,042

Quadro 3. Continuação...

	Ds	0,05	4,74	0,001
	VTP	2,65	4,84	7,215
	Macro	4,14	25,89	17,241
	Micro	1,87	4,83	3,452
7,5 - 15	Retenção 10 kPa	2,05	5,83	3,52
	Retenção 33 kPa	1,62	5,39	0,878
	Retenção 50 kPa	1,24	4,16	0,813
	DMG	0,35	8,27	0,034
	COT	0,27	9,75	0,024

Verifica-se, por meio dos dados do Quadro 3, que os atributos que apresentaram valores de desvio padrão e coeficiente de variação mais elevados, consequentemente apresentam valores de efeito pepita também elevados. Dessa forma, é possível verificar, pela estatística descritiva, parâmetros que apresentaram valores de variabilidade não observada pelo esquema de amostragem, indicando maior descontinuidade entre as amostras (Siqueira, 2006).

A análise dos mapas de superfície (Figura 2), obtidos pelo processo de interpolação dos pontos por meio da krigagem, facilita a visualização da distribuição espacial das variáveis e auxilia no planejamento do manejo da área, evitando-se custos desnecessários.

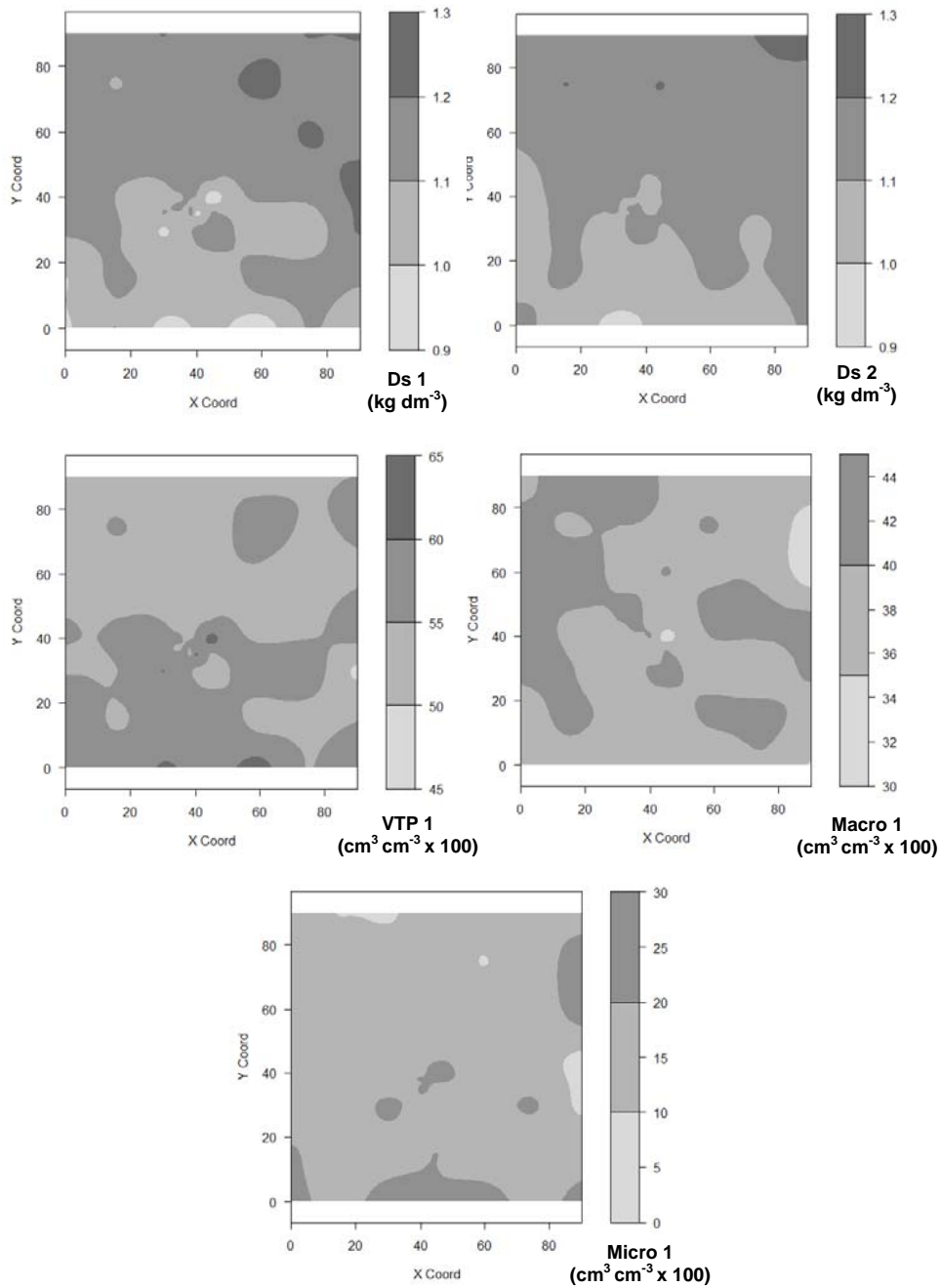


Figura 2. Mapas de krigagem para os atributos físicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo nas camadas de 0-7,5 cm (1) e 7,5-15 cm (2)

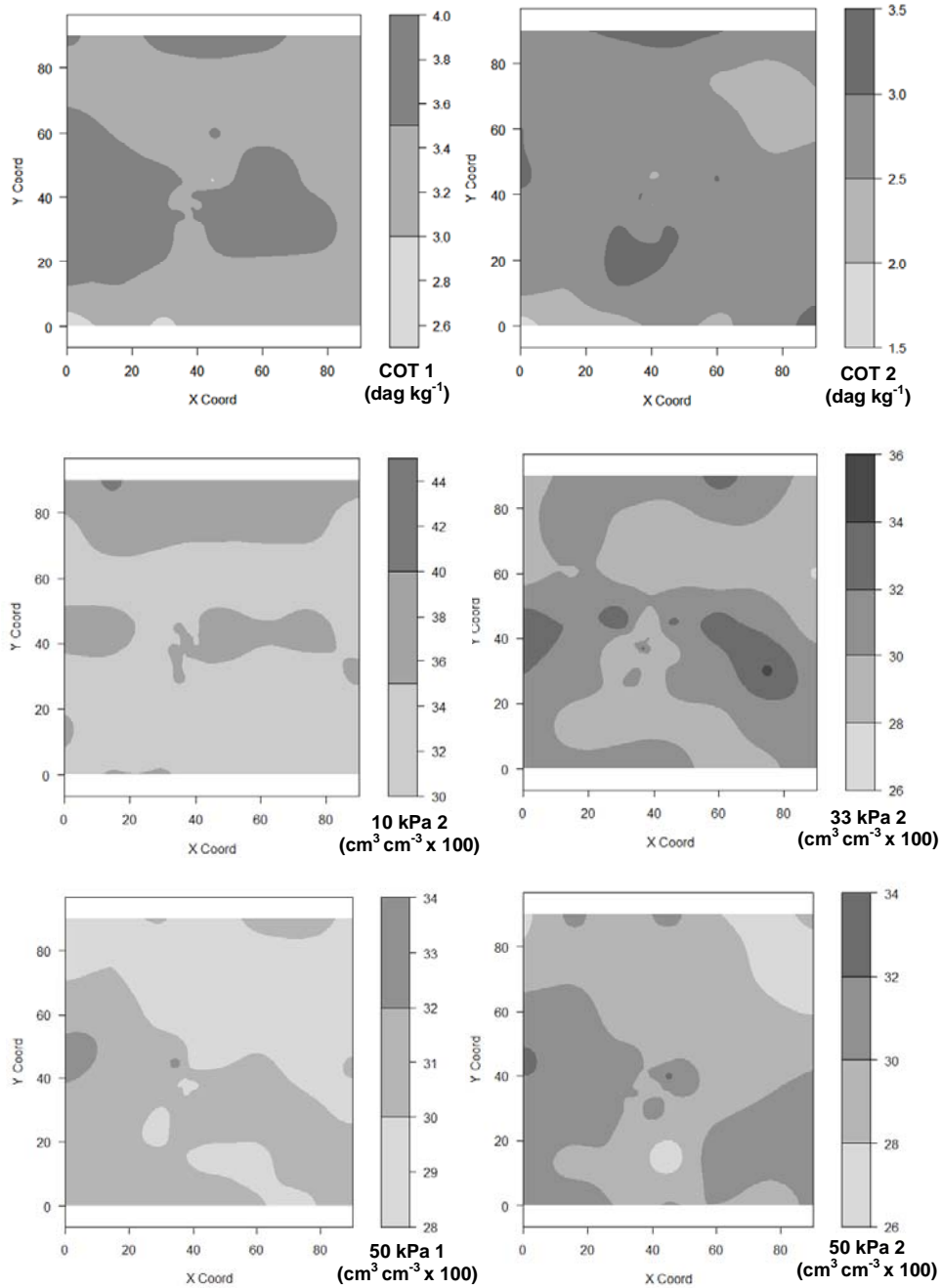


Figura 2. Continuação...

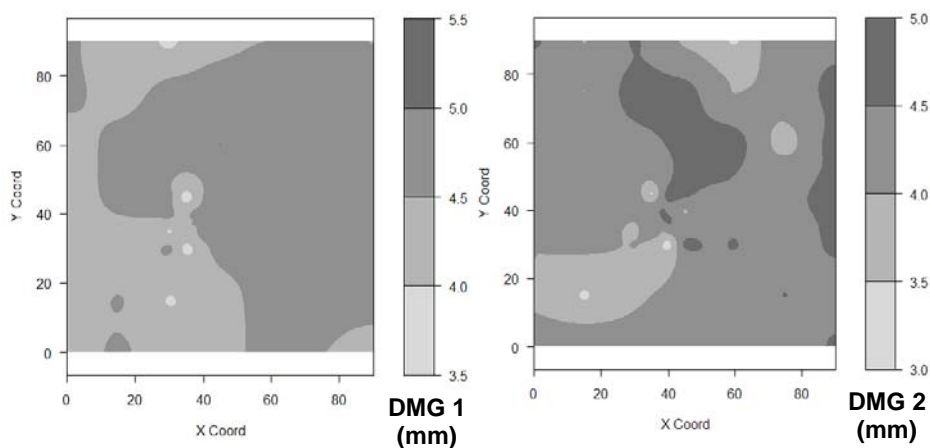


Figura 2. Continuação...

Observando-se os mapas obtidos para a D_s , verifica-se maior estado de compactação da metade ao Norte da área de estudo. Na região onde se executam as manobras do maquinário agrícola, localizada na parte superior direita do mapa, foram verificados os valores mais elevados de D_s .

A distribuição espacial da D_s , nas duas profundidades estudadas, foi semelhante, evidenciando não haver uma distinção clara entre o estado de compactação do solo em profundidade. Os outros atributos que demonstraram estrutura de dependência espacial nas duas camadas (teor de COT e umidade na tensão de 50 kPa) também demonstraram similaridade para as duas camadas, mas não tão clara como para a D_s .

Observa-se ligeira correlação espacial, avaliando-se visualmente, entre o teor de carbono total e a retenção de água no solo, principalmente a 50 kPa. Em relação aos mapas de krigagem para o DMG, não se verificou relação clara com os de carbono orgânico, divergindo de Souza et al. (2004).

CONCLUSÕES

1. Pela estatística descritiva, os atributos físicos estudados demonstraram distribuição normal em quase a sua totalidade e coeficiente de variação baixo, excetuando a macroporosidade, que apresentou variação elevada nas duas camadas.
2. O melhor ajuste efetuado para os semivariogramas dos atributos estudados foi pelo modelo exponencial, em sua maioria, ajustando-se o modelo esférico apenas para o diâmetro médio geométrico dos agregados.
3. A densidade do solo foi o atributo físico que apresentou maior similaridade de distribuição espacial nas duas camadas em estudo.
4. Verificou-se correlação espacial entre os mapas obtidos para o teor de carbono orgânico do solo e umidade em diferentes tensões.

LITERATURA CITADA

ABREU, S. L. de; REICHERT, J.M.; SILVA, V. R. da; REINERT, D. J.; BLUME, E. Variabilidade espacial de propriedades físico-hídricas do solo, da produtividade e da qualidade de grãos de trigo em Argissolo Franco Arenoso sob plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 2, p. 275-282, mar./abr. 2003.

ANDRADE, A. R. S. de; GUERRINI, I. A.; GARCIA, C. J. B.; KATEZ, I.; GUERRA, H. O. C. Variabilidade espacial da densidade do solo sob manejo da irrigação. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 29, n. 2, p. 322-329, mar./abr. 2005.

ANDRIOTTI, J. L. S. **Fundamentos de estatística e geoestatística**. São Leopoldo: Ed. Unisinos, 2003. 165 p.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, Sept./Oct. 1994.

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

CAVALCANTE, E. G. C.; ALVES, M. C.; PEREIRA, G. T.; SOUZA, Z. M. Variabilidade espacial de MO, P, K e CTC do solo sob diferentes usos e manejos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 2, p. 394-400, mar./abr. 2007.

CORÁ, J. E.; BERALDO, J. M. G. Variabilidade espacial de atributos do solo antes e após calagem e fosfatagem em doses variadas na cultura de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 2, p. 374-387, maio/ago. 2006.

