

**ALTERAÇÕES ESTRUTURAIS DE
LATOSSOLOS REPRESENTATIVOS DA
REGIÃO DO CERRADO E POTENCIAL DE USO
DE SOLOS CULTIVADOS COM CANA-DE-
AÇÚCAR**

EDUARDO DA COSTA SEVERIANO

2010

EDUARDO DA COSTA SEVERIANO

**ALTERAÇÕES ESTRUTURAIS DE LATOSSOLOS
REPRESENTATIVOS DA REGIÃO DO CERRADO E POTENCIAL DE
USO DE SOLOS CULTIVADOS COM CANA-DE-AÇÚCAR**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras,
como parte das exigências do Programa de Pós-
Graduação em Ciência do Solo, área de
concentração Recursos Ambientais e Uso da Terra,
para a obtenção do título de “Doutor”.

Orientador

Prof. Geraldo César de Oliveira

LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL
2010

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

Severiano, Eduardo da Costa.

Alterações estruturais de Latossolos representativos da região do Cerrado e potencial de uso de solos cultivados com cana-de-açúcar / Eduardo da Costa Severiano. – Lavras : UFLA, 2010.

134 p. : il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 2010.

Orientador: Geraldo César de Oliveira.

Bibliografia.

1. Física do solo. 2. Planejamento conservacionista. 3. Pressão de preconsolidação. 4. Intervalo Hídrico Ótimo. 5. *Saccharum* sp. 6. Latossolo. 7. Cambissolo. I. Universidade Federal de Lavras.

II. Título.

CDD – 631.43

EDUARDO DA COSTA SEVERIANO

**ALTERAÇÕES ESTRUTURAIS DE LATOSSOLOS
REPRESENTATIVOS DA REGIÃO DO CERRADO E POTENCIAL DE
USO DE SOLOS CULTIVADOS COM CANA-DE-AÇÚCAR**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração Recursos Ambientais e Uso da Terra, para a obtenção do título de “Doutor”.

APROVADA em 16 de Janeiro de 2010.

Dr. Arystides Resende Silva

EMBRAPA Amazônia Oriental

Prof. Dr. Moacir de Souza Dias Junior

DCS/UFLA

Prof. Dr. Mozart Martins Ferreira

DCS/UFLA

Prof. Dr. Carlos Rogério de Mello

DEG/UFLA

Prof. Dr. Geraldo César de Oliveira

UFLA

(Orientador)

LAVRAS

MINAS GERAIS - BRASIL

A Deus,

meu senhor, pela sua fidelidade

Aos meus pais, Divino Severiano e Maria de Fátima,

fontes inesgotáveis de amor incondicional,

As minhas irmãs,

Daniella e Anna Carolina

OFEREÇO

A minha esposa, Katia Costa,

Ao meu orientador, Geraldo Oliveira,

Exemplos de profissionalismo,

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus e à nossa Senhora Aparecida, pela certeza de que estais comigo durante a minha caminhada.

À Universidade Federal de Lavras e ao Departamento de Ciência do Solo pela oportunidade de realização do curso de Doutorado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de doutorado e financiamento parcial deste estudo, através da taxa de bancada (processo número 142232/2007-6).

Ao grande amigo e orientador, Professor Geraldo César de Oliveira, por toda confiança.

Ao Professor Moacir de Souza Dias Junior, pela amizade, participação na banca examinadora e contribuição na realização deste trabalho.

Ao Professor Mozart Martins Ferreira, pela amizade, participação na banca, críticas e sugestões.

Ao Professor Nilton Curi, pela preciosa contribuição à minha formação acadêmica e amizade.

Ao Professor Carlos Rogério de Mello, pela amizade, participação na banca, críticas e sugestões.

Ao Dr. Arystides Resende Silva, pela amizade e participação na banca examinadora.

Ao amigo, Professor Luiz Fernando Coutinho de Oliveira, pela constante motivação ao longo da minha formação acadêmica.

Ao Pesquisador Dr. Vinícius de Melo Benites, pela amizade e apoio durante os trabalhos de campo.

Ao Professor Francisco Dias Nogueira e família, pela amizade, carinho e apoio durante o período em que estive em Lavras.

Ao Professor Yuri Lopes Zinn, pelas críticas e sugestões.

A todos os professores da UFLA que participaram da minha formação.

A todos os acadêmicos de graduação da FESURV e UFLA, pelo auxílio de campo e laboratório, em especial ao Silvio, Marcone, Graciele, Tachinha e Cesinha.

Aos produtores rurais Sr (a). Andrei, Clésio, Ivana Godói e José, e as empresas Sementes São Francisco e Jalles Machado S.A., que gentilmente cederam as áreas experimentais para coleta das amostras de solo.

A minha esposa, Kátia, por toda motivação, carinho, apoio e, principalmente, por tornar a minha vida intensamente feliz.

Aos meus padrinhos, e grandes amigos, Milton, Fernanda, Cristiane, Carlos, Thatiane, Renata e Thiago, pela preciosa amizade.

Ao amigo Cezar, pela parceria acadêmica ao longo do curso e agradável convivência em casa.

Ao amigo Ênio, pela parceria ao longo curso.

Aos colegas do curso de pós-graduação Bruno, Silvio, Ciro, Karina, Karine, Daniela, Maurício, Geila, Gustavinho, Milson, Letúzia, Vitória, Waldete, Vico, Piero e Paula Caruana, pelo agradável convívio.

As amigas, Anna, Ayeska e Carla, pelo incondicional apoio e motivação, fundamentais para superação dos momentos de dificuldades.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO GERAL	i
GENERAL ABSTRACT	iii
CAPÍTULO 1: Alterações estruturais e comportamento compressivo do solo	1
1 Introdução Geral	2
2 Referencial Teórico	3
2.1 Alterações estruturais dos solos	3
2.2 Intervalo Hídrico Ótimo (IHO)	5
2.3 Comportamento compressivo do solo	7
3 Referências bibliográficas	12
CAPÍTULO 2: Relação entre comportamento compressivo, suscetibilidade à compactação e textura de Latossolos oxídicos da região do Cerrado	19
1 Resumo	20
2 Abstract	21
3 Introdução	22
4 Material e métodos	26
4.1 Área estudada e descrição dos locais de amostragem	26
4.2 Protocolo de Amostragem	29
4.3 Caracterização química, física e mineralógica	30
4.4 Curva de retenção de água no solo	31
4.5 Ensaio de compressão uniaxial	32

4.6 Determinação da pressão de preconsolidação e análise estatística ...	32
5 Resultados e discussão	33
5.1 Caracterização física e classificação mineralógica dos Latossolos estudados	33
5.2 Retenção de água no solo	38
5.3 Comparação dos modelos de capacidade de suporte de carga dos Latossolos	39
5.4 Relações entre textura do solo e suscetibilidade à compactação	41
6 Conclusões	46
7 Referências bibliográficas	47
CAPÍTULO 3: Alterações estruturais de Latossolos representativos da região do Cerrado: I - Relações entre atributos físicos do solo e intervalo hídrico ótimo	57
1 Resumo	58
2 Abstract	59
3 Introdução	60
4 Material e métodos	62
5 Resultados e discussão	68
6 Conclusões	78
7 Referências bibliográficas	79
CAPÍTULO 4: Alterações estruturais de Latossolos representativos da região do cerrado: II – Comportamento compressivo do solo e modelagem da compactação adicional	85
1 Resumo	86
2 Abstract	87
3 Introdução	88

4 Material e métodos	90
5 Resultados e discussão	94
6 Conclusões	103
7 Referências bibliográficas	104
CAPÍTULO 5: Potencial de uso e qualidade estrutural de dois solos cultivados com cana-de-açúcar em Goianésia (GO)	108
1 Resumo	109
2 Abstract	110
3 Introdução	111
4 Material e métodos	113
5 Resultados e discussão	116
6 Conclusões	128
7 Referências bibliográficas	129
ANEXOS	133

RESUMO GERAL

SEVERIANO, Eduardo da Costa. **Alterações estruturais de Latossolos representativos da região do cerrado e potencial de uso de solos cultivados com cana-de-açúcar**. 2010. 134 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras – MG¹.

Os solos da ordem Latossolos recobrem grandes áreas nos trópicos e são os principais solos sob utilização agrícola na região do Cerrado Brasileiro. Devido a sua fertilidade física, são potencialmente aptos para o desenvolvimento de uma agricultura mecanizada. Entretanto, quando incorporados ao processo produtivo, seu espaço poroso pode ser seriamente afetado, levando a rápida degradação e aceleração do processo erosivo dos mesmos. Apesar da textura do solo ser reconhecidamente importante no comportamento compressivo do solo, há carência de estudos que quantifiquem a sua influência nas alterações estruturais dos Latossolos oxídicos desta região. Por outro lado, solos com menor potencial para o cultivo intensivo muitas vezes ocorrem associados aos Latossolos, como é o caso dos Cambissolos. Com a expansão das atividades agrícolas na região do Cerrado, e com destaque ao setor sucroalcooleiro, tanto os solos com poucas limitações como aqueles que apresentam riscos permanentes ao cultivo intensivo foram incorporados ao processo produtivo. Para tanto, faz-se necessária a adoção de sistemas de manejo que mantenham a estrutura do solo. A formulação de decisões quanto ao uso dos recursos naturais pode ser a chave para a manutenção da qualidade e sustentabilidade agrícola na região. Dessa forma, o presente estudo teve os seguintes objetivos: (1) avaliar a relação entre o comportamento compressivo e a textura de Latossolos oxídicos; (2) avaliar as alterações estruturais de Latossolos do município de Rio Verde, GO, e; (3) avaliar o potencial de uso para cana-de-açúcar e a qualidade estrutural de dois solos, no município de Goianésia, GO. O trabalho foi conduzido em três partes, utilizando amostras coletadas em dez Latossolos oxídicos do município de Rio Verde, GO, sob vegetação nativa na primeira parte; selecionaram-se cinco Latossolos contrastantes quanto à textura para a realização da segunda parte; e dois solos, sendo um Cambissolo Háptico (CXbd) e um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVAd) do município de Goianésia, GO, na terceira parte do trabalho. Foram coletadas amostras deformadas e indeformadas para determinação da classe textural, conteúdo de óxidos, densidade do solo (Ds) e de partículas (Dp), porosidade total (PT), curva de retenção de água, intervalo hídrico ótimo (IHO) e dos modelos de capacidade de suporte de carga (CSC). Os

¹ **Orientador:** Prof. Geraldo César de Oliveira – DCS/UFLA.

resultados mostraram que a textura do solo influenciou todas as propriedades físico-hídricas dos solos, reduzindo a D_s , aumentando a porosidade e a retenção de água com o incremento do conteúdo de argila. Consequentemente, a suscetibilidade à compactação dos Latossolos aumentou em direção do incremento no conteúdo de argila. Considerando as características dos maquinários utilizados na agricultura brasileira, a CSC pode ser considerada baixa. Naqueles solos argilosos e muito argilosos, algum grau de compactação adicional pode ser considerado praticamente inevitável, mesmo sob condições de baixos conteúdos de água no solo. Os resultados referentes à segunda parte do trabalho mostraram que a compactação adicional do solo resultou desde benefícios ao crescimento das plantas, relacionados ao aumento na retenção de água, até condições de severas restrições as suas funções edáficas. A D_s correspondente à macroporosidade crítica do solo foi mais restritiva ao manejo sustentável dos Latossolos estudados que a D_s crítica correspondente ao IHO. As avaliações das curvas de compressão do solo associadas a valores de D_s relacionados às propriedades ecológicas do solo permitiram determinar as pressões benéficas em termos de retenção de água, e crítica para o desempenho das funções edáficas do solo. Por sua vez, essas pressões são caracterizadas como compactação adicional dos Latossolos estudados. Os resultados correspondentes à terceira parte do estudo indicaram que o cultivo contínuo do CXbd com cana-de-açúcar, deve-se ao fato dessa cultura promover pequeno revolvimento do solo e aumentar-lhe a cobertura. O CXbd apresentou maior disponibilidade de água para as plantas, o que tende a trazer benefícios à cultura. O LVAd é mais suscetível à compactação, necessitando da adequação do tráfego de máquinas.

GENERAL ABSTRACT

SEVERIANO, Eduardo da Costa. **Structural changes in Latosols of the Brazilian Cerrado region and use potential of soils for sugarcane.** 2010. 134 p. Thesis (Doctorate in Soil Science) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG².

Latosols cover large areas of the humid tropics and are the main soils used for agriculture in the Brazilian Cerrado region. Because of their favorable physical properties, they are highly appropriate for development of mechanized agriculture. However, when intensively cultivated, their porosity can be seriously reduced, leading to rapid degradation and acceleration of the erosion process. Though soil texture is recognized as very important in the compression behavior of soil, there are few studies that quantify its influence on the structural changes of such Latosols. On the other hand, soils with less potential for intensive cropping are often associated with in the landscape, such as Cambisols. With the increase of agricultural area in the Cerrado region, especially for sugar/alcohol, soils with variable limitations were incorporated in to the productive process, not always considering potential risks from intensive cultivation. Thus, it becomes necessary to develop management systems that maintain soil structure. Forming decisions about the use of natural resources can be a key in maintaining quality and sustainability in this region. Thus, the objectives of the present study are: (1) to evaluate the relationship between compression behavior and the texture of Latosols; (2) to evaluate the structural changes of Latosols in Rio Verde, Goiás, and; (3) to evaluate the potential for sugarcane cropping and structural quality of two soils, in Goianésia, Goiás. The experiment was conducted in three parts: the first used samples of ten Latosols collected in Rio Verde, Goiás, under native vegetation; the second used five Latosols with different textures; and the third part used two soils, a Haplic Cambisol (CXbd) and one a Red-Yellow Latosol (LVAd) from Goianésia, Goiás. Disturbed and undisturbed samples were collected to determine textural class, Fe/Al oxide contents, bulk (Bd) and particle density (Pd), total porosity (TP), water retention curves, Least Limiting Water Range (LLWR) and bearing capacity models (BCM). The results show that soil texture influenced all of the physical properties of the soil, reducing Bd, as increasing clay content increased porosity and water retention, where as Bd was reduced. Consequently, the susceptibility to the compaction of Latosols increased with an increment of the clay content. Considering the characteristics of the machinery utilized in

² **Adviser:** Prof. Geraldo César de Oliveira.

Brazilian agriculture, BCM could be considered low. In clayey and very clayey soils, some degree of additional compaction can be considered inevitable, even when there is low water content in the soil. The results from the second part of the study showed that additional soil compaction caused from benefits in plant growth related to increased water retention, even conditions of severe restriction of edaphic functions. B_d corresponding to critical soil macroporosity was more restrictive to the sustainable use of the Latosols studied than the critical B_d corresponding to LLWR. The evaluation of soil compression curves associated with B_d values favoring ecological soil function allow determination of beneficial pressure in terms of water retention, and critical pressure for compaction. The results from the third part of the study indicate that continuous sugarcane cultivation on CXdb is acceptable, since this crop does not require much tillage and increases soil cover. CXbd made more water available for plants, which tends to benefit the crop. LVAd is more susceptible to compression, requiring improvement to adapt to machine traffic. Plant available water higher in CXbd than LVAd, which tends to be advantageous for crops. The LVAd was most susceptible to compaction, requiring improved to machine traffic.

CAPÍTULO 1

ALTERAÇÕES ESTRUTURAIS E COMPORTAMENTO COMPRESSIVO DO SOLO

1 INTRODUÇÃO GERAL

Nas últimas décadas o Brasil vem se firmando como uma das grandes potências agrícolas mundiais, o que se deve às inovações tecnológicas no que diz respeito ao uso de insumos e de máquinas agrícolas. Com isso, tem-se viabilizando a expansão da fronteira agrícola para regiões até então marginalizadas, com destaque para a região do Cerrado (Vargas & Hungria, 1997). Isto tem levado contribuições significativas no que se refere à produção de grãos, pecuária e agroenergética do país.

Sob condições naturais, os Latossolos, que são a maioria dos solos sob vegetação de Cerrado, apresentam restrições químicas ligadas à baixa fertilidade e elevada toxidez por alumínio (Sousa & Lobato, 2004). Por outro lado os atributos físicos desses solos, aliado à topografia suavizada onde estão inseridos (Resck et al., 1991), fez desta uma região potencialmente apta para o desenvolvimento de uma agricultura altamente mecanizada.

Mesmo com a grande variação textural dos Latossolos presentes neste bioma, a mineralogia da fração argila destes solos é composta basicamente por proporções variáveis de óxidos (termo que inclui óxidos, hidróxidos e oxihidróxidos) de ferro e alumínio e minerais 1:1, notadamente a caulinita (Ker, 1997; Kampf & Curi, 2003; Resende et al., 2007), o que associada à matéria orgânica nos diversos estágios de decomposição (Silva & Resck, 1997), leva à elevada estabilidade estrutural e friabilidade.

Por outro lado, apesar da composição granulométrica ser reconhecidamente importante no comportamento compressivo do solo, há carência de estudos que quantificam a sua influência nas alterações estruturais dos Latossolos. Dessa forma, faz-se necessário o desenvolvimento de pesquisas nessa temática, visando à adequação do manejo e manutenção da produção

agropecuária sem a contrapartida da degradação estrutural do solo e conseqüentemente ambiental.

O presente trabalho objetivou avaliar as alterações estruturais e o comportamento compressivo de Latossolos representativos da região do Cerrado e o potencial de uso de solos cultivados com cana-de-açúcar.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Alterações estruturais dos solos

Segundo Macedo (1996) os Latossolos se destacam como a principal classe cultivada na região do Cerrado. Isto se deve ao elevado percentual de recobrimento na paisagem (aproximadamente 50%), associado à topografia suave, elevada estabilidade estrutural e friabilidade; características estas muito favoráveis à mecanização agrícola.

Por outro lado, as inovações tecnológicas dos sistemas de produção relacionada ao uso de máquinas, cada vez maiores e mais pesadas, vêm desencadeando o processo de compactação do solo (Dias Junior, 2000). Essa por sua vez, tem origem na compressão do solo não saturado, durante a qual a densidade do solo sofre um incremento em função da redução no volume de poros ocupados pelo ar (Gupta & Allmaras, 1987; Gupta et al., 1989).

A degradação do solo com a conseqüente queda de produção das culturas está diretamente relacionada com as práticas que promovem a alteração da estrutura do solo (Vieira, 1985), o que afeta uma série de atributos do solo a ela ligada. Marshall (1962) define a estrutura do solo como sendo o arranjo de partículas do solo e o espaço poroso, incluindo, ainda, a forma, o tamanho e o arranjo dos agregados formados pelas partículas primárias e que se agrupam em unidades com limites definidos.

O espaço poroso do solo é classificado, em função da distribuição de poros por tamanho, em macroporos (poros maiores que 50 μm de diâmetro, caracterizando os poros de aeração e drenagem), e microporos (poros menores que 50 μm , cuja função é o de armazenamento da água). Há um consenso em considerar valores de macroporosidade crítica, situando-os em torno de 0,10 $\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$ (Vomocil & Flocker, 1966; Kiehl, 1979; Oliveira et al., 2003; Centurion et al., 2007; Oliveira et al., 2007; Severiano et al., 2008).

Sintomas de compactação do solo podem ser observados tanto no solo quanto na planta (Dias Junior, 2000). No solo, observa-se incremento nos valores de densidade do solo (Ds) (Kondo & Dias Junior, 1999; Dias Junior et al., 2003; Beutler et al., 2004), na resistência de solo à penetração de raízes (Imhoff et al., 2001; Beutler & Centurion, 2004; Marchão et al., 2007); redução na porosidade, afetando principalmente os bioporos (Torres & Saraiva, 2001; Lima et al., 2005) e os macroporos (Suzuki et al., 2007), podendo ou não afetar a microporosidade (Oliveira et al., 2003). A compactação do solo reduz também a condutividade hidráulica do solo saturado (Sales et al., 1999; Reichert et al., 2007), potencializando os processos erosivos (Richart et al., 2005; Krümmelbein et al., 2008).

Por outro lado, uma leve compactação, pode ser benéfica por aumentar a retenção de água (Resende et al., 2007), além de favorecer o processo de difusão de nutrientes, particularmente o fósforo (Santos et al., 2005) em função do maior contato solo/raiz, podendo resultar no maior rendimento das culturas (Beutler et al., 2005). Contudo, quando excessiva, pode promover redução do estande, variação no tamanho das plantas, amarelecimento das folhas e má formação do sistema radicular, tornando-o raso e superficial (Ferreira & Dias Junior, 1996; Beutler & Centurion, 2004).

A qualidade do solo é definida como o funcionamento do mesmo dentro de limites do ecossistema, que sustente a produtividade biológica, mantenha a

qualidade ambiental e promova a saúde animal e vegetal (Soil Science Society of American, SSSA, 2010).

Segundo Imhoff (2002) a qualidade do solo é intrínseca, e pode ser inferida a partir de suas características e propriedades, ou por observações indiretas. A qualidade física deve incluir atributos físicos do solo relacionados com a magnitude com que a matriz do solo resiste à deformação e, ainda, com a sua capacidade em fornecer ar e água em proporções adequadas ao pleno desenvolvimento das plantas (Singer & Ewing, 2000).

Indicadores de qualidade estrutural do solo têm sido sugeridos para a quantificação das alterações nas propriedades físicas do solo (Horn, 2003; Lapen et al., 2004; Oliveira et al., 2007; Tormena et al., 2007). Embora diversos atributos possam ser utilizados como indicadores de qualidade estrutural, há um consenso de que eles devem incluir atributos que influenciam diretamente a produção das culturas e aqueles que influenciam indiretamente, ao determinar parâmetros da capacidade de suporte de carga do solo (Imhoff, 2002).

2.2 Intervalo Hídrico Ótimo (IHO)

O manejo inadequado do solo promove alterações em vários atributos físicos, os quais interagem entre si, com a conseqüente alteração no ambiente de crescimento das plantas. O conhecimento dessas interações sugere o uso de indicadores que integram diversos atributos físicos do solo relacionados com o crescimento das plantas (Silva et al., 2006).

O IHO é um indicador de qualidade do solo, multifatorial, que engloba o déficit hídrico ou de oxigênio e a resistência mecânica do solo (Silva et al., 1994). Este parâmetro é considerado um indicador de qualidade estrutural para o crescimento das plantas por abranger em torno de um único parâmetro, três fatores físicos que afetam diretamente na produtividade agrícola: água, ar e resistência à penetração do sistema radicular (Imhoff, 2002).

O risco de exposição das culturas às condições físicas inadequadas no solo depende da amplitude do IHO (Silva & Kay, 1997). Nesse cenário, esse indicador significa grande avanço nos estudos de biofísica do solo, sendo considerado o indicador que melhor se correlaciona ao crescimento das plantas (Tormena et al., 2007).

A quantificação do IHO exige a determinação dos limites superiores e inferiores de água disponível às plantas. Os limites superiores são determinados pelo conteúdo de água no solo referente à capacidade de campo (θ_{CC}) ou à porosidade de aeração (θ_{PA}); e os limites inferiores, pelo conteúdo de água do solo no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) ou pelo conteúdo de água no solo que promove resistência do solo à penetração limitante ao desenvolvimento radicular (θ_{RP}). Silva et al. (2002) ressaltam que diferentes valores dos limites críticos podem ser utilizados sem alterar a aplicabilidade do conceito.

Se o solo apresentar estrutura ideal ao desenvolvimento das plantas, os limites, superior e inferior, serão respectivamente a θ_{CC} e θ_{PMP} , correspondendo ao conteúdo de água disponível (AD) (Silva et al., 2006). Entretanto, com a degradação estrutural do solo ocorre a substituição desses limites pela θ_{PA} e θ_{RP} , reduzindo o IHO (Tormena et al., 1998; Leão et al., 2004), tornando-o assim um indicador mais sensível às alterações estruturais que a AD (Silva et al., 1994).

A Ds na qual o IHO assume o valor nulo é considerada como densidade crítica ao desenvolvimento das plantas (Dsc), uma vez que, para qualquer conteúdo de água no solo, ocorrerá limitação física para o desenvolvimento das plantas. Tormena et al. (1998) encontraram valores de Dsc igual a $1,28 \text{ g cm}^{-3}$ para um Latossolo Argiloso, enquanto que valores para solos de textura média variaram de $1,55$ a $1,62 \text{ g cm}^{-3}$ (Silva et al., 1994; Beutler et al., 2004); e para os arenosos, o valor limite assumido situa-se acima de $1,70 \text{ g cm}^{-3}$ (Imhoff et al., 2001). Isto demonstra a forte relação de IHO com textura do solo.

Revisando dados de literatura de diferentes autores que trabalharam com solos de diferentes granulometrias e classes pedológicas, Reichert et al. (2007) relacionaram os parâmetros IHO e percentual de argila, sem, contudo, levar em consideração a influência da estrutura do solo. Em contrapartida, Severiano et al. (2008) demonstraram que o IHO em um Latossolo e um Cambissolo, com composições granulométrica semelhantes, variou devido ao tipo, classe e grau de estruturação dos mesmos.

2.3 Comportamento compressivo do solo

O aumento do tráfego de máquinas sobre o solo promove uma série de alterações nas propriedades físicas, destacando-se o processo de compactação do solo, tornando-o uma preocupação universal (Larson et al., 1980). Este processo é considerado um dos mais importantes fatores limitantes à obtenção de maiores índices de produtividade das culturas exploradas.

A compactação tem sua origem na compressão do solo não saturado; a facilidade com que esse decresce de volume é chamada de compressibilidade (Gupta & Allmaras, 1987), a qual é dependente de fatores intrínsecos e extrínsecos do solo (Lebert & Horn, 1991). Nesse último caso, destaca-se o tipo, a intensidade e a frequência da carga aplicada pelas máquinas agrícolas, como a carga por eixo, a área de contato do rodado com o solo e a pressão de inflação dos pneus (Castro Neto, 2001).

Os fatores intrínsecos que afetam a compressibilidade do solo estão relacionados com a história de tensão (Gupta et al., 1989), conteúdo de água no solo ou potencial matricial (Dias Junior, 1994; Oliveira et al., 2003), textura, estrutura e densidade do solo (Larson et al., 1980; Gupta et al., 1989; Severiano et al., 2008; Ajayi et al., 2009), mineralogia da fração argila, hidróxidos de

alumínio livres, além de outros atributos químicos do solo (Assouline et al., 1997).

Para uma mesma condição de manejo, o conteúdo de água no solo é o fator que governa a quantidade de deformação que poderá ocorrer (Dias Junior, 1994). Assim, quando os solos estão mais secos, sua capacidade de suporte de carga pode ser suficiente para suportar as pressões aplicadas e a compactação do solo pode não ser significativa.

A suscetibilidade do solo à compactação torna-se crítica em condições de excessivos conteúdos de água no solo (Dias Junior & Pierce, 1996), devido à baixa capacidade de suporte de carga do solo. Assim, torna-se necessária a determinação da umidade antes que seja cultivado ou trafegado, bem como uma previsão quantitativa do prejuízo causado à sua estrutura, caso as pressões aplicadas pelas máquinas excedam a capacidade de suporte de carga do mesmo (Silva et al., 2007).

A curva de compressão do solo obtida em laboratório, por meio do ensaio de compressão uniaxial, tem sido utilizada para simular as reduções do volume do solo (Stone & Larson, 1980; Dias Junior, 1994). Essa curva representa graficamente a relação entre o logaritmo da pressão aplicada ao solo e algum parâmetro relacionado ao arranjo das partículas, sendo comumente utilizada a D_s (Dias Junior & Pierce, 1996).

Quando o solo não sofreu nenhuma pressão prévia, a curva de compressão é linear, denominada de reta de compressão virgem, em que a aplicação de qualquer pressão resultará em deformações não recuperáveis (Larson et al., 1980; Dias Junior & Pierce, 1996), causando, portanto, compactação adicional.