CRESSIE, N. **Statistics for spatial data**. New York: J. Wiley, 1991. 900 p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análises de solo**. 2. ed. rev. e atual. Rio de Janeiro: Embrapa-CNPq, 1997. 212p. (Embrapa-CNPq. Documentos, 1).

FERREIRA, D. F. Análises estatísticas por meio do SISVAR para Windows 4.0. In: REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE INTERNACIONAL DE BIOMETRIA, 45., 2000, São Carlos. **Anais ...** São Carlos: UFSCar, 2000. p. 255-258.

GOMES, N. M. **Variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo da sub-bacia do Ribeirão Marcela na região do Alto Rio Grande, MG**. 2005. 125 p. Dissertação (Mestrado Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.

GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo e uma parcela experimental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 1, p.169-177, jan./fev. 2005.

GREMINGER, P. J.; SUD, Y. K.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of field-measured soil- water characteristics. **Soil Science Society American Journal**, v. 49, n. 5, p. 1075-1082, Sept./Oct. 1985.

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 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

KRAEMER, G. B. **Variabilidade espacial dos atributos do solo na delimitação das unidades de mapeamento.** 2007. 101 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

MARCOLAN, A. L.; ANGHINONI, I.; FRAGA, T. I.; LEITE, J. G. D. B. Recuperação de atributos físicos de um Argissolo em função do seu revolvimento e do tempo de semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 3, p. 571-579, maio/jun. 2007.

NOVAES FILHO, J. P. Variabilidade espacial de atributos físicos de solo usada na identificação de classes pedológicas de microbacias na Amazônia meridional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 1, p. 91-100, jan./fev. 2007.

PIMENTEL-GOMES, F. **A estatística moderna na pesquisa agropecuária.** Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1984. 160 p.

RIBEIRO JUNIOR, P. J.; DIGGLE, P. J. GeoR: A package for geostatistical analysis. **R-News**, v. 1, n. 2, p. 15-18, 2001.

SANCHEZ, R. B.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; SOUZA, Z. M. Variabilidades espacial de propriedades de latossolo e da produção de café em diferentes superfícies geomórficas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 3, p. 489-495, set./dez. 2005.

SILVA, A. P. **Variabilidade espacial de atributos físicos do solo.** 1988. 105 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.

SIMÕES, W. L. **Variabilidade espacial da disponibilidade de água e da porosidade drenável em um Latossolo Vermelho distroférico.** 2004. 85 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.

SIQUEIRA, G. M. **Variabilidade de atributos físicos do solo determinados por métodos diversos**. 2006. 163 p. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

SIQUEIRA, G. M.; VIEIRA, S. R.; CEDDIA, M. B. Variabilidade de atributos físicos do solo determinados por métodos diversos. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 1, p. 203-211, 2008.

SOUZA, Z. M. ; MARQUES JUNIOR, J. ; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial da estabilidade de agregados e matéria orgânica em solos de relevos diferentes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 5, p. 491-499, maio 2004.

SOUZA, Z. M.; SILVA, M. L. S.; GUIMARÃES, G. L.; CAMPOS, D. T. S.; CARVALHO, M. P.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo Vermelho distrófico sob semeadura direta em Selvíria (MS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 4, p. 699-707, jul./ago. 2001.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M.; MOREIRA, J. A. A. **Atributos físico-hídricos do solo sob plantio direto**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2006. 39 p. (Embrapa Arroz e Feijão. Documentos, 191).

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.

VERONESE JÚNIOR, 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 and Tillage Research**, Amsterdam, v. 85, n. 1/2, p. 166-177, 2006.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, G. R. (Ed.) **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 1, p. 1-54.

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, p. 319-344, 1980.

WEBSTER, R.; OLIVER, M. **Geostatistics for environmental**. Chichester: J. Wiley, 2001. 271 p.

WEIRICH NETO, P. H.; BORGHI, E.; SVERZUT, C. B.; MANTOVANI, E. C.; GOMIDE, R. L.; NEWES, W. L. de C. Análise multivariada da resistência do solo à penetração sob plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 4, p. 1186-1192, jul./ago. 2006

YEOMANS, J.C.; BREMNER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 19, n.13, p. 1467-1476, 1988.

CAPÍTULO 2 - Variabilidade espacial da umidade de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob plantio direto

(Preparado de acordo com as normas da Revista Engenharia Agrícola)

RESUMO: Este trabalho foi realizado com o objetivo de estudar a variabilidade espacial da umidade de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob plantio direto cultivado com milho. A pesquisa foi conduzida em uma área localizada no município de Lavras (MG). Na avaliação dos atributos do solo foi delineada uma malha experimental com dimensões de 90 x 90 m (0,81 ha de área) e espaçamento entre os pontos de amostragem de 15 x 15 m. Para se obter maior detalhamento da dependência espacial dos dados, realizou-se a implantação de mais duas malhas (zoom) dentro de um quadrante da grande malha, totalizando 73 pontos de leitura. A umidade do solo em base volume ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) foi determinada *in situ*, em duas datas, utilizando-se um aparelho de TDR. Por meio da análise dos dados das duas datas pela Estatística Clássica, observaram-se coeficientes de variação médios para a umidade do solo. Obteve-se um semivariograma com efeito pepita puro quando o solo apresentou-se mais úmido, indicando a ausência total de estruturação nestas condições. Já para o solo mais seco, ajustou-se o modelo exponencial ao semivariograma, o qual mostrou moderada dependência espacial e alcance de 75 m. Verificou-se que a associação entre a umidade do solo e o carbono orgânico aumentou na condição de solo mais seco.

PALAVRAS-CHAVE: Geoestatística, manejo do solo, reflectometria no domínio do tempo.

SPATIAL VARIABILITY OF SOIL MOISTURE CONTENT OF A RED-YELLOW LATOSOL UNDER NO-TILLAGE

ABSTRACT: Whereas the soil moisture varies significantly in space and in time, this study aimed to investigate the spatial and temporal variability of the humidity of a Red-Yellow Latosol under no-tillage cultivated with maize. This research was conducted in an area located in the Lavras city (MG), which was implanted an experimental mesh with dimensions equal to 90 x 90 m (0.81 ha of area) and spacing between points equal to 15 x 15 m . For a more detailed spatial dependence of the data, made up the deployment of two more meshes (zoom) in a quadrant of the great mesh, totaling 73 points in. The soil moisture in base volume ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) was determined on two dates, using a equipment that is based on the technique of Time Domain Reflectometry (TDR). Through the analysis of data from two dates with classical statistical, was observed coefficients of variation average. Was obtained a semivariogram with pure nugget to the soil more wet, indicating a total lack of structuring for soil moisture. For the soil more dry, found that the association between soil moisture and organic carbon increased and fit the exponential model to semivariogram, which showed moderate spatial dependence and range equal to 75 m.

KEYWORDS: Geostatistic, soil management, time domain reflectometry.

INTRODUÇÃO

O sistema plantio direto (SPD) é uma prática de manejo do solo que tem a função de conservar o solo, visando à sustentabilidade da produção agrícola. Este sistema de manejo tem como pilares o mínimo revolvimento do solo, a cobertura vegetal continuada do solo e a rotação de culturas (Stone et al., 2006; Weirich Neto et al., 2006, Reis et al., 2007).

O conhecimento da distribuição espacial dos atributos do solo em determinada área é importante para o refinamento das práticas de manejo e a avaliação dos efeitos da agricultura sobre a qualidade ambiental (Cambardella et al., 1994). Também tem importância na definição da intensidade de amostragem do solo para sua caracterização, possibilitando, dessa maneira, reduzir o erro padrão da média, maximizando a eficiência da amostragem e reduzir os custos e a mão-de-obra (Webster & Oliver, 2001).

A umidade volumétrica do solo (θ) no campo pode ser avaliada por métodos diretos e indiretos. Dentre os métodos diretos, o gravimétrico é considerado altamente confiável e, conseqüentemente, preferido (Teixeira et al., 2003). As principais desvantagens deste método são a grande demanda de trabalho para a amostragem do solo e os procedimentos posteriores no laboratório, uma vez que, por ser um método destrutivo, não permite retirar uma nova amostra no mesmo local, posteriormente. Ultimamente, a técnica da reflectometria no domínio do tempo (TDR) vem sendo amplamente usada como um método indireto não-destrutivo para avaliação de θ .

A umidade do solo apresenta elevada variação no espaço como conseqüência da variabilidade de outras propriedades. O estudo detalhado do seu comportamento é necessário para se saber como ela varia no campo, além de fornecer elementos essenciais ao estabelecimento ou ao aprimoramento de práticas de manejo agrícola que visem à otimização da produtividade (Grego et al., 2006).

A Geoestatística, ferramenta estatística utilizada para estudar a variabilidade espacial, possibilita a interpretação dos resultados com base na estrutura da variabilidade natural dos atributos avaliados, considerando a dependência espacial dentro do intervalo de amostragem (Andriotti, 2003).

Os estudos da variabilidade espacial utilizando a geoestatística têm sido realizados por meio da análise de semivariogramas (Enghball et al., 1999). A

obtenção de semivariogramas representativos depende, fundamentalmente, do número de pares de pontos encontrado em determinada direção, para diferentes distâncias (Webster & Oliver, 2001).

Grego et al. (2006), estudando um Latossolo Vermelho eutrófico sob plantio direto, citam que a dependência espacial é mais fraca quando se têm valores mais baixos de umidade do solo. Já Veronese Júnior et al. (2006) observaram que, próximo da capacidade de campo, os semivariogramas mostram efeito pepita puro para a umidade do solo, a qual depende da distribuição espacial dos macro e dos microporos.

Na realização deste trabalho, objetivou-se aplicar técnicas da Estatística Clássica e da Geoestatística para estudar a variabilidade espacial da umidade do solo de um Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado com milho sob plantio direto, em duas datas de amostragem.

MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada no sítio Olho D'água, localizado no município de Lavras (MG), em uma área de cultivo de milho, como cultura principal, manejado com o sistema de plantio direto desde outubro de 1998, envolvendo cobertura de inverno. A propriedade possui 27 ha de área total, localizando-se a 21°16'15'' de latitude Sul e 44°57'22'' de longitude Oeste.

O tipo climático da região é Cwb, segundo a classificação de Köppen, com chuvas concentradas entre novembro e março. O solo onde a malha experimental foi instalada, classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) com textura argilosa, encontra-se na área mais plana da propriedade, a 950 m de altitude.

O manejo de plantas daninhas foi realizado com o auxílio dos herbicidas glifosate, aplicado em pós-colheita, anteriormente ao plantio do milho e atrazina, aplicado em pós-emergência, entre 15 a 20 dias após o plantio. As culturas

escolhidas para a cobertura de inverno, após três anos de testes com várias espécies, foram o nabo forrageiro e o tremço-branco, pois estas apresentaram melhor associação entre si e maior adaptabilidade às condições edafoclimáticas da propriedade.

A grande malha experimental apresenta dimensões iguais a 90 x 90 m (0,81 ha de área). O espaçamento entre os pontos de leitura adotados foi de 15 x 15 m, com um subtotal de 49 pontos. Para obter maior detalhamento da dependência espacial dos dados, foram implantadas mais duas malhas (zoom) dentro de um quadrante da grande malha, escolhido por meio de sorteio, excetuando aqueles das bordas (Figura 1). Os espaçamentos utilizados para as malhas do zoom foram de 5 x 5 m e 1,67 x 1,67 m, totalizando mais 24 pontos de leitura no total.

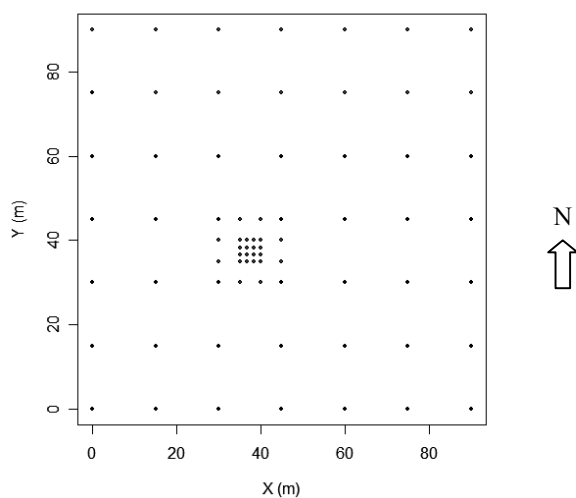


FIGURA 1. Grid de amostragem utilizado para a obtenção da umidade do solo.

Para a determinação da umidade do solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), utilizou-se a constante dielétrica (k_a), obtida por um aparelho que utiliza a técnica da reflectometria no domínio do tempo (TDR) da Soilmoisture, modelo Trase

System II. A sonda de leitura apresenta 15 cm de comprimento com duas hastes não-segmentadas. O TDR foi calibrado para a obtenção dos valores de umidade no solo estudado, conforme metodologia utilizada por SOUZA et al. (2006), sendo as medidas realizadas nos dias 13 de abril e 19 de maio de 2007.

Em cada ponto de amostragem, foram retiradas amostras de solo deformadas e indeformadas, em duas profundidades (0-7,5 cm e 7,5-15 cm). Estas amostras destinaram-se à determinação dos teores de carbono orgânico do solo e da macro e microporosidade, atributos que apresentam elevada influência no armazenamento de água no solo.

Os dados foram analisados no programa Sisvar v 4.3, utilizando-se a Estatística Clássica para descrever adequadamente a tendência central e avaliar a hipótese de normalidade dos dados (Ferreira, 2000). Foi realizada também a análise de correlação entre os atributos estudados, com auxílio do software SAEG versão 9.0.

A dispersão dos dados e a variabilidade espacial foram analisadas usando a Geoestatística, por meio de parâmetros obtidos pelo programa GeoR v. 2.4.1 (Ribeiro Jr. & Diggle, 2001) do software R. Os modelos de semivariograma que apresentaram menor soma de quadrados pelo método dos mínimos quadrados ordinários foram os utilizados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 é apresentado o resultado do resumo estatístico da análise do comportamento da umidade do solo. Observa-se que os valores de umidade do solo apresentaram assimetria e curtose compatíveis com a distribuição normal somente para a primeira data de amostragem. Valores próximos de zero para assimetria e de três para a curtose, a qual mede o grau de achatamento, caracterizam a distribuição normal de frequências (Ferreira, 2000).

TABELA 1. Parâmetros estatísticos para a umidade do solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$).

Data	Média	Desvio padrão	CV (%)	Máximo	Mínimo	AS	K
13/04/2007	0,310	3,14	10,1	0,393	0,239	0,01	2,88
19/05/2007	0,191	2,44	12,8	0,257	0,145	0,85	3,21

CV = coeficiente de variação, AS = assimetria, K = curtose.

Em relação aos coeficientes de variação, nas duas datas, foram observados valores dentro do intervalo de 10% a 20%, os quais são considerados médios, segundo Pimente-Gomes (1984).

Deve-se salientar que a Estatística Clássica avalia os dados considerando a variável independente espacialmente, por isso ela deve ser usada com cautela se os dados apresentarem estrutura de dependência espacial. Se esta dependência ocorrer, verificada pela Geoestatística, a interpretação dos dados pela Estatística Clássica fica tendenciosa.

Os semivariogramas obtidos para as umidades volumétricas nas duas datas encontram-se nas Figuras 2a e 2b. Observa-se o efeito pepita puro para a primeira amostragem (Figura 2a), que resulta em atribuir os mesmos pesos a todos os pontos de amostragem, ou seja, pontos mais próximos não têm maior influência no valor estimado, o que se resume em desconsiderar a correlação espacial (Andriotti, 2003). Já para a condição de solo mais seco, ajustou-se o modelo exponencial ao semivariograma obtido por meio dos dados, indicando que a variabilidade espacial da umidade é dependente da magnitude dos seus valores, em função das condições pluviométricas da época de amostragem (Figura 2b).

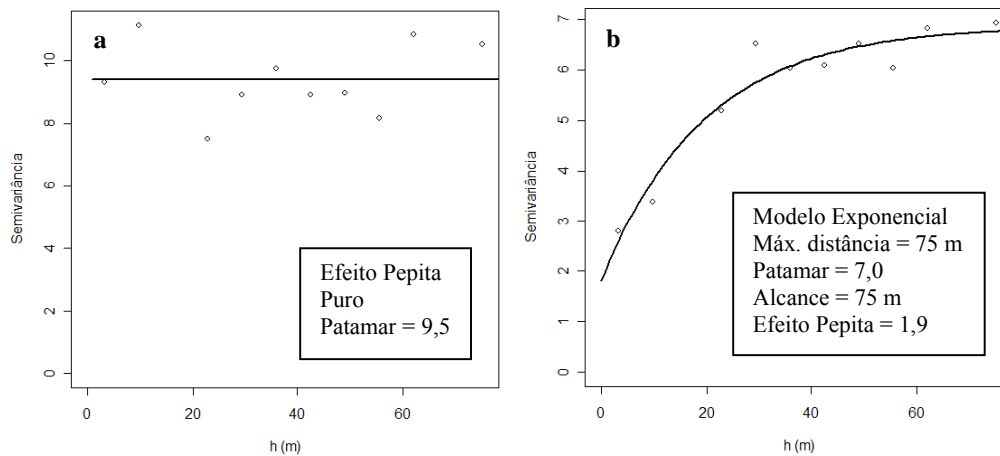


FIGURA 2. Semivariogramas para os dados de umidade do solo ajustados por meio dos mínimos quadrados ordinários (a- 13/04/2007; b- 19/05/2007).

O efeito pepita puro indica a ausência total de estruturação do fenômeno estudado (Andriotti, 2003). Nessa situação, os resultados obtidos pela Geoestatística serão os mesmos indicados pela Estatística Clássica, a qual assume que as variações das características do solo dentro das unidades amostrais não são correlacionadas e que o valor médio constitui o melhor estimador das mesmas em qualquer local da unidade amostral.

Grego et al. (2006) não verificaram dependência espacial para a umidade do solo de amostras coletadas a 30 e 90 cm de profundidade, em um Latossolo Vermelho eutroférico sob plantio direto, ressaltando que a densidade de amostragem pode ter sido insuficiente para expressar a variabilidade espacial destas amostras. No entanto, Souza et al. (2005), trabalhando em um Latossolo Vermelho eutroférico sob cultivo de cana-de-açúcar, encontraram forte dependência espacial para a umidade do solo na profundidade de 0 a 0,2 m. Resultados semelhantes aos de Souza et al. (2005) foram encontrados por Grego & Vieira (2005), em estudos realizados em um Latossolo Vermelho sob preparo convencional. As diferenças, em relação ao presente trabalho, no comportamento das observações da umidade do solo, podem estar relacionadas

às diferenças existentes no ambiente edáfico dos sistemas de manejo adotados nas áreas estudadas.

A ausência de estrutura de dependência espacial encontrada neste trabalho para a primeira data também pode estar associada aos elevados valores de umidade obtidos na área estudada (média igual a $0,31 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), pois as leituras foram executadas três dias após a ocorrência de uma precipitação pluviométrica acumulada de 70 mm, medida por meio de um pluviômetro instalado na propriedade. Dessa maneira, encontra-se maior homogeneidade nos valores de umidade do solo, evidenciada pelo menor CV (Tabela 1), pois os atributos do solo, tais como a microporosidade e teor de matéria orgânica, ainda não se expressaram sobre a retenção de água do solo. Porém, por não existir estrutura, a previsibilidade do fenômeno fica dificultada.

Segundo a classificação de Cambardella et al. (1994), o grau de dependência espacial verificado para a condição de solo mais seco, obtido através da relação entre o efeito pepita e o patamar, demonstrou moderada dependência espacial para o semivariograma estudado (valor igual a 73%), com alcance igual a 75 m. Grego et al. (2006) também obtiveram semivariogramas com moderada dependência espacial para todas as épocas estudadas nas amostragens a 60 cm de profundidade em área sob plantio direto, com alcance de 90 a 110 m.

O estudo dos semivariogramas para teor de carbono orgânico do solo, macro e microporosidade está apresentado na Tabela 2. Observa-se que a microporosidade na camada de 0-7,5 cm foi o atributo que demonstrou parâmetros geoestatísticos mais próximos dos encontrados para a umidade do solo mais seco, com alcance igual a 84 m e moderada dependência espacial. O teor de carbono orgânico do solo na camada de 7,5-15 cm também apresentou moderada dependência espacial dos dados.

TABELA 2. Valores do efeito pepita (C_0), patamar (C_0+C_1), alcance (a) e classificação dos modelos ajustados para teores de carbono orgânico do solo (COT), macro e microporosidade

Profundidade (cm)	Atributo	Modelo	C_0	C_0+C_1	a (m)	Dependência espacial
0-7,5	COT	Exponencial	0,042	0,059	12,8	Moderada
	Macro	Exponencial	15,530	20,340	39,6	Fraca
	Micro	Exponencial	3,32	8,93	84	Moderada
7,5-15	COT	Exponencial	0,024	0,073	38,7	Moderada
	Macro	EPP	-	17,24	-	-
	Micro	EPP	-	3,45	-	-

EPP = Efeito pepita puro

Os dados apresentam, em sua maior parte, distribuição espacial aleatória, indicando elevada variabilidade do solo para esses atributos. Verificou-se ausência de dependência espacial para a macro e a microporosidade do solo, na camada de 7,5-15 cm. As causas adicionais de variabilidade das propriedades físicas nos cultivos conservacionistas, como falta de revolvimento do solo e tráfego aleatório do maquinário agrícola, podem ser apontadas como fatores condicionantes desse comportamento.

Por meio da interpolação dos pontos por meio da krigagem, obtiveram-se os mapas temáticos com legenda para a umidade do solo na segunda data de amostragem, macro e microporosidade na camada de 0-7,5 cm e teor de carbono orgânico do solo nas duas camadas (Figura 3). Estes mapas facilitam a visualização da distribuição espacial das variáveis e auxiliam no planejamento do manejo da área.

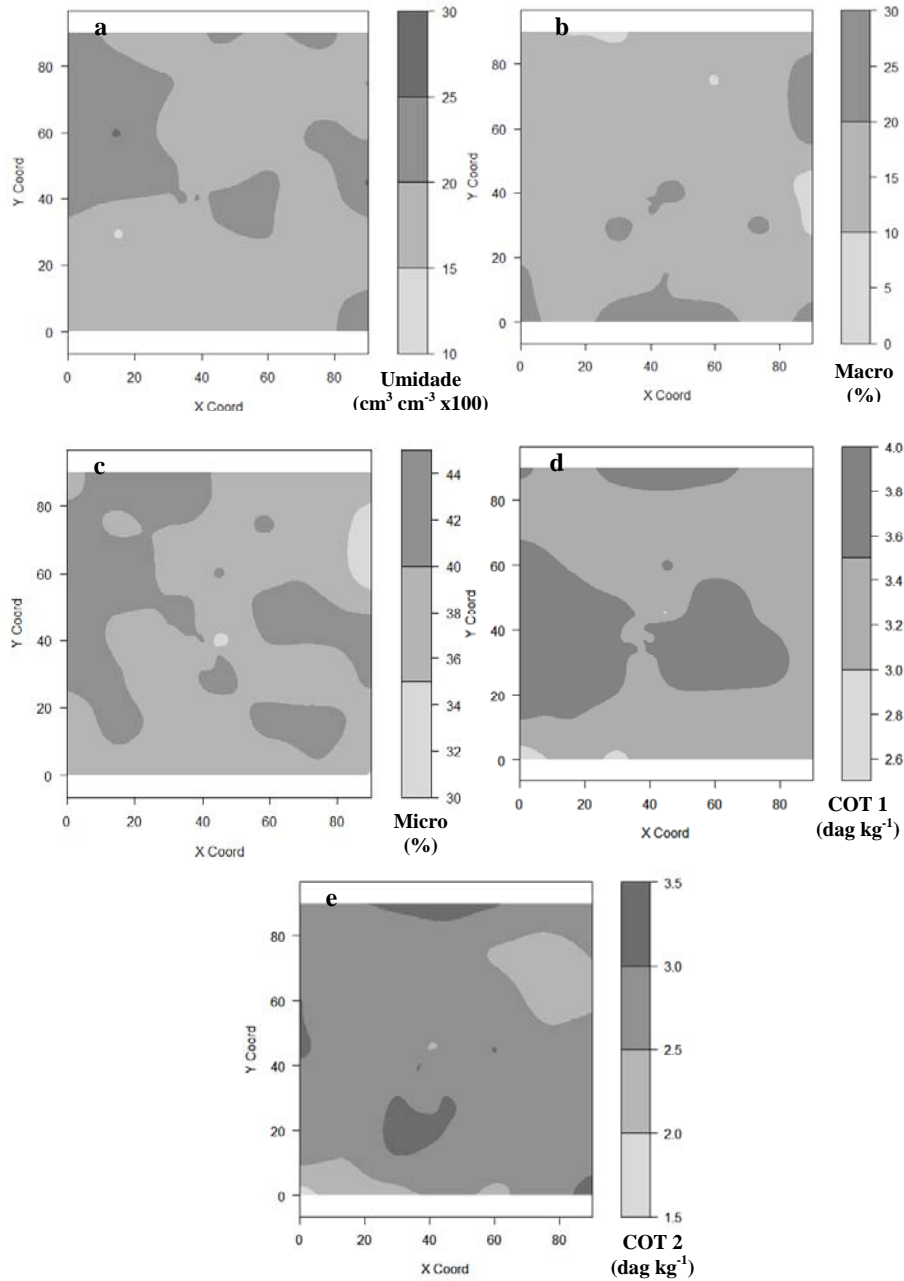


FIGURA 3. Mapas de krigagem para a umidade do solo (a), macroporosidade 0-7,5 cm (b), microporosidade 0-7,5 cm (c) e teor de carbono orgânico do solo, nas camadas de 0-7,5 (d) e 7,5-15 cm (e).

Verifica-se a predominância de valores mais elevados de umidade do solo na região superior esquerda da área estudada, coincidindo com pontos de maior microporosidade. Os elevados valores nas outras regiões podem estar associados também a outros atributos, como o teor de matéria orgânica.