Entretanto, quando o solo já sofreu pressões prévias, o mesmo adquire certo grau de compactidade, sofrendo deformações apenas quando submetidos a pressões superiores às anteriormente aplicadas. O comportamento da curva de

compressão do solo nessas condições é descrito em duas regiões características: uma de deformações elásticas e recuperáveis, denominada de curva de compressão secundária (portanto, não degradando a estrutura do solo) e uma região de deformações plásticas e não recuperáveis, denominada de curva de compressão virgem (região em que ocorre compactação adicional) (Holtz & Kovacs, 1981; Dias Junior & Pierce, 1996).

O ponto que divide as duas regiões é denominado de pressão de preconsolidação (σ_p) e seu uso como um indicador de qualidade estrutural do solo baseia-se no fato dele indicar a máxima pressão que pode ser exercida no solo sem que uma compactação adicional ocorra (Dias Junior & Pierce, 1996).

Estudos sobre o comportamento compressivo em Latossolos Brasileiros vêm aumentando nos últimos anos. Neste sentido, e com o objetivo de avaliar o estado inicial de compactação sobre a compressibilidade de um Latossolo Vermelho distrófico argiloso, Silva et al. (2002) verificaram relação direta entre a D_s e a pressão de preconsolidação.

Avaliando as alterações estruturais em um Latossolo Vermelho distrófico argiloso após vinte anos de manejo agrícola, Oliveira et al. (2003) constataram maior capacidade de suporte de carga nas áreas sob vegetação de cerrado e sob plantio direto na profundidade superficial (0-5 cm), em comparação com a área sob cultivo convencional, preparada com arado de discos. Esse comportamento foi atribuído à influência da densidade do solo e à matéria orgânica, cujos teores foram bem superiores aos encontrados na área que sofreu revolvimento anual. Na profundidade de 20-30 cm, foi observado comportamento inverso, o que foi atribuído ao histórico de tensão da área sob cultivo convencional, função da ação do arado de discos na profundidade especificada.

Avaliando a influência do rodado traseiro do trator e de implementos agrícolas sobre a compressibilidade de um Latossolo Vermelho distrófico típico

da região do Cerrado, Silva et al. (2003) constataram que a intensidade de tráfego do rodado e a ação da soleira dos implementos alteraram o comportamento compressivo do solo. De maneira geral, a passada do rodado traseiro provocou compactação adicional. Contudo, a soleira dos órgãos ativos do arado de discos e da grade aradora foram os que mais elevaram a pressão de preconsolidação.

Visando obter uma solução para os problemas resultantes das operações de colheita de *Eucalyptus* sp. em um Latossolo Vermelho-Amarelo argiloso, com base nos modelos de capacidade de suporte de carga do solo, Dias Junior et al. (2003) concluíram que as operações conjuntas realizadas com o Harvester e Forwarder, Feller-Büncher e Skidder e Feller-Büncher e Skidder foram as que mais degradaram a estrutura do solo.

Uma vez quantificada a compactação em sistemas silviculturais, faz-se necessário à adoção de medidas preventivas. Nesse sentido, Silva et al. (2007) avaliaram o efeito da camada de resíduos da colheita sobre a pressão de preconsolidação, com o uso dos modelos de capacidade de suporte de carga de um Latossolo Amarelo e de um Latossolo Vermelho. Os resíduos florestais minimizaram a compactação do solo causada pelo tráfego do “Forwarder”, sendo a presença de galhada + casca a condição que oferece maior dissipação da carga do maquinário aplicada ao solo.

Severiano et al. (2008), avaliando alterações estruturais em um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), textura média, em consequência das operações de colheita da cana-de-açúcar em diferentes épocas de safra, constataram que o atributo pressão de preconsolidação é muito sensível e apropriado para o diagnóstico da compactação do solo. Os autores salientaram que a colheita mecanizada da cultura em épocas chuvosas pode ser muito prejudicial à estrutura do solo, destacando que a pressão exercida pelas

máquinas pode superar a capacidade de suporte de carga do solo nessa época, quando o solo se encontra com elevado conteúdo de água.

Dentre os fatores internos relacionados com a compressibilidade de Latossolos brasileiros, Ajayi et al. (2009) destacaram a relação existente entre a resistência do solo à compactação com a mineralogia e estrutura. Os autores observaram que o Latossolo Amarelo coeso de mineralogia caulínica e estrutura em blocos apresentou maior capacidade de suporte de carga em comparação com Latossolos Vermelhos de mineralogia oxídica e estrutura granular típica; salienta-se, que os solos estudados eram argilosos ou muito argilosos.

3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AJAYI, A. E.; DIAS JUNIOR, M. S.; CURTI, N.; ARAUJO JUNIOR, C. F.; SOUZA, T. T. T.; INDA JUNIOR, A.V. Strength attributes and compaction susceptibility of Brazilian Latosols. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 105, n. 1, p. 122-127, Sept. 2009.

ASSOULINE, S.; TAVARES FILHO, J.; TESSIER, D. Effect of compaction on physical and hydraulic properties: experimental results and modeling. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 61, n. 2, p. 390-398, Mar./Apr. 1997.

BEULTER, A. N.; CENTURION, J. F. Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 6, p. 581-588, jun. 2004.

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, MG, v. 29, n. 6, p. 843-849, nov./dez. 2005.

CASTRO NETO, P. **Desenvolvimento e avaliação de equipamentos e metodologia para determinação de parâmetros físicos do solo relacionados a dias trabalháveis com máquinas agrícolas**. 2001. 155 p. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

CENTURION, J. F.; FREDDI, O. S.; ARATANI, R. G.; METZNER, A. F. M.; BEUTLER, A. N.; ANDRIOLI, I. Influência do cultivo da cana-de-açúcar e da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos Vermelhos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, n. 2, p. 199-209, mar./abr. 2007.

DIAS JUNIOR, M. S. **Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic**. 1994. 114 p. Tese (Doutorado em Crop and Soil Sciences)- Michigan State University, East Lansing.

DIAS JÚNIOR, M. S. Compactação do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H. V.; SCAEFER, C. E. G. C. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 1, p. 55-94.

DIAS JÚNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Campinas, SP, v. 20, n.2 p. 175-182, 1996.

DIAS JUNIOR, M. S.; LEITE, F. P.; WINTER, M. E.; PIRES, J. V. G. Avaliação quantitativa da sustentabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho-amarelo cultivado com Eucalipto na região de Peçanha-MG. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 27, n. 3, p. 343-349, maio/jun. 2003.

FERREIRA, M. M.; DIAS JÚNIOR, M. S. **Física do solo**. Lavras: UFLA, 1996. 86 p.

GUPTA, S. C.; ALLMARAS, R. R. Models to access the susceptibility of soil to excessive compaction. **Advances in Soil Science**, New York, v. 6, p. 65-100, 1987.

GUPTA, S. C.; HADAS, A.; SCHAFER, R. L. Modeling soil mechanical behavior during compaction. In: LARSON, W. E.; BLAKE, G. R.; ALLMARAS, R. R.; VOORHEES, W. B.; GUPTA, S. C. (Ed.). **Mechanical and related process in structured agricultural soils**. The Netherlands: Kluwer Academic, 1989. p. 137-152.

HOLTZ, R. D.; KOVACS, W. D. **An introduction to geotechnical engineering**. New Jersey: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1981. 733p.

HORN, R. Stress-strain effects in structured unsaturated soils on coupled mechanical and hydraulic processes. **Geoderma**, Amsterdam, v. 116, n. 1/2, p. 77-88, Sept. 2003.

IMHOFF, S.; SILVA, A. P.; DIAS JUNIOR, M. S.; TORMENA, C. A. Quantificação de pressões críticas para o crescimento das plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 25, n. 1, p. 11-18, jan./mar. 2001.

IMHOFF, S. D. C. **Indicadores de qualidade estrutural e trafegabilidade de Latossolos e Argissolos Vermelhos**. 2002. 94 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas)-Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP.

KÄMPF, N.; CURI, N. Argilominerais em solos brasileiros. In: CURI, N.; MARQUES, J. J. G. S. M.; GUILHERME, L. R. G.; LIMA, J. M.; LOPES, A. S.; VENEGAS, V. H. A. (Org.). **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003, v. 3, p. 1-54.

KER, J. C. Latossolos do Brasil: uma revisão. **Geonomos**, Belo Horizonte, v. 5, n. 1, p. 17-40, jan./jun. 1997.

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

KONDO, M. K.; DIAS JUNIOR, M. S. Compressibilidade de três Latossolos em função da umidade e uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 23, n. 2, p. 211-218, abr./jun. 1999.

KRÜMMELBEIN, J.; PETH, S.; HORN, R. Determination of pre-compression stress of a variously grazed steppe soil under static and cyclic loading. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 99, n. 2, p. 139-148, June 2008.

LAPEN, D. R.; TOPP, G. C.; GREGORICH, E. G.; CURNOE, W. E. Least limiting water range indicators of soil quality and corn production, eastern Ontario, Canada. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 78, n. 2, p. 151-170, Aug. 2004.

LARSON, W. E.; GUPTA, S. C.; USECHE, R. A. Compression of agricultural soils from eight soil orders. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 44, n. 3, p. 450-457, May 1980.

LEÃO, T. P.; SILVA, A. P.; MACEDO, M. C. M.; IMHOFF, S.; EUCLIDES, V. P. B. Intervalo hídrico ótimo na avaliação de sistemas de pastejo contínuo e rotacionado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, n. 3, p. 415-423, maio/jun. 2004.

LEBERT, M.; HORN, R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 19, n. 2/3, p. 275-286, Feb. 1991.

LIMA, H. V.; LIMA, C. L. R.; LEÃO, T. P.; COOPER, M.; SILVA, A. P.; ROMERO, R. E. Tráfego de máquinas agrícolas e alterações de bioporos em área sob pomar de laranja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 29, n. 5, p. 677-684, set./out. 2005.

MACEDO, J. Os solos da região dos cerrados. In: ALVARES, V. H.; FONTES, L. E. F.; FONTES, M. P. F. (Ed.). **O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado**. Viçosa, MG: SBSCS/UFV, 1996. p. 135-155.

MARCHÃO, R. L.; BALBINO, L. C.; SILVA, E. M.; SANTOS JUNIOR J. D. G.; SA, M. A. C.; VILELA, L.; BECQUER, T. Qualidade física de um Latossolo Vermelho sob sistemas de integração lavoura-pecuária no Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 6, p. 873-882, jun. 2007.

MARSHALL, T.J. The nature, development, and significance of soil structure. In: NEALE, G.J. (Ed.). **Transaction of joint meeting of comissions IV e V (ISSS)**. Palmerston North, New Zealand, 1962. p. 243-257.

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

OLIVEIRA, G. C.; SEVERIANO, E. C.; MELLO, C. R. Dinâmica da resistência à penetração de um Latossolo Vermelho da microrregião de Goiânia, GO. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 3, p. 265-270, maio/jun. 2007.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. (Org.). **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007, v. 5, p. 49-134.

RESCK, D. V. S.; PEREIRA, J.; SILVA, J. E. **Dinâmica da matéria orgânica na região dos Cerrados**. Planaltina: EMBRAPA CERRADOS, 1991. 22 p.

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B.; CORRÊA, G. F. **Pedologia**: base para distinção de ambientes. 5. ed. Lavras: UFLA, 2007. 322 p.

RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; BRITO, O. R.; LLANILLO, R. F.; FERREIRA, R. Compactação do solo: causas e efeitos. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 26, n. 3, p. 321-344, jul./set. 2005.

SALES, L. E. O.; FERREIRA, M. M.; OLIVEIRA, M. S.; CURI, N. Estimativa da velocidade de infiltração básica do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 11, p. 2091-2095, nov. 1999.

SANTOS, G. A.; DIAS JUNIOR, M. S.; GUIMARÃES, P. T. G.; FURTINI 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.

SEVERIANO, E. C.; OLIVEIRA, G. C.; DIAS JUNIOR, M. S.; OLIVEIRA, L. F. C.; CASTRO, M. B. Pressão de preconsolidação e intervalo hídrico ótimo como indicadores de alterações estruturais do solo em decorrência das operações de colheita da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 4, p. 1419-1427, jul./ago. 2008.

SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 58, n. 6, p. 1775-1781, Nov./Dec. 1994.

SILVA, A. P.; KAY, B. D. Estimating the least limiting water range of soil from properties and management. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 61, n. 3, p. 977-883, May. 1997.

SILVA, J. E.; RESCK, D. V. S. Matéria orgânica do Solo. In: VARGAS, M. A. T.; HUNGRIA, M. **Biologia dos Solos dos Cerrados**. Planaltina, EMBRAPA CERRADOS, 1997. p. 467-524.

SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; IMHOFF, S. Intervalo hídrico ótimo. In: MORAES, M. H.; MÜLLER, M. M. L.; FOLONI, J. S. S. (Coord.). **Qualidade física do solo: métodos de estudo – sistemas de preparo e manejo do solo**. Jaboticabal: FUNEP, 2002. cap. 1 p. 1-20.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; SOARES, J. M. Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico e de um Latossolo Vermelho distrófico típico. I - Estado inicial de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 26, n. 1, p. 1-8, jan./mar. 2002.

SILVA, R. B.; DIAS JUNIOR, M. S.; SILVA, F. A. M.; FOLE, S. M. O tráfego de máquinas agrícolas e as propriedades físicas, hídricas e mecânicas de um Latossolo dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 27, n. 6, p. 973-983, nov./dez. 2003.

SILVA, A. P.; KAY, B. D.; TORMENA, C. A.; IMHOFF, S. Least Limiting Water Range of Soils. In: Lal, R. (Org.). **Encyclopedia of Soil Science**. New York, 2006. v. 1, p. 1026-1029.

SILVA, A. R.; DIAS JUNIOR, M. S.; LEITE, F. P. Camada de resíduos florestais e pressão de preconsolidação de dois Latossolos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 1, p. 89-93, jan. 2007.

SINGER, M.; EWING, S. Soil quality. In: SUMMER, M. E. (Ed.). **Handbook of soil science**. Boca Raton: CRC, 2000. p. 271-298.

SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICAN. **Glossary of soil science terms**. Disponível em: <www.soils.org/publications/soils-glossary>. Acesso em: 13 jan. 2010.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Brasília: EMBRAPA Informação Tecnológica, 2004. 416 p.

STONE, J. A.; LARSON, W. E. Rebound of five one dimensionally compressed unsaturated granular soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 44, n. 3, p. 819-822, 1980.

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

TORMENA, C. A.; ARAÚJO, M. A.; FIDALSKI, J.; COSTA, J. M. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférico sob sistemas de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, n. 2, p. 211-219, mar./abr. 2007.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 22, n. 4, p. 573-581, out./dez. 1998.

TORRES, E.; SARAIVA, O.F. **Camadas de impedimento mecânico do solo em sistemas agrícolas com soja**. Londrina: Embrapa soja, 2001. 58 p.

VARGAS, M. A. T.; HUNGRIA, M. **Biologia dos solos dos Cerrados**. Planaltina: EMBRAPA CERRADOS, 1997. 524 p.

VIEIRA, M. J. Comportamento físico do solo em plantio direto. In: FRANCELLI, A. L.; TORRADO, P. V.; MACHADO, J. (Coord.). **Atualização em plantio direto**. Campinas: Fundação Cargil, 1985. p. 163-79.

VOMOCIL, J. A.; FLOCKER, W. J. Effect os soil compaction on storage and movement of soil, air and water. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 4, p. 242-246, July/Aug. 1966.

CAPÍTULO 2

RELAÇÃO ENTRE COMPORTAMENTO COMPRESSIVO, SUSCETIBILIDADE À COMPACTAÇÃO E TEXTURA DE LATOSSOLOS OXÍDICOS DA REGIÃO DO CERRADO

1 RESUMO

A morfologia dos Latossolos, associada ao relevo predominantemente suavizado e ao expressivo recobrimento no Bioma Cerrado brasileiro, torna-os potencialmente aptos para o desenvolvimento de uma agricultura mecanizada. A adoção de sistemas inadequados de manejo do solo tem como uma das principais consequências, a compactação, que leva à redução do rendimento das culturas e, principalmente, à degradação ambiental. O presente estudo objetivou avaliar a relação entre o comportamento compressivo e a textura de Latossolos da região do Cerrado, com potencial de auxiliarem a formulação de decisões apropriadas ao uso sustentável das terras agrícolas. Foram utilizadas amostras coletadas em dez Latossolos oxídicos sob vegetação nativa, e determinadas a classe textural, o conteúdo de óxidos, a densidade do solo e de partículas, a porosidade total, a curva de retenção de água e a pressão de preconsolidação em diferentes potenciais de água, que foram utilizadas no desenvolvimento de modelos de capacidade de suporte de carga do solo. Os resultados mostraram que a textura do solo influenciou todas as propriedades físico-hídricas das amostras estudadas, reduzindo a densidade do solo e aumentando a porosidade total e a retenção de água com o incremento do conteúdo de argila. Consequentemente, a suscetibilidade à compactação dos Latossolos oxídicos aumentou em direção do incremento no conteúdo de argila, sendo este comportamento considerado específica a essa classe de Latossolo, o que é reflexo do arranjo em grânulos das partículas unitárias e do elevado espaço poroso entre eles. Considerando as características dos maquinários utilizados na agricultura brasileira, a capacidade de suporte de carga do solo pode ser considerada baixa, observando-se, entretanto, diferenças na resistência entre os Latossolos estudados. Naqueles solos argilosos e muito argilosos, algum grau de compactação adicional pode ser considerado praticamente inevitável, mesmo sob condições de baixos conteúdos de água no solo, o que exige cautela na avaliação das alterações estruturais decorrentes da compactação adicional do solo após a realização das operações mecanizadas.

2 ABSTRACT

In Brazilian Cerrado Bioma, Latosols predominate on most gently sloping lands and are highly appropriate for development of mechanized agriculture. However, inappropriate farming methods may lead to reduced crop yields and environmental degradation. The objective of the present study was to evaluate the relationship between compression behavior and texture of Latosols in the Cerrado region, aiming to support decision toward more sustainable uses of agricultural land. Soil samples were collected in ten Latosols of oxidic mineralogy under native vegetation, from which it was determined the textural class, Fe/Al oxide content, bulk and particles densities, total porosity, water retention curves and preconsolidation pressure at different water potentials, used to develop soil bearing capacity models. The results indicate that soil texture influenced all physical properties of the studied samples, as increasing clay content increased total porosity and water retention, whereas bulk density was reduced. Consequently, the susceptibility of the compaction of these soils increased with an increment of the clay content, a peculiar behavior, reflecting the granular structure and the high porous space between aggregates. Considering the characteristics of the machinery utilized in Brazilian intensive agriculture, bearing capacity of soils could be considered low, despite considerable variability of soil strength. In clayey and very clayey soils, some additional degree of compaction can be practically inevitable, even with its low water content in the soil, requiring caution in the evaluation of structural changes after harvest operations.

3 INTRODUÇÃO

A produção agrícola empresarial no Brasil, baseada no uso intensivo de maquinário, de insumos e de variedades de plantas melhoradas, é relativamente recente. Até o início da década de 1970, o Bioma Cerrado apresentava cerca de 2 milhões de km² considerados marginais para a agricultura comercial, em função, dentre outros fatores, da acidez e da baixa disponibilidade de nutrientes na maioria de seus solos (Borlaug & Dowsell, 1997).

Com a adoção de tecnologia específica, os problemas relativos à fertilidade química dos solos dessa região vêm sendo gradativamente suplantados. Passou-se então a se obterem produtividades recordes, resultando em um aumento vertiginoso da economia do país. Como consequência, é expressivo o processo de industrialização e melhorias na qualidade de vida da população. Grandes áreas estão sendo convertidas em campos de agricultura (Neufeldt et al., 2002; Leão et al., 2006; Marchão et al., 2008), sendo a produção da região dos Cerrados baseada na agricultura de exportação, além de ser considerada a nova fronteira para produção agroenergética do Brasil (Severiano et al., 2009; Rathmann et al., 2010).

Os solos desta região estão entre os mais velhos da Terra, cujo início do intemperismo é datado do Cretáceo e do Terciário (Marques et al., 2004), com grande destaque para os solos da ordem Latossolos (Oxisols, na U.S. Soil Taxonomy e Ferralsols, na World Reference Base for Soil Resources). São solos que recobrem grandes áreas nos trópicos, particularmente no Brasil. De acordo com Macedo (1996) e Reatto et al. (2007), aproximadamente 50 % do Bioma Cerrado são recobertos por essa classe, sendo, sem dúvida, os principais solos sob utilização agrícola na região (Ker, 1997).

O elevado intemperismo dos Latossolos favoreceu o desenvolvimento de solum muito espesso, com pequena diferenciação entre os horizontes

(Vollant-Tuduri et al., 2005; Reatto et al., 2007; Reatto et al., 2009), o que também refletiu em uma mineralogia muito simples, composta basicamente de caulinita (argilomineral 1:1); óxidos de Fe e Al (termo que inclui óxidos, hidróxidos e oxi-hidróxidos) em diferentes proporções na fração argila, quartzo e outros minerais altamente resistentes (Curi & Franzmeier, 1984; Ker, 1997; Ferreira et al., 1999a; Ajayi et al., 2009b). A mineralogia, associada à presença de moléculas orgânicas recalcitrantes confere aos Latossolos elevada estabilidade estrutural e friabilidade (Resende et al., 2007).

Estes são solos que apresentam horizonte “B latossólico” (Bw: weathering) em sequência a qualquer tipo de horizonte A e sem gradiente textural entre os horizontes superficiais e subsuperficiais (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, EMBRAPA, 2006). Com relação à textura (neste trabalho, este termo é usado para se referir à distribuição de partículas por tamanho da fração mineral), apresenta conteúdo mínimo de argila igual ou superior a 150 g kg^{-1} (classe textural franco-arenosa ou mais fina), estando relacionada ao material de origem (Giarola et al., 2002; Marques et al., 2004; Reatto et al., 2009). Solos com textura mais grosseira que os Latossolos também ocorrem de forma expressiva nessa região, e também vêm sendo intensivamente utilizados na agricultura (Carneiro et al., 2009; Frazão et al., 2010). No entanto, apesar das semelhanças morfológicas com os Latossolos, com base nos critérios definidos pelo sistema de classificação de solos utilizado no Brasil (EMBRAPA, 2006), são enquadrados em outra ordem.

Por estarem inseridos em relevo predominantemente suavizado, tornam-se potencialmente aptos para o desenvolvimento de uma agricultura mecanizada. Baseando-se nisto, tem-se observado intensa movimentação de máquinas e equipamentos agrícolas em todas as etapas do processo produtivo (Cardoso, 2007; Silva et al., 2009). Em função do alto rendimento operacional, a agricultura brasileira tem se tornado altamente dependente dessa ordem de solo.

Atualmente, o Cerrado Brasileiro é uma das regiões de agricultura mais avançada do país, devido o recobrimento dessa ordem de solo.

Por outro lado, o impacto provocado pelo tráfego de máquinas sobre a estrutura do solo vem sendo negligenciado, o que tem aumentado a preocupação com o aumento das áreas agrícolas com problemas de compactação. Por sua vez, esta é decorrente da compressão do solo não saturado quando submetido a pressões aplicadas pelos modernos maquinários utilizados na agricultura (Gupta et al., 1989).

Grande parte desse problema se deve às operações mecanizadas realizadas em condições inadequadas ao tráfego. Isso se deve ao fato da capacidade de suporte de carga do solo (resistência à compactação) decrescer exponencialmente com o aumento do conteúdo de água no solo (Peng et al., 2004; Chan et al., 2006; Silva et al., 2009). Este fator de manejo é fundamental para a sustentabilidade da atividade agrícola, principalmente quando se considera a compactação do solo como um dos fatores primordiais de degradação de sua estrutura (Pagliai et al., 2003; Mosaddeghi et al., 2007; Schäffer et al., 2008) o que traz, como consequência, redução da capacidade produtiva (Reichert et al., 2009) e aumento dos processos erosivos (Krümmelbein et al., 2008).

Nesse contexto, torna-se necessário um planejamento global com esforço coordenado para encontrar estratégias de manejo que minimizem os impactos negativos sobre a estrutura desses Latossolos, tendo em vista a sua contribuição no abastecimento mundial de alimentos e, principalmente, quando se considera que a degradação do solo é o principal problema ambiental mundial (Keller et al., 2007).

Para avaliar a resistência mecânica e a susceptibilidade à compactação, a curva de compressão do solo, obtida dos ensaios de compressão uniaxial, tem sido amplamente avaliada nos estudos de compactação do solo (Larson et al.,

1980; Horn & Lebert, 1994; Dias Junior et al., 2008; Silva et al., 2009; Severiano et al., 2010). Esta curva representa graficamente a relação entre o logaritmo da pressão aplicada, no eixo das abscissas, e a alguma propriedade relacionada com a estrutura do solo (densidade do solo ou índice de vazios), no eixo das ordenadas. A curva de compressão é composta de duas regiões: uma de pequenas deformações, classificadas como elásticas e, portanto, recuperáveis, e chamada de curva de compressão secundária. A outra região é chamada de curva de compressão virgem, caracterizada por deformações plásticas e não recuperáveis (Larson et al., 1980; Dias Junior & Pierce, 1995; Silva et al., 2002).

O ponto que separa as duas regiões da curva de compressão é chamado de pressão de preconsolidação (σ_p). De acordo com Dias Junior et al. (2008), a pressão de preconsolidação pode ser considerada como sendo: 1) um indicador do comportamento compressivo do solo (Horn & Fleige, 2003); 2) a máxima pressão a ser aplicada para evitar a compactação adicional do solo (Gupta et al., 1989; Rücknagel et al., 2007). É, portanto, um indicador útil para avaliar a suscetibilidade do solo à compactação (Peng et al., 2004), e ainda 3) a pressão que o sistema radicular tem que superar para poder crescer (Römken & Miller, 1971).

A resistência do solo à compactação depende dos seus atributos intrínsecos, dentre os quais a textura, a mineralogia dos constituintes da fração mineral e a estrutura do solo estão entre os mais relevantes (Larson et al., 1980; Horn & Lebert, 1994; Imhoff et al., 2004; Ajayi et al., 2009b). Em Latossolos, a relação entre a mineralogia das argilas, associada ao desenvolvimento da estrutura do solo e os atributos de resistência, foi estudada por Ajayi et al. (2009a), sendo demonstrado que a capacidade de suporte de carga reduziu na ordem que a estrutura mudou de blocos (Latossolos das regiões litorâneas e do Sul do Brasil) para granular (Latossolos da região do Cerrado).

Apesar da suscetibilidade à compactação de solos tropicais estar sendo discutida em vários artigos científicos (e.g. Imhoff et al., 2004; Leão et al., 2006; Benites et al., 2007; Bell et al., 2007; Dias Junior et al., 2008), há carência de informações quanto ao comportamento compressivo dos Latossolos do Bioma Cerrado, de diferentes classes texturais, uma vez que a distribuição de partículas por tamanho está intimamente relacionada com o arranjo das partículas unitárias e do espaço poroso do solo (Ferreira et al., 1999a; Giarola et al., 2002; Reatto et al., 2007; Carneiro et al., 2009; Reichert et al., 2009). Neste estudo, objetivou-se estabelecer a relação entre o comportamento compressivo, a suscetibilidade à compactação e a textura do solo, usando dez Latossolos representativos da região do Cerrado Brasileiro, através do uso de modelos de capacidade de suporte de carga do solo. Essas informações se tornam muito úteis como subsídios na tomada de decisão sobre a trafegabilidade dos mesmos.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Área estudada e descrição dos locais de amostragem

Inicialmente, foram realizadas descrições dos perfis de acordo com o manual de descrição de solos no campo (Santos et al., 2005) em dez Latossolos (EMBRAPA, 2006) sob vegetação nativa, no município de Rio Verde, Estado de Goiás, Brasil (Figura 1; Tabela 1). As coordenadas geográficas de cada local foram determinadas pelo receptor de sistema de posicionamento global (GPS) e a altitude pelo altímetro. Esse é o grupamento de solos de maior abrangência na região do Cerrado Brasileiro. O relevo desta região é pouco movimentado, o que ajuda a explicar o avanço da agricultura mecanizada e intensiva (Marques et al., 2004; Severiano et al., 2009).