Os coeficientes de correlação entre os valores de umidade do solo e os teores de carbono orgânico, macro e microporosidade, nas camadas de 0-7,5 cm e 7,5-15 cm, encontram-se na Tabela 3.

TABELA 3. Coeficientes de correlação para a umidade do solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) com outros atributos físicos do solo, nas duas profundidades amostradas.

Data	0 – 7,5 cm			7,5 – 15 cm		
	COT	Macro	Micro	COT	Macro	Micro
13/04/2007	-0,04	0,21	-0,12	-0,01	0,09	-0,02
19/05/2007	0,17	-0,07	0,01	0,25	-0,15	0,09

COT = teor de carbono orgânico total; Macro = macroporosidade; Micro = microporosidade.

Na condição de solo mais úmido (13/04/2007), o atributo que mais se associou com a retenção de água foi a macroporosidade, enquanto que, para o solo mais seco, os teores de carbono orgânico foram mais relevantes. Quando a umidade do solo apresenta-se abaixo da capacidade de campo, a capilaridade é a força que predomina na retenção de água no solo (Ferreira & Dias Júnior, 1997). Nota-se uma tendência de aumento da correlação entre umidade do solo, teores de carbono orgânico do solo e microporosidade, à medida que o solo se torna mais seco. Esta maior associação se justifica, pois a matéria orgânica e os microporos apresentam elevada capacidade de reter água. Portanto, quando o solo passa para um estado mais seco, as regiões com maior concentração de matéria orgânica e de microporos tendem a apresentar maiores valores de umidade.

CONCLUSÕES

A presença da estrutura de dependência espacial da umidade do solo está associada às condições de umidade do solo, não sendo detectada dependência no período mais úmido.

Na condição de solo mais seco, observou-se moderada dependência espacial para a umidade do solo, com alcance igual a 75 m.

REFERÊNCIAS

- ANDRIOTTI, J. L. S. **Fundamentos de estatística e geoestatística**. São Leopoldo: Ed. Unisinos, 2003. 165 p
- CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, Sept./Oct. 1994.
- ENGBALL, B.; HERGERT, G. W.; LESOING, G. W.; FERGUSON, R. B. Fractal analysis of spatial and temporal variability. **Geoderma**, Amsterdam, v. 88, p. 349-362, 1999.
- FERREIRA, D. F. Análises estatísticas por meio do SISVAR para Windows 4.0. In: REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE INTERNACIONAL DE BIOMETRIA, 45., 2000, São Carlos. **Anais ...** São Carlos: UFSCar, 2000. p. 255-258.
- FERREIRA, M. M.; DIAS JÚNIOR, M. S. **Física do solo**. Lavras: UFLA/FAEPE, 1997. 63 p.
- GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo e uma parcela experimental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 1, p.169-177, jan./fev. 2005.
- GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R.; ANTONIO, A. M.; DELLA ROSA, S. C. Geostatistical analysis for soil moisture content under the no tillage cropping system. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 63, n. 4, p. 341-350, jul/ago. 2006.
- PIMENTEL-GOMES, F. **A estatística moderna na pesquisa agropecuária**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1984. 160 p.

REIS, G. N.; FURLANI, C. E. A.; SILVA, R. P.; GERLACH, J. R.; CORTEZ, J. W.; GROTTA, D. C. C. Decomposição de culturas de cobertura no sistema plantio direto, manejadas mecânica e quimicamente. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 1, p.194-200, jan./abr. 2007.

RIBEIRO JUNIOR, P. J.; DIGGLE, P. J. GeoR: A package for geostatistical analysis. **R-News**, v. 1, n. 2, p. 15-18, 2001.

SOUZA, C. F.; FOLEGATTI, M. V.; MATSURA, E. E.; OR, D. Calibração da reflectometria no domínio do tempo (TDR) para a estimativa da concentração da solução no solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 1, p. 282-291, jan./abr. 2006.

SOUZA, Z. M. de; CAMPOS, M. C. C.; CAVALCANTE, I. H. L.; MARQUES JÚNIOR, J.; CESARIN, L. G.; SOUZA, S. R. de. Dependência espacial da resistência do solo à penetração e do teor de água do solo sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n.1, p. 128-134, jan./fev. 2006.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M.; MOREIRA, J. A. A. **Atributos físico-hídricos do solo sob plantio direto**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2006. 39 p. (Embrapa Arroz e Feijão. Documentos, 191).

TEIXEIRA, W. G.; SCHROTH, G.; MARQUES, J. D. & HUWE, B. Sampling and TDR probe insertion in the determination of the volumetric soil water content. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 3, p. 575-582, maio/jun. 2003.

VERONESE JÚNIOR, 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 and Tillage Research**, Amsterdam, v. 85, n. 1/2, p. 166-177, 2006.

WEBSTER, R.; OLIVER, M. **Geostatistics for environmental scientists**. Chichester: J. Wiley, 2001. 271 p.

WEIRICH NETO, P. H.; BORGHI, E.; SVERZUT, C. B.; MANTOVANI, E. C.; GOMIDE, R. L.; NEWES, W. L. de C. Análise multivariada da resistência do solo à penetração sob plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 4, p. 1186-1192, jul./ago. 2006

CAPÍTULO 3 – Atributos físicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo submetido a diferentes sistemas de manejo

(Preparado de acordo com as normas da Revista Brasileira de Ciência do Solo)

RESUMO

O conhecimento das alterações dos atributos físicos de um solo em diferentes manejos é importante para o uso e o manejo sustentável do mesmo. Neste trabalho, objetivou-se verificar o comportamento dos atributos físicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo textura argilosa, submetido a diferentes sistemas de manejo. O estudo foi realizado em uma área com diferentes sistemas de manejo, localizada no município de Lavras (MG). O solo estudado foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) textura argilosa. Os sistemas de manejo consistiram de plantio direto (PD), implantado há dez anos com rotação de culturas, tendo o milho como cultura principal; preparo convencional do solo cultivado com milho (PC), com uma aração e gradagem anual, durante nove anos e mata nativa (MT), a qual serviu de testemunha. Foram coletadas, em cada uma das áreas, amostras de solo nas camadas de 0-7,5 cm e 7,5-15 cm, sendo dez amostras por camada. Na camada mais superficial (0-7,5 cm), verificou-se maior estado de compactação para o PD, sendo observados valores mais elevados de densidade do solo e mais baixos de macroporosidade. Para o teor de carbono orgânico do solo, não foi detectada diferença entre o PD e a MT, na camada de 0-7,5 cm, tendo o PD apresentado valores, em média, 21,4% e 7,2% superiores ao PC, para as camadas de 0-7,5 cm e 0-15 cm, respectivamente. O solo sob PD demonstrou-se, em geral, próximo da condição preservada, apresentando produção de grãos superior ao PC.

Termos de indexação: Manejo do solo, geoestatística, física do solo.

SUMMARY: *PHYSICAL ATTRIBUTES OF A RED-YELLOW LATOSOL UNDER DIFFERENT MANAGEMENT SYSTEMS.*

The knowledge of changes in the physical attributes of soil in different management is important for the sustainable use and management of soil. In this

work, it was aimed to evaluate the behaviour of physical attributes of a Red-Yellow Latosol clayey texture, submitted to different management systems. The study was conducted in an area with different management systems, located in the city of Lavras (MG). The soil study was classified as Red-Yellow Latosol clayey texture. The management systems consisted of no-tillage (PD), established ten years ago with rotation of crops having the maize as main crop, conventional tillage of maize (PC), with an annual plowing plus disking, for nine years, and native forest (MT), used as reference. Were collected, in each area, samples of soil under layers of 0-7.5 cm and 7.5-15 cm, being ten samples per layer. In the most superficial layer (0-7.5 cm), there was a greater state of compaction in the PD, being observed higher values for density of soil and lower values for macroporosity. For the organic carbon content of soil, no difference was found between the PD and MT in the layer of 0-7,5 cm, and the PD values presented, on average, 21.4 and 7.2 % higher than the PC to the layers of 0-7.5 cm and 0-15 cm, respectively. The soil under PD has, in general, behavior near the preserved condition, giving grain yield higher than the PC. Index terms: No-tillage, soil quality, soil physical, maize, organic matter.

INTRODUÇÃO

As propriedades físicas do solo são fortemente influenciadas pelo sistema de manejo, servindo como indicador da sua qualidade física (D'Andréa et al., 2002). Essas propriedades podem sofrer alterações permanentes ou temporárias, evoluindo para condições positivas ou negativas ao crescimento e à produtividade das plantas (Bertol et al., 2001).

O revolvimento do solo empregado pelos métodos convencionais de manejo aumenta a porosidade total da camada trabalhada, mas também acelera a decomposição da matéria orgânica do solo, a qual é considerada um importante atributo na avaliação da qualidade de um sistema de manejo (Doran & Parkin, 1994). Sistemas conservacionistas, como o plantio direto, têm sido propostos como formas de manejo sustentável do solo, com menor revolvimento e manutenção da cobertura do solo, resultando em aumento dos teores de matéria

orgânica no solo (Castro Filho et al., 1998; Silva et al., 2000). Este aumento é mais acentuado nas camadas superficiais (Silva et al., 2006).

Existe forte correlação positiva entre os teores de matéria orgânica do solo e os agregados estáveis em água (Corrêa, 2002). Assim, a degradação da matéria orgânica, decorrente do uso intensivo e do revolvimento do solo, tem efeito negativo na estabilidade de agregados (Bayer & Mielniczuk, 1999). Nesse contexto, Bertol et al. (2004) observaram que, na média das camadas estudadas, o teor de matéria orgânica e a estabilidade de agregados foram maiores no plantio direto e no campo nativo do que nos preparos convencionais.

Na maioria dos sistemas de plantio direto, principalmente nos primeiros anos após a implantação, verifica-se maior estado de compactação do solo devido à ausência quase completa do revolvimento do solo (Araujo et al., 2004; Bertol et al., 2004; Weirich Neto et al., 2006). A compactação reduz o volume total (Stone et al., 2006) e altera a distribuição do tamanho dos poros do solo (Klein & Libardi, 2002). Como consequência, observam-se maiores valores de densidade do solo e redução do volume de macroporos. Essas mudanças podem afetar negativamente o desenvolvimento das raízes, sendo o volume mínimo de macroporos, para uma boa condição de aeração para as raízes, de 10% (Tormena et al., 2004).

Beutler et al. (2005) citam que, ao contrário da resistência à penetração, a densidade do solo não depende da umidade do solo, sendo assim mais utilizada como um parâmetro para monitorar a compactação de um determinado tipo de solo, definindo níveis a partir dos quais o solo se encontra compactado e necessita de medidas curativas. Mas, para se comparar diferentes solos e manejos, a densidade do solo não pode ser diretamente utilizada, pois essa varia em função da forma e da distribuição do tamanho e do arranjo das suas partículas (Kiehl, 1979, Håkansson & Lipiec, 2000). A densidade relativa do solo (D_r) é considerada um bom indicativo do estado de compactação, sendo

obtida por meio da relação entre a densidade do solo e a densidade máxima do solo encontrada pelo ensaio de Proctor (Klein, 2006).

O maior estado de compactação na semeadura direta verifica-se próximo aos 0,10 m de profundidade (Genro Junior et al., 2004), principalmente em virtude do confinamento das pressões resultantes do tráfego de máquinas. Em algumas áreas de plantio direto, tem sido utilizado o revolvimento por meio da escarificação mecânica superficial, antes da semeadura da safra de verão (Tormena et al., 2004; Fidalski et al., 2006). Essa intervenção é necessária devido à menor eficiência do sistema radicular das culturas em sucessão. Por outro lado, a rotação de culturas, planejada com a inclusão de espécies como aveia e nabo forrageiro, cultivadas no inverno, pode ser indicada como alternativa para a manutenção da qualidade física do solo.

No plantio direto, a compactação pode não afetar o desenvolvimento e a distribuição do sistema radicular, em função da melhor qualidade dos poros que, embora menores, apresentam-se mais contínuos ao longo do perfil (Henklain et al., 1996). Os canais e as galerias formados pela atividade biológica e a decomposição das raízes das culturas anteriores induzem a melhores condições estruturais (Tavares Filho et al., 2001).

Muitos trabalhos têm evidenciado que, em função do maior estado de compactação e do maior acúmulo de matéria orgânica, no plantio direto, o conteúdo de água do solo é maior do que em áreas cultivadas com preparo convencional (Lal, 1974; Vieira, 1981; Sidiras et al., 1983). De maneira geral, os sistemas de preparo que provocam maior revolvimento do solo propiciam maiores tensões da água no solo, indicando menor disponibilidade para a cultura (Stone & Silveira, 1999). Vieira & Muzilli (1984) citam que a maior disponibilidade de água no plantio direto também está relacionada à menor temperatura e à maior cobertura superficial.

Embora muito difundido na região Sul do Brasil, existe uma carência de estudos sobre a utilização do plantio direto nas demais regiões brasileiras que, apesar de não apresentarem condições climáticas adequadas para este sistema de manejo, podem ser beneficiadas com a melhoria dos atributos do solo.