TABELA 1 Locais de amostragens e descrição dos solos.

Legenda	Coordenadas geográficas	Altitude	Cor de Munsell	Classificação do solo
L ₁₅₂	17°31'18''S; 51°38'07''W	898m	5YR 5/4	Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico
L ₂₀₉	17°57'29''S; 51°00'31''W	807m	2,5YR 3/6	Latossolo Vermelho distrófico
L ₂₆₃	17°35'01''S; 51°37'12''W	871m	2,5YR 3/3	Latossolo Vermelho distrófico
L ₃₁₁	17°43'11''S; 50°59'49''W	803m	2,5YR 4/6	Latossolo Vermelho distrófico
L ₃₆₅	17°53'50''S; 50°58'30''W	664m	10R 3/3	Latossolo Vermelho distroférico
L ₃₉₉	17°46'02''S; 51°02'17''W	838m	2,5YR 4/6	Latossolo Vermelho distrófico
L ₄₂₀	17°46'40''S; 50°47'52''W	685m	10R 3/4	Latossolo Vermelho distroférico
L ₄₉₀	17°47'00''S; 50°57'55''W	726m	10R 3/4	Latossolo Vermelho distroférico
L ₅₂₁	17°47'26''S; 50°57'17''W	727m	10R 3/6	Latossolo Vermelho distroférico
L ₇₁₆	17°30'52''S; 51°34'05''W	943m	2,5YR 4/4	Latossolo Vermelho distrófico

O clima é classificado de acordo com Köppen (1931), como Megatérmico ou Tropical Úmido (Aw), do subtipo Tropical de Savana, com inverno seco e verão chuvoso. A temperatura média anual varia entre 20°C e 25°C, sendo a temperatura média do mês mais frio superior a 16 °C. A média pluviométrica anual varia de 1500 a 2000 mm, com a máxima precipitação em janeiro e menores em junho, julho e agosto (<50 mm mês⁻¹). A umidade relativa do ar é aproximadamente 75% entre janeiro e abril, e inferior a 30% durante o inverno seco.

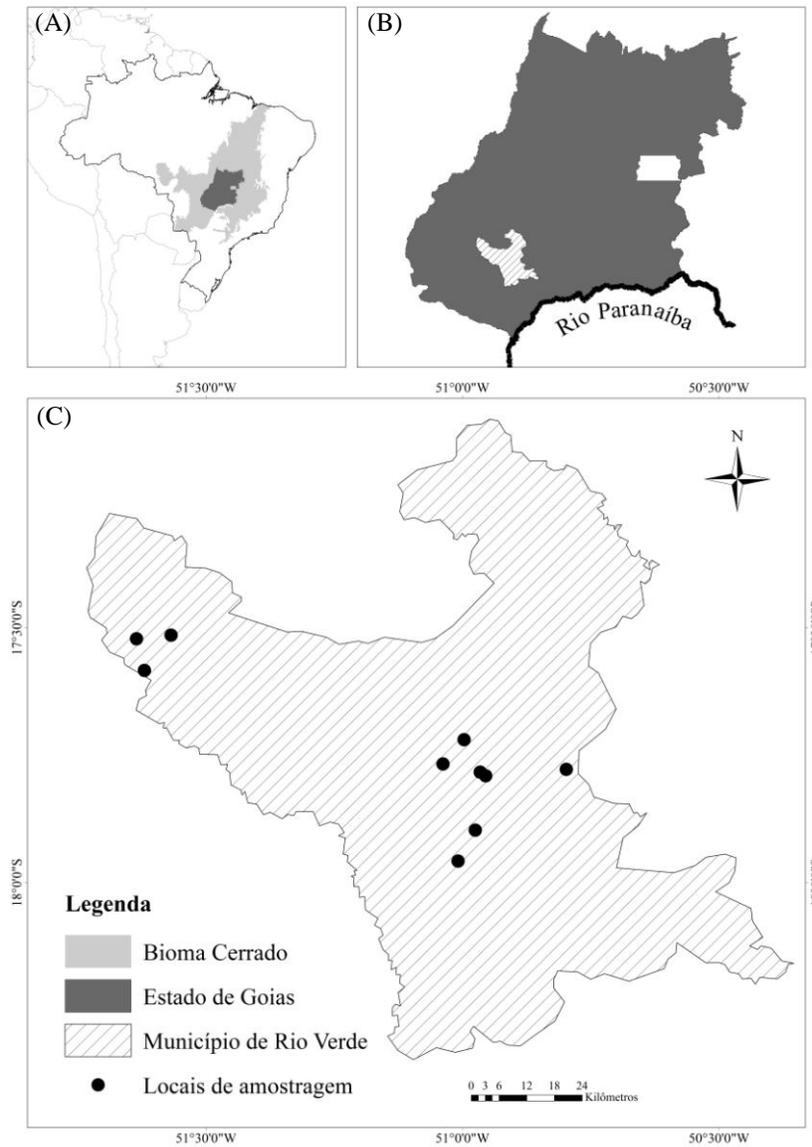


FIGURA 1 (A) Mapa político da Brasil mostrando o bioma Cerrado e o estado de Goiás. (B) A área hachurada esboça o município de Rio Verde, Goiás, e a linha preta o Rio Paranaíba. (C) Os pontos mostram os locais amostrados.

Os locais estudados representam a variabilidade textural existente nos Latossolos da região sudoeste do estado de Goiás, Brasil, e é representativa daquelas que ocorrem no bioma Cerrado. A Figura 2 ilustra a relação entre a formação geológica e a distribuição dos solos na paisagem. O material de origem dos solos é composto por sedimentos argilosos de origem do Cretáceo e do Terciário na superfície geomórfica Sul Americana (altitude > 910m), arenitos da formação Bauru, e basalto oriundo do derramamento magmático de uma fenda do Rio Paranaíba, em diferentes proporções, datados do Pré-cretáceo, nas superfícies geomórficas Velhas (Curi & Franzmeier, 1984; Marques et al., 2004).

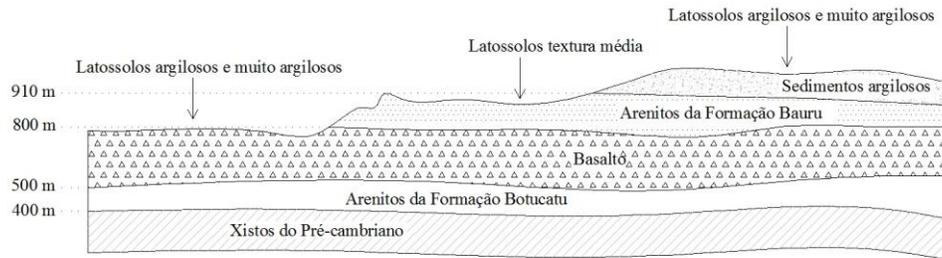


FIGURA 2 Esboço mostrando a relação entre a formação geológica e distribuição dos Latossolos na paisagem do sudoeste do Estado de Goiás. Adaptado de Marques et al. (2004).

4.2 Protocolo de Amostragem

Foram abertas, em cada local, trincheiras com dimensões de 1 m x 1 m x 2 m, onde trinta e seis amostras de solo com estrutura preservada (indeformadas) foram coletadas em cilindros de alumínio de 6,4 cm de diâmetro x 2,5 cm de altura utilizando o amostrador de Uhland, com cuidado para evitar a auto-

compactação das amostras, no horizonte B latossólico (Bw) de todos os perfis (0,80 a 1,00 de profundidade). Segundo Ajayi et al. (2009b), como estes solos são homogêneos em termos morfológicos, escolheu-se para coletar as amostras o B diagnóstico, porque é nesse horizonte que a estrutura é expressa verdadeiramente, e a fim de se evitar, tanto quanto possível, teores consideráveis de matéria orgânica do solo, tendo em vista esta exercer influência sobre os atributos analisados.

As amostras, coletadas aleatoriamente em cada trincheira para assegurar a boa representatividade, foram acondicionadas em filmes plásticos, e parafinadas, objetivando à preservação das mesmas até serem realizados os ensaios de compressibilidade, além de outras análises.

4.3 Caracterização química, física e mineralógica

As amostras indeformadas dos Latossolos foram preparadas em laboratório. O solo correspondente às porções excedentes das partes superiores e inferiores do volume de seus respectivos anéis foram secas ao ar e passadas por peneiras de 2 milímetros, obtendo assim as amostras deformadas.

As análises de caracterização química e física do solo foram realizadas conforme metodologias descritas em EMBRAPA (1997). A distribuição das partículas por tamanho foi determinada via agitação rápida (10000 rpm), utilizado como dispersante físico, e NaOH 1N em contato com a amostra durante 24 horas, como dispersante químico. Procedeu-se às quantificações das partículas de areia (2,00–0,05 mm) por tamisagem, de argila (<0,002 mm) pelo método da pipeta, e de silte (0,05–0,002 mm), determinada pela diferença entre o conteúdo total da amostra de solo e os conteúdos de areia e argila.

A densidade do solo inicial (D_s) foi obtida pela relação entre a massa de solo seco e o volume do anel (Blake & Hartge, 1986a). A densidade de partículas (D_p) foi determinada utilizando-se água destilada e eliminação a

vácuo do ar do picnômetro de acordo com Blake & Hartge (1986b). A porosidade total (PT) foi determinada a partir da relação entre a densidade do solo e densidade de partículas, pela seguinte expressão: $PT = [1 - (D_s/D_p)]$ (EMBRAPA, 1997).

Para a caracterização química, foram determinados os conteúdos de SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, P₂O₅ e TiO₂ do extrato sulfúrico, após digestão com 9,4 M H₂SO₄ (densidade = 1,47). Este método é um procedimento padrão em solos brasileiros para indicar o grau de intemperismo do solo (EMBRAPA, 2006). É considerado também um indicativo da composição mineralógica da fração argila (Reatto et al., 2009) de Latossolos. Os conteúdos de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ foram utilizados nos cálculos das relações moleculares Ki (SiO₂/Al₂O₃) e Kr [SiO₂/(Al₂O₃ + Fe₂O₃)] (EMBRAPA, 2006).

4.4 Curva de retenção de água no solo

Quatro amostras indeformadas de cada local foram inicialmente saturadas por capilaridade com água destilada e equilibradas nos seguintes potenciais matriciais (Ψ_m): 1, 2, 4, 6, 8 e 10 kPa, na unidade de sucção (Grohmann, 1960) e 33, 60, 100, 500 e 1500 kPa dentro de câmaras de pressão de Richards (Klute, 1986). Esses sistemas são dotados de placa cerâmica porosa e equipamentos de produção e controle de pressão, em que a extração de água ocorre por diferença de potencial entre a placa porosa e a amostra de solo.

Foram determinados ainda, em amostras de solo deformadas, o conteúdo de água retido em potenciais matriciais próximos de 5000 e 10000 kPa, utilizando o psicrômetro WP4-T Dewpoint Potentia Meter (Decagon Devices, 2000). Este psicrômetro é dotado de um sistema cuja gaveta conduz uma amostra de solo úmido para dentro de uma câmara que fica hermeticamente fechada. A umidade no interior da câmara equilibra-se com o potencial da água no solo, sendo este calculado com base na temperatura do solo e do ar no ponto

de orvalho (Scanlon et al., 2002). Dessa forma, é possível quantificar o conteúdo de água retido no solo em potenciais matriciais superiores àqueles determinados pelos extratores de placas porosas. Tais determinações são fundamentais em estudos de mecânica do solo, uma vez que as operações de manejo mecanizado podem promover o tráfego de maquinário e implementos mesmo em condições de solo muito seco ($\Psi_m > 1500$ kPa). As curvas de retenção de água no solo foram determinadas de acordo com Genuchten (1980).

4.5 Ensaio de compressão uniaxial

Trinta e duas amostras indeformadas de cada solo foram inicialmente saturadas por capilaridade, sendo equilibradas em cada um dos seguintes potenciais matriciais (Ψ_m): 1, 2, 6, 10, 33, 100, 1.500, 10.000 kPa, sendo 4 repetições de cada potencial. As amostras indeformadas nas diferentes tensões de água no solo foram então submetidas ao ensaio de compressão uniaxial, usando consolidômetro pneumático Terraload S-450 (Durham Geo Enterprises, USA), conforme descrito por Dias Junior (1994).

As amostras indeformadas foram mantidas dentro da célula de compressão e submetidas às pressões de 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1.600 kPa. Cada pressão foi aplicada até obter 90 % da deformação máxima (Taylor, 1948), sendo então aplicadas sucessivamente as pressões crescentes, sem efetuar o descarregamento das pressões previamente aplicadas. A deformação do solo em função da carga aplicada foi monitorada através do incremento na densidade do solo.

4.6 Determinação da pressão de preconsolidação e análise estatística

A curva de compressão do solo foi obtida ajustando-se graficamente, para cada amostra, o logaritmo da pressão aplicada (base 10) no eixo das abscissas, e a deformação do solo no eixo das ordenadas. Os valores de pressão

de preconsolidação (σ_p) foram determinados de acordo com metodologia descrita por Dias Junior & Pierce (1995), e então ajustados em função do potencial matricial (Ψ_m), obtendo-se assim os modelos de capacidade de suporte de carga do solo. A equação 1 permite calcular a σ_p em função do Ψ_m :

$$\sigma_p = a\Psi_m^b \quad (1)$$

ou alternativamente

$$\log \sigma_p = \log a + b \log \Psi_m \quad (2)$$

Os parâmetros a e b representam parâmetros empíricos de ajuste do modelo. As análises de regressão foram ajustadas através do software Sigma Plot 10.0 (Jandel Scientific), correspondendo aos modelos de capacidade de suporte de carga dos solos em estudo. As comparações entre as equações estimadas para os Latossolos foram realizadas de acordo com procedimento descrito por Snedecor & Cochran (1989), o qual testa a homogeneidade dos dados (F) e a significância dos coeficientes angular (b) e linear ($\log a$) das equações linearizadas (eq. 2).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização física e classificação mineralógica dos Latossolos estudados

A classificação textural dos Latossolos estudados está apresentada na Figura 3. A ampla variação da distribuição de partículas por tamanho nas amostras dos diferentes solos está relacionada à composição do material de

origem, conforme apresentado na Figura 2. Latossolos originados de sedimentos argilosos ou de materiais provenientes do intemperismo do basalto tendem a ser mais argilosos que aqueles desenvolvidos de arenitos. Essa relação torna-se evidente na composição da fração areia ($> 0,05$ mm), composta basicamente pelo mineral quartzo (Ferreira et al., 1999a,b; Marques et al., 2004; EMBRAPA, 2006), que é extremamente resistente ao intemperismo e está presente no arenito e ausente no basalto (Curi & Franzmeier, 1987). Dessa forma, sugere-se que esses dois materiais parentais em diferentes proporções originaram os solos estudados (Curi & Franzmeier, 1984; Marques et al., 2004).

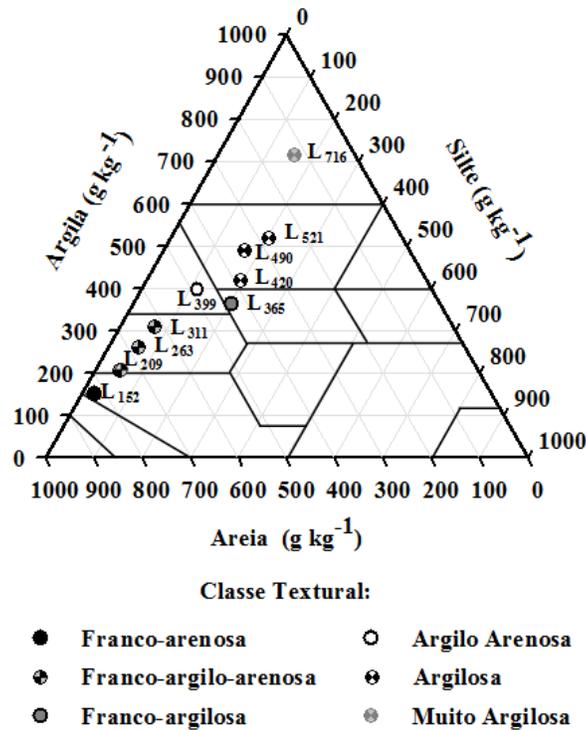


FIGURA 3 Triângulo e classificação textural do horizonte Bw dos Latossolos (L) estudados. O número subscrito na legenda dos Latossolos corresponde ao respectivo conteúdo de argila (g kg^{-1}).

Os Latossolos apresentaram ainda baixo conteúdo de silte, devido ao elevado grau de intemperismo (Volland-Tuduri et al., 2005; Reatto et al., 2009), configurado pela relação silte/argila inferior a 0,6 em todas as amostras (EMBRAPA, 2006). Mesmo assim, ainda é comum a presença nas frações areia e silte, de microagregados de argila resistentes aos tratamentos de dispersão química e física da terra fina nos Latossolos argilosos e muito argilosos, sobretudo naqueles com caráter férrico ou gibbsítico (Vitorino et al., 2003; Gomes et al., 2004).

A densidade do solo (D_s) das amostras dos solos estudados é apresentada na Tabela 2. A variação desta propriedade nas amostras dos solos estudados deve-se basicamente à distribuição e ao arranjo das partículas unitárias, e apresenta relação inversa ao conteúdo de argila dos solos, de acordo com Benites et al. (2007) e Suzuki et al. (2008). Isto se deve ao aumento do volume de poros intra e inter-microagregados promovido pelas partículas finas, resultando assim, no incremento da porosidade total (Tabela 2) (Ferreira et al., 1999a; Reatto et al., 2007; Silva et al., 2008). Contudo, considerando a influência da classe textural do solo na D_s , esses resultados podem ser considerados muito baixos e não limitantes ao crescimento de plantas em solos altamente intemperizados (Reichert et al., 2009), corroborando com observações realizadas por Leão et al. (2006), para Latossolos da região do Cerrado sob condições naturais. Consequentemente, considerando as classes texturais dos solos, a porosidade total (PT) pode ser considerada elevada.

Por outro lado, os valores de densidade de partículas (D_p) apresentaram relação direta, principalmente, com o conteúdo de Fe_2O_3 do extrato sulfúrico (Tabela 2), corroborando com Giarola et al. (2002). De acordo com Curi & Franzmeier (1987), o efeito do material de origem é evidente mesmo em solos altamente intemperizados, sendo neste caso a relação arenito/basalto em

diferentes proporções. Em função da elevada porosidade de aeração que esses Latossolos apresentam, são muito bem drenados (Gomes et al., 2004; Cooper & Vidal-Torrado, 2005; Volland-Tuduri et al., 2005; Leão et al., 2006; Cavalieri et al., 2009; Reatto et al., 2009; Severiano et al., 2009). Devido aos processos geoquímicos, ocorre a oxidação e precipitação, e, conseqüentemente, a concentração residual do ferro na forma de óxidos. Esses minerais apresentam elevada densidade específica. Dessa forma, a Dp desses solos tropicais refletiu a composição dos minerais da fração argila que apresentam densidade específica elevada (Schwertmann & Taylor, 1977).

TABELA 2 Atributos físicos e conteúdos de óxidos das amostras dos Latossolos (L) estudados.

Solo	Ds (kg dm ⁻³)	Dp (dm ³ dm ⁻³)	PT (dm ³ dm ⁻³)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	TiO ₂	Ki	Kr
				(g kg ⁻¹)						
L ₁₅₂	1,36	2,66	0,49	24	67	38	0,17	8	0,61	0,45
L ₂₀₉	1,31	2,76	0,53	34	85	85	0,31	34	0,68	0,42
L ₂₆₃	1,24	2,75	0,55	24	113	116	0,37	29	0,36	0,22
L ₃₁₁	1,13	2,76	0,59	62	147	68	0,28	19	0,72	0,55
L ₃₆₅	1,14	2,81	0,59	41	173	181	0,11	56	0,40	0,24
L ₃₉₉	1,05	2,67	0,61	92	213	78	0,37	18	0,73	0,60
L ₄₂₀	1,02	2,95	0,65	56	204	231	2,10	63	0,47	0,27
L ₄₉₀	1,01	2,92	0,65	90	179	298	1,39	68	0,85	0,41
L ₅₂₁	0,98	2,92	0,66	87	205	245	2,29	82	0,72	0,41
L ₇₁₆	0,86	2,69	0,68	180	344	105	0,54	24	0,88	0,73

Ds: Densidade do solo; Dp: Densidade de partículas; PT: Porosidade total; Ki: relação molecular (SiO₂/Al₂O₃) Kr: relação molecular SiO₂: (Al₂O₃ + Fe₂O₃). O número subscrito na legenda dos Latossolos corresponde ao respectivo conteúdo de argila (g kg⁻¹).

Os conteúdos dos óxidos do extrato sulfúrico também são utilizados como critério taxonômico pelo sistema brasileiro de classificação dos solos.

Solos com $180 < \text{Fe}_2\text{O}_3 < 360 \text{ g kg}^{-1}$ (amostras estudadas: L₃₆₅; L₄₂₀; L₄₉₀; L₅₂₁) são classificados em nível de grande grupo (terceiro nível hierárquico desse sistema de classificação) como férricos (EMBRAPA, 2006).

As relações moleculares Ki e Kr são utilizadas na estimativa da mineralogia e classificação dos Latossolos (EMBRAPA, 2006). São, portanto, considerados indicativos do grau de intemperismo do solo. Os Latossolos são classificados em cauliniticos (Kr > 0,75) ou oxídicos (Kr ≤ 0,75), de acordo com a predominância de óxidos de Fe e Al. A relação Kr variou de 0,2 a 0,7 para os horizontes Bw estudados (Tabela 2). Consequentemente, todos os Latossolos estudados foram classificados como oxídicos.

Os óxidos de ferro e alumínio funcionam como agentes cimentantes entre as partículas minerais, condicionando o tipo de estrutura do solo (Muggler et al., 1999; Resende et al., 2007; Barthès et al., 2008). Nessas condições de mineralogia, os óxidos de ferro e alumínio na fração argila tendem a desorganizar as partículas microscopicamente. A micromorfologia dos Latossolos oxídicos é conhecida por apresentar a distribuição dos grãos em relação ao plasma seguindo o padrão aglutinado com cavidades interconectadas, ou seja, em agregados granulares muito pequenos e muito resistentes, de diâmetro entre 50 a 300 μm (Vollant-Tuduri et al., 2005). São dotados de elevada estabilidade estrutural e friabilidade, com predomínio de poros entre micropeds (inter agregados) (Ferreira et al., 1999b; Vitorino et al., 2003; Schaefer et al., 2004). Consequentemente, esse tipo de estrutura confere aos solos elevada permeabilidade, mesmo naqueles mais argilosos (Ferreira et al., 1999a; Cavalieri et al., 2009). A expressão de estrutura granular muito pequena, favorecida pela presença dos óxidos (Resende et al., 2007), é típica dos Latossolos da região do Cerrado, independente da sua classe textural (Gomes et al., 2004; Reatto et al., 2009).

5.2 Retenção de água no solo

As curvas de retenção de água obtidas para os diferentes Latossolos estudados são apresentadas na Figura 4. Os resultados mostram que os conteúdos de água retidos nas diferentes tensões aumentam em direção ao incremento no conteúdo de argila. Isto se deve ao aumento de poros texturais (poros intra-agregados), que são basicamente relacionados com a distribuição por tamanho das partículas primárias do solo (conteúdos de areia, silte e argila) (Cooper & Vidal-Torrado et al., 2005).

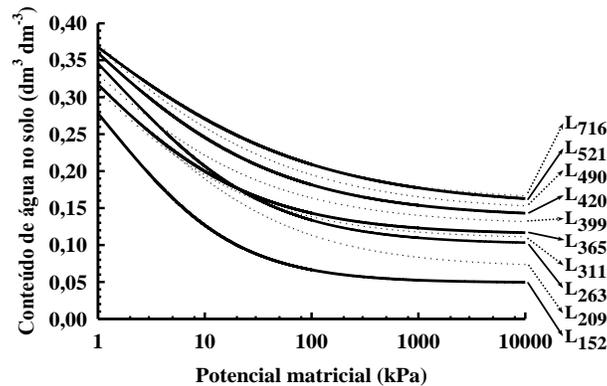


FIGURA 4 Curvas de retenção de água das amostras dos Latossolos (L) estudados. O número subscrito na legenda dos Latossolos corresponde ao respectivo conteúdo de argila (g kg^{-1}).

A forte influência da argila na retenção da água no solo corrobora os resultados apresentados por diversos estudos (Giarola et al., 2002; Hodnett & Tomasella, 2002; Rawls et al., 2003; Reatto et al., 2007; Ajayi et al., 2009a). De acordo com Silva et al. (2008), o conteúdo de argila é o atributo mais importante na retenção de água em solos altamente intemperizados de regiões tropicais, como é o caso de todos os Latossolos estudados, em função dos baixos conteúdos de matéria orgânica e predomínio de argilas de baixa atividade,

comparativamente aos solos de regiões de clima temperado (Resende et al., 2007). Dessa forma, o incremento na retenção de água está relacionado com a maior área superficial específica para adesão de moléculas de água, conferida ao solo pela argila.

O conhecimento da capacidade de retenção de água no solo torna-se fundamental em estudos de comportamento compressivo e trafegabilidade dos solos agrícolas, uma vez que, para uma mesma condição de manejo, o conteúdo de água no solo é o fator que governa a quantidade de deformação que poderá ocorrer (Imhoff et al., 2004; Peng et al., 2004; Fritton, 2008; Schäffer et al., 2008; Severiano et al., 2009; Silva et al., 2009). Portanto, em função das diferenças entre as curvas de retenção de água dos Latossolos (Figura 4), sugere-se que, para uma mesma energia de retenção de água no solo (potencial matricial), os Latossolos argilosos e muito argilosos estudados, em relação àqueles de textura média, apresentaram também comportamento diferenciado quando submetidos às pressões externas aplicadas pelo maquinário agrícola, dada a ação lubrificante da água sobre as partículas do solo, inclusive quando o mesmo se encontrar com o conteúdo de água abaixo do ponto de murcha permanente de culturas ($\Psi_m > 1500$ kPa), onde o tráfego de máquinas para a realização dos tratos culturais na agricultura brasileira ainda é intenso (e.g. manejo fitossanitário e colheitas florestal, de cana-de-açúcar e das culturas produtoras de grãos após o término da estação chuvosa).

5.3 Comparação dos modelos de capacidade de suporte de carga dos Latossolos

Para verificar as possíveis relações entre a textura do solo e o comportamento compressivo dos Latossolos, todas as comparações entre os modelos de capacidade de suporte de carga dos solos foram realizadas de acordo com Snedecor & Cochran (1989) (Tabela 3). Este procedimento estatístico

analisa a homogeneidade dos dados (F), e a significância dos interceptos ($\log a$) e dos coeficientes angulares da regressão linearizada (b).

TABELA 3 Comparação entre as regressões lineares dos modelos de capacidade de suporte de carga dos Latossolos estudados ($\log \sigma_p = \log a + b \log \Psi_m$), de acordo com Snedecor & Cochran (1989)⁽¹⁾.

Latossolo	F		Decisão	
	F	Coefficiente linear, $\log a$		Coefficiente angular, b
L ₁₅₂ X L ₂₀₉	NH	*	**	Não agrupar
L ₁₅₂ X L ₂₆₃	NH	*	**	Não agrupar
L ₁₅₂ X L ₃₁₁	NH	**	**	Não agrupar
L ₁₅₂ X L ₃₆₅	NH	**	**	Não agrupar
L ₁₅₂ X L ₃₉₉	NH	**	**	Não agrupar
L ₁₅₂ X L ₄₂₀	NH	**	**	Não agrupar
L ₁₅₂ X L ₄₉₀	NH	**	**	Não agrupar
L ₁₅₂ X L ₅₂₁	NH	**	**	Não agrupar
L ₁₅₂ X L ₇₁₆	NH	**	**	Não agrupar
L ₂₀₉ X L ₂₆₃	H	ns	ns	Agrupar
(L ₂₀₉₋₂₆₃) X L ₃₁₁	NH	**	**	Não agrupar
(L ₂₀₉₋₂₆₃) X L ₃₆₅	NH	**	**	Não agrupar
(L ₂₀₉₋₂₆₃) X L ₃₉₉	NH	**	**	Não agrupar
(L ₂₀₉₋₂₆₃) X L ₄₂₀	NH	**	**	Não agrupar
(L ₂₀₉₋₂₆₃) X L ₄₉₀	NH	**	**	Não agrupar
(L ₂₀₉₋₂₆₃) X L ₅₂₁	NH	**	**	Não agrupar
(L ₂₀₉₋₂₆₃) X L ₇₁₆	NH	**	**	Não agrupar
L ₃₁₁ X L ₃₆₅	NH	*	**	Não agrupar
L ₃₁₁ X L ₃₉₉	NH	*	**	Não agrupar
L ₃₁₁ X L ₄₂₀	NH	*	**	Não agrupar
L ₃₁₁ X L ₄₉₀	NH	**	**	Não agrupar
L ₃₁₁ X L ₅₂₁	NH	**	**	Não agrupar
L ₃₁₁ X L ₇₁₆	NH	**	**	Não agrupar
L ₃₆₅ X L ₃₉₉	H	ns	ns	Agrupar
(L ₃₆₅₋₃₉₉) X L ₄₂₀	H	ns	ns	Agrupar
(L ₃₆₅₋₄₂₀) X L ₄₉₀	H	ns	ns	Agrupar
(L ₃₆₅₋₄₉₀) X L ₅₂₁	NH	*	**	Não Agrupar
L ₅₂₁ X L ₇₁₆	H	ns	ns	Agrupar

⁽¹⁾ NH: Não Homogêneo; H: Homogêneo; ns: não-significativo; *: significativo a 5 %; **: significativo a 1 %. O número subscrito na legenda dos Latossolos (L) corresponde ao respectivo conteúdo de argila (g kg^{-1}).

Equações de regressão linear ($\ln \sigma_p = \ln a + b \ln \Psi_m$) homogêneas entre si e coeficientes das regressões não significativos são agrupadas, sendo então, ajustado um novo modelo considerando todos os valores de σ_p e Ψ_m . De acordo com esta análise estatística, os modelos de capacidade de suporte de carga dos Latossolos estudados foram agrupados em cinco faixas de conteúdo de argila, sendo: L₁₅₂, L₂₀₉₋₂₆₃, L₃₁₁, L₃₆₅₋₄₉₀ e L₅₂₁₋₇₁₆ (Tabela 3).

5.4 Relações entre textura do solo e suscetibilidade à compactação

Os modelos de capacidade de suporte de carga das diferentes amostras dos Latossolos, com seus respectivos parâmetros, coeficientes de determinação e nível de significância são apresentados na Figura 5. Estes modelos mostraram que a resistência do solo aumentou em todas as amostras em direção aos maiores potenciais matriciais. Entretanto, sob baixos potenciais matriciais, a resistência do solo é bastante reduzida, devido a uma alta pressão da água nos poros criada dentro do solo (Ajayi et al., 2009b). Os resultados demonstraram que a resistência das amostras dos solos estudados diminuiu com o incremento da fração argila, na seguinte ordem: L₁₅₂ > L₂₀₉₋₂₆₃ > L₃₁₁ > L₃₆₅₋₄₉₀ > L₅₂₁₋₇₁₆.

As proporções entre constituintes minerais do solo, distribuídos em frações de vários tamanhos, associados ao seu arranjo e ao espaço poroso, afetam todas as propriedades físicas do solo (Giarola et al., 2002; Reatto et al., 2007; Ajayi et al., 2009a; Carneiro et al., 2009; Reichert et al., 2009) e conseqüentemente o seu comportamento compressivo (Imhoff et al., 2004; Severiano et al., 2009). Em decorrência do plasma aglutinado, a estrutura granular apresenta aspecto macromorfológico observado “*in situ*” de maciça porosa (Ferreira et al., 1999b). Este tipo de estrutura caracteriza-se por apresentar um maior desenvolvimento dos poros estruturais (macroporos, que são poros com diâmetro > 50µm), e menor desenvolvimento dos poros texturais

(microporos, < 50µm) (Cooper & Vidal-Torrado et al., 2005). De acordo com Ferreira et al. (1999a), em Latossolos oxídicos, a macroporosidade apresenta relação direta com o conteúdo de argila do solo. Isso se torna determinante no comportamento compressivo do solo, uma vez que, ao serem sujeitos às pressões externas aplicadas por máquinas agrícolas, esses poros governarão a magnitude com que a matriz do solo resistirá a deformação (Schäffer et al., 2008; Severiano et al., 2010).

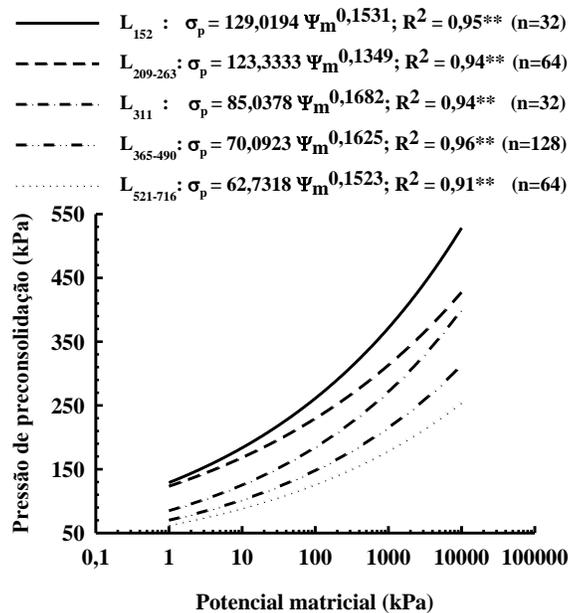


FIGURA 5 Modelos de capacidade de suporte de carga das amostras dos Latossolos (L) coletadas em todos os locais. O número subscrito na legenda dos Latossolos corresponde ao respectivo conteúdo de argila ($g\ kg^{-1}$).

Associado ao aumento da porosidade das amostras dos solos estudados (Tabela 2), o incremento também na retenção de água em um mesmo potencial matricial (Figura 4) contribuiu para maior suscetibilidade à compactação dos

Latossolos, à medida que se aumenta a proporção das partículas finas do solo (argila). Por outro lado, de acordo com Silva et al. (2002), o aumento da resistência naqueles solos com maiores proporções de frações grosseiras (areia) pode ser atribuído à maior resistência nos pontos de contato, geralmente entre os grãos do mineral quartzo. Isso aumenta as forças de atrito e contribui para a dissipação da energia mecânica aplicada ao solo, resultando no aumento da capacidade de suporte de carga dos Latossolos de textura média.

Esse comportamento pode ser considerado como sendo particular da classe dos Latossolos oxídicos, em função da estrutura ser do tipo granular. Em termos de comportamento compressivo do solo, a estrutura granular favorece baixos valores de pressão de preconsolidação em comparação a outros tipos de estrutura, devido ao menor contato entre grânulos (Ajayi et al., 2009a,b). Esse tipo de estrutura confere elevada porosidade e baixos valores de D_s aos Latossolos do Cerrado sob condições naturais (Tabela 2), o que os torna muito suscetíveis à compactação sob condições inadequadas de manejo (Leão et al., 2006).

Nesse sentido, vários estudos vêm demonstrando comportamento contrário em outros solos. Relações diretas entre o conteúdo de partículas finas e resistência à compactação foram encontradas em outras classes de solos no Brasil (Silva et al., 2002) e em outras regiões (Mosaddeghi et al., 2007), como também em Latossolos de ocorrência nas regiões sudeste e sul do Brasil, submetidos a diferentes manejos e avaliados nas profundidades de maior estado de compactação decorrente do acúmulo de pressões pelo tráfego de máquinas, e portanto, com estado inicial de compactação elevado (Imhoff et al., 2004; Suzuki et al., 2008). Deve-se ressaltar que os atributos mineralógicos e o tipo da estrutura do solo, determinantes dos atributos de resistência, não foram descritos nos estudos anteriormente mencionados. Contudo, os solos dessas regiões apresentam tendências de formação de estrutura em blocos, em função da

mineralogia dos solos ser predominantemente caulínica (Ajayi et al., 2009a,b). Por sua vez, esse tipo de estrutura promove um encaixe face a face dos blocos que promovem maior resistência à compactação, comparativamente aos Latossolos oxídicos.

Suzuki et al. (2008) observaram um aumento nos valores de pressão de preconsolidação em solos do estado do Rio Grande do Sul, Brasil, com aumento do teor de argila, mesmo estando os solos argilosos mais úmidos na ocasião da realização dos testes de compressibilidade. Esses resultados também corroboram com Ajayi et al. (2009a), que demonstraram que os Latossolos da região sul do Brasil (estrutura em blocos) apresentam maior capacidade de suporte de carga, mesmo apresentando maior retenção de água em relação aos Latossolos da região do Cerrado (estrutura granular), demonstrando que o aumento da resistência a compactação conferida pela estrutura do solo do tipo blocos pode superar a ação lubrificante da água nesses solos. Cabe ressaltar ainda que a influência da estrutura do solo sobre suas propriedades físicas torna-se mais expressiva nos solos argilosos (solos bem estruturados) (Ferreira et al., 1999b), enquanto que para os solos arenosos tendem a apresentar a orientação das partículas na forma de grãos soltos (pobremente estruturados), e portanto apresentam, nesses casos, menor resistência à compactação.

Apesar das diferenças de resistência entre os Latossolos estudados, a capacidade de suporte de carga do solo pode ser considerada muito baixa, particularmente sob condições de baixos potenciais matriciais ($\sigma_p < 270$ kPa, para $\Psi_m = 100$ kPa em todas as amostras estudadas), o que se deve à forte conexão da macroporosidade em solos oxídicos (Ferreira et al., 1999b). Por esse motivo, são crescentes as preocupações a respeito da possibilidade de dano para a estrutura do solo durante as operações mecanizadas de campo (Horn et al., 2003; Peng et al., 2004; Raper, 2005; Keller et al., 2007; Dias Junior et al., 2008; Silva et al., 2009).

Considerando os valores de pressões aplicados pelas máquinas utilizadas na agricultura brasileira variando entre 200 e 450 kPa (Cardoso, 2007), aliados às condições climáticas favoráveis para até dois cultivos anuais em um período de chuvas concentradas, ou até três cultivos quando se utiliza irrigação suplementar, há grandes possibilidades do tráfego de máquinas e implementos ocorrer sob condições de elevados conteúdos de água no solo e baixa resistência, mesmo nos Latossolos de textura média, causando alterações em sua estrutura. Em adição, salienta-se que a compactação do solo nestes Latossolos argilosos e muito argilosos pode ser considerada um processo praticamente inevitável (Assouline et al., 1997), mesmo se trafegados sob condições de solo seco ($\Psi_m > 1500$ kPa), em função da baixa capacidade de suporte de carga do mesmo. Isso exige cautela na avaliação dos impactos causados pelo maquinário e, principalmente, na quantificação das alterações estruturais decorrentes da compactação adicional do solo.

Ressalta-se ainda que o conhecimento da capacidade de suporte de carga dos Latossolos oxidícos pode ser muito útil para auxiliar o planejamento agrícola da região do Cerrado brasileiro. A fim de otimizar o uso do maquinário agrícola, e entre os fatores agronômicos, a definição do material genético é baseada na possibilidade de realização dos tratamentos culturais seguindo uma escala temporal nos diversos talhões em uma propriedade rural. Dado a proximidade de Latossolos com textura contrastante na paisagem (Figura 1), muitas vezes eles ocorrem dentro de uma mesma propriedade e até em uma mesma topossequência (Silva et al., 2008), sugere-se que as áreas de produção agrícola localizadas em Latossolos argilosos ou muito argilosos sejam cultivadas com espécies (ou variedades genéticas) que exijam menor número de operações mecanizadas dos tratamentos culturais (e.g. plantas geneticamente modificadas e resistentes à pragas), ou ainda que a colheita mecanizada seja realizada no final do período chuvoso

(variedades de maturação tardia), devido à elevada suscetibilidade à compactação (Figura 5).

Por outro lado, a utilização de culturas de ciclos precoce nos Latossolos de textura média pode ser favorecida pela sua maior resistência. O rápido secamento do solo, promovido pelas mudanças de potencial de água (Figura 4), que podem ocorrer após poucos dias com ausência de chuvas, e, conseqüentemente, o grande aumento na capacidade de suporte de carga dos Latossolos de textura média também deve ser considerado como critério de tomada de decisão do momento adequado da realização das operações mecanizadas nesses solos.

6 CONCLUSÕES

Os resultados mostraram que a suscetibilidade à compactação dos Latossolos oxidicos aumenta proporcionalmente com o incremento no conteúdo de argila. Esse comportamento pode ser considerado como sendo particular dessa classe de Latossolo. Apesar das diferenças de resistência entre os Latossolos estudados e considerando-se as características dos maquinários utilizados na agricultura brasileira, a capacidade de suporte de carga do solo pode ser considerada baixa. Nestes Latossolos argilosos e muito argilosos, algum grau de compactação adicional pode ser praticamente inevitável, mesmo quando trafegados sob condições de baixos conteúdos de água no solo.

Os resultados ajudam a entender como a capacidade de suporte de carga e a suscetibilidade à compactação de Latossolos altamente intemperizados do Brasil, com estrutura granular, é influenciada pela textura do solo.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AJAYI, A. E.; DIAS JUNIOR, M. S.; CURI, N.; ARAUJO JUNIOR, C. F.; SOUZA, T. T. T.; INDA JUNIOR, A.V. Strength attributes and compaction susceptibility of Brazilian Latosols. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 105, n. 1, p. 122-127, Sept. 2009a.

AJAYI, A. E.; DIAS JUNIOR, M. S.; CURI, N.; GONTIJO, I.; ARAUJO JUNIOR, C. F.; INDA JUNIOR, A.V. Relation of strength and mineralogical attributes in Brazilian Latosols. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 102, n. 1, p. 14-18, Jan. 2009b.

ASSOULINE, S.; TAVARES FILHO, J.; TESSIER, D. Effect of compaction on soil physical and hydraulic properties: experimental results and modeling. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 61, n. 2, p. 390-398, Mar./Apr. 1997.

BARTHÈS, B. G.; KOUAKOUA, E.; LARRÉ-LARROUY, M. C.; RAZAFIMBELO, T. M.; LUCA, E. F.; AZONTONDE, A.; NEVES, C. S.V. J.; FREITAS, P. L.; FELLER, C. L. Texture and sesquioxide effects on water-stable aggregates and organic matter in some tropical soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 143, n. 1/2, p. 14-25, Jan. 2008.

BELL, M. J.; STIRLING, G. R.; PANKHURST, C. E. Management impacts on health of soils supporting Australian grain and sugarcane industries. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 97, n. 2, p. 256-271, Dec. 2007.

BENITES, V. M.; MACHADO, P. L. O. A.; FIDALGO, E. C. C.; COELHO, M. R.; MADARI, B. E. Pedotransfer functions for estimating soil bulk density from existing soil survey reports in Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 139, n. 1/2, p. 90-97, Apr. 2007.

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. 2. ed. Madison: ASA/SSSA, 1986a. p. 363-375. (Agronomy monograph, 9).

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Particle density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. 2. ed. Madison: ASA/SSSA, 1986b. p. 377-382. (Agronomy monograph, 9).

BORLAUG, N. E.; DOWSWELL, C. R. The acid lands: one of the agriculture's last frontiers. In: MONIZ, A. C.; FURLANI, A. M. C.; SCHAFFERT, R. E.; FAGERIA, N. K.; ROSOLEM, C. A.; CANTARELA, H. (Ed.). **Plant-soil interactions at Low pH**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997. p. 5-15.

CARDOSO, V. M. F. **Sustentabilidade estrutural de um solo na região do Alto Paranapanema/SP, submetido a dois sistemas de cultivo**. 2007. 121 p. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

CARNEIRO, M. A. C.; SOUZA, E. D.; REIS, E. F.; PEREIRA, H. S.; AZEVEDO, W. R. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 33, n. 1, p. 147-157, jan./fev. 2009.

CAVALIERI, K. M. V.; SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; LEÃO, T. P.; DEXTER, A. R.; HÅKANSSON, I. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a rhodic ferrasol in Paraná, Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 103, n. 1, p. 158-164, Apr. 2009.

CHAN, K. Y.; OATES, A.; SWAN, A. D.; HAYES, R. C.; DEAR, B. S.; PEOPLES, M. B. Agronomic consequences of tractor wheel compaction on a clay soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 89, n. 1, p. 13-21, Aug. 2006.

COOPER, M.; VIDAL-TORRADO, P. Caracterização morfológica, micromorfológica e físico-hídrica de solos com horizonte B Nítico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 29, n. 4, p. 581-595, jul./ago. 2005.

CURI, N.; FRANZMEIER, D. Effect of parent rocks on chemical and mineralogical properties of some oxisols in Brazil. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 51, n. 1, p. 153-158, Jan. 1987.

CURI, N.; FRANZMEIER, D. Toposequence of oxisols from the central plateau of Brazil. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 48, n. 2, p. 341-346, Mar. 1984.

DECAGON DEVICES. **Operator's manual version 1.3 WP4 dewpointmeter**. Pullman, 2000. 70 p.

DIAS JUNIOR, M. S. **Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic**. 1994. 114 p. Thesis (Ph.D. in Crop and Soil Science) - Michigan State University, East Lansing.

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. **Soil Technology**, Amsterdam, v. 8, n. 2, p. 139-151, Nov. 1995.

DIAS JUNIOR, M. S.; SILVA, S. R.; SANTOS, N. S.; ARAUJO-JUNIOR, C. F. Assessment of the soil compaction of two ultisols caused by logging operations. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 6, p. 2245-2253, nov./dez. 2008.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Manual de métodos de análises de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e Abastecimento, 1997. 212 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e Abastecimento, 2006. 306 p.

FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 23, n. 3, p. 515-524, jul./set. 1999a.

FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Mineralogia da fração argila e estrutura de Latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 23, n. 3, p. 507-514, jul./set. 1999b.

FRAZÃO, L. A.; PICCOLO, M. C.; FEIGL, B. J.; CERRI, C. C.; CERRI, C. E. P. Inorganic nitrogen, microbial biomass and microbial activity of a sandy Brazilian cerrado soil under different land uses. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 135, n. 3, p. 161-167, Jan. 2010.

FRITTON, D. D. Evaluation of pedotransfer and measurement approaches to avoid soil compaction. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 99, n. 2, p. 268-278, June 2008.

GENUCHTEN, M. T. van. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 44, n. 5, p. 892-898, Sept. 1980.

GIAROLA, N. F. B.; SILVA, A. P.; IMHOFF, S. Relações entre propriedades físicas e características de solos da região sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 26, n. 4, p. 885-893, out./dez. 2002.

GOMES, J. B. V.; CURI, N.; SCHULZE, D. G.; MARQUES, J. J. G. S. M.; KER, J. C.; MOTTA, P. E. F. Mineralogia, morfologia e análise microscópica de solos do bioma cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, n. 4, p. 679-694, jul./ago. 2004.

GROHMANN, F. Distribuição e tamanho de poros em três tipos de solos do estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 19, n. 21, p. 319-328, abr. 1960.

GUPTA, S. C.; HADAS, A.; SCHAFER, R. L. Modeling soil mechanical behavior during compaction. In: LARSON, W. E.; BLAKE, G. R.; ALLMARAS, R. R.; VOORHEES, W. B.; GUPTA, S. C. (Ed.). **Mechanical and related process in structured agricultural soils**. The Netherlands: Kluwer Academic, 1989. p. 137-152.

HODNETT, M. G.; TOMASELLA, J. Marked differences between van Genuchten soil water-retention parameters for temperate and tropical soils: a new water-retention pedo-transfer functions developed for tropical soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 108, n. 3/4, p. 155-180, Aug. 2002.

HORN, R.; FLEIGE, H. A method for assessing the impact of load on mechanical stability and on physical properties of soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, n. 1/2, p. 89-99, Oct. 2003.

HORN, R.; LEBERT, M. Soil compactability and compressibility. In: SOANE, B. D.; OUWERKERK, C. van. (Ed.). **Soil compaction in crop production: development in agricultural engineering**. Amsterdam: Elsevier Science, 1994. v. 11, p. 45-69.

HORN, R.; WAY, T.; ROSTEK, J. Effect of repeated tractor wheeling on stress/strain properties and consequences on physical properties in structured arable soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, n. 1/2, p. 101-106, Oct. 2003.

IMHOFF, S.; SILVA, A. P.; FALLOW, D. Susceptibility to compaction, load support capacity, and soil compressibility of Hapludox. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 68, n. 1, p. 17-24, Jan. 2004.

KELLER, T.; DÉFOSSEZ, P.; WEISSKOPF, P.; ARVIDSSON, J.; RICHARD, G. SoilFlex: a model for prediction of soil stresses and soil compaction due to agricultural field traffic including a synthesis of analytical approaches. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 93, n. 2, p. 391-411, Apr. 2007.

KER, J. C. Latossolos do Brasil: uma revisão. **Geonomos**, Belo Horizonte, v. 5, n. 1, p. 17-40, jan./jun. 1997.

KLUTE, A. **Laboratory measurement of hydraulic conductivity of saturated soils**. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p. 253-261. (Monograph, 9).

KÖPPEN, W. P. **Grundriss der klimakunde**. Berlin: W. Gruyter, 1931. p. 388.

KRÜMMELBEIN, J.; PETH, S.; HORN, R. Determination of pre-compression stress of a variously grazed steppe soil under static and cyclic loading. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 99, n. 2, p. 139-148, June 2008.

LARSON, W. E.; GUPTA, S. C.; USECHE, R. A. Compression of agricultural soils from eight soil orders. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 44, n. 3, p. 450-457, May 1980.

LEÃO, T. P.; SILVA, A. P.; MACEDO, M. C. M.; IMHOFF, S.; EUCLIDES, V. P. B. Least limiting water range: a potential indicator of changes in near-surface soil physical quality after the conversion of Brazilian Savanna into pasture. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 88, n. 1/2, p. 279-285, July 2006.

MACEDO, J. Os solos da região dos cerrados. In: ALVARES, V. H.; FONTES, L. E. F.; FONTES, M. P. F. (Ed.). **O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado**. Viçosa, MG: SBSCS/UFV, 1996. p. 135-155.

MARCHÃO, R. L.; BECQUER, T.; BRUNET, D.; BALBINO, L. C.; VILELA, L.; BROSSARD, M. Carbon and nitrogen stocks in a Brazilian clayey Oxisol: 13-year effects of integrated crop–livestock management systems. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 103, n. 2, p. 442-450, May 2009.

MARQUES, J. J.; SCHULZE, D. G.; CURI, N.; MERTTZMAN, S. A. Major element geochemistry and geomorphic relationships in Brazilian cerrado soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 119, n. 3/4, p. 179-195, Apr. 2004.

MOSADDEGHI, M. R.; KOOLEN, A. J.; HEMMAT, A.; HAJABBASI, M. A.; LERINK P. Comparisons of different procedures of pre-compaction stress determination on weakly structured soils. **Journal of Terramechanics**, Oxford, v. 44, n. 1, p. 53-63, Jan. 2007.

MUGGLER, C. C.; GRIETHUYSEN, C. van; BUURMAN, P.; PAPE, T. Aggregation, organic matter, and iron oxide morphology in oxisols from Minas Gerais, Brazil. **Soil Science**, Baltimore, v. 164, n. 10, p. 759-770, Oct. 1999.

NEUFELDT, H.; RESCK, D. V. S.; AYARZA, M. A. Texture and landuse effects on soil organic matter in cerrado oxisols, central Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 107, n. 3/4, p.151-164, June 2002.

PAGLIAI, M.; MARSILI, A.; SERVADIO, P.; VIGNOZZI, N.; PELLEGRINI, S. Changes in some physical properties of a clay soil in central Italy following the passage of rubber tracked and wheeled tractors of medium power. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, n. 1/2, p. 119-129, Oct. 2003.

PENG, X. H.; HORN, R.; ZHANG, B.; ZHAO, Q. G. Mechanisms of soil vulnerability to compaction of homogenized and recompacted ultisols. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 76, n. 2, p. 125-137, Apr. 2004.

RAPER, R. L. Agricultural traffic impacts on soil. **Journal of Terramechanics**, Oxford, v. 42, n. 3/4, p. 259-280, July/Oct. 2005.

RATHMANN, R.; SZKLO, A.; SCHAEFFER, R. Land use competition for production of food and liquid biofuels: an analysis of the arguments in the current debate. **Renewable Energy**, Oxford, v. 35, n. 1, p. 14-22, Jan. 2010.

RAWLS, W. J.; PACHEPSKY, Y. A.; RITCHIE, J. C.; SOBECKI, T. M.; BLOODWORTH, H. Effect of soil organic carbon on soil water holding capacity. **Geoderma**, Amsterdam, v. 116, n. 1/2, p. 61-76, Sept. 2003.

REATTO, A.; BRUAND, A.; MARTINS, E. S.; MULLER, F.; SILVA, E. M.; CARVALHO JUNIOR, O. A.; BROSSARD, M.; RICHARD, G. Development and origin of the microgranular structure in Latosols of the Brazilian central plateau: significance of texture, mineralogy, and biological activity. **Catena**, Cremlingen, v. 76, n. 2, p. 122-134, Jan. 2009.

REATTO, A.; BRUAND, A.; SILVA, E. M.; MARTINS, E. S.; BROSSARD, M. Hydraulic properties of the diagnostic horizon of Latosol of a regional topequence across the Brazilian central plateau. **Geoderma**, Amsterdam, v. 139, n. 1/2, p. 51-59, Feb. 2007.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J.; HORN, R.; HÅKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 102, n. 2, p. 242-254, Mar. 2009.

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B.; CORRÊA, G. F. **Pedologia**: base para distinção de ambientes. 5. ed. Lavras: UFLA, 2007. 322 p.

RÖMKENS, M. J. M.; MILLER, R. D. Predicting root size and frequency from one-dimensional consolidation data: a mathematical model. **Plant and Soil**, The Hague, v. 35, n. 1/3, p. 237-248, Aug. 1971.

RÜCKNAGEL, J.; HOFMANN, B.; PAUL, R.; CHRISTEN, O.; HÜLSBERGEN, K. J. Estimating precompression stress of structured soils on the basis of aggregate density and dry bulk density. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 92, n. 1/2, p. 213-220, Jan. 2007.

SANTOS, R. D.; LEMOS, R. C.; SANTOS, U. G.; KER, J. C. ; ANJOS, L. H. C. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 5. ed. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. 92 p.

SCANLON, B. R.; ANDRASKI, B. J.; BILSKIE, J. Water potential: miscellaneous methods for measuring matric or water potential. In: DANE, J. H.; TOPP, C. (Ed.). **Methods of soil analysis: part 4: physical methods**. Madison: Soil Science Society of America, 2002. p. 643-670.

SCHAEFER, C. E. R.; GILKES, R. J.; FERNANDES, R. B. A. EDS/SEM study on microaggregates of Brazilian Latosols, in relation to P adsorption and clay fraction attributes. **Geoderma**, Amsterdam, v. 123, n. 1/2 p. 69-81, Nov. 2004.

SCHÄFFER, B.; STAUBER, M.; MUELLER, T. L.; MÜLLER, R.; SCHULIN, R. Soil and macro-pores under uniaxial compression: I mechanical stability of repacked soil and deformation of different types of macro-pores. **Geoderma**, Amsterdam, v. 146, n. 1/2, p.183-191, July 2008.

SCHWERTMANN, U.; TAYLOR, R. M. Iron oxides. In: DIXON, J. B.; WEED, S. B. (Ed.). **Minerals in soil environments**. Madison: Soil Science Society of America, 1977. p. 145-176.