Com a realização deste trabalho, objetivou-se avaliar os atributos físicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo textura argilosa, submetido a diferentes sistemas de manejo, com ênfase no plantio direto.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em uma área com diferentes sistemas de manejo, localizada na cidade de Lavras (MG), sob coordenadas 21°16'15'' de latitude Sul e 44°57'22'' de longitude Oeste. O tipo climático da região é Cwb, segundo a classificação de Köppen, com excesso de chuva de novembro a março.

O solo das áreas estudadas, as quais são adjacentes, foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo textura argilosa, encontrando-se em uma região mais plana do relevo, à altitude de 960 m.

Os sistemas de manejo consistiram de plantio direto (PD), implantado há dez anos com rotação de culturas, tendo o milho como cultura principal; preparo convencional do solo cultivado com milho (PC), com uma aração e gradagem anual, durante nove anos e mata nativa (MT), a qual serviu de testemunha.

A área manejada com plantio direto foi implantada em outubro de 1998. O manejo de plantas daninhas foi realizado com o auxílio dos herbicidas glifosate, aplicado antes do plantio do milho e após a colheita e atrazina, aplicado em pré-emergência, entre 15 a 20 dias após o plantio. As culturas escolhidas para a cobertura de inverno, após três anos de testes com várias espécies, foram o nabo forrageiro e o tremoço-branco, pois estas apresentaram

melhor associação entre si e maior adaptabilidade às condições edafoclimáticas da propriedade. Apenas o tremço-branco exigiu novos plantios anuais, realizando-se a semeadura de 25 kg ha⁻¹ em cada inverno, após a aplicação de glifosate, acompanhando o espaçamento da cultura do milho (0,8 m entre linhas). O último plantio do milho antes da coleta das amostras foi realizado em 2006, com o híbrido simples Pioneer 30F33. A colheita foi realizada com colhedora automotriz, na primeira semana de março de 2007.

Na área sob preparo convencional, foram efetuadas operações de aração e gradagem no solo, antes do cultivo do milho, sendo os resíduos da cultura roçados e depositados sobre o solo após a colheita. Anteriormente à implantação deste manejo, a área destinava-se ao plantio de café.

A coleta do solo foi realizada nos meses de março e abril de 2007, após a colheita do milho (safra 2006/2007). Em cada área, foram escolhidos dez pontos, aleatoriamente, para a coleta de amostras deformadas e indeformadas, em duas profundidades (0-7,5 cm e 7,5-15 cm). Adotou-se distância mínima de dez metros entre as amostras.

Com as amostras indeformadas, determinou-se a densidade do solo (Ds) pelo método do anel volumétrico, obtendo-se também o volume total de poros (VTP), a macro e a microporosidade (Embrapa, 1997).

Os torrões de solo coletados foram desmanchados manualmente, tomando-se o cuidado de não destruir os agregados, sendo tamisados a seguir, em peneiras de 8 mm e 4 mm, colocadas em seqüência. Os agregados retidos na menor peneira foram selecionados e submetidos à análise laboratorial via úmida, para a determinação da estabilidade dos agregados, expressa pelo diâmetro médio geométrico dos agregados (DMG). Para verificar a diferença entre os tratamentos com cultivo e a mata nativa, calculou-se o índice de sensibilidade (Is) sugerido por Bolinder et al. (1999). Este índice utiliza o princípio da comparação relativa entre tratamentos e a testemunha, sendo obtido pela razão

entre o DMG de um determinado manejo pelo DMG da referência (MT). Um valor de I_s maior do que a unidade (um) significa que a estabilidade dos agregados aumentou e, quando menor, diminuiu.

No estudo da retenção de água no solo, foram utilizadas amostras deformadas de solo, passadas em peneira com 2 mm de abertura, determinando-se a umidade do solo submetido a três tensões diferentes (0,50, 0,33 e 0,10 atm), utilizando-se o extrator de placa porosa de Richards. As amostras de solo foram colocadas em contato direto com a placa porosa, alocadas dentro de cilindros de PVC. Todas as amostras, após serem preparadas, foram saturadas diretamente na placa porosa, por 24 horas e submetidas à sucção desejada posteriormente.

Para melhor caracterizar o estado de compactação do solo, procedeu-se ao estudo da densidade relativa do solo (D_r). A densidade máxima do solo (D_s máx), obtida para o cálculo da D_r , foi determinada com as amostras deformadas coletadas nas duas camadas estudadas e passadas em peneira de 4,0 mm. Para tal, utilizou-se o teste Proctor normal, com reuso de material (Nogueira, 1998). A D_r foi calculada por meio da relação entre a D_s e a D_s máx, sendo obtida para cada camada, em cada sistema de manejo estudado.

A densidade de partículas foi determinada pelo método do balão volumétrico, por meio da relação entre a massa de solo seco e o volume ocupado pelos sólidos do solo seco (Embrapa, 1997). Já a textura foi obtida pelo método da pipeta, de acordo com descrição obtida em Embrapa (1997), com separação da areia em peneiras com abertura de 0,053mm e secagem em estufa da suspensão de argila coletada com pipeta, descontando-se o peso de hidróxido de sódio presente na amostra.

O teor de carbono orgânico nas amostras foi determinado pelo método proposto por Yeomans & Bremner (1988), cujo princípio é a oxidação a quente com dicromato de potássio e titulação do dicromato remanescente com sulfato ferroso amoniacal.

Os dados foram avaliados estatisticamente, mediante análise de variância e teste de Tukey, a 5%, com auxílio do software Sisvar versão 4.3 (Ferreira, 2000). Foi realizada também a análise de correlação entre os atributos estudados, com auxílio do software SAEG versão 9.0.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O teor de carbono orgânico do solo (COT) foi inferior para o PC em relação aos outros manejos na camada mais superficial (Figura 1). Isto revela a acentuada vantagem da semeadura direta na incorporação do carbono ao solo em relação ao preparo convencional do solo (Bertol et al., 2004).

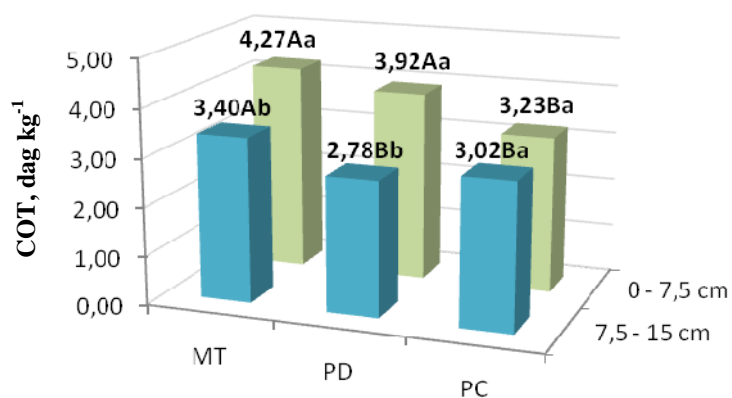


Figura 1. Teor de carbono orgânico de um Latossolo Vermelho-Amarelo em diferentes manejos (MT = mata nativa; PD = plantio direto; PC = preparo convencional do solo) - Médias seguidas de mesma letra maiúscula não apresentam diferença significativa para os tipos de manejo e médias seguidas de mesma letra minúscula não diferenciam significativamente em relação à profundidade (Teste de Tukey, a 5%).

Silva et al. (2006) também observaram que, na camada superficial, os teores de COT foram semelhantes para o campo nativo e PD, e maiores em comparação ao PC e ao plantio reduzido.

No entanto, na camada inferior de 7,5-15 cm, não foi constatada diferença significativa entre os valores médios de COT para o PD e PC. Este comportamento deve estar associado ao revolvimento do solo no PC, ocasionando o processo de inversão das camadas (Bertol et al., 2004). Isto também é justificado pelo fato de somente no PC não terem sido obtidos valores médios de COT diferentes entre as duas camadas estudadas.

Em comparação ao PC, verificou-se que o teor de COT no PD foi, em média, 21,4% maior na camada de 0-7,5 cm. Considerando as duas camadas estudadas (0-15 cm), constatou-se que o PD obteve valor médio 7,2% maior que o PC.

Bayer et al. (2002) observaram que, comparado à mata, o solo sob preparo convencional apresentou 36% ($46,2 \text{ Mg ha}^{-1}$) menos COT na camada de 0-25 cm, bem como um decréscimo generalizado no estoque de C, em todas frações da MO na camada de 0-2,5 cm. Os mesmos autores citam que, no plantio direto, durante 10 anos, houve aumento de, aproximadamente, 20% ($16,1 \text{ Mg ha}^{-1}$) na camada de 0-2,5 cm, comparado com o preparo convencional do solo.

Com relação à estabilidade dos agregados em água, para a profundidade de 0-7,5 cm, o PD revelou DMG semelhante ao da MT, sendo os menores valores obtidos no PC (Quadro 1). O cultivo intensivo, aliado à alta taxa de revolvimento do solo no PC, destrói os agregados e promove uma aceleração na decomposição da matéria orgânica, influenciando os valores de DMG (Castro Filho et al., 1998).

Quadro 1. Diâmetro médio geométrico dos agregados (DMG) e umidade do solo em três tensões diferentes (10, 33 e 50 kPa), para o Latossolo Vermelho-Amarelo nas duas camadas estudadas.

Profundidade (cm)	Manejo	Atributo físico			
		DMG (mm)	50 kPa (%)	33 kPa (%)	10 kPa (%)
0 – 7,5	PD	4,67 Aa	29,55 Aa	31,07 Aa	34,97 Aa
	PC	4,42 Ba	26,31 Ba	26,96 Ba	32,13 Ba
	MT	4,88 Aa	29,14 Aa	30,33 Aa	31,46 Ba
7,5 – 15	PD	4,49 Ba	29,55 Aa	30,45 Aa	34,45 Aa
	PC	4,59 Aba	26,50 Ba	26,82 Ca	30,62 Ba
	MT	4,82 Aa	27,68 Bb	28,83 Bb	30,78 Ba
CV (%)		4,92	4,88	4,29	4,90

Médias seguidas de mesma letra maiúscula não apresentam diferença significativa para os tipos de manejo e médias seguidas de mesma letra minúscula não diferenciam significativamente em relação à profundidade (Teste de Tukey, a 5%).

SILVA et al. (2000) também observaram que o plantio direto apresentou agregados maiores e mais resistentes do que no cultivo convencional, sendo a energia cinética necessária para destruir agregados cerca de 1,37 e 2,4 vezes maior do que no cultivo convencional.

Corrêa (2002), analisando a estabilidade de agregados em água de um Latossolo Vermelho-Amarelo de textura média, verificou que os maiores fracionamentos de agregados ocorreram nas áreas preparadas para o monocultivo, enquanto o plantio direto sobre a palhada do milho, por dois anos consecutivos, proporcionou maior estabilidade de agregados do solo.

Não foi detectada diferença significativa entre as duas profundidades em cada manejo, ao contrário de Wendling et al. (2005), que verificaram diminuição da estabilidade de agregados com o aumento da profundidade, em todos os tratamentos estudados.

Na camada de 7,5-15 cm, o PD mostrou menor valor de DMG em comparação à MT, enquanto que o PC não apresentou média com diferença significativa em relação à MT. O maior DMG para o PC, nesta profundidade, pode ser influência da inversão das camadas, a qual ocorre durante o preparo do solo e ao manejo da palhada da área estudada, que é mantida em cobertura após a colheita.

A menor estabilidade de agregados para o PD, em comparação à MT, na camada de 7,5-15 cm, se justifica pela avaliação dos teores de carbono orgânico do solo, demonstrando menor valor de média no PD para esta camada (Figura 1). Diversos autores citam que o aumento dos teores de COT no PD em comparação ao PC é restrito às camadas superficiais e dependente do sistema de cultura adotado (Bertol et al., 2004; Silva et al., 2006).

No que se refere à retenção de água no solo (Tabela 1), verifica-se que, nas duas camadas, o PD apresentou maiores valores de umidade, nas diferentes tensões em comparação ao PC. O principal parâmetro para explicar tal comportamento seria o teor de matéria orgânica, já que foram utilizadas amostras deformadas (Kiehl, 1979; Stone et al., 2006). O PC apresentou-se semelhante à MT, somente na tensão de 10 kPa.

Observou-se que, na média das duas camadas estudadas, o PD reteve 11%, 13% e 10% mais água que o PC, nas tensões de 50, 33 e 10 kPa, respectivamente. Sidiras et al. (1983) verificaram que, em plantio direto, o solo reteve de 36% a 45% mais água disponível para as culturas, reduzindo as perdas de água por evaporação e aumentando o armazenamento de água no solo.

Como foi constatada diferença entre os tratamentos com cultivo e a mata nativa para o DMG, calculou-se o índice de sensibilidade (I_s) para cada tratamento (Figura 2). Por meio deste índice, não foram verificadas diferenças entre o PD e PC, apresentando I_s próximo da unidade, o que indica pouca diferença em relação à MT.