SEVERIANO, E. C.; OLIVEIRA, G. C.; CURI, N.; DIAS JUNIOR, M. S. Potencial de uso e qualidade estrutural de dois solos cultivados com cana-de-açúcar em Goianésia (GO). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 33, n. 1, p. 159-168, jan./fev. 2009.

SEVERIANO, E. C.; OLIVEIRA, G. C.; DIAS JUNIOR, M. S.; COSTA, K. A. P.; CASTRO, M. B.; MAGALHÃES, E. N. Potencial de descompactação de um Argissolo promovido pelo capim-tifton 85. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 1, p. 39-45, jan. 2010.

SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; IMHOFF, S. Funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 1, p. 1-10, jan./fev. 2008.

SILVA, R. B.; LANÇAS, K. P.; MIRANDA, E. E. V.; SILVA, F. A. M.; BAIO, F. H. R. Estimation and evaluation of dynamic properties as indicators of changes on soil structure in sugarcane fields of Sao Paulo state – Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 103, n. 2, p. 265-270, May 2009.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; SOARES, J. M. Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico e de um Latossolo Vermelho distrófico típico. I - Estado inicial de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 26, n. 1, p. 1-8, jan./mar. 2002.

SNEDECOR, G. W.; COCHRAN, W. G. **Statistical methods**. 8. ed. Ames: Iowa State University, 1989. 503 p.

SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; LIMA, C. L. R. Estimativa da susceptibilidade à compactação e do suporte de carga do solo com base em propriedades físicas de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 3, p. 963-973, maio/jul. 2008.

TAYLOR, D. W. **Fundamentals of soil mechanics**. New York: J. Wiley, 1948. 700 p.

VITORINO, A. C. T.; FERREIRA, M. M.; CURINI, L. M.; SILVA, M. L. N.; MOTTA, P. E. F. Mineralogia, química e estabilidade de agregados do tamanho de silte de solos da região sudeste do Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 1, p. 133-141, jan. 2003.

VOLLANT-TUDURI, N.; BRUAND, A.; BROSSARD, M.; BALBINO, L. C.; OLIVEIRA, M. I. L.; MARTINS, E. S. Mass proportion of microaggregates and bulk density in a Brazilian clayey oxisol. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 69, n. 5, p. 1559-1564, Sept. 2005.

CAPÍTULO 3

ALTERAÇÕES ESTRUTURAIS DE LATOSSOLOS REPRESENTATIVOS DA REGIÃO DO CERRADO: I - RELAÇÕES ENTRE ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO

1 RESUMO

Apesar do elevado potencial agrícola dos Latossolos da região do Cerrado brasileiro, quando inseridos ao processo produtivo, o seu espaço poroso pode ser seriamente afetado logo nos primeiros cultivos, levando à sua rápida degradação. Como consequência, tem-se observado a aceleração do processo erosivo e o assoreamento dos mananciais associados na paisagem. Dessa forma, o presente trabalho teve por objetivo avaliar as alterações estruturais de Latossolos do município de Rio Verde, GO, através da quantificação das funções necessárias para a obtenção dos limites e caracterização do intervalo hídrico ótimo (IHO), e determinação de relações entre IHO e demais propriedades físicas desses solos. O estudo foi conduzido utilizando-se amostras de cinco Latossolos oxídicos representativos da variabilidade textural existente nos Latossolos ocorrentes no bioma Cerrado. Foram determinados o IHO e os atributos físico-hídricos dos solos em diversos estados de compactação do solo. Os resultados indicaram que a compactação do solo resultou desde benefícios ao crescimento das plantas, relacionados ao aumento na retenção de água, até condições de severas restrições às suas funções edáficas, sendo observadas relações inversas entre o conteúdo de argila e os valores de densidade do solo (D_s) nas diversas condições estruturais. A D_s correspondente à macroporosidade crítica do solo ($D_{s_{MAC}}$) foi mais restritiva ao manejo sustentável dos Latossolos estudados que a D_s crítica correspondente ao IHO ($D_{s_{IHO}}$). A maior compactação permissível observada nesses Latossolos se deve à elevada porosidade de aeração conferida pela estrutura do tipo granular.

2 ABSTRACT

Despite the strong agricultural potential of Latosols of the Brazilian Cerrado region, when intensively cultivated their porosity can be seriously reduced since the first crops, leading to rapid soil degradation. As a consequence, accelerated erosion and sedimentation process of springs and creeks have been observed. Therefore, the objective of the present work is to evaluate structural changes of Latosols in Rio Verde, Goias, by means of the Least Limiting Water Range (LLWR), and its relationships between LLWR and other physical properties. The study was conducted on five Latosols of oxidics mineralogy representing the textural variability of Latosols of the Cerrado biome. LLWR and other soil physical attributes were determined at various soil compaction degrees. Soil compaction caused effects varying from enhanced plant growth due to higher water retention, to severe restriction of edaphic functions. Also, inverse relationships were observed between clay content and bulk density values (Bd) under different structural conditions. Bd values corresponding to critical soil macroporosity ($Bd_{c_{MAC}}$) were more restrictive to sustainable use of Latosols studied than the critical Bd corresponding to LLWR ($Bd_{c_{LLWR}}$). The high compression potential of these Latosols derives from the high aeration porosity associate to granular structure.

3 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o Brasil vem se firmando como uma das grandes potências agrícolas mundiais, o que se deve à incorporação de inovações tecnológicas, no que diz respeito ao uso de insumos e de máquinas agrícolas, viabilizando, dessa forma, a expansão da fronteira agrícola para regiões até então consideradas marginalizadas, com destaque para a região do Cerrado. Isto tem levado a contribuições significativas na produção de grãos, pecuária e agroenergética do país (Oliveira et al., 2003; Rathmann et al., 2010).

Os Latossolos, que são a maioria dos solos e a principal ordem sob uso agrícola neste bioma, apresentam baixa disponibilidade de nutrientes sob condições naturais, contrastando com a elevada fertilidade física decorrente da atuação dos óxidos de alumínio e ferro presentes na fração argila (Ferreira et al., 1999a,b), resultante do elevado grau de intemperismo a que foram expostos (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, EMBRAPA, 2006).

Aliados à topografia suavizada de sua ocorrência, esses solos tornam-se potencialmente aptos para o desenvolvimento de uma agricultura altamente mecanizada, favorecendo sobremaneira o seu manejo. Entretanto, os atributos físicos lhe conferem uma baixa resistência mecânica (Leão et al., 2006; Ajayi et al., 2009), o que tem desencadeado processos de compactação nos mesmos quando incorporados ao processo produtivo (Oliveira et al., 2007; Severiano et al., 2008; Borges et al., 2009).

A preocupação com este problema tem sido crescentemente manifestada pelos pesquisadores, uma vez que a degradação do solo leva à perda do seu potencial produtivo. Em áreas intensamente cultivadas, a compactação do solo tem sido associada à compressão decorrente das operações mecanizadas, particularmente em conteúdos de água no solo inadequados ao tráfego, levando ao incremento da densidade do solo em função da redução no volume de poros

ocupados pelo ar (Gupta et al., 1989). Os danos na macroporosidade são de preocupação particular, uma vez que estes desempenham papel crucial em muitos processos ambientais regulados pelo solo (Hamza & Anderson, 2005; Schäffer et al., 2008), com destaque para aqueles relacionados à infiltração de água e recarga de água subterrânea.

A perda da qualidade física do solo está frequentemente relacionada com a magnitude em que a condição estrutural do solo restringe o desenvolvimento das plantas (Lapen et al., 2004; Tormena et al., 1998). Nesse contexto, o intervalo hídrico ótimo (IHO) tem sido sugerido como um índice multifatorial, que engloba o déficit hídrico ou de oxigênio, e a resistência mecânica do solo, os quais afetam diretamente a produtividade agrícola (Silva et al., 1994), definindo assim, uma faixa de água no solo em que, teoricamente, as restrições físicas ao crescimento vegetal são mínimas (Blainski et al., 2009).

Esse índice é dependente de atributos do solo, com destaque para textura (Reichert et al., 2009) e estrutura (Severiano et al., 2008). Contudo, em solos com estrutura preservada ou pouco alterada, a amplitude do IHO é convencionalmente reconhecida como a da água disponível (AD), e compreendida pelo intervalo de água no solo entre a capacidade de campo (θ_{CC}) e o ponto de murcha permanente (θ_{PMP}). Com a degradação física do solo, as raízes das plantas podem encontrar camadas de impedimento mecânico ao seu pleno crescimento (θ_{RP}) e disponibilidade de oxigênio limitada (θ_{PA}), devido à redução das trocas gasosas com a atmosfera (Letey, 1985; Bengough et al., 2006). Com isso, aumenta-se o risco de exposição das culturas aos estresses físicos, mesmo dentro da faixa de AD. Neste contexto, o IHO representa grande avanço nos estudos de biofísica do solo, sendo este considerado o indicador que melhor se correlaciona ao crescimento das plantas (Tormena et al., 2007).

O presente trabalho objetivou avaliar as alterações estruturais de cinco Latossolos oxidicos, do município de Rio Verde, GO, através da quantificação

das funções necessárias para a obtenção dos limites e caracterização do IHO, e determinação de relações entre IHO e demais propriedades físicas desses solos.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Para a condução deste estudo, selecionaram-se cinco áreas experimentais sob vegetação nativa recobertas por Latossolos (EMBRAPA, 2006), localizadas no município de Rio Verde, GO, Microrregião do Sudoeste Goiano (Tabela 1) e representativas da variabilidade textural existente nos Latossolos ocorrentes no bioma Cerrado. O clima local é classificado de acordo com Köppen, como Megatérmico ou Tropical Úmido (Aw), do subtipo Tropical de Savana, com inverno seco e verão chuvoso. A temperatura média anual varia entre 20°C e 25°C, e a média pluviométrica anual, de 1500 a 2000 mm. A máxima precipitação ocorre em janeiro e a menor entre junho e agosto. A umidade relativa do ar é de aproximadamente 75% no verão e inferior a 30% durante o inverno seco.

TABELA 1 Locais de amostragem e descrição dos Latossolos (L).

L ⁽¹⁾	Coordenadas geográficas	Altitude	Cor Úmida	Classificação do solo
L ₁₅₂	17°31'18"S; 51° 38'07"W	898m	5YR 5/4	Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico textura Franco-arenosa
L ₂₆₃	17°35'01"S; 51°37'12"W	871m	2,5YR 3/3	Latossolo Vermelho distrófico textura Franco-argilo-arenosa
L ₃₉₉	17°46'02"S; 51°02'17"W	838m	2,5YR 4/6	Latossolo Vermelho distrófico textura Argilo-arenosa
L ₅₂₁	17°47'26"S; 50°57'17"W	727m	10R 3/6	Latossolo Vermelho distroférico textura Argilosa
L ₇₁₆	17°30'52"S; 51°34'05"W	943m	2,5YR 4/4	Latossolo Vermelho distrófico textura Muito argilosa

⁽¹⁾: O número subscrito na legenda dos Latossolos corresponde ao respectivo conteúdo de argila (g kg⁻¹).

Foi aberta, em cada local de amostragem, uma trincheira com dimensões de 1m x 1m x 2m, onde, aleatoriamente, entre 0,80 e 1,00 m de profundidade, foram coletadas 128 amostras de solo com estrutura preservada, em anéis de alumínio de 6,4 cm de diâmetro x 2,5 cm de altura, utilizando o amostrador de Uhland. Em função da uniformidade morfológica desses solos, a amostragem foi realizada no horizonte B latossólico (Bw), onde a estrutura granular é expressa verdadeiramente (Ajayi et al., 2009).

As amostras indeformadas foram preparadas em laboratório, e o material de solo resultante das sobras dos anéis foi submetido à caracterização química e física, seguindo a metodologia proposta por EMBRAPA (1997) (Tabela 2).

TABELA 2 Caracterização química e física dos Latossolos do município de Rio Verde, GO.

Latossolo	Dp ¹ kg dm ⁻³	Granulometria ²							Ataque Sulfúrico			Ki ³	Kr ⁴
		AMG	AG	AM	AF	AMF	S	A	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃		
		----- g kg ⁻¹ -----											
L ₁₅₂	2,66	1	21	343	433	25	25	152	24	67	38	0,6	0,4
L ₂₆₃	2,75	4	9	172	441	50	61	263	24	113	116	0,4	0,2
L ₃₉₉	2,67	1	16	159	276	35	114	399	92	213	78	0,7	0,6
L ₅₂₁	2,92	1	14	94	139	30	201	521	87	205	245	0,7	0,4
L ₇₁₆	2,69	1	3	43	68	11	158	716	180	344	105	0,9	0,7

⁽¹⁾: Dp: Densidade de partículas pelo método do picnômetro; ⁽²⁾: Determinada pelo método da pipeta; AMG: areia muito grossa; AG: areia grossa; AM: areia média; AF: areia fina; AMF: areia muito fina; A: argila; S: silte (média de 12 repetições); ⁽³⁾: Ki: relação molecular SiO₂:Al₂O₃; ⁽⁴⁾: Kr: relação molecular SiO₂: (Al₂O₃ + Fe₂O₃); O número subscrito na legenda dos Latossolos corresponde ao respectivo conteúdo de argila (g kg⁻¹).

O estudo seguiu um esquema fatorial 5 x 4 x 8, sendo 5 Latossolos (Tabela 1), 4 valores de tensões de água no solo ($\Psi_m = 2, 6, 33$ e 1500 kPa), e 8 níveis de compactação, correspondentes ao solo sem nenhuma compressão prévia (condições estruturais naturais), e às pressões aplicadas pelo consolidômetro pneumático Terraload S-450 (Durham Geo Enterprises, USA) ($\sigma = 25, 50, 100, 200, 400, 800$ e 1600 kPa), sendo a aplicação da pressão realizada por meio da utilização de ar comprimido, com quatro repetições, totalizando 640 amostras. Para tanto, as amostras indeformadas foram inicialmente saturadas por capilaridade, equilibradas nos potenciais matriciais e posteriormente submetidas à aplicação de uma única pressão em cada amostra, até a obtenção de 90 % da deformação máxima (Taylor, 1948), sendo esta monitorada através do incremento na densidade do solo.

Após a compressão, as amostras foram resaturadas e submetidas à tensão de 6 kPa para a determinação da microporosidade e capacidade de campo (EMBRAPA, 1997; Mello et al., 2002), e novamente ajustadas a conteúdos de água no solo correspondentes às tensões avaliadas, para então serem submetidas ao teste de penetrometria, utilizando um penetrômetro de bancada MARCONI-MA 933, dotado de variador eletrônico de velocidade e sistema de registro de dados, segundo Tormena et al. (1998). Em seguida, as amostras foram secas em estufa, a 105°C , por 48 horas, para a determinação do conteúdo de água correspondente às tensões de água no solo, e densidade do solo (D_s), conforme EMBRAPA (1997). A porosidade total (PT) foi determinado pela equação 1:

$$PT = [1 - (D_s/D_p)] \quad \text{Eq. (1)}$$

sendo D_p a densidade de partículas. A macroporosidade do solo foi obtida pela diferença entre PT e microporosidade, segundo EMBRAPA (1997).

Obteve-se para cada solo, a curva de resistência à penetração (CRP), ajustando-se os valores de resistência à penetração (RP) em função do conteúdo

volumétrico de água (θ) e da D_s , por meio do modelo não-linear proposto por Busscher (1990), conforme as equações 2 a 6:

$$L_{152} : RP = 0,002\theta^{-1,29} D_s^{8,48}; R^2 = 0,89^{**} \quad \text{Eq. (2)}$$

$$L_{263} : RP = 0,028\theta^{-0,98} D_s^{6,40}; R^2 = 0,92^{**} \quad \text{Eq. (3)}$$

$$L_{399} : RP = 0,008\theta^{-2,30} D_s^{6,79}; R^2 = 0,86^{**} \quad \text{Eq. (4)}$$

$$L_{521} : RP = 0,025\theta^{-1,94} D_s^{8,24}; R^2 = 0,92^{**} \quad \text{Eq. (5)}$$

$$L_{716} : RP = 0,060\theta^{-2,34} D_s^{6,59}; R^2 = 0,83^{**} \quad \text{Eq. (6)}$$

em que o número subscrito na legenda dos Latossolos (L) corresponde ao respectivo conteúdo de argila, expresso em g kg^{-1} .

Na determinação do intervalo hídrico ótimo (IHO) (Silva et al., 1994), foram considerados como limites superiores, o conteúdo de água no solo retido no potencial de 6 kPa como sendo a capacidade de campo (θ_{CC}) (Mello et al., 2002; Severiano et al., 2008) ou aquele em que a porosidade de aeração (θ_{PA}) é de 10 % (Grable & Siemer, 1968), calculado para cada amostra pela equação 7:

$$\theta_{PA} = PT - 0,1 \quad \text{Eq. (7)}$$

Como limites inferiores, o conteúdo de água retido no potencial de 1500 kPa foi considerado como sendo o ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) (Richards & Weaver, 1943), e o conteúdo de água correspondente à resistência à penetração de 2,5 MPa (θ_{RP}) (Camargo & Alleoni, 1997), determinados através das Eqs. 2 a 6, para o respectivo solo.

O IHO foi obtido ajustando-se os limites do conteúdo de água no solo em função da D_s , e considerando-se como o limite superior o menor valor entre θ_{CC} e θ_{PA} , e como limite inferior o maior valor entre θ_{PMP} e θ_{RP} . Conforme descrito por Wu et al. (2003), existem quatro possibilidades para calcular o IHO, dependendo dos valores dos seus limites críticos (Eqs. 8 a 11). Dessa forma:

$$(a) \text{ Se } \theta_{PA} \geq \theta_{CC} \text{ e } \theta_{RP} \leq \theta_{PMP}: \\ IHO = \theta_{CC} - \theta_{PMP} \quad \text{Eq. (8)}$$

$$(b) \text{ Se } \theta_{PA} \geq \theta_{CC} \text{ e } \theta_{RP} \geq \theta_{PMP}: \\ IHO = \theta_{CC} - \theta_{RP} \quad \text{Eq. (9)}$$

$$(c) \text{ Se } \theta_{PA} \leq \theta_{CC} \text{ e } \theta_{RP} \leq \theta_{PMP}: \\ IHO = \theta_{PA} - \theta_{PMP} \quad \text{Eq. (10)}$$

$$(d) \text{ Se } \theta_{PA} \leq \theta_{CC} \text{ e } \theta_{RP} \geq \theta_{PMP}: \\ IHO = \theta_{PA} - \theta_{RP} \quad \text{Eq. (11)}$$

O valor de D_s no qual o IHO assumiu o valor nulo ($IHO = 0$) foi considerado como a densidade crítica com base no IHO ($D_{sc_{IHO}}$), uma vez que, para qualquer conteúdo de água no solo, ocorrerá limitação físico-hídrica para o desenvolvimento das plantas.

Os valores de macroporosidade do solo foram ajustados em função da D_s através de regressão linear, utilizadas na determinação do valor deste atributo crítico ao crescimento radicular (Vomocil & Flocker, 1966), com base na macroporosidade ($D_{sc_{MAC}}$), e limitante às funções edáficas do solo relacionadas à infiltração de água e recarga de água subterrânea, sendo esta considerada o valor de D_s correspondente à macroporosidade a $0,10 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$.

Os valores de Densidade do solo inicial (D_{si}), benéfica (D_{sb}) e crítica ao desenvolvimento das plantas ($D_{sc_{IHO}}$), obtidos dos IHOs dos solos, além dos valores de $D_{sc_{MAC}}$, foram utilizados no desenvolvimento de funções de pedotransferência que permitem estimar essas propriedades a partir do conteúdo de argila do solo. Essas funções foram obtidas através de ajustes lineares entre os atributos mencionados, e comparadas segundo os procedimentos estatísticos descritos por Snedecor & Cochran (1989).

As análises de regressão foram ajustadas através do software Sigma Plot 10.0, Jandel Scientific. Os resultados dos atributos físicos do solo antes da compressão foram submetidos à análise de variância, segundo delineamento inteiramente casualizado, e as comparações das médias, ao teste de Tukey a 5 %.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os atributos físicos dos solos estudados estão apresentados na Tabela 3. Em decorrência do elevado intemperismo a que foram expostos, esses Latossolos apresentam suas partículas unitárias arranjadas em grânulos muito pequenos (Vollant-Tuduri et al., 2005), o que confere elevado espaço poroso entre os agregados, e conseqüentemente, baixa densidade do solo sob condições naturais (Ferreira et al., 1999b; Balbino et al., 2004; Oliveira et al., 2007). As variações entre os solos devem-se basicamente a sua composição granulométrica, uma vez que o desenvolvimento de poros texturais (microporos) aumenta com o conteúdo de argila (Reatto et al., 2007; Silva et al., 2008).

TABELA 3 Atributos físicos dos Latossolos do município de Rio Verde, GO.

Latossolo ¹	Ds (Kg dm ⁻³)	Total -----	Porosidade		
			Macro (dm ³ dm ⁻³)	Micro -----	Mac: Mic
L ₁₅₂	1,33A	0,50C	0,34B	0,16C	2,13A
L ₂₆₃	1,22B	0,56B	0,32B	0,24B	1,33B
L ₃₉₉	1,08C	0,60B	0,33B	0,27B	1,19C
L ₅₂₁	0,99D	0,66A	0,35AB	0,30AB	1,17C
L ₇₁₆	0,83E	0,70A	0,37A	0,33A	1,12C

¹ O número subscrito na legenda dos Latossolos corresponde ao respectivo conteúdo de argila em g kg⁻¹. Ds: densidade do solo; Mac: Mic: Relação entre macroporos e microporos. Para cada propriedade analisada, médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 %. Valores representam média de 32 repetições.

A macroporosidade pode ser considerada elevada em todos os solos e muito superior ao valor de 0,10 dm³ dm⁻³, considerado crítico ao crescimento das plantas (Vomocil & Flocker, 1966; Oliveira et al., 2003), o que favorece sobremaneira os processos de condução de água (Cooper & Vidal-Torrado, 2005), mesmo naqueles solos de textura fina (Borges et al., 2009). Em geral, houve incremento na macroporosidade nos solos mais argilosos (Tabela 3),

corroborando com Ferreira et al. (1999a), que demonstraram correlação positiva entre esses atributos em Latossolos oxídicos.

Preconiza-se que um solo em condições ideais de cultivo deve apresentar 1/3 da porosidade total formada por macroporos, e os 2/3 restantes por microporos, estabelecendo uma relação entre macroporos e microporos igual a 0,5 (Kiehl, 1979; Oliveira et al., 2003). Observa-se que os Latossolos estudados apresentaram valores em torno de 2 a 4 vezes superior a essa relação (Tabela 3). Nessas condições, a água no solo seria rapidamente percolada, demonstrando a elevada capacidade de infiltração destes solos, o que é muito positivo no que se refere à recarga de água subterrânea. Esse papel ecológico desempenhado pelos Latossolos, associados ao seu recobrimento na região do Cerrado (em torno de 50% e representativa no abastecimento do Aquífero Guarani e outros mananciais hídricos), bem como o elevado índice pluviométrico anual, podem ser considerados os fatores primordiais da origem das principais bacias hidrográficas da América do Sul (Rios Tocantins-Araguaia, Prata, e São Francisco).

As curvas de resistência do solo à penetração (CRP) demonstraram que a RP foi inversamente correlacionada com o θ diretamente com a D_s (Eqs. 2 a 6), em decorrência da ação desses fatores serem considerados os principais mecanismos para aumento da coesão entre as partículas do solo (Leão et al., 2006; Blainski et al., 2009). Por outro lado, com o incremento da compactação do solo, a sua aeração pode se tornar deficiente sob condições de elevados conteúdos de água no solo (Lapen et al., 2004). Dessa forma, conforme apresentado pela Figura 1, tanto o θ_{RP} quanto o θ_{PA} reduziram a faixa de água disponível às culturas, o que provavelmente afetará o crescimento e rendimento das plantas cultivadas por esses fatores de estresse (Silva et al., 1994). Os IHOS dos solos estão representados pela área hachurada.

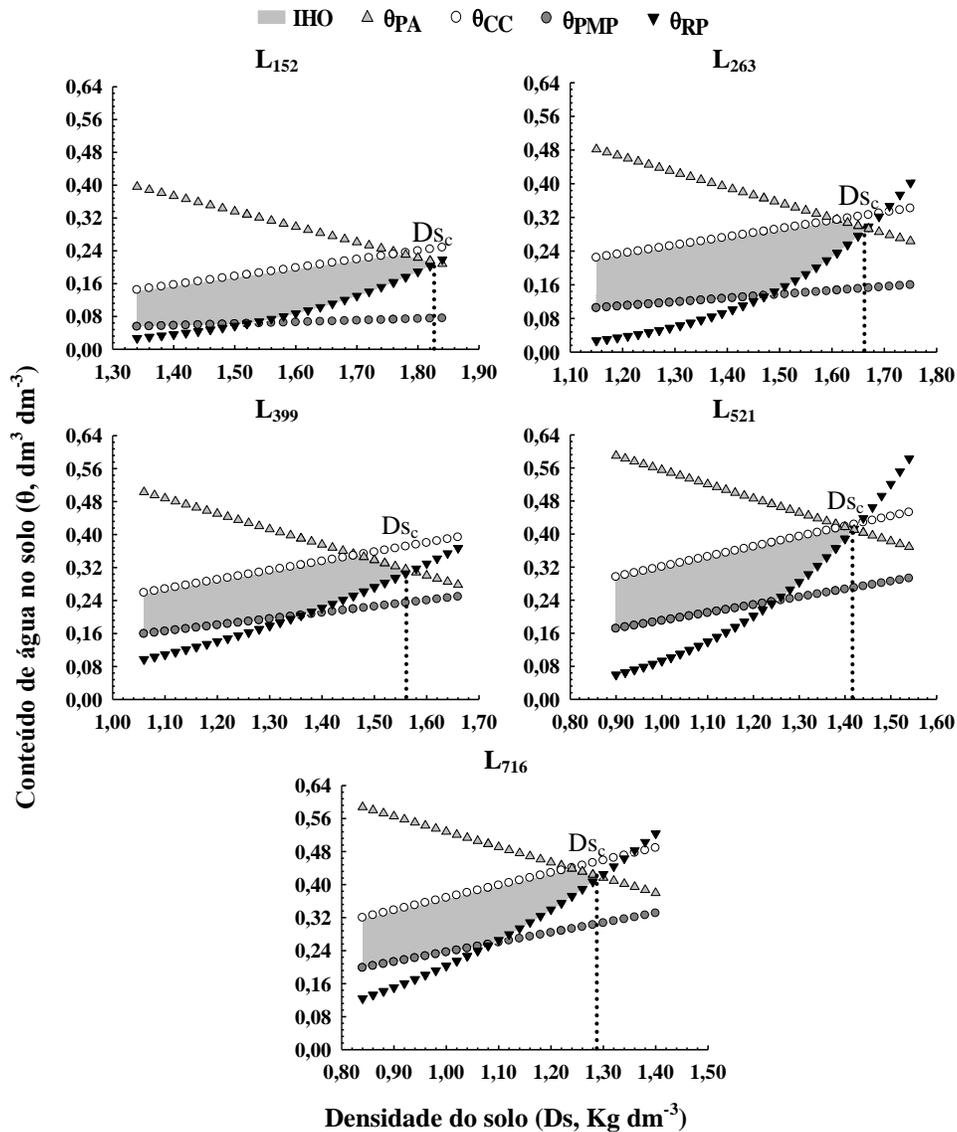


FIGURA 1 Variação do conteúdo de água no solo (θ) com o incremento da Densidade do solo (D_s), nos limites críticos de capacidade de campo (θ_{CC} , 6 kPa), ponto de murcha permanente (θ_{PMP} , 1500 kPa), porosidade de aeração a 10% (θ_{PA}), e resistência do solo à penetração de 2,5 MPa (θ_{RP}), dos Latossolos do município de Rio Verde. A área hachurada representa o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO); D_{sc} : densidade crítica ao desenvolvimento das plantas.