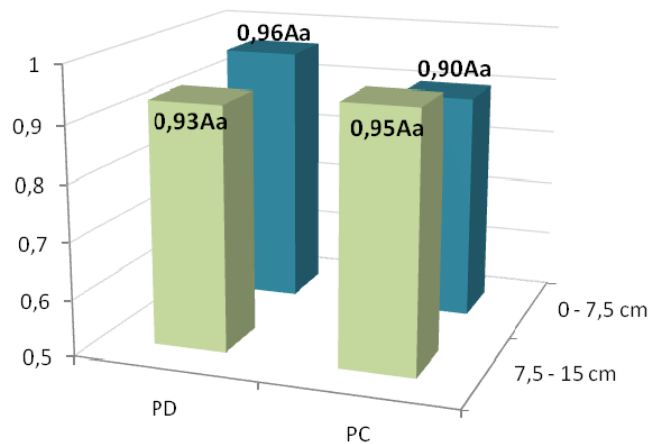


Figura 2. Índice de sensibilidade dos agregados de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob plantio direto (PD) e preparo convencional (PC) – Médias seguidas de mesma letra maiúscula não apresentam diferença significativa para os tipos de manejo e médias seguidas de mesma letra minúscula não diferenciam significativamente em relação à profundidade (Teste de Tukey, a 5%).

Bertol et al. (2004) obtiveram Is para a estabilidade de agregados expressivamente menor do que a unidade nos tratamentos com preparo convencional do solo, enquanto que, no plantio direto, os valores foram próximos à unidade, indicando a sustentabilidade da semeadura direta, no que se refere à estabilidade dos agregados em água.

Os valores de COT demonstraram forte associação com os valores de DMG para PD e MT, obtendo-se baixos valores de correlação apenas para o PC (Quadro 2). Corrêa (2002) também verificou que a porcentagem de matéria orgânica correlacionou-se positivamente com a porcentagem de agregados estáveis em água maiores que 2 mm, com o diâmetro médio ponderado dos agregados e com o grau de floculação.

Quadro 2. Coeficientes de correlação simples para ajuste linear entre COT e demais atributos de um Latossolo Vermelho-Amarelo, nos diferentes manejos.

Profundidade (cm)	Manejo	Atributo físico			
		DMG (mm)	50 kPa (%)	33 kPa (%)	10 kPa (%)
0 – 7,5	PD	0,77*	0,54 ^{ns}	0,60**	0,68**
	PC	0,49 ^{ns}	0,43 ^{ns}	0,30 ^{ns}	0,66**
	MT	0,65**	0,72**	0,45 ^{ns}	0,78*
7,5 – 15	PD	0,87*	0,57**	0,61**	0,67**
	PC	0,42 ^{ns}	0,65**	0,62**	0,43 ^{ns}
	MT	0,62**	0,78*	0,90*	0,69**

ns = não significante; * = significativo, a 1% de probabilidade; ** = significativo, a 5% de probabilidade.

Observou-se também que, para o DMG, os coeficientes de correlação com o COT foram mais elevados na camada mais superficial somente no PC e MT. Já os valores de umidade nas diferentes tensões apresentaram coeficientes mais elevados na camada inferior, tendo o PC sido o sistema que apresentou menores valores de correlação dos atributos analisados com o COT.

Na camada mais superficial (0-7,5 cm), verifica-se um maior estado de compactação para o PD, sendo observados valores mais elevados de Ds e valores mais baixos de macro (Quadro 3). Em função do mínimo revolvimento do solo, a compactação é um processo inerente do sistema de PD, mesmo com o menor tráfego de máquinas em relação ao preparo convencional (Stone et al., 2006).

Quadro 3. Densidade do solo (Ds), porosidade total (PT), macroporosidade (Macro) e microporosidade (Micro), para o Latossolo Vermelho-Amarelo, nas duas camadas estudadas

Profundidade (cm)	Manejo	Atributo físico			
		Ds (kg dm ⁻³)	PT (%)	Macro (%)	Micro (%)
0 – 7,5	PD	1,15 Aa	53,40 Ba	13,35 Ca	40,05 Aa
	PC	1,06 Ba	56,80 Aa	23,94 Aa	32,87 Ca
	MT	1,10 Aba	54,94 ABa	19,48 Ba	35,47 Ba
7,5 - 15	PD	1,14 Aa	53,72 Aa	14,90 Ba	38,82 Aa
	PC	1,09 Aa	55,56 Aa	23,53 Aa	32,03 Ca
	MT	1,13 Aa	54,07 Aa	18,86 Ba	35,21 Ba
CV (%)		4,66	3,85	20,70	6,52

Médias seguidas de mesma letra maiúscula não apresentam diferença significativa para os tipos de manejo e médias seguidas de mesma letra minúscula não diferenciam significativamente em relação à profundidade (Teste de Tukey, a 5%).

O PD apresentou Ds média 4,35% superior à MT e 7,83% superior ao PC, para a profundidade de 0-7,5 cm. Entretanto, considerando-se as duas camadas estudadas (0-15 cm), detectaram-se menores diferenças, sendo o PD superior em 2,7% e 6,5% em relação à MT e PC, respectivamente.

Conforme Freddi et al. (2007), o tráfego de tratores sobre o solo provoca maiores níveis de compactação na camada superficial, proporcionando alterações na morfologia do sistema radicular do milho e reduzindo a produtividade da cultura.

Em relação à macroporosidade, não foram observados valores abaixo de 10%, sendo os menores valores encontrados para o PD nas duas camadas. A porosidade de aeração do solo se torna limitante para o desenvolvimento da maioria das plantas, quando for menor que 10%, pois é o mínimo necessário para difusão de O₂ (Xu et al., 1992).

Pelo Quadro 3, pode-se observar que apenas o PD não atende à proporção ideal de macroporos, que é igual a 1/3 da PT para culturas de sequeiro, segundo Kiehl (1979). Nas camadas estudadas, os sistemas PC e MT apresentam proporção de macroporos acima da ideal.

Segundo a classificação proposta por Pimentel-Gomes (1984), a macro foi o único atributo que apresentou elevado valor de coeficiente de variação (CV >20 %), demonstrando a sua elevada variabilidade. Para os demais atributos, verificou-se baixa variação (CV <10%).

O PC foi o que apresentou maiores valores para Ds máx, enquanto que, para o PD e MT, os valores são semelhantes (Quadro 4). A Ds máx mais elevada no preparo convencional pode estar ligada ao menor teor de matéria orgânica neste solo, decorrente da aceleração da decomposição provocada pelo revolvimento contínuo. Considerando que as características do solo são semelhantes, por ser tratar do mesmo tipo de solo, a diferença encontrada se dá pelo manejo. Conforme Braida et al. (2003), o acúmulo de matéria orgânica no solo reduz a densidade máxima do solo e aumenta a umidade crítica da máxima compactação do solo, ressaltando que a magnitude é dependente da granulometria do solo.

Quadro 4. Densidade máxima do solo (kg dm^{-3}) e umidade crítica (kg kg^{-1}) para os diferentes sistemas de manejo

Profundidade (cm)	Manejos		
	PD	PC	MT
	Ds máx		
0 – 7,5	1,354Ba	1,435Aa	1,345Ba
7,5 – 15	1,385Ba	1,465Aa	1,361Ba
CV (%)	1,25		
	Umidade crítica		
0 – 7,5	0,312Aa	0,276Ba	0,310Aa
7,5 – 15	0,293Aa	0,258Ba	0,320Aa
CV (%)	1,79		

Médias seguidas de mesma letra maiúscula não apresentam diferença significativa para os tipos de manejo e médias seguidas de mesma letra minúscula não se diferenciam significativamente em relação à profundidade (Teste de Tukey, a 5%).

Nos três sistemas avaliados, não foram detectadas diferenças significativas para os valores de Ds máx e umidade crítica entre as duas camadas de amostragem.

As médias obtidas para a Dr nos diferentes manejos, apresentadas no Quadro 5, confirmam um maior estado de compactação para o plantio direto na camada mais superficial. Ferreras et al. (2001) observaram diferença significativa de Dr entre o plantio direto (0,82) e plantio direto escarificado (0,69) na camada de 0-6 cm, refletindo drasticamente no rendimento da cultura de soja.

Quadro 5. Densidade relativa do solo para os diferentes manejos

Profundidade (cm)	Manejos		
	PD	PC	MT
0-7,5	0,847Aa	0,741Ca	0,817Bb
7,5-15	0,822Ab	0,746Ba	0,830Aa
CV (%)	0,51		

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na horizontal e minúscula na vertical não apresentam diferença significativa, pelo teste de Tukey, a 5%.

Não foram encontrados valores limitantes ($>0,86$) ao desenvolvimento de plantas nos tratamentos estudados. Em relação às condições ótimas ao desenvolvimento de plantas, Klein (2006) afirma que a Dr deve ser próxima de 0,71, para um Latossolo Vermelho. Já Santos et al. (2005) constataram que a produção máxima, a partir da qual ocorre redução, ocorreu na Dr igual a 0,65 para um Latossolo Vermelho-Amarelo textura argilosa. Assim, pode-se verificar que, neste trabalho, o plantio direto apresenta valores bem acima daqueles considerados ideais.

Klein (2006) observou que, em solo sob mata, a Dr de um Latossolo Vermelho ficou entre 0,66 e 0,69. Esses valores são semelhantes aos encontrados nas áreas cultivadas pelo mesmo autor. A diferença de Dr existente entre o preparo convencional e a mata nativa neste trabalho pode se justificar por esta última se tratar apenas de um pequeno fragmento.

Foram observadas diferenças significativas entre as médias de Dr para as duas profundidades estudadas em todos os tratamentos. No plantio direto, ao contrário dos outros tratamentos, a Dr foi maior para a camada mais superficial (0-7,5 cm), refletindo a maior compactação na superfície do solo neste tipo de manejo (Genro Junior et al., 2004; Stone et al., 2006).

Embora a área com PD apresente maior estado de compactação, principalmente na camada mais superficial, a produção alcançada na safra 2006/2007 foi de 7.000 kg ha⁻¹ contra 5.000 kg ha⁻¹, para a área com PC. Esses resultados demonstram que, conforme afirmam diversos autores (Henklain et al., 1996; Tavares Filho et al., 2001; Stone et al., 2006), as condições físicas do solo sob PD podem favorecer o desenvolvimento radicular devido à melhor qualidade dos poros e da estrutura do solo.

CONCLUSÕES

- O solo sob plantio direto apresentou teor de carbono orgânico similar ao da mata nativa e superior ao preparo convencional na camada mais superficial, evidenciando a incorporação de matéria orgânica no solo.
- No sistema de plantio direto, foi detectado um maior estado de compactação, embora não tenham sido encontrados valores impeditivos ao crescimento radicular.
- Em relação aos atributos físicos, o solo sob plantio direto demonstrou-se, em geral, próximo da condição preservada, apresentando produção de grãos superior ao PC.

LITERATURA CITADA

ARAÚJO, M. A.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 2, p. 337-345, mar./abr. 2004.

BAYER, C.; DICK, D. P.; RIBEIRO, G. M. Carbon stocks in organic matter fractions as affected by land use and soil management, with emphasis on no-tillage effect. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.32, n.3, p.401-406, maio/jun. 2002.

BAYER, C., MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G.A., CAMARGO, F.A.O. (Ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre : Genesis, 1999. p. 9-26.

BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J. A.; LEITE, D.; AMARAL, A. J.; ZOLDAN JUNIOR, W. A.. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas às do campo nativo **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 1, p. 155-163, jan./fev. 2004.

BERTOL, I.; BEUTLER, J. F.; LEITE, D.; BATISTELA, O. Propriedades físicas de um Cambissolo Húmico afetadas pelo tipo de manejo do solo. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 58, n. 3, p. 555-560, jul./set. 2001.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; ROQUE, C. G.; FERRAZ, M. V. Densidade relativa ótima de Latossolos Vermelhos para a produtividade de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 5, p. 843-849, set./out. 2005.

BOLINDER, M. A.; ANGERS, D. A.; GREGORICH, E. G. ;CARTER, M. R. The response of soil quality indicators to conservation management. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 79, n. 1, p. 37-45, Feb. 1999.

BRAIDA, J. A.; SEQUINATTO, L.; REICHERT, M.; REINERT, D. J.; VEIGA, M. Carbono orgânico e suas implicações na umidade crítica para a compactação do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., 2003, Ribeirão Preto. **Resumo expandido...** Ribeirão Preto : SBCS, 2003. CD-ROM.

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PADANOSCHI, A. L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo Roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 4, p. 527-538, jul./ago.1998.

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, fev. 2002.

DORAN, J.W., PARKIN, T.B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F.; STEWART, B. A. (Ed.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p.3-21.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análises de solo**. 2. ed. rev. e atual. Rio de Janeiro,1997. 212p.

FERREIRA, D. F. Análises estatísticas por meio do SISVAR para Windows 4.0. In: REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE INTERNACIONAL DE BIOMETRIA, 45., 2000, São Carlos. **Anais ...** São Carlos: UFSCar, 2000. p. 255-258.

FERRERAS, L. A.; BATTISTA, J. J.; AUSILIO, A.; PECORARI, C.
Parâmetros físicos del suelo en condiciones no perturbadas y bajo laboreo.
Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 36, n.1, p.161-170, jan. 2001.

FIDALSKI, J.; TORMENA, C. A.; GONÇALVES, A. C. A; OLIVEIRA
JÚNIOR, R. S. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração e da
taxa de estratificação de carbono orgânico do solo em um Latossolo Vermelho
eutroférico. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 6, p. 1773-1779, nov./dez.
2006.

FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F.; BEUTLER, A. N.; ARATANI, R. G.;
LEONEL, C. L. Compactação do solo no crescimento radicular e produtividade
da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 4,
p. 627-636, jul./ago. 2007.

GENRO JUNIOR, 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,
v.28, n. 3, p.477-484, maio/jun. 2004.

HÅKANSSON, I.; LIPIEC, J. A review of the usefulness of relative bulk
density values in studies of soil structure and compaction. **Soil and Tillage
Research**, Amsterdam, v. 53, p. 71-85, 2000.

HENKLAIN, J. C.; GUIMARÃES, M. F.; VIEIRA, M. J.; MEDINA, C. C.
Efeito do preparo do solo no desenvolvimento radicular. In: CONGRESSO
BRASILEIRO DE PLANTIO DIRETO PARA UMA AGRICULTURA
SUSTENTÁVEL, 1, 1996, Ponta Grossa. **Resumos expandidos...** Ponta Grossa:
IAPAR, 1996. p.103-105.

KLEIN, V. A. Densidade relativa - um indicador da qualidade física de um
Latossolo Vermelho. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 5, n.1, p.
26-32, 2006.

KLEIN, V.A.; LIBARDI, P.L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros
de um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista
Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 4, p. 857-867, jul./ago. 2002.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 262
p.

LAL, R. No-tillage effects on soil properties and maize (*Zea mays* L.) production in Western Nigeria. **Plant and Soil**, Amsterdam, v. 40, p. 321-331, 1974.

NOGUEIRA, J. B. **Mecânica dos solos**: ensaios de laboratório. São Carlos, USP-EESC, 1998. 248 p.

PIMENTEL-GOMES, F. **A estatística moderna na pesquisa agropecuária**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1984. 160 p.

SANTOS, G. A.; DIAS JÚNIOR, M. S.; GUIMARÃES, P. T. G.; FUTINI NETO, A. E. Diferentes graus de compactação e fornecimento de fósforo influenciando no crescimento de plantas de milho (*Zea mays* L.) cultivadas em solos distintos. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 29, n. 4, p. 740-752, jul./ago. 2005.

SIDIRAS, N.; DERPSCH, R.; MONDARDO, A. Influência de diferentes sistemas de preparo do solo na variação da umidade e rendimento da soja, em Latossolo Roxo distrófico (Oxisol). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 7, n. 1, p. 103-106, jan./fev. 1983.

SILVA, M. A. S.; MAFRA, A. L.; ALBUQUERQUE, J. A.; DALLA ROSA, J.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Propriedades físicas e teor de carbono orgânico de um Argissolo Vermelho sob distintos sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 2, p. 329-337, fev./mar. 2006.

SILVA, M. L. N.; CURI, N.; BLANCANEAUX, P. Sistemas de manejo e qualidade estrutural de Latossolo Roxo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 12, p. 2485-2492, dez. 2000.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. Efeitos do sistema de preparo na compactação do solo, disponibilidade hídrica e comportamento do feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 1, p.83-91, jan. 1999.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M.; MOREIRA, J. A. A. **Atributos físico-hídricos do solo sob plantio direto**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2006. 39 p. (Embrapa Arroz e Feijão. Documentos, 191).

TAVARES FILHO, J.; BARBOSA, G. M. C.; GUIMARÃES, M. F.; FONSECA, I. C. B. Resistência do solo à penetração e desenvolvimento do sistema radicular do milho (*Zea mays*) sob diferentes sistemas de manejo em um

Latossolo Roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 4, p. 725-730, jul./ago. 2001.

TORMENA, C. A.; FRIEDRICH, R.; PINTRO, J. C.; COSTA, A. C. S.; FIDALSKI, J. Propriedades físicas e taxa de estratificação de carbono orgânico num Latossolo Vermelho após dez anos sob dois sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 6, p. 1023-1031, nov./dez. 2004.

VIEIRA, M. J. Propriedades físicas do solo. In: IAPAR. **Plantio direto no Estado do Paraná**. Londrina, 1981. p.19-32. (IAPAR. Circular, 23).

VIEIRA, M. J.; MUZILLI, O. Características físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 19, n. 7, p. 873-882, jul. 1984.

WEIRICH NETO, P. H.; BORGHI, E.; SVERZUT, C. B.; MANTOVANI, E. C.; GOMIDE, R. L.; NEWES, W. L. de C. Análise multivariada da resistência do solo à penetração sob plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 4, p. 1186-1192, jul./ago. 2006

WENDLING, B.; JUCKSCH, I.; MENDONÇA, E. S.; NEVES, J. C. L. Carbono orgânico e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho sob diferentes manejos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n. 5, p. 487-494, maio 2005.

XU, X.; NIEBER, J. L.; GUPTA, S. C. Compaction effects on the gas diffusion coefficients in soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 56, p. 1743-1750, 1992.

YEOMANS, J.C.; BREMNER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in Soil Science Plant Analysis**, New York, v. 19, n.13, p.1467-1476. 1988.

ANEXOS

TABELA 1. Valores observados para o teor de carbono orgânico do solo (COT), diâmetro médio geométrico (DMG) e umidade do solo nas diferentes tensões (50, 33 e 10 kPa) nas camadas de 0-7,5 cm (1) e 7,5-15 cm (2).

Ponto	COT	COT	DMG	DMG	50kPa	50kPa	33kPa	33kPa	10kPa	10kPa
	dag kg ⁻¹ (1)	dag kg ⁻¹ (2)	mm (1)	mm (2)	% (1)	% (2)	% (1)	% (2)	% (1)	% (2)
1	2,70	1,77	4,14	4,19	30,92	30,49	31,45	30,58	35,20	34,40
2	3,00	2,26	4,62	4,39	31,54	30,68	31,78	30,37	34,86	35,27
3	2,88	2,34	4,14	4,09	30,73	29,93	30,06	30,39	34,22	35,34
4	3,17	2,53	4,30	4,13	31,24	30,23	31,43	30,66	35,19	33,68
5	3,24	2,44	4,69	4,28	30,15	29,98	30,28	29,42	34,08	34,01
6	3,27	2,65	4,51	4,00	29,47	29,16	30,13	29,60	34,79	34,63
7	3,23	3,29	4,21	4,62	31,23	30,25	31,37	30,75	35,14	31,90
8	3,65	2,97	4,14	3,88	30,64	30,34	30,29	30,68	35,66	35,73
9	3,61	2,55	4,56	3,38	30,17	29,48	30,30	29,31	34,04	32,08
10	3,41	3,17	3,93	3,94	30,09	29,81	30,72	29,60	31,61	33,04
11	3,38	2,95	4,21	4,11	29,55	26,36	30,45	29,63	34,32	34,10
12	3,34	2,68	4,81	4,41	29,50	24,61	30,58	29,39	34,31	33,68
13	3,14	2,50	4,69	4,52	31,16	30,48	31,51	30,94	34,09	33,53
14	3,27	2,68	4,73	4,35	31,13	30,55	32,62	31,47	33,09	32,45
15	3,54	2,84	4,23	4,00	31,45	31,20	32,17	32,15	33,52	33,23
16	3,71	2,74	4,11	4,10	30,61	31,83	31,08	31,16	33,61	33,93
17	3,78	3,07	4,67	4,02	29,67	30,27	31,62	29,79	34,86	33,50
18	3,71	3,05	4,83	4,67	31,06	29,66	31,41	30,66	34,28	33,56
19	3,71	2,93	4,63	4,53	30,93	29,55	31,47	31,11	33,60	33,39
20	3,90	2,91	4,79	4,20	30,27	30,26	32,04	34,56	35,08	33,27
21	3,29	2,65	4,69	4,61	29,46	31,47	30,78	31,09	35,74	35,66
22	3,71	3,05	4,20	4,36	32,43	32,40	33,42	33,40	35,35	36,88
23	3,76	2,88	4,70	4,47	31,72	30,80	31,49	32,01	36,45	36,77
24	3,66	2,91	4,69	4,34	31,23	30,27	33,40	34,07	34,42	34,63
25	2,97	2,52	4,89	4,65	29,15	29,76	33,13	32,43	34,85	38,19
26	3,98	3,02	4,73	4,45	30,48	29,10	32,35	32,91	38,01	35,31
27	3,17	2,58	4,59	4,47	29,27	28,74	31,90	31,52	34,90	36,74
28	3,19	2,85	4,82	4,74	30,28	29,67	28,62	28,51	32,12	33,55
29	3,48	3,02	4,21	4,11	31,59	31,10	29,79	29,02	33,01	32,59
30	3,28	2,61	4,68	4,40	31,67	31,01	30,72	29,85	33,27	32,86
31	3,17	2,69	4,86	4,39	29,05	29,19	29,94	29,26	32,94	32,21
32	3,56	2,87	5,01	4,64	28,94	28,95	28,34	29,19	31,46	31,79
33	3,39	2,85	4,87	4,79	28,45	28,51	28,57	28,57	31,54	32,03
34	3,34	2,33	4,81	3,67	28,91	28,30	29,56	29,25	32,79	32,83

TABELA 1. Continuação...

35	3,21	2,41	4,82	4,74	28,00	27,89	29,71	27,76	32,87	31,90
36	3,21	2,49	4,68	4,23	29,23	28,16	29,67	29,29	34,11	33,06
37	3,29	2,87	4,24	3,99	29,98	29,54	30,85	32,01	38,35	39,05
38	3,32	2,66	4,74	4,77	28,38	28,96	30,08	29,38	36,43	36,78
39	3,09	2,51	4,91	4,73	28,26	28,29	29,63	28,69	35,85	36,36
40	3,14	2,44	4,76	3,97	28,31	29,11	29,35	29,90	34,91	36,32
41	3,26	2,21	4,50	4,06	28,09	27,61	28,35	29,75	33,75	36,21
42	3,37	2,54	4,91	4,77	28,79	27,41	28,84	28,32	31,78	33,13
43	3,55	2,98	4,59	4,62	28,61	27,43	30,14	29,20	37,38	38,15
44	3,45	2,98	4,19	3,97	29,70	30,60	30,12	30,26	38,41	40,71
45	3,60	3,07	3,84	4,56	30,23	28,70	30,54	31,32	40,23	35,92
46	3,89	3,32	4,33	3,88	28,79	30,83	33,85	30,84	36,84	37,57
47	3,67	3,05	4,50	3,38	30,76	28,02	31,52	33,16	40,97	36,71
48	3,43	2,90	4,71	4,44	34,55	27,60	29,02	31,11	34,58	35,54
49	3,26	2,88	4,48	4,42	29,34	28,33	32,43	29,22	37,68	35,94
50	3,30	2,90	3,82	3,90	30,34	29,19	31,99	30,47	40,62	35,91
51	3,30	2,85	4,28	3,24	31,49	31,40	31,46	28,48	39,70	34,01
52	3,55	2,55	3,89	3,85	31,40	29,97	28,71	28,34	33,78	32,90
53	3,64	2,87	4,41	4,49	30,88	30,41	29,24	29,33	37,05	36,18
54	3,68	2,91	4,96	4,42	31,13	29,54	30,57	28,43	35,40	34,14
55	3,64	2,66	4,58	4,23	30,38	29,90	29,34	28,83	34,47	35,58
56	3,57	2,53	4,68	4,25	31,22	31,26	29,95	29,05	34,09	34,17
57	3,30	2,87	4,23	4,51	30,88	30,47	29,48	28,76	34,41	34,02
58	3,79	2,96	4,69	4,34	31,14	31,03	29,05	29,06	34,19	34,36
59	3,98	2,66	4,59	3,92	31,07	32,59	29,49	30,11	34,52	36,24
60	3,55	2,71	3,68	3,39	32,71	31,12	31,34	29,71	36,48	35,46
61	3,03	2,46	4,53	4,74	28,87	28,67	28,53	28,79	34,22	34,19
62	3,44	2,80	4,09	4,43	30,04	29,37	29,46	28,86	34,41	34,50
63	3,44	2,87	4,56	3,95	29,70	29,25	30,75	29,56	35,38	33,50
64	3,37	2,80	4,40	4,24	30,07	29,57	30,35	29,98	35,23	36,18
65	3,08	2,60	4,49	4,18	30,19	29,65	32,78	23,06	33,96	34,52
66	3,59	2,99	4,59	4,41	29,43	29,88	29,01	30,94	34,15	37,82
67	3,40	2,43	4,47	4,61	29,45	28,36	30,27	29,17	41,20	39,76
68	3,15	2,97	4,52	4,50	30,12	29,80	30,70	31,03	39,82	39,53
69	3,30	3,02	4,46	4,27	29,19	28,30	30,15	30,56	37,70	36,24
70	3,31	2,65	4,71	4,66	29,08	28,47	29,81	29,72	37,57	37,41
71	3,24	2,69	4,71	4,56	28,95	28,93	30,50	29,30	39,55	37,10
72	3,22	3,02	4,69	4,41	30,16	29,18	30,35	29,66	38,29	37,58
73	3,52	2,99	4,72	4,63	30,17	29,35	29,99	30,29	38,08	36,50

TABELA 2. Valores observados para a densidade do solo (Ds), volume total de poros (VTP), macro e microporosidade (Macro e Micro) nas camadas de 0-7,5 cm (1) e 7,5-15 cm (2).