Sob condição estrutural inicial, ou seja, quando o solo não sofreu nenhuma compressão prévia (Tabela 3), os limites superior e inferior foram respectivamente, o θ_{CC} e θ_{PMP} , correspondendo ao conteúdo de água disponível (AD), para todos os Latossolos estudados (Figura 1). Nessas condições, a qualidade física do solo pode ser considerada ideal, uma vez que a ocorrência de stress que limita o desenvolvimento das plantas é dependente apenas de fatores extrínsecos ao solo, relacionados ao déficit hídrico, que por sua vez, são decorrentes da sazonalidade climática (Silva et al., 1994; Wu et al., 2003).

Com incremento da compactação do solo, ocorreu a substituição desses limites primeiramente pelo θ_{RP} em todos os solos, sendo esse atributo que mais frequentemente reduziu a amplitude do IHO (Figura 1). Isto se deve à estrutura do tipo granular do horizonte Bw desses Latossolos conferir maior desenvolvimento dos poros estruturais (macroporos), que por sua vez, favorecem uma aeração excessiva aos mesmos (Ferreira et al., 1999a,b; Cooper & Vidal-Torrado, 2005; Reatto et al., 2007). Este comportamento foi observado também em outros Latossolos (Tormena et al., 1998; Leão et al., 2006; Severiano et al., 2008; Freddi et al., 2009), e os resultados indicam que problemas relativos à anoxia em Latossolos oxídicos ocorrerão somente quando a sua estrutura estiver extremamente degradada (elevado estado de compactação), ou ainda em escala temporal relativamente curta, no período em que o conteúdo de água no solo se encontrar acima da capacidade de campo, dado o comportamento dinâmico da água no solo (Blainski et al., 2009).

Por outro lado, sob condições naturais, esses solos apresentam um reduzido desenvolvimento de poros texturais (microporos), responsáveis pelos processos de retenção de água (Balbino et al., 2004; Vollant-Tuduri et al., 2005; Reatto et al., 2007), sendo sugerido por Resende et al. (2007), que em Latossolos altamente intemperizados, com baixa capacidade de retenção de água para as plantas, algum grau de compactação do solo poderia ser benéfico, pela

transformação de parte dos macroporos em microporos, resultando, dessa forma, em incrementos na produtividade das culturas, principalmente nos anos mais secos (Richart et al., 2005; Beutler et al., 2008; Freddi et al., 2009).

Esse comportamento pode ser visualizado nas Figuras 1 e 2, em que retenção de água na capacidade de campo, e conseqüentemente do IHO, aumentou em direção ao incremento da densidade do solo até o momento em que o θ_{RP} substituiu o θ_{PMP} . Nesse ponto, a água disponível atingiu o valor máximo (Figura 2), sem, contudo, apresentar limitações de oxigênio e resistência mecânica para o crescimento radicular das plantas na faixa da água disponível (Figura 1), caracterizando-a como compactação benéfica em termos de retenção de água. Resultados semelhantes foram encontrados por Tormena et al. (1998) e Leão et al. (2006).

O incremento na retenção de água com a compactação benéfica pelos solos estudados decresceu à medida que se aumentou o conteúdo de argila do solo (aumento de 33% para o L₁₅₂; 28% para o L₂₆₃; 23% para o L₃₉₉; 15% para o L₅₂₁ e; 12% para o L₇₁₆) (Figura 2). Esse fato torna-se muito importante no manejo de Latossolos de textura média, uma vez que, dado a baixa capacidade de retenção de água nesses solos (Giarola et al., 2002; EMBRAPA, 2006; Silva et al., 2008), estes são solos mais vulneráveis que os argilosos, aos efeitos dos veranicos que ocorrem durante o desenvolvimento da cultura. O aumento na microporosidade, obtido através de manejo adequado, minimizaria as conseqüências desse fenômeno.

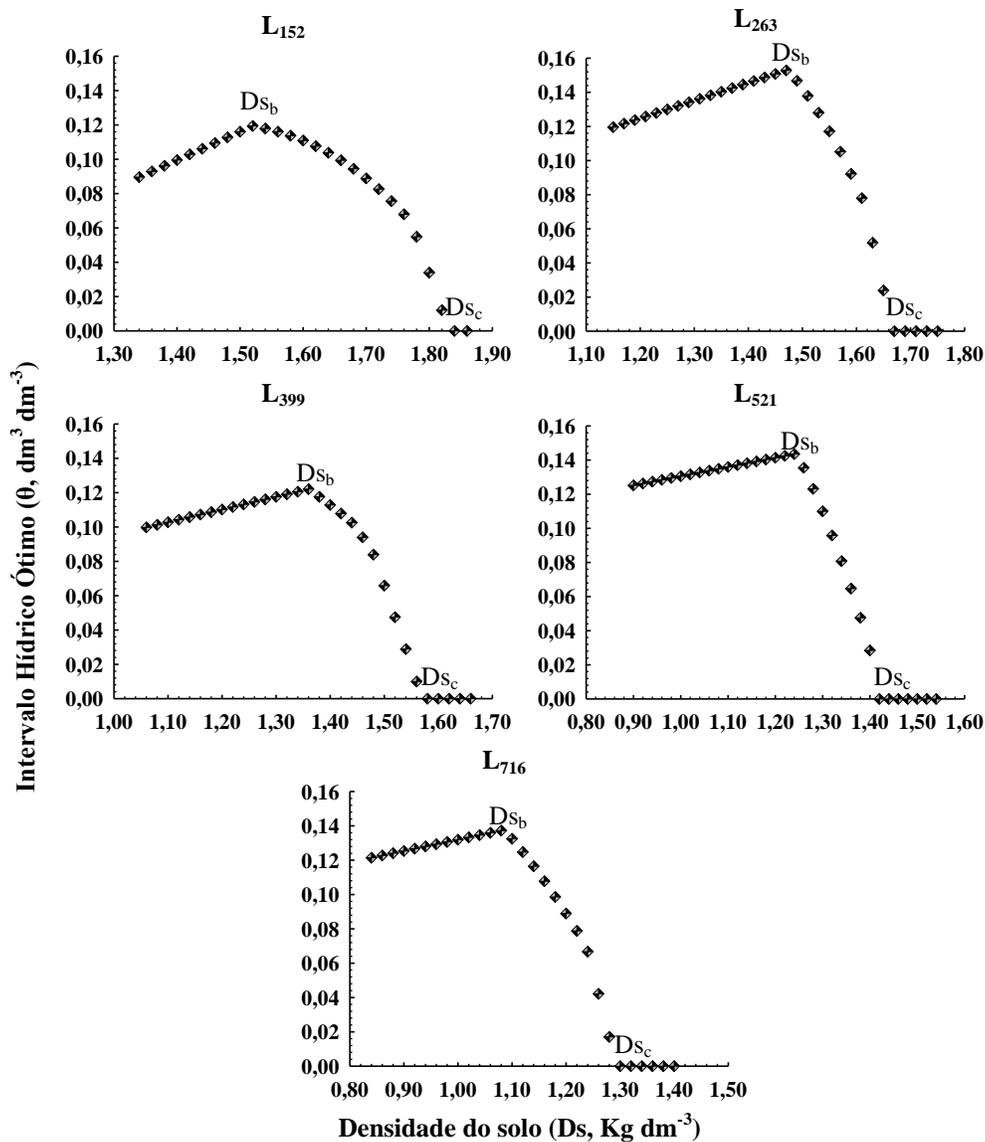


FIGURA 2 Variação do intervalo hídrico ótimo (IHO) com a densidade do solo (D_s) nos Latossolos do município de Rio Verde, GO. D_{sb} : densidade benéfica ao aumento da retenção de água no solo; D_{sc} : densidade crítica ao desenvolvimento das plantas. O número subscrito na legenda dos Latossolos corresponde ao respectivo conteúdo de argila.

Apesar da maior retenção de água em decorrência de uma leve compactação do solo, a quantidade de água disponível no solo, obtida a partir dos IHOs, foi similar entre os Latossolos estudados, sendo o valor absoluto sempre inferior a $0,15 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$, independente da variação textural entre si, corroborando com resultados obtidos por Giarola et al. (2002) e Silva et al. (2008) através de análises das curvas de retenção de água no solo, o que caracteriza a homogeneidade da água disponível nos Latossolos oxidicos.

Ainda em análise da Figura 2, observa-se que os valores de D_s em que os IHOs tornou-se nulo ($D_{s_{IHO}}$), em todos os solos, foram superiores àqueles onde a macroporosidade do solo atingiu o valor de $0,10 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$ (Figura 3), e portanto, em maior estado de compactação do solo. Severiano et al. (2008) sugeriram que a determinação de valores de referência de D_s , indicadora de degradação estrutural severa, em estudos de compactação do solo, seja baseada na macroporosidade ($D_{s_{MAC}}$), em contrapartida à $D_{s_{IHO}}$ (Tormena et al., 1998; 2007; Beutler et al., 2008), uma vez que, nesse último caso, a porosidade drenável já pode estar sendo comprometida. A manutenção da macroporosidade em níveis adequados, além de proporcionar condições físicas do solo favoráveis à obtenção de produções satisfatórias, garante também a sustentabilidade ambiental, salientando-se que, em última análise, esta classe de poros determina a movimentação potencial de água no solo (Ferreira et al., 1999a; Mesquita & Moraes, 2004), papel esse, fundamental, no processo de infiltração de água e recarga de água subterrânea, e na redução das perdas de solo por erosão (Hamza & Anderson, 2005). O menor estado de compactação da $D_{s_{MAC}}$ em relação à $D_{s_{IHO}}$ também foi observado por Reichert et al. (2009). Consequentemente, as propriedades hidrológicas do solo são afetadas antes que a compactação do solo se torne restritiva ao crescimento e rendimento das culturas.

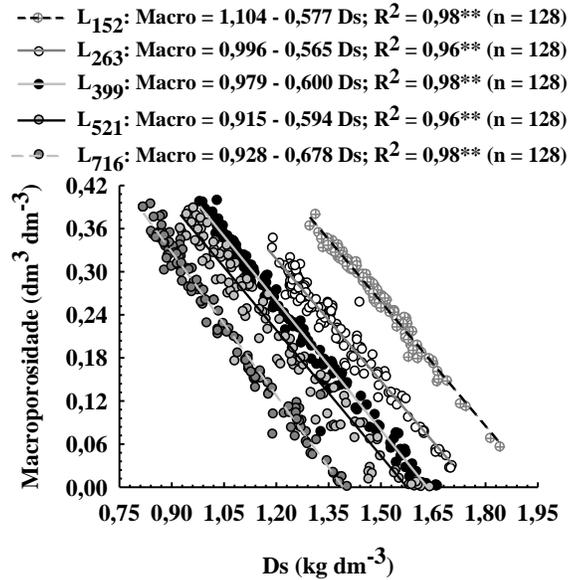


FIGURA 3 Macroporosidade em função do incremento da densidade do solo (Ds), nos Latossolos do município de Rio Verde, GO. O número subscrito na legenda dos Latossolos corresponde ao respectivo conteúdo de argila.

Os resultados discutidos anteriormente demonstram que, sob condições naturais, os Latossolos oxídicos apresentam condições sub-ótimas para o crescimento das plantas, uma vez que a baixa microporosidade promove uma baixa retenção de água, enquanto que a elevada macroporosidade pode vir a promover um pequeno contato solo-semente, fundamental para uma boa germinação e estabelecimento populacional das plantas (Richart et al., 2005; Modolo et al., 2008) (Tabela 3). Entretanto, em termos ambientais, esses solos apresentam uma rápida infiltração de água. Quando submetidos à compressão, a compactação do solo resultou desde benefícios ao crescimento das plantas em decorrência do incremento na retenção de água, até condições de severas

restrições as suas funções edáficas relacionadas à infiltração de água e recarga do lençol freático, inclusive com valores de $D_s > D_{SC_{MAC}}$ ou $D_{SC_{IHO}}$ (Figuras 2 e 3), fazendo-se necessário a determinação de valores de referência indicativos do estado de compactação do solo.

Destaca-se que, pelo fato da densidade do solo ser a medida quantitativa mais direta no diagnóstico da compactação, e tendo em vista a sua forte correlação com os demais atributos físico-hídricos do solo (Horn & Fleige, 2003; Fritton, 2006; Oliveira et al., 2007), este atributo tem sido muito utilizado em estudos de alterações estruturais do solo. Entretanto, a forte influência da textura e estrutura do solo sobre este atributo limita a escolha de um valor absoluto de referência (Camargo & Alleoni, 1997; Severiano et al., 2008), tornando-se necessário o desenvolvimento de funções matemáticas para determinação de valores de D_s relacionados às funções edáficas do solo, com destaque ao crescimento e rendimento das plantas e à infiltração de água, a partir dos atributos facilmente mensuráveis.

Essas funções foram obtidas através de ajustes lineares entre os valores de D_s relacionados às alterações estruturais e o conteúdo de argila, e os resultados são apresentados na Figura 4. A comparação das regressões pelos procedimentos estatísticos descritos por Snedecor & Cochran (1989) não apontou diferenças entre os valores dos coeficientes angulares das quatro equações, indicando que o incremento da fração argila reduziu o valor de D_s de maneira semelhante, independente do estado de compactação em que o solo se encontra, corroborando com Reichert et al. (2009). Observa-se dessa forma, pelos valores dos coeficientes lineares, que a compactação benéfica corresponde a um incremento em torno de 15% da densidade do solo inicial (D_{si}), 27% para redução da macroporosidade a $0,10 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$ ($D_{SC_{MAC}}$), e 35% para se ter restrições ao desenvolvimento das plantas, com base no intervalo hídrico ótimo ($D_{SC_{IHO}}$).

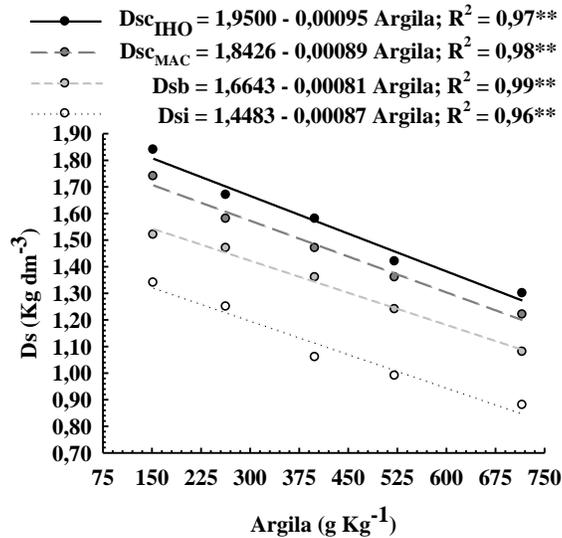


FIGURA 4 Densidade do solo inicial (Dsi), benéfica em termos de aumento na retenção de água no solo (Dsb), crítica para redução da macroporosidade a $0,10\ dm^3\ dm^{-3}$ (Dsc_{MAC}), e crítica ao crescimento e rendimento das plantas, com base no intervalo hídrico ótimo (Dsc_{IHO}), em função do conteúdo de argila dos Latossolos do município de Rio Verde, GO.

Em trabalho semelhante, realizado utilizando valores de referência de diferentes classes de solos brasileiros de regiões subtropicais, Reichert et al. (2009) encontraram valores de Dsc_{IHO} inferiores aos determinados pela Figura 4. Salienta-se que em função da mineralogia predominantemente caulínica dos solos dessa região do Brasil, estes apresentam tendência de formação de estrutura em blocos (Kämpf & Schwertmann, 1983; Melo et al., 2004). Por sua vez, a pedogênese deste tipo de estrutura está associada ao desenvolvimento de um plasma denso (Ferreira et al., 1999b), com predomínio de poros texturais (Cooper & Vidal-Torrado, 2005), o que confere ao solo maior adensamento

natural que os Latossolos oxídicos, em condições granulométricas semelhantes (Ferreira et al., 1999a; Ajayi et al., 2009). Por esse motivo, as restrições físicas do solo para o crescimento e rendimento das culturas ocorrem em valores de D_s inferiores em solos com estrutura do tipo bloco, com relação àqueles com estrutura granular (Severiano et al., 2008), em decorrência da sua elevada porosidade de aeração prolongar a faixa positiva do IHO (Figura 1).

6 CONCLUSÕES

1. O indicador físico intervalo hídrico ótimo mostrou-se mais sensível à dinâmica estrutural dos Latossolos que o indicador água disponível;
2. A compactação do solo pode resultar desde benefícios ao crescimento das plantas, relacionados ao aumento na retenção de água, até condições de severas restrições as suas funções edáficas;
3. Todos os valores de densidade do solo de referência (D_{si} , D_{sb} , $D_{sc_{IHO}}$ e $D_{sc_{MAC}}$) diminuiram com o incremento do conteúdo de argila;
4. A $D_{sc_{MAC}}$ foi mais restritiva ao manejo sustentável dos Latossolos estudados que a $D_{sc_{IHO}}$;
5. O maior estado de compactação permissível em Latossolos oxídicos deve-se a elevada porosidade de aeração conferida pela estrutura granular.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AJAYI, A. E.; DIAS JUNIOR, M. S.; CURI, N.; ARAUJO JUNIOR, C. F.; SOUZA, T. T. T.; INDA JUNIOR, A.V. Strength attributes and compaction susceptibility of Brazilian Latosols. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 105, n. 1, p. 122-127, Sept. 2009.

BALBINO, L. C.; BRUAND, A.; COUSIN, I.; BROSSARD, M.; QUÉTIN, P.; GRIMALDI, M. Change in the hydraulic properties of a Brazilian clay ferralsol on clearing for pasture. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, n. 3/4, p. 297-307, June 2004.

BENGOUGH, G. A.; BRANSBY, M. F.; HANS, J.; MCKENNA, S. J.; ROBERTS, T. J.; VALENTINE, T. A. Root responses to soil physical conditions: growth dynamics from field to cell. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 57, n. 2, p. 437-447, Jan. 2006.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SILVA, A. P.; CENTURION, M. A. P. C.; LEONEL, C. L.; FREDDI, O. S. Soil compaction by machine traffic and least limiting water range related to soybean yield. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 11, p. 1591-1600, nov. 2008.

BLAINSKI, E.; GONÇALVES, A.C. A.; TORMENA, C. A.; FOLEGATTI, M.V.; GUIMARÃES, R. M. L. Intervalo hídrico ótimo num Nitossolo Vermelho distroférico irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 33, n. 2, p. 273-281, mar./abr. 2009.

BORGES, T. A.; OLIVEIRA, F. A.; SILVA, E. M.; GOEDERT, W. J. Avaliação de parâmetros físico-hídricos de Latossolo Vermelho sob pastejo e sob cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 1, p. 18-25, jan./fev. 2009.

BUSSCHER, W. J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to common water content. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 33, n. 2, p. 519-524, Apr. 1990.

CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e o desenvolvimento de plantas**. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 1997. 132 p.

COOPER, M.; VIDAL-TORRADO, P. Caracterização morfológica, micromorfológica e físico-hídrica de solos com horizonte B Nítico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 29, n. 4, p. 581-595, jul./ago. 2005.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Manual de métodos de análises de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e Abastecimento, 1997. 212 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e Abastecimento, 2006. 306 p.

FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 23, n. 3, p. 515-524, jul./set. 1999a.

FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Mineralogia da fração argila e estrutura de Latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 23, n. 3, p. 507-514, jul./set. 1999b.

FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F.; DUARTE, A. P.; PERES, F. S. C. Compactação do solo e produção de cultivares de milho em Latossolo Vermelho: II – Intervalo hídrico ótimo e sistema radicular. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 33, n. 4, p. 805-818, jul./ago. 2009.

FRITTON, D. D. Fitting uniaxial soil compression using initial bulk density, water content, and matric potential. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 70, n. 4, p. 1262-1271, July 2006.

GIAROLA, N. F. B.; SILVA, A. P.; IMHOFF, S. Relações entre propriedades físicas e características de solos da região sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 26, n. 4, p. 885-893, out./dez. 2002.

GRABLE, A. R.; SIEMER, E. G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 32 n. 2, p. 180-186, Mar. 1968.

GUPTA, S. C.; HADAS, A.; SCHAFER, R. L. Modeling soil mechanical behavior during compaction. In: LARSON, W. E.; BLAKE, G. R.; ALLMARAS, R. R.; VOORHEES, W. B.; GUPTA, S. C. (Ed.). **Mechanical and related process in structured agricultural soils**. Dordrecht: Kluwer Academic, 1989. p. 137-152.

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

HORN, R.; FLEIGE, H. A method for assessing the impact of load on mechanical stability and on physical properties of soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, n. 1/2, p. 89-99, Oct. 2003.

KÄMPF, N.; SCHWERTMANN, U. Relações entre óxidos de ferro e a cor em solos caulíníticos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 7, n. 1, p. 27-31, jan./mar. 1983.

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

LAPEN, D. R.; TOPP, G. C.; GREGORICH, E. G.; CURNOE, W. E. Least limiting water range indicators of soil quality and corn production, eastern Ontario, Canada. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 78, n. 2, p. 151-170, Aug. 2004.

LEÃO, T. P.; SILVA, A. P.; MACEDO, M. C. M.; IMHOFF, S.; EUCLIDES, V. P. B. Least limiting water range: a potential indicator of changes in near-surface soil physical quality after the conversion of Brazilian Savanna into pasture. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 88, n. 1/2, p. 279-285, July 2006.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Advances in Soil Science**, New York, v. 1, n. 1, p. 277-294, Jan. 1985.

MELLO, C. R.; OLIVEIRA, G. C.; RESCK, D. V. S.; LIMA, J. M.; DIAS JUNIOR, M. S. Estimativa da capacidade de campo baseada no ponto de inflexão da curva característica. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 26, n. 4, p. 836-841, jul./ago. 2002.

MELO, G. W.; MEURER, E. J.; PINTO, L. F. S. Fontes de potássio em solos distroféricos caulíníticos originados de basalto no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, n. 4, p. 597-603, jul./ago. 2004.

MESQUITA, M. G. B. F.; MORAES, S. O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 3, p. 963-969, maio/jun. 2004.

MODOLO, A. J.; FERNANDES, H. C.; SCHAEFER, C. E. G.; SILVEIRA, J. C. M. Efeito da compactação do solo sobre a emergência de plântulas de soja em sistema plantio direto. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 4, p. 1259-1265, jul./ago. 2008.

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

OLIVEIRA, G. C.; SEVERIANO, E. C.; MELLO, C. R. Dinâmica da resistência à penetração de um Latossolo Vermelho da microrregião de Goiânia, GO. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 3, p. 265-270, maio/jun. 2007.

RATHMANN, R.; SZKLO, A.; SCHAEFFER, R. Land use competition for production of food and liquid biofuels: an analysis of the arguments in the current debate. **Renewable Energy**, Oxford, v. 35, n. 1, p. 14-22, Jan. 2010.

REATTO, A.; BRUAND, A.; SILVA, E. M.; MARTINS, E. S.; BROSSARD, M. Hydraulic properties of the diagnostic horizon of Latosol of a regional toposequence across the Brazilian central platea. **Geoderma**, Amsterdam, v. 139, n. 1/2, p. 51-59, Feb. 2007.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J.; HORN, R.; HÅKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 102, n. 2, p. 242-254, Mar. 2009.

RESENDE, M.; CURTI, N.; REZENDE, S. B.; CORRÊA, G. F. **Pedologia**: base para distinção de ambientes. 5. ed. Lavras: UFLA, 2007. 322 p.

RICHARDS, L. A.; WEAVER, L. R. Fifteen-atmosphere percentage as related to the permanent wilting point. **Soil Science**, Baltimore, v. 56, n. 5, p. 331-339, Nov. 1943.

RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; BRITO, O. R.; LLANILLO, R. F.; FERREIRA, R. Compactação do solo: causas e efeitos. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 26, n. 3, p. 321-344, jul./set. 2005.

SCHÄFFER, B.; STAUBER, M.; MUELLER, T. L.; MÜLLER, R.; SCHULIN, R. Soil and macro-pores under uniaxial compression: I mechanical stability of repacked soil and deformation of different types of macro-pores. **Geoderma**, Amsterdam, v. 146, n. 1/2, p.183-191, July 2008.

SEVERIANO, E. C.; OLIVEIRA, G. C.; DIAS JUNIOR, M. S.; OLIVEIRA, L. F. C.; CASTRO, M. B. Pressão de preconsolidação e intervalo hídrico ótimo como indicadores de alterações estruturais do solo em decorrência das operações de colheita da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 4, p. 1419-1427, jul./ago. 2008.

SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 58, n. 6, p.1775-1781, Nov./Dec. 1994.

SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; IMHOFF, S. Funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 1, p. 1-10, jan./fev. 2008.

SNEDECOR, G. W.; COCHRAN, W. G. **Statistical methods**. 8. ed. Ames: Iowa State University, 1989. 503 p.

TAYLOR, D. W. **Fundamentals of soil mechanics**. New York: J. Wiley, 1948. 700 p.

TORMENA, C. A.; ARAÚJO, M. A.; FIDALSKI, J.; COSTA, J. M. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférrico sob sistemas de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, n. 2, p. 211-219, mar./abr. 2007.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 22, n. 4, p. 573-581, out./dez. 1998.

VOLLANT-TUDURI, N.; BRUAND, A.; BROSSARD, M.; BALBINO, L. C.; OLIVEIRA, M. I. L.; MARTINS, E. S. Mass proportion of microaggregates and bulk density in a Brazilian clayey oxisol. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 69, n. 5, p. 1559-1564, Sept. 2005.

VOMOCIL, J. A.; FLOCKER, W. J. Effect os soil compaction on storage and movement of soil, air and water. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 4, p. 242-246, July/Aug. 1966.

WU, L.; FENG, G.; LETEY, J.; FERGUSON, L.; MITCHELL, J.; MCCULLOUGH-SANDEN, B.; MARKEGARD, G. Soil management effects on the nonlimiting water range. **Geoderma**, Amsterdam, v. 114, n. 3/4, p. 401-414, June 2003.

CAPÍTULO 4

ALTERAÇÕES ESTRUTURAIS DE LATOSSOLOS REPRESENTATIVOS DA REGIÃO DO CERRADO: II – COMPORTAMENTO COMPRESSIVO DO SOLO E MODELAGEM DA COMPACTAÇÃO ADICIONAL

1 RESUMO

Atualmente, no Brasil, como no resto do mundo, há uma grande preocupação com o aumento das áreas agrícolas degradadas, o que, na maioria das vezes está relacionada com a ocorrência da compactação do solo. Apesar da composição granulométrica do solo ser reconhecidamente importante no comportamento compressivo do solo, há carência de estudos que quantificam a sua influência na dinâmica estrutural dos Latossolos oxídicos da região do Cerrado. O objetivo deste trabalho foi avaliar as alterações estruturais de Latossolos do município de Rio Verde, GO, através da avaliação do comportamento compressivo e modelagem da compactação adicional do solo. O estudo foi conduzido utilizando-se amostras de cinco Latossolos oxídicos muito contrastantes quanto à textura. Determinaram-se, a partir de amostras indeformadas, as curvas de retenção de água e de compressão do solo, e os modelos de capacidade de suporte de carga do solo. Os resultados indicaram que os Latossolos argilosos e muito argilosos estudados, comparativamente aos de textura média, apresentaram elevada suscetibilidade à compactação. As avaliações das curvas de compressão do solo associadas a valores de densidade do solo de referência, relacionados às funções edáficas do solo, permitem a determinação das pressões benéficas (σ_b) em termos de retenção de água, e pressões críticas (σ_{ctMAC}), capaz de promover a redução da macroporosidade a níveis considerados críticos para o desempenho das funções edáficas do solo. Por sua vez, essas pressões são superiores à pressão de preconsolidação (σ_p), e, portanto, caracterizadas como compactação adicional dos Latossolos estudados. Com base no estudo de comportamento compressivo dos Latossolos, é possível concluir que o uso conjunto dos índices, pressão de preconsolidação, pressão benéfica e pressão crítica, permitem melhor entendimento do processo de compactação dos Latossolos oxídicos.

2 ABSTRACT

Currently, there is great concern with increasing of degradation of agricultural areas, in most cases is related to soil compaction. Although soil texture is recognized as a very important component in the compressive behavior of soils, there are few studies that quantify its influence on the structural changes of Latosols in the Brazilian Cerrado region. This work aimed to evaluate structural changes of Latosols in Rio Verde, Goias, through evaluation of compressive behavior and the modeling of additional soil compaction. The study was carried out using five Latosols with very different textures. Water retention, soil compression curves, and bearing capacity models were determined from undisturbed samples. Results indicated that clayey and very clayey Latosols were more susceptible to compression than medium-textured soils. Soil compression curves at density values associate with edaphic functions were used to determine the beneficial pressure (σ_b) allowing optimal water retention, and critical pressure (σ_{crMAC}) able to reducing macroporosity below critical levels. These pressures were above the preconsolidation pressure (σ_p), and thus were considered additional compaction. Based on the compressive behavior of these Latosols, it can be concluded that the preconsolidation pressure, beneficial pressure and critical pressure combined allow better understanding of compression processes of Latosols.

3 INTRODUÇÃO

A degradação das áreas agrícolas tem-se tornado uma preocupação universal, o que, na maioria das vezes, está relacionada à disseminação da compactação do solo, provocada pelo tráfego de máquinas e implementos (Canillas & Salokhe, 2002).

Na região do Cerrado brasileiro, a evolução da agricultura tem sido baseada em tecnologias de produção cada vez mais dependentes do uso de máquinas agrícolas em todas as etapas do processo produtivo. Em decorrência das condições climáticas dessa região, que possibilitam até dois cultivos anuais, os períodos para execução dos tratos culturais estão cada vez mais curtos. Associados aos constantes aumentos no tamanho e na potência do maquinário, que realizam as operações em larga escala a um custo operacional cada vez menor, os problemas físicos do solo tendem a se intensificar (Yavuzcan et al., 2005), fazendo-se necessário o desenvolvimento de pesquisas envolvendo a identificação, limites críticos e mitigação das alterações estruturais provocadas pelo uso inadequado do solo.

Os Latossolos dessa região apresentam ampla variação textural, com conteúdos de argila variando de 150 g kg⁻¹ (Empresa Brasileira de Pesquisa e Agropecuária, EMBRAPA, 2006) a superior a 750 g kg⁻¹ (Gontijo et al., 2008). Esses solos, que já apresentam elevada suscetibilidade à compactação sob condições naturais (Ajayi et al., 2009), tornam-se ainda mais vulneráveis, devido à concentração do tráfego de máquinas durante a estação chuvosa e, portanto, sob condições de elevados conteúdos de água no solo (Kondo & Dias Junior, 1999; Silva et al., 2003; Cardoso, 2007; Cavalieri et al., 2009; Severiano et al., 2010), o que pode tornar praticamente inevitável a ocorrência de alguma compactação adicional quando inseridos ao processo produtivo.

Por esse motivo, na avaliação das alterações estruturais do solo, deve-se levar em consideração as condições favoráveis à obtenção de produções satisfatórias sem comprometer a sua capacidade de infiltração de água e recarga de água subterrânea, minimizando, desta forma, as perdas de solo e nutrientes por erosão e o assoreamento dos mananciais (Izidorio et al., 2005). Portanto, para maior elucidação dos impactos adversos do uso do solo, faz-se necessário a realização de estudos que relacionem a qualidade do solo para o crescimento das plantas com a sua capacidade de suporte de carga (Imhoff et al., 2001), considerando ainda, o seu papel ecológico na paisagem (Capítulo 3).

Neste contexto, a caracterização do comportamento compressivo do solo torna-se fundamental no processo preventivo da degradação das áreas agrícolas. Para tanto, tem sido utilizada a curva de compressão do solo (representação gráfica da relação entre a pressão aplicada ao solo e algum atributo relacionado com a sua estrutura, geralmente a densidade do solo ou índice de vazios). A pressão de preconsolidação (σ_p), obtida a partir dos ensaios de compressão uniaxial, tem sido considerada como indicador de trafegabilidade dos solos, tendo em vista que a aplicação de cargas maiores que esse valor leva a uma compactação adicional do solo (Dias Junior, 1994).

Apesar das propriedades mecânicas do solo permitirem uma estimativa da capacidade de suporte de carga dos solos, no Brasil, poucos são os trabalhos que quantificam os níveis de pressões que podem ser aplicados para evitar a compactação crítica do solo (Oliveira et al., 2003). Dessa forma, ressalta-se que através da curva de compressão, além da possibilidade de determinação diretamente da própria curva dos níveis de pressão que estão associados a índices estruturais restritivos, tanto ao crescimento das plantas, quanto às funções hidrológicas do solo, pode-se também associar a valores considerados benéficos, uma vez que a ocorrência de compactação adicional nem sempre é considerada prejudicial para a qualidade do solo (Capítulo 3).

Salienta-se ainda que, apesar da composição granulométrica do solo ser reconhecidamente importante no comportamento compressivo do solo, há carência de estudos que quantificam a sua influência na dinâmica estrutural desses solos. O objetivo deste trabalho foi avaliar as alterações estruturais de Latossolos, através da avaliação do comportamento compressivo e modelagem da compactação adicional do solo.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido utilizando-se amostras de solo coletadas em áreas experimentais sob vegetação nativa recobertas por Latossolos (EMBRAPA, 2006) muito contrastantes quanto à textura (Figura 1), localizadas no município de Rio Verde, GO, Microrregião do Sudoeste Goiano. O clima local é do tipo Aw (Tropical de Savana), com inverno seco e verão chuvoso e precipitações anuais médias entre 1500 a 2000 mm. A descrição das áreas estudadas, classificação dos perfis, a forma de amostragem e os procedimentos analíticos para caracterização química e física dos solos foram descritos no capítulo 3.

Foram feitas amostragens de solo no horizonte Bw, coletando aleatoriamente, em cada trincheira, vinte amostras indeformadas, confinadas em anéis de alumínio com capacidade para 80 cm³, utilizando o amostrador de Uhlend. As amostras foram revestidas por filme de PVC e parafinadas, para a sua preservação até a realização das análises físico-hídricas.

Para determinação das curvas de retenção de água no solo (CRA), quatro amostras de cada Latossolo foram inicialmente saturadas por capilaridade com água destilada e equilibradas através da secagem, nos seguintes potenciais matriciais (Ψ_m): 1, 2, 4, 6, 8 e 10 kPa, na unidade de sucção e; 33, 60, 100, 500 e 1500 kPa dentro de câmaras de Richards (EMBRAPA, 1997).

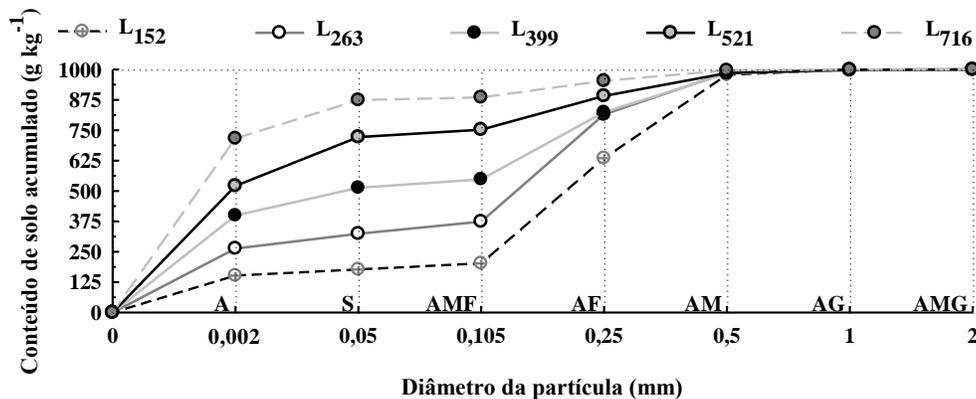


FIGURA 1 Distribuição de partículas por tamanho dos Latossolos do município de Rio Verde, GO. O número subscrito na legenda dos Latossolos corresponde ao respectivo conteúdo de argila (g kg^{-1}); A: Argila; S: silte; AMF: Areia muito fina; AF: Areia fina; AM: Areia média; AG: Areia grossa; AMG: Areia muito grossa.

As demais amostras foram submetidas ao ensaio de compressão uniaxial, conforme Dias Junior (1994). Para tanto, as amostras foram inicialmente saturadas por capilaridade equilibradas a cada um dos seguintes potenciais matriciais (Ψ_m): 2, 6, 33 e 1500 kPa (quatro amostras por potencial). As amostras foram submetidas, subsequentemente, às pressões de 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1.600 kPa. Cada pressão foi aplicada até se obterem 90 % da deformação máxima (Taylor, 1948), sendo então aplicadas sucessivamente as pressões crescentes, sem efetuar o descarregamento das pressões previamente aplicadas. Após a determinação da retenção de água no solo e da compressibilidade, as amostras foram secas em estufa, a 105°C, por 48 horas, para a determinação do conteúdo de água no solo e da densidade do solo (D_s).

Os conteúdos volumétricos de água (θ) foram ajustados de acordo com o potencial matricial (ψ_m), obtendo-se então a CRA, seguindo o modelo proposto por Genuchten (1980), conforme a equação 1:

$$\theta = \theta_r + \left\{ \theta_s - \theta_r / \left[1 + (\alpha \psi_m)^n \right]^m \right\} \quad \text{Eq. (1)}$$

em que θ_s e θ_r são o conteúdo de água na saturação e residual, respectivamente; α , n e m representam parâmetros empíricos de ajuste do modelo.

A pressão de preconsolidação (σ_p) e a densidade do solo na pressão de preconsolidação ($D_{s(p)}$) foram obtidas da curva de compressão do solo segundo Dias Junior & Pierce (1995), utilizando uma planilha eletrônica de fluxo livre para determinação dos parâmetros da curva de compressão do solo. Determinaram-se ainda os valores de pressão (σ) aplicados nas amostras, correspondentes aos níveis de compactação benéfica e crítica às funções edáficas do solo, utilizando-se os valores de D_s de referência determinados no capítulo 3, para os diversos estados de compactação do solo.

Para tanto, está sendo proposta a modificação da planilha utilizada para o cálculo da pressão de preconsolidação. Admitindo que esses níveis de pressão estejam localizados na curva de compressão virgem, foi ajustada, para cada amostra, uma regressão linear entre o logaritmo da pressão aplicada ($\log \sigma$) e a densidade do solo (D_s) correspondente ao prolongamento da reta de compressão virgem. Matematicamente, tem-se:

$$D_s = a + b(\log \sigma) \quad \text{Eq. (2)}$$

em que a e b representam parâmetros empíricos de ajuste do modelo.

Assim, o valor de $\log \sigma$ é:

$$\log \sigma = \frac{(Ds - a)}{b} \quad \text{Eq. (3)}$$

Então, o valor de σ correspondente a compactação adicional é:

$$\sigma = 10^{\left[\frac{(Ds - a)}{b} \right]} \quad \text{Eq. (4)}$$

Esses procedimentos de cálculo foram então incorporados ao método proposto por Dias Junior & Pierce (1995). A planilha eletrônica de fluxo livre, com as modificações mencionadas, é apresentada no Anexo A.

Os valores de pressão (σ) obtidos no ensaio de compressão uniaxial foram ajustados em função do potencial matricial (Ψ_m), obtendo-se assim os modelos de capacidade de suporte de carga do solo para a pressão de preconsolidação (σ_p), caracterizada como a máxima pressão a ser aplicada no solo para evitar a compactação adicional do solo; para a pressão benéfica (σ_b) em termos de aumento na retenção de água no solo; e para a pressão crítica (σ_{cMAC}), sendo aquela capaz de reduzir a macroporosidade a $0,10 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$, em contrapartida à pressão necessária para tornar o intervalo hídrico ótimo nulo ($IHO = 0$), sugerida por Imhoff et al. (2001), uma vez que, nesse último caso, a porosidade drenável já pode estar sendo comprometida (Capítulo 3). A equação 5 permite calcular σ em função de Ψ_m :

$$\sigma = a\Psi_m^b \quad \text{Eq. (5)}$$

ou alternativamente, tem-se a equação linearizada:

$$\log \sigma = \log a + b \log \Psi_m \quad \text{Eq. (6)}$$

Os parâmetros a e b representam parâmetros empíricos de ajuste do modelo. As comparações entre as equações estimadas para os Latossolos foram realizadas de acordo com Snedecor & Cochran (1989), o qual testa a homogeneidade dos dados (F), e a significância dos coeficientes angular (b) e linear ($\log a$) das equações linearizadas (eq. 6).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As curvas de retenção de água dos Latossolos são apresentadas na Figura 2. Observa-se que a retenção de água aumentou proporcionalmente ao incremento do conteúdo de argila em toda extensão da curva, o que se deve ao aumento de poros texturais, que são basicamente relacionados com esta fração. Segundo Silva et al. (2008), o conteúdo total de argila é o principal atributo relacionado com a retenção de água em Latossolos altamente intemperizados, em função dos baixos conteúdos de matéria orgânica e predomínio de minerais de baixa atividade nestes solos.

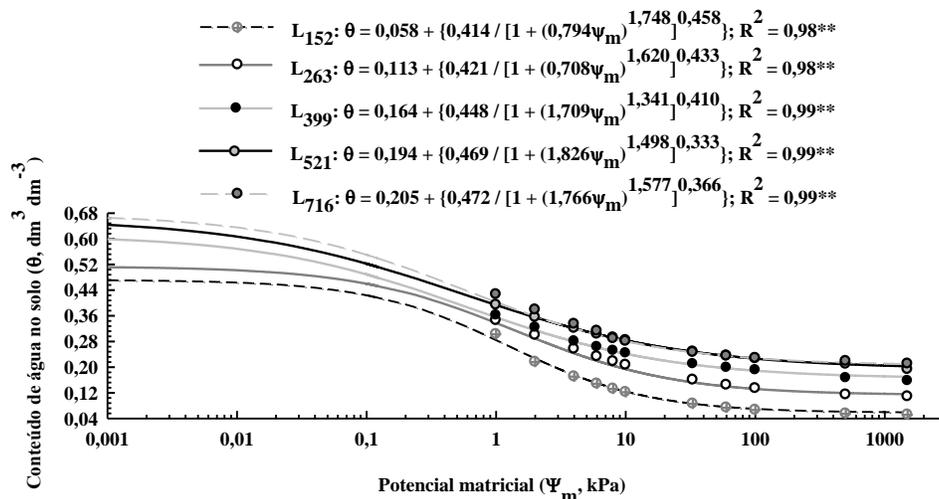


FIGURA 2 Curva característica de água [conteúdo de água no solo (θ) em função do potencial matricial (ψ_m)] dos Latossolos do município de Rio Verde, GO. O número subscrito na legenda dos Latossolos corresponde ao respectivo conteúdo de argila (g kg^{-1}).

Na avaliação das alterações estruturais do solo, a densidade do solo tem sido uma propriedade extensivamente estudada (Capítulo 3). Entretanto, para o diagnóstico de ocorrência de compactação adicional através deste atributo, a sua interpretação deve ser associada à curva de compressão do solo (Dias Junior, 1994). Pesquisas realizadas têm revelado que, nessas condições, o incremento nos valores de D_s observados na pressão de preconsolidação ($D_s\sigma_p$) está em torno de 10% (Kondo & Dias Junior, 1999). Com base nessas considerações, observa-se, na Tabela 1, que os valores de densidade (D_s) onde a retenção de água é máxima (compactação benéfica), e para redução da macroporosidade a $0,10 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$ (D_{sMAC}), dos Latossolos estudados, são superiores aos observados na $D_s\sigma_p$. Estes valores correspondem a incrementos localizados na região de ocorrência de deformações plásticas dessa curva, caracterizando-as como compactação adicional do solo.

TABELA 1 Densidade do solo inicial (D_{si}), na pressão de preconsolidação ($D_{s\sigma p}$), correspondente à compactação benéfica em termos de retenção de água (D_{sb}) e a redução da macroporosidade a $0,10 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$ (D_{scMAC}), dos Latossolos do município de Rio Verde, GO⁽¹⁾.

Latossolo	D_{si}	$D_{s\sigma p}$	D_{sb}	D_{scMAC}
	----- (Kg dm^{-3}) -----			
L ₁₅₂	1,33	1,45	1,54	1,74
L ₂₆₃	1,22	1,34	1,45	1,59
L ₃₉₉	1,08	1,19	1,34	1,47
L ₅₂₁	0,99	1,13	1,24	1,37
L ₇₁₆	0,83	0,97	1,08	1,22

⁽¹⁾: De acordo com os critérios definidos no capítulo 3. D_{si} : Densidade do solo inicial (antes da compressão); O número subscrito na legenda dos Latossolos corresponde ao respectivo conteúdo de argila (g kg^{-1}).

A avaliação das alterações estruturais dos solos baseados nesses valores de referência (Tabela 1) permite, portanto, quantificar os riscos de exposição das culturas aos estresses físicos do solo, bem como de limitação das funções edáficas do solo. Além disso, através da curva de compressão, é possível determinar a densidade do solo de acordo com a pressão aplicada (Oliveira et al., 2003), e dessa forma, inferir os níveis de pressões aplicados ao solo que são necessários para elevar o grau de compactação a valores benéficos, ou ainda críticos. Isto é o que está esquematizado na Figura 3. Observa-se, portanto, que os níveis de pressões correspondentes à compactação adicional (benéfica e crítica) estão localizados na região de deformações não recuperáveis, apesar de não serem considerados restritivos, como já discutidos. Os valores de σ_b e σ_{cMAC} foram determinados a partir das equações 2 a 4.

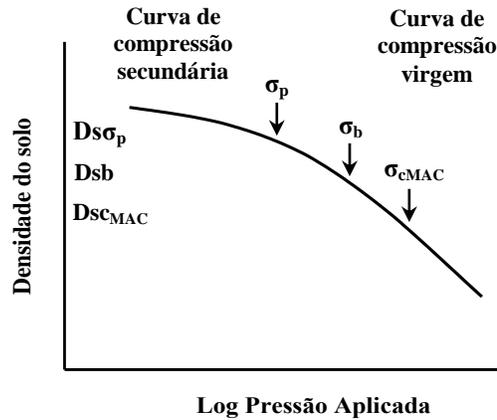


FIGURA 3 Curva de compressão do solo [variação da densidade do solo (D_s) em função do logaritmo da pressão aplicada (σ)], indicando os pontos correspondentes à pressão de pré-consolidação (σ_p), pressão benéfica em termos de retenção de água (σ_b) e crítica para redução da macroporosidade do solo a $0,10 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$ (σ_{cMAC}), e suas respectivas densidades do solo correspondentes. Fonte: Modificado de Dias Junior (1994).

Salienta-se que, para as condições estruturais correspondentes à densidade do solo em que o $IHO = 0$, a porosidade drenável dos Latossolos em estudos pode já estar comprometida (Capítulo 3). Por esse motivo, a modelagem da compactação crítica foi realizada apenas para os valores de D_{scMAC} , dada a importância da manutenção das funções ambientais dos solos na paisagem.

Os modelos de capacidade de suporte de carga das diferentes amostras dos Latossolos, com base na compactação adicional (σ_p), benéfica em termos de retenção de água (σ_b) e crítica para redução da macroporosidade do solo a $0,10 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$ (σ_{cr}), são apresentados na Figura 4. As equações relacionando os diversos estados de compactação solos foram tratadas isoladamente, pelo fato de terem sido observadas diferenças estatísticas entre as regressões, segundo os procedimentos estatísticos descritos por Snedecor & Cochran (1989).

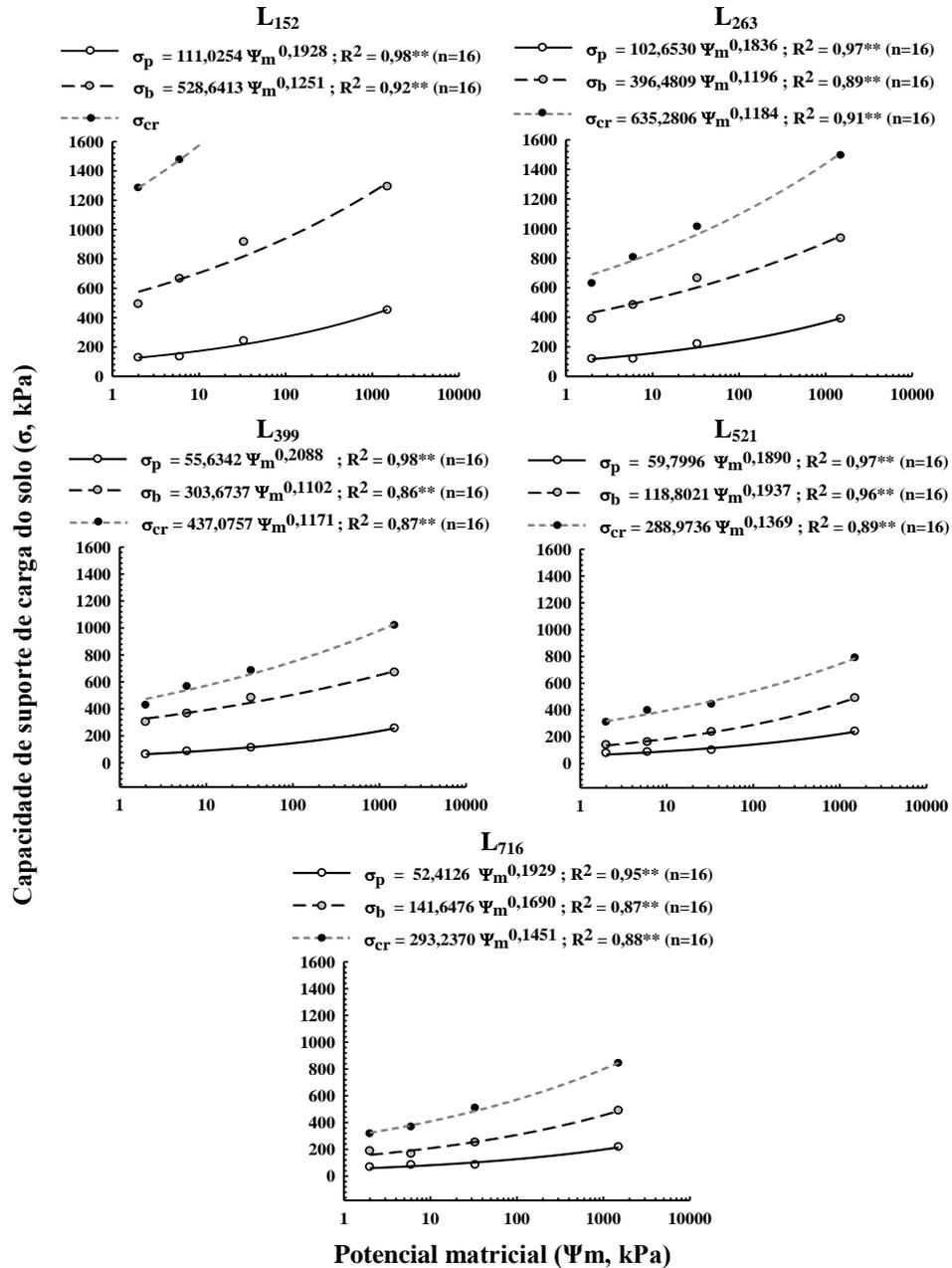


FIGURA 4 Modelos de capacidade de suporte de carga para compactação adicional (σ_p), benéfica em termos de retenção de água (σ_b) e crítica para redução da macroporosidade do solo a $0,10 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$ (σ_{cr}) dos Latossolos do município de Rio Verde, GO.

Observa-se que a capacidade de suporte de carga dos solos decresceu à medida em que se aumentou o conteúdo de argila, sendo este comportamento resultante do efeito integrado dos incrementos da macroporosidade (Capítulo 3) e da retenção de água (Figura 2). Esses fatores são considerados determinantes no comportamento compressivo do solo, uma vez que, quando submetidos à compressão, regularão a magnitude com que a matriz do solo resistirá a deformação (Oliveira et al., 2003; Severiano et al., 2010).

Conforme apresentado no capítulo 2, esse comportamento pode ser considerado como sendo particular da classe dos Latossolos oxídicos, em função do tipo da sua estrutura pedológica. Em termos de comportamento compressivo do solo, a estrutura granular confere menor resistência mecânica ao solo em comparação a outros tipos de estrutura, devido ao reduzido contato pontual entre grânulos (Ajayi et al., 2009). Em solos pertencentes a outras classes, quando submetidos a diferentes sistemas de uso e manejo em outras regiões do Brasil, a relação entre o conteúdo de argila e a pressão de preconsolidação, na maioria das vezes, tem sido direta (Imhoff et al., 2004; Suzuki et al., 2008), sugerindo que o estado de compactação inicial apresenta maior influência na compressibilidade de solos, quando comparado com a ação lubrificante da água nesses solos.

Considerando as características do maquinário utilizado na agricultura brasileira (Cardoso, 2007), associado à concentração do tráfego durante a estação chuvosa (Silva et al., 2003; Cavalieri et al., 2009; Severiano et al., 2010), a resistência à compactação adicional (modelos de capacidade de suporte de carga do solo com base na pressão de preconsolidação) dos Latossolos pode ser considerada muito baixa nessas condições, o que deve promover alguma compactação adicional nos mesmos quando submetidos às operações de manejo agrícola (Figura 4). Para os Latossolos argilosos e muito argilosos, isto pode ocorrer mesmo quando forem trafegados sob condições de solo seco (ou seja, elevados potenciais matriciais). Dessa forma, faz-se necessário a adoção de

medidas preventivas para evitar que a degradação estrutural seja restritiva às funções edáficas do solo.

Por outro lado, a maior resistência mecânica observada para compactação benéfica dos Latossolos, com relação à pressão de preconsolidação (Figura 4) deve-se ao maior estado de compactação do solo nessas condições estruturais (Tabela 1; Figura 3). Em adição, salienta-se que essa compactação adicional, além de aumentar a quantidade de água disponível às plantas (Capítulo 3), também pode ser considerada benéfica para os Latossolos oxidícos da região do Cerrado no que diz respeito à sua trafegabilidade, uma vez que esse aumento na capacidade de suporte de carga pode viabilizar a realização de operações mecanizadas sem a degradação estrutural, particularmente nos Latossolos de textura média (L_{152} e L_{263}). Isto é devido ao aumento das forças de fricção e do número de pontos de contato entre as partículas e, conseqüentemente, à sua menor capacidade de movimentação. Nessas condições, a maior dificuldade de deformação do solo ocasiona esse aumento da resistência à compactação do solo (Imhoff et al., 2001).

Por outro lado, considerando que os valores médios de pressões aplicados pelas máquinas utilizados no Brasil para a produção de culturas anuais variam entre 200 e 450 kPa (Cardoso, 2007), a resistência mecânica daqueles Latossolos argilosos e muito argilosos ainda é baixa, particularmente sob baixos potenciais matriciais (Figura 4). Esse fato indica a maior possibilidade de ocorrência de algum grau de degradação estrutural do solo em decorrência do tráfego de máquinas, que, por sua vez, afetará a disponibilidade de água e oxigênio em proporções adequadas ao pleno desenvolvimento das plantas.

Assumindo então, que a compactação adicional poderá ocorrer mesmo quando se utilizam os valores de pressão benéfica (σ_b), faz-se necessário, no planejamento das operações mecanizadas, definirem-se limites cujas alterações estruturais não se tornem restritivas as funções edáficas do solo, relacionadas

com a produção vegetal e a recarga de água subterrânea. Quando se utilizam os níveis de pressão aplicados ao solo para redução da macroporosidade a $0,10 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$ (σ_{cMAC}), observa-se que a elevação da capacidade de suporte de carga dos Latossolos de textura média tornam-os praticamente resistentes à compactação crítica em áreas cultivadas (Figura 4). Destaca-se que, para o L_{152} , não foi possível ajustar a regressão que descreve a sua resistência, uma vez que, apenas nos dois menores conteúdos de água no solo avaliados ($\Psi_m < 6 \text{ kPa}$), os valores se encontraram no intervalo de carga avaliado. Dessa forma, com o secamento do solo, faz-se necessário a aplicação de uma carga superior à 1600 kPa , para atingir a referida redução na macroporosidade.