Ponto	Ds	Ds	VTP	VTP	Macro	Macro	Micro	Micro
	kg dm ⁻³ (1)	kg dm ⁻³ (2)	% (1)	% (2)	% (1)	% (2)	% (1)	% (2)
1	0,98	1,13	60,04	53,97	23,22	11,31	36,81	42,66
2	1,10	1,05	55,15	57,17	15,99	19,12	39,17	38,04
3	0,96	0,97	60,86	60,76	24,88	26,96	35,99	33,80
4	1,02	1,02	58,35	58,44	19,99	21,28	38,35	37,16
5	0,92	1,04	62,44	57,92	27,41	20,98	35,03	36,94
6	1,11	1,05	54,69	57,23	15,02	18,92	39,67	38,31
7	1,01	1,11	58,80	54,82	24,27	14,60	34,53	40,22
8	0,99	1,06	59,71	56,78	21,81	17,75	37,90	39,03
9	1,12	1,15	54,31	53,33	13,14	14,17	41,17	39,17
10	1,09	1,09	55,57	55,82	16,04	16,61	39,53	39,20
11	1,02	0,96	58,61	61,17	20,18	24,08	38,42	37,09
12	1,17	1,13	52,31	53,91	11,04	14,14	41,27	39,77
13	1,14	1,10	53,58	55,47	11,54	16,18	42,03	39,29
14	1,11	1,13	54,83	53,91	16,11	14,18	38,72	39,73
15	1,11	1,13	54,69	54,20	13,89	13,65	40,80	40,54
16	1,11	1,13	54,75	54,15	14,47	12,69	40,28	41,46
17	0,98	1,02	60,32	58,64	23,58	21,39	36,74	37,25
18	1,15	1,09	53,11	55,79	12,54	17,53	40,57	38,26
19	1,02	1,19	58,47	51,61	20,12	10,60	38,35	41,01
20	1,02	1,07	58,38	56,65	22,34	19,85	36,04	36,80
21	1,27	1,08	48,54	56,00	7,81	20,36	40,73	35,64
22	1,10	1,03	55,30	58,32	14,12	21,61	41,17	36,71
23	1,10	1,16	55,13	52,85	15,71	13,36	39,41	39,49
24	1,10	1,22	55,23	50,48	15,22	7,56	40,01	42,92
25	1,10	1,10	55,36	55,19	17,10	18,63	38,26	36,55
26	1,19	1,15	51,69	53,33	9,92	13,86	41,77	39,47
27	1,15	1,16	53,30	52,80	11,39	14,22	41,91	38,59
28	1,24	1,18	49,53	52,19	7,79	10,48	41,74	41,71
29	1,18	1,13	52,14	54,17	11,70	15,87	40,44	38,30
30	1,16	1,14	53,01	53,77	10,49	15,74	42,52	38,03
31	1,14	1,20	53,73	51,31	14,44	9,74	39,29	41,57
32	1,13	1,17	54,02	52,40	13,96	12,14	40,07	40,26
33	1,13	1,14	54,27	53,61	15,09	15,02	39,18	38,59
34	1,22	1,16	50,30	52,90	11,22	14,02	39,09	38,88
35	1,14	1,16	53,71	52,85	27,21	14,51	26,49	38,35

TABELA 2. Continuação...

36	1,19	1,11	51,64	54,95	10,53	18,29	41,11	36,67
37	1,09	1,20	55,77	51,11	16,62	10,50	39,16	40,61
38	1,13	1,19	53,92	51,53	13,87	11,14	40,04	40,39
39	1,18	1,24	51,91	49,76	12,23	9,99	39,68	39,77
40	1,24	1,11	49,56	54,95	9,39	16,88	40,18	38,07
41	1,13	1,18	54,14	51,96	15,52	14,56	38,62	37,40
42	1,06	1,17	56,79	52,25	23,70	16,11	33,08	36,14
43	1,15	1,17	53,10	52,33	14,60	13,82	38,50	38,51
44	1,17	1,14	52,31	53,71	9,57	13,97	42,74	39,74
45	1,21	1,10	50,96	55,29	8,60	17,58	42,35	37,71
46	1,13	1,11	54,26	54,74	14,66	17,55	39,61	37,19
47	1,17	1,16	52,57	52,79	13,23	13,57	39,34	39,22
48	1,12	1,21	54,41	51,01	19,06	12,80	35,35	38,20
49	1,11	1,23	55,04	50,18	17,15	12,87	37,89	37,31
50	1,04	1,13	57,84	54,08	19,59	14,32	38,25	39,77
51	1,13	1,15	54,20	53,28	13,61	12,92	40,59	40,35
52	1,11	1,11	54,87	54,94	15,60	15,87	39,27	39,07
53	1,07	1,05	56,32	57,50	18,52	19,21	37,80	38,29
54	0,95	1,09	61,42	55,53	26,31	18,33	35,12	37,20
55	1,13	1,17	54,20	52,38	13,20	11,80	41,00	40,58
56	1,04	1,13	57,63	54,18	20,25	15,09	37,38	39,09
57	1,07	1,13	56,35	54,14	16,62	14,39	39,73	39,75
58	1,10	1,04	55,46	57,76	14,42	20,98	41,04	36,78
59	0,92	1,10	62,61	55,16	30,78	16,08	31,83	39,07
60	1,17	1,17	52,47	52,29	11,61	12,57	40,86	39,72
61	1,13	1,08	54,02	55,94	15,05	17,78	38,96	38,16
62	1,02	1,19	58,37	51,64	19,81	11,19	38,57	40,46
63	1,15	1,13	53,10	54,08	12,83	12,85	40,26	41,23
64	1,14	1,12	53,79	54,58	14,24	14,17	39,56	40,41
65	1,08	1,13	56,13	54,05	16,80	14,37	39,33	39,68
66	1,12	1,17	54,66	52,49	15,48	13,64	39,18	38,84
67	1,06	1,02	56,73	58,65	18,80	23,27	37,93	35,38
68	1,11	1,02	55,06	58,45	15,80	20,50	39,26	37,95
69	1,11	1,08	54,78	56,27	16,49	18,98	38,29	37,29
70	1,06	1,09	56,98	55,89	20,29	17,90	36,69	37,99
71	1,02	0,94	58,61	61,66	22,43	27,25	36,18	34,41
72	1,12	1,12	54,63	54,29	15,20	14,94	39,44	39,34
73	1,11	0,96	54,68	60,85	15,46	27,38	39,22	33,47

TABELA 3. Valores observados para o teor de carbono orgânico do solo (COT), diâmetro médio geométrico (DMG) e umidade do solo nas diferentes tensões (50, 33 e 10 kPa), nas camadas de 0-7,5 cm (1) e 7,5-15 cm (2).

Ponto	COT	COT	DMG	DMG	50kPa	50kPa	33kPa	33kPa	10kPa	10kPa
	dag kg ⁻¹ (1)	dag kg ⁻¹ (2)	mm (1)	mm (2)	% (1)	% (2)	% (1)	% (2)	% (1)	% (2)
PD										
1	4,04	2,74	4,81	4,41	29,50	28,29	30,58	29,39	34,31	33,68
2	3,74	2,68	4,69	4,52	29,16	30,48	31,51	31,09	34,09	33,53
3	3,64	2,50	4,11	4,10	28,46	27,51	30,78	29,38	31,54	33,93
4	3,69	2,65	4,69	4,61	30,61	28,96	31,08	30,94	33,61	32,03
5	3,99	2,88	4,70	4,47	29,26	30,80	31,49	28,57	36,45	36,77
6	3,95	3,02	4,89	4,65	29,15	29,76	30,03	32,43	36,84	38,19
7	4,16	2,95	4,87	4,79	29,45	28,51	32,31	32,01	35,74	37,57
8	4,05	2,91	4,74	4,77	29,38	30,83	30,08	31,16	36,43	36,78
9	4,29	3,01	4,91	4,73	31,72	31,37	33,85	30,84	35,85	36,36
10	3,69	2,42	4,33	3,88	28,79	28,96	29,03	28,69	34,85	35,66
PC										
1	3,30	3,40	4,26	4,86	26,06	27,36	26,48	27,71	32,44	31,81
2	3,40	3,00	4,77	3,95	25,93	26,30	26,83	26,25	31,17	30,66
3	3,30	3,10	4,35	4,77	25,88	26,83	26,30	27,09	29,86	33,31
4	3,40	3,00	4,73	4,56	27,41	26,22	27,45	26,50	32,69	31,42
5	3,30	2,90	4,38	4,48	27,32	26,67	27,57	27,00	33,16	31,82
6	3,30	2,90	4,25	4,56	26,28	26,85	27,95	26,81	29,68	29,94
7	3,10	3,00	4,39	4,72	26,00	26,07	26,09	26,44	30,26	29,89
8	3,10	2,90	4,59	4,55	26,49	25,69	28,28	26,61	29,83	29,15
9	3,10	3,00	4,60	4,76	25,89	26,34	26,71	26,40	29,15	28,48
10	3,00	3,00	3,86	4,74	25,83	26,64	25,91	27,35	29,41	29,76
MT										
1	4,30	3,00	4,92	4,73	27,75	26,38	29,51	27,79	32,40	29,79
2	4,10	3,40	4,72	4,79	27,60	27,42	29,47	28,50	31,07	30,47
3	4,80	3,30	4,92	4,83	29,85	27,82	30,66	27,72	33,00	29,57
4	4,90	3,80	5,05	4,94	29,36	27,81	29,55	29,81	32,26	30,47
5	3,70	3,10	4,73	4,68	27,79	28,42	30,23	28,70	31,55	31,18
6	4,00	3,30	4,89	4,71	28,94	26,18	29,48	28,14	31,48	29,68
7	4,00	3,00	4,92	4,82	28,06	26,69	28,29	27,30	29,89	30,03
8	3,80	3,00	4,80	4,83	28,47	27,94	31,34	29,04	31,76	31,75
9	3,80	3,30	4,89	4,91	29,99	27,62	31,08	29,08	31,96	31,29
10	5,30	4,80	4,94	4,94	33,58	30,54	33,69	32,18	35,94	33,58

PD = plantio direto; PC = preparo convencional; MT = mata nativa.

TABELA 4. Valores observados para a densidade do solo (Ds), volume total de poros (VTP), macro e microporosidade (Macro e Micro) nas camadas de 0-7,5 cm (1) e 7,5-15 cm (2).

Ponto	Ds kg dm ⁻³ (1)	Ds kg dm ⁻³ (2)	VTP % (1)	VTP % (2)	Macro % (1)	Macro % (2)	Micro % (1)	Micro % (2)
PD								
1	1,17	1,13	52,31	53,91	11,04	14,14	41,27	39,77
2	1,14	1,10	53,58	55,47	11,54	16,18	42,03	39,29
3	1,11	1,13	54,75	54,15	14,47	12,69	40,28	41,46
4	1,27	1,08	48,54	56,00	7,81	20,36	40,73	35,64
5	1,10	1,16	55,13	52,85	15,71	13,36	39,41	39,49
6	1,10	1,10	55,36	55,19	17,10	18,63	38,26	36,55
7	1,13	1,14	54,27	53,61	15,09	15,02	39,18	38,59
8	1,13	1,19	53,92	51,53	13,87	11,14	40,04	40,39
9	1,18	1,24	51,91	49,76	12,23	9,99	39,68	39,77
10	1,13	1,11	54,26	54,74	14,66	17,55	39,61	37,19
PC								
1	1,00	1,10	59,49	55,26	29,19	23,75	30,30	31,50
2	1,00	1,06	59,28	56,95	28,39	24,90	30,90	32,05
3	1,07	1,08	56,35	56,28	25,17	24,87	31,19	31,41
4	1,12	1,06	54,62	56,99	20,79	25,80	33,83	31,19
5	1,06	1,04	56,74	57,75	23,68	24,87	33,07	32,88
6	1,17	1,05	52,64	57,13	15,91	27,73	36,73	29,39
7	1,09	1,16	55,74	52,73	19,58	18,83	36,16	33,89
8	1,10	1,09	55,29	55,80	21,69	25,01	33,60	30,79
9	0,98	1,20	60,27	51,04	30,96	16,18	29,31	34,86
10	1,04	1,09	57,59	55,62	24,03	23,32	33,56	32,30
MT								
1	1,10	1,11	55,09	54,75	20,43	22,06	34,66	32,69
2	1,07	1,13	56,64	54,02	22,21	19,29	34,43	34,73
3	1,10	1,17	55,10	52,58	20,55	20,55	34,55	32,03
4	1,13	1,11	54,26	54,84	18,02	21,41	36,24	33,43
5	1,07	1,17	52,42	52,45	12,61	16,66	39,81	35,80
6	1,07	1,16	56,39	52,66	26,05	11,71	30,34	40,95
7	1,13	1,14	54,07	53,72	18,79	21,23	35,28	32,49
8	1,14	1,20	53,47	51,41	16,83	14,79	36,64	36,62
9	1,04	1,13	57,61	53,87	21,11	11,79	36,51	42,07
10	1,12	0,97	54,39	60,39	18,15	29,14	36,24	31,25

PD = plantio direto; PC = preparo convencional; MT = mata nativa.