Esse fato vem sendo confirmado ainda que de maneira indireta, através de análises das relações massa/volume do solo, por resultados de vários pesquisadores em solos de textura grosseira (Abreu et al., 2004; Carneiro et al., 2009), sendo este, geralmente, associado à adequação do tráfego de máquinas ou da pressão de pastejo de animais. Nesse contexto, a avaliação das alterações estruturais, baseada no comportamento compressivo sob condições restritivas demonstra a relevância da resistência da matriz do solo à deformação, na elucidação do processo de compactação desses solos.

Para os Latossolos argilosos e muito argilosos, a capacidade de suporte de carga para compactação crítica ainda pode ser superada pelas pressões aplicadas pelo maquinário agrícola, particularmente sob baixa tensão de água no solo (Figura 4). Esses resultados foram semelhantes aqueles encontrados por Oliveira et al. (2003) e necessários para promover a redução da porosidade do solo a níveis considerados críticos para a maioria das culturas, em um Latossolo Vermelho de textura argilosa (530 g kg^{-1}) da região do Cerrado.

Ressalta-se ainda que essa situação pode agravar-se ainda mais, quando se considera que a maioria das mensurações das pressões aplicadas pelos maquinários agrícolas se baseia, principalmente, em resultados de ensaios para

determinação da área de contato do pneu conduzidos em condições estáticas (Blaszkievics, 1990; Sharma & Pandey, 1996; Cardoso, 2007). Segundo Castro Neto (2001), nessas condições a área de contato do rodado se altera devido ao desaparecimento gradual da deflexão do pneu, resultando em uma maior área, conseqüentemente, subestimando os reais valores de pressões aplicadas ao solo sob condições de tráfego. Dessa forma, a realização de tratos culturais mecanizados nesses Latossolos deve ser precedida de bastante cautela para evitar a sua degradação estrutural, principalmente quando se considera que a destruição dos macroporos pode ocorrer logo nas primeiras passagens do maquinário (Horn et al., 1995).

Se por um lado, a adoção dos modelos de capacidade de suporte de carga baseados nas pressões benéficas e críticas, além de proporcionar maior flexibilidade ao manejo do solo, pode até viabilizar a exploração agrícola sustentável em áreas de elevada suscetibilidade à compactação, particularmente quando se trata de cultivos anuais, em que a realização dos tratos culturais se concentra durante a estação chuvosa, a redução do diâmetro dos poros pode ser determinante na regulação dos fluxos de água e gases no solo (Horn, 2003), principalmente quando se considera que o maior fluxo de água ocorre nos macroporos.

Por esse motivo, espera-se uma forte alteração das propriedades hidrológicas do solo quando submetido ao uso, mesmo quando definidos limites críticos às atividades antrópicas, fazendo-se necessário um planejamento global com esforço coordenado para se encontrarem estratégias de manejo que maximizem a produção e minimizem o impacto negativo ao ambiente (Lal, 1993; Capítulo 3).

Neste contexto, o fracionamento do comprimento de rampa através da prática do terraceamento agrícola, a adoção de sistema agrícolas com pequeno revolvimento do solo e incorporação de espécies vegetais em sistemas de

rotação de culturas, com habilidade para o rompimento de camadas compactadas, e potencialmente capazes de formarem bioporos que favorecem o fluxo preferencial de água no solo (Abreu et al., 2004; Jimenez et al., 2008), devem ser consideradas medidas mitigadoras compensatórias à redução da macroporosidade, culminando em contribuições para a sustentabilidade agrícola e ambiental na região do Cerrado.

6 CONCLUSÕES

1. Os Latossolos oxídicos argilosos e muito argilosos estudados, comparativamente aos de textura média, apresentam baixa capacidade de suporte de carga;

2. A avaliação das curvas de compressão do solo associadas a valores de densidade do solo de referência relacionados às funções edáficas do solo permitem a determinação das pressões benéficas em termos de retenção de água, e crítica, capaz de promover a redução da macroporosidade de níveis considerados críticos para o desempenho das funções edáficas do solo;

3. O uso conjunto de valores de pressão de preconsolidação, pressão benéfica e pressão crítica permitem melhor entendimento dos processos de compactação adicional e compactação prejudicial nos Latossolos oxídicos.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, S. L.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em argissolo franco-arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, n. 3, p. 519-531, maio/jun. 2004.

AJAYI, A. E.; DIAS JUNIOR, M. S.; CURI, N.; GONTIJO, I.; ARAUJO JUNIOR, C. F.; INDA JUNIOR, A. V. Relation of strength and mineralogical attributes in Brazilian Latosols. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 102, n. 1, p. 14-18, Jan. 2009.

BLASZKIEWICS, Z. A method for the determination of the contact area between a tyre and the ground. **Journal of Terramechanics**, Oxford, v. 27, n. 4, p. 263-282, 1990.

CANILLAS, E. C.; SALOKHE, V. M. A decision support system for compaction assessment in agricultural soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 65, n. 2, p. 221-230, May 2002.

CARDOSO, V. M. F. **Sustentabilidade estrutural de um solo na região do Alto Paranapanema/SP, submetido a dois sistemas de cultivo**. 2007. 121 p. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

CARNEIRO, M. A. C.; SOUZA, E. D.; REIS, E. F.; PEREIRA, H. S.; AZEVEDO, W. R. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 33, n. 1, p. 147-157, jan./fev. 2009.

CASTRO NETO, P. **Desenvolvimento e avaliação de equipamentos e metodologia para determinação de parâmetros físicos do solo relacionados a dias trabalháveis com máquinas agrícolas**. 2001. 155 p. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

CAVALIERI, K. M. V.; SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; LEÃO, T. P.; DEXTER, A. R.; HÅKANSSON, I. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a rhodic ferrasol in Paraná, Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 103, n. 1, p. 158-164, Apr. 2009.

DIAS JUNIOR, M. S. **Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic**. 1994. 114 p. Thesis (Ph.D. in Crop and Soil Science) - Michigan State University, East Lansing.

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. **Soil Technology**, Amsterdam, v. 8, n. 2, p. 139-151, Nov. 1995.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Manual de métodos de análises de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e Abastecimento, 1997. 212 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e Abastecimento, 2006. 306 p.

GENUCHTEN, M. T. van A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 44, n. 5, p. 892-898, Sept. 1980.

GONTIJO, I.; DIAS JUNIOR, M. S.; GUIMARÃES, P. T. G.; ARAUJO JUNIOR, C. F. Atributos físico-hídricos de um Latossolo de cerrado em diferentes posições de amostragem na lavoura cafeeira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 6, p. 2227-2234, nov./dez. 2008.

HORN, R.; DOMZAL, H.; SLOWIŃSKA-JURKIEWICZ, A.; OUWERKERK, C. van. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 35, n. 1/2, p. 23-36, Aug. 1995.

HORN, R. Stress-strain effects in structured unsaturated soils on coupled mechanical and hydraulic processes. **Geoderma**, Amsterdam, v. 116, n. 1/2, p.77-88, Sept. 2003.

IMHOFF, S.; SILVA, A. P.; DIAS JUNIOR, M. S.; TORMENA, C. A.
Quantificação de pressões críticas para o crescimento das plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 25, n. 1, p. 11-18, jan./mar. 2001.

IMHOFF, S.; SILVA, A. P.; FALLOW, D. Susceptibility to compaction, load support capacity, and soil compressibility of Hapludox. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 68, n. 1, p. 17-24, Jan. 2004.

IZIDORIO, R.; MARTINS FILHO, M. V.; MARQUES JUNIOR, J.; SOUZA, Z. M.; PEREIRA, G. T. Perdas de nutrientes por erosão e sua distribuição espacial em área sob cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 3, p. 660-670, set./dez. 2005.

JIMENEZ, R. L.; GONÇALVES, W. G.; ARAÚJO FILHO, J. V.; ASSIS, R. L.; PIRES, F. R.; SILVA, G. P. Crescimento de plantas de cobertura sob diferentes níveis de compactação em um Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 2, p. 116-121, mar./abr. 2008.

KONDO, M. K.; DIAS JUNIOR, M. S. Compressibilidade de três Latossolos em função da umidade e uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 23, n. 2, p. 211-218, abr./jun. 1999.

LAL, R. Tillage effects on soil degradation, soil resilience, soil quality, and sustainability. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 27, n. 1/4, p. 1-8, Oct. 1993.

OLIVEIRA, G. C.; DIAS JUNIOR, M. S.; RESCK, D. V. S.; CURI, N. Compressibilidade de um Latossolo Vermelho argiloso de acordo com a tensão de água no solo, uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 27, n. 5, p. 773-781, set./out. 2003.

SEVERIANO, E. C.; OLIVEIRA, G. C.; DIAS JÚNIOR, M. S.; COSTA, K. A. P.; CASTRO, M. B.; MAGALHÃES, E. N. Potencial de descompactação de um Argissolo promovido pelo capim-tifton 85. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 1, p. 39-45, jan. 2010.

SHARMA, A. K.; PANDEY, K. P. A review on contact area measurement of pneumatic tyre on rigid and deformable surfaces. **Journal of Terramechanics**, Oxford, v. 33, n. 5, p. 253-264, Sept. 1996.

SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; IMHOFF, S. Funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 1, p. 1-10, jan./fev.2008.

SILVA, R. B.; DIAS JUNIOR, M. S.; SILVA, F. A. M.; FOLE, S. M. O tráfego de máquinas agrícolas e as propriedades físicas, hídricas e mecânicas de um Latossolo dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 27, n. 6, p.973-983, nov./dez.2003.

SNEDECOR, G. W.; COCHRAN, W. G. **Statistical methods**. 8. ed. Ames: Iowa State University, 1989. 503 p.

SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; LIMA, C. L. R. Estimativa da susceptibilidade à compactação e do suporte de carga do solo com base em propriedades físicas de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 3, p. 963-973, maio/jul. 2008.

TAYLOR, D. W. **Fundamentals of soil mechanics**. New York: J. Wiley, 1948. 700 p.

YAVUZCAN, H. G.; MATTHIES, D.; AUERNHAMMER, H. Vulnerability of Bavarian silty loam soil to compaction under heavy wheel traffic: impacts of tillage method and soil water content. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 84, n. 2, p. 200-215, Dec. 2005.

CAPÍTULO 5

POTENCIAL DE USO E QUALIDADE ESTRUTURAL DE DOIS SOLOS CULTIVADOS COM CANA-DE-AÇÚCAR EM GOIANÉSIA (GO)

1 RESUMO

Com a expansão do setor sucroalcooleiro, tanto os solos com poucas limitações como aqueles que apresentam riscos permanentes ao cultivo intensivo tiveram sua vegetação nativa removida, e foram incorporados ao processo produtivo. Para isso, a adoção de sistemas de manejo que mantêm a estrutura do solo pode ser a chave para a manutenção da qualidade e sustentabilidade dos agrossistemas canavieiros. Assim, o objetivo deste estudo foi avaliar o potencial de uso para cana-de-açúcar e a qualidade estrutural de um Cambissolo Háplico Tb distrófico (CXbd) e um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd), no município de Goianésia, GO. Em cada área, realizou-se a classificação das terras quanto à capacidade de uso. Foram coletadas amostras deformadas nas profundidades correspondentes aos horizontes diagnósticos superficiais e subsuperficiais, para caracterização química e físico-hídrica dos solos. Nas profundidades de 0 a 0,05, 0,1 a 0,15 e 0,3 a 0,4 m, foram coletadas amostras indeformadas para determinação da porosidade do solo, da curva de retenção de água, do intervalo hídrico ótimo e da pressão de preconsolidação. O enquadramento dos solos no sistema de capacidade de uso da terra apontou o CXbd como pertencente à classe IVe, e o LVAd, à classe IIIs. Os resultados das análises dos atributos químicos e físico-hídricos do CXbd indicaram que o cultivo contínuo com cana-de-açúcar, mesmo com o enquadramento na classe IVe do sistema de capacidade de uso, deve-se à adoção de terraceamento agrícola, além do fato de essa cultura promover pequeno revolvimento do solo e aumentar-lhe a cobertura quando colhida crua. O CXbd apresentou maior disponibilidade de água para as plantas, o que tende a trazer benefícios à cultura. O LVAd, nas condições de estudo, é mais suscetível à compactação, necessitando da adequação do tráfego de máquinas.

2 ABSTRACT

With the expansion of the sugar/alcohol sector, the native vegetation was removed from soils with few limitations as well as with great risks for intensive cultivation and the areas incorporated in the production process. Therefore, the adoption of management systems that maintain the soil structure may be a key for the maintenance of the quality and sustainability of sugarcane production systems. The objective of this study was therefore to evaluate the use potential for sugarcane and structural quality of a Dystrophic Haplic Cambisol (CXbd) (Inceptisol) and Dystrophic Red-Yellow Latosol (LVAd) (Oxisol), in the county of Goianésia, Goiás State. The soils of each area were classified for their use capacity. Disturbed soil samples were collected at depths corresponding to the surface and subsurface diagnostic horizons, for chemical and physical-hydric characterization. Undisturbed samples were collected (from the layers 0–0.05, 0.1–0.15 and 0.3–0.4 m) to determine soil porosity, water retention curves, the least limiting water range and preconsolidation pressure. The evaluation of soils by the land use capacity system indicated that CXbd belongs to class IVe and LVAd to IIIs. Results of the analysis of the chemical and physical-hydric attributes of the CXbd indicated that a continuous sugar-cane cultivation, despite the classification as IVe in the use potential system, was due to the adoption of agricultural terraces, aside from the fact that the degrees of soil revolving was lower and of soil cover higher, when sugarcane was harvested green. The water availability for plants was highest for CXbd, which tends to be advantageous for crops. In the study conditions, the LVAd was most susceptible to compaction, which requires limitations of machinery traffic.

3 INTRODUÇÃO

A necessidade mundial por fontes alternativas de energia coloca o Brasil em posição de destaque em relação à produção de etanol, em razão das condições edafoclimáticas favoráveis ao cultivo da cana-de-açúcar, o que tem levado à expansão geográfica dessa cultura e a impactos ambientais decorrentes do manejo. Se por um lado a queima da cana-de-açúcar traz grandes prejuízos em termos de qualidade do solo (Centurion et al., 2007) e do ar (Campos, 2003), em contrapartida, quando colhida crua, apesar de a ausência da queima promover o acúmulo do material orgânico na superfície do terreno, e melhorar a qualidade física e química do solo (Canellas et al., 2003; Souza et al., 2005), o uso de maquinário em condições inadequadas de umidade pode resultar em uma série de alterações das propriedades físicas do solo (Severiano et al., 2008).

Com a grande demanda por novas áreas para a implantação dessa cultura, solos enquadrados como de menor potencial para o cultivo intensivo, como é o caso da maioria dos Cambissolos, estão sendo incorporados ao processo produtivo. Segundo o sistema de classificação da capacidade de uso utilizado no Brasil (Lepsch, 1991), solos pertencentes a essa classe podem apresentar atributos restritivos ao cultivo intensivo relacionados à menor profundidade efetiva, a teores relativamente elevados de silte em relação aos de argila (relação silte/argila igual ou superior a 0,6 ou 0,7 quando textura argilosa ou média, conforme a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, EMBRAPA, 2006), e à sua posição na paisagem, geralmente em relevos mais movimentados.

Os Cambissolos constituem um grupo bastante heterogêneo em termos de ambiente (Resende et al., 2007). Na região central do Estado de Goiás, onde a canavicultura tem grande importância no setor agrícola, a ocorrência desses solos na paisagem regional é representativa (EMBRAPA, 1981). Em alguns

casos, eles deveriam ser destinados à preservação permanente, tendo em vista a sua vulnerabilidade ao processo erosivo. No entanto, muitas áreas de ocorrência desses solos em várias regiões do Brasil já tiveram sua vegetação nativa removida e vêm sendo cultivadas com cana-de-açúcar de forma intensiva há mais de 50 anos (Berner et al., 2007).

Por outro lado, no Cerrado brasileiro, os Latossolos representam o grupamento de solos de maior abrangência, ocupando cerca de 50 % da área (Macedo, 1996). O alto grau de intemperismo confere elevada estabilidade da estrutura, o que, aliado à topografia suavizada onde estão inseridos, favorece sobremaneira o seu manejo. Corrigidos quimicamente, esses solos passaram a contribuir significativamente para a produção agropecuária do País. Entretanto, considerando que o aumento do tráfego de máquinas em condições inadequadas de umidade resulta na degradação da estrutura, torna-se necessário o conhecimento do seu potencial de uso, com o auxílio de indicadores de qualidade do solo que possibilitem a predição das alterações no ambiente de crescimento das plantas decorrentes do manejo a que estão sendo submetidas.

Nesse contexto, sistemas de manejo que aliam colheita de cana-crua e rotação de culturas na renovação do canavial contribuem para a manutenção da estrutura do solo e podem ser considerados medidas-chave na manutenção da sustentabilidade dos agrossistemas canavieiros.

A qualidade física pode ser indicada a partir de seus atributos relacionados com a magnitude com que a matriz do solo resiste à deformação e, ainda, com a sua capacidade em fornecer ar e água em proporções adequadas ao pleno crescimento e desenvolvimento das plantas (Singer & Ewing, 2000). Embora diversos atributos possam ser utilizados como indicadores de qualidade estrutural, há consenso de que esses devem influenciar diretamente a produção das culturas, assim como aqueles que a influenciam indiretamente, a exemplo do

intervalo hídrico ótimo (Silva et al., 1994) e das propriedades envolvidas nos estudos da capacidade de suporte de carga do solo (Dias Junior, 1994).

O presente trabalho objetivou avaliar a qualidade estrutural e o potencial de uso para cana-de-açúcar de um Cambissolo Háptico Tb distrófico e um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, no município de Goianésia, GO.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido nas áreas pertencentes à empresa Jalles Machado S.A., no município de Goianésia, microrregião de Ceres, localizada no centro do Estado de Goiás, a 15 ° 10 ' S de latitude e 49 ° 15 ' W de longitude, com 640 m de altitude. De acordo com Köppen, O clima local é classificado como tropical de savana, quente e úmido, com inverno seco e verão chuvoso (Aw) e média pluvial anual de 1.500 mm.

Na realização deste estudo, foi selecionada uma área localizada em relevo ondulado (12 % de declividade média), recoberta por um Cambissolo Háptico Tb distrófico textura média (CXbd), e outra área localizada em relevo plano (3 % de declividade média), recoberta por um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico textura argilosa (LVAd); ambos os solos foram classificados conforme EMBRAPA (2006), e cultivados com cana-de-açúcar sob condições de cana-planta, isto é, antes do primeiro corte do canavial, em sistema convencional de preparo do solo, com uma aração a 0,25 m de profundidade e duas gradagens superficiais. Em cada área, realizou-se a descrição morfológica dos perfis, segundo Santos et al. (2005), e os dados para classificação da capacidade de uso das terras foram obtidos de forma paramétrica, seguindo o método de Lepsch (1991).

A amostragem foi realizada coletando-se, em cada área, 12 amostras deformadas nas profundidades de 0 a 0,2 e 0,4 a 0,6 m (CXbd) e 0 a 0,2 e 0,6 a

0,8 m (LVAd), correspondentes aos horizontes diagnósticos superficiais (Ap) e subsuperficiais (respectivamente, Bi e Bw). Foram coletadas ainda 24 amostras indeformadas, nas profundidades de 0 a 0,5, 0,1 a 0,15 e 0,30 a 0,40 m, sendo esta última localizada abaixo da camada arada do solo. Os pontos de amostragem foram localizados nas entrelinhas da cultura, totalizando 72 amostras.

As amostras deformadas foram utilizadas na determinação da granulometria, por meio do método da pipeta, da densidade de partículas, pelo método do picnômetro, e na caracterização dos óxidos pelo ataque sulfúrico (Tabela 1), do complexo sortivo e da matéria orgânica do solo – todas as determinações conforme método proposto por EMBRAPA (1997).

TABELA 1 Caracterização química e física de dois solos cultivados com cana-de-açúcar no município de Goianésia, GO.

Horiz. ⁽¹⁾	Prof. - m -	Dp ⁽²⁾ kg dm ⁻³	Granulometria ⁽³⁾			Ataque sulfúrico			Ki ⁴	Kr ⁴
			Arg	Sil	Are	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃		
Cambissolo Háplico Tb Distrófico (CXbd)										
Ap	0-0,2	2,67	266	206	528	-	-	-	-	-
Bi	0,4-0,6	2,68	323	209	468	117	152	68	1,32	1,03
Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico (LVAd)										
Ap	0-0,2	2,64	301	105	594	-	-	-	-	-
Bw	0,6-0,8	2,70	352	132	516	128	170	50	1,27	1,08

⁽¹⁾: Ap: Horizonte A com perturbação de origem antrópica; Bi: horizonte B incipiente; Bw: horizonte B latossólico. ⁽²⁾: Dp: Densidade de partículas; ⁽³⁾: Arg: argila; Sil: silte; Are: areia; ⁽⁴⁾: Ki: relação molecular SiO₂:Al₂O₃; Kr: relação molecular SiO₂: (Al₂O₃ + Fe₂O₃).

As amostras indeformadas foram utilizadas na caracterização físico-hídrica dos solos. Na determinação das curvas de retenção de água no solo, 12 amostras foram inicialmente saturadas e submetidas às tensões matriciais de 0, 2, 4, 6, 10, 33, 60, 80, 100, 500 e 1.500 kPa (EMBRAPA, 1997). As demais amostras indeformadas foram equilibradas, por meio de secagem natural, a conteúdos de água variando entre 0,14 e 0,38 m³ m⁻³, e submetidas inicialmente

ao teste de resistência à penetração, conforme Tormena et al. (1998), utilizando-se de um penetrômetro digital de bancada MARCONI, modelo MA 933, com velocidade constante de 100 mm min⁻¹. Posteriormente, as amostras foram submetidas ao ensaio de compressão uniaxial (Dias Junior, 1994), usando um consolidômetro de marca Boart Longyear, cuja aplicação das pressões é feita por ar comprimido. As pressões aplicadas a cada amostra obedeceram à seguinte ordem: 25, 50, 120, 200, 400, 800 e 1.600 kPa, sendo cada pressão aplicada até obtenção de 90 % da deformação máxima.

Após a realização dos ensaios, as amostras foram secas em estufa, a 105°C, por 48 h, para determinação da densidade do solo (Ds). A porosidade total (PT) foi determinada pela expressão: $PT = 1 - (Ds/Dp)$, sendo Ds a densidade do solo e Dp a densidade de partículas. A macroporosidade do solo foi obtida pela diferença entre PT e microporosidade, sendo esta considerada o conteúdo de água retido à tensão matricial de 6 kPa (EMBRAPA, 1997).

Para obtenção das curvas de retenção de água, os conteúdos de água (θ) foram ajustados de acordo com a tensão da água no solo (ψ_m). A capacidade de campo (θ_{CC}) foi considerada o conteúdo de água no ponto de inflexão da curva (Ferreira & Marcos, 1983), determinada pela segunda derivada da equação ajustada, construída com base em polinômios cúbicos e trabalhando-se com o logaritmo da tensão (pF) em função do conteúdo de água no solo, conforme Mello et al. (2002).

A seguir, aplicou-se o teste de Scott-Knott a 5 % entre as umidades geradas pela inflexão e as correspondentes a 6 kPa; essas últimas foram obtidas ajustando-se o mesmo polinômio cúbico, porém fazendo-se $\theta = f(\psi_m = 6 \text{ kPa})$. A água disponível (AD) foi calculada pela seguinte expressão: $AD = \theta_i - \theta_{1500}$, sendo AD a água disponível (dm³ dm⁻³); θ_i , o conteúdo de água equivalente à tensão matricial do ponto de inflexão; e θ_{1500} , o conteúdo de água equivalente à tensão matricial de 1.500 kPa.

Os valores de resistência à penetração (RP), obtidos em kgf cm^{-2} , foram multiplicados pelo fator 0,098, para transformação em MPa. A pressão de preconsolidação (σ_p) foi obtida segundo Dias Junior & Pierce (1995), e os modelos de capacidade de suporte de carga dos solos foram obtidos ajustando-se a σ_p em função de θ , conforme Dias Junior (1994). As comparações das regressões foram feitas segundo Snedecor & Cochran (1989).

O Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) foi obtido segundo Silva et al. (2002), determinando-se: a porosidade de aeração adequada ao desenvolvimento da cultura (θ_{PA}), obtida pela fórmula: $\theta_{PA} = (VTP - 0,1)$, e os conteúdos de água no solo na capacidade de campo (θ_{CC}), no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), considerado como o conteúdo de água retido à tensão de 1.500 kPa, e correspondente à resistência à penetração de 2,5 MPa (θ_{RP}).

Os resultados das análises dos atributos físico-hídricos do solo foram submetidos à análise de variância, segundo o delineamento inteiramente casualizado. As comparações das médias foram realizadas pelo teste de Scott-Knott a 5 %.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O enquadramento dos solos no Sistema de Capacidade de Uso da Terra (Lepsch, 1991) apontou o CXbd como pertencente à classe IVe, o que se deu em razão da declividade do terreno e da presença de erosão laminar severa, enquanto o LVAd foi enquadrado na classe IIIs, por apresentar como principal fator limitante o caráter álico (Tabela 2).

TABELA 2 Estrutura do solo, fatores limitantes ao manejo e classificação das terras no sistema de capacidade de uso para dois solos cultivados com cana-de-açúcar no município de Goianésia, GO.

Solo	Estrutura ⁽¹⁾				Fatores Limitantes ⁽²⁾					Classe de capacidade de uso
	Tipo	Classe	Grau	Prof. efetiva	Textura	Permeab.	Declivid.	Erosão	Específicos	
CXbd	Blocos subangulares	Média	Moderado	0,6 m	Franco argilo-arenosa	Rápida/Moderada	12 %	Laminar severa	Distrofismo	IVe
LVAd	Granular	Muito pequena	Forte	> 2,0 m	Argilosa	Rápida/Rápida	3 %	Laminar ligeira	Álico	IIIs

⁽¹⁾: Segundo critérios propostos por Santos et al. (2005); ⁽²⁾: Segundo Lepsch (1991).

Segundo recomendações desse sistema, solos enquadrados na classe IV são mais indicados para pastagens, mas podem ser suficientemente aptos para certos cultivos ocasionais, seguindo a proporção de um ano de cultivo para cada quatro a seis de pastagens (Lepsch, 1991). Solos enquadrados na subclasse IVE apresentam severas limitações por erosão, geralmente relacionadas com declividades acentuadas. Em contrapartida, devido ao fato de a cana-de-açúcar suportar cortes sucessivos, promovendo assim um pequeno revolvimento do solo, sendo este realizado apenas na renovação do canavial, e aliando-se a isso o incremento da cobertura do solo quando esta é colhida crua, sugere-se que o CXbd possa apresentar elevado potencial para o cultivo intensivo com a cultura da cana-de-açúcar, dependendo dos seus atributos.

Tendo-se em mente a possibilidade de redução das limitações químicas dos solos (Tabela 2) em decorrência de adubações e calagens, os solos apresentam, nas condições atuais, valores de saturação por bases superiores a 50% na camada cultivada (horizonte Ap) (Tabela 3), o que é considerado por Sousa & Lobato (2004) como adequado ao crescimento e desenvolvimento da cultura. Segundo esses autores, observa-se que o teor de P pode ser considerado baixo nos dois solos ($< 10 \text{ mg dm}^{-3}$), tornando necessária a adubação da cana-soca com esse nutriente. O teor de K encontra-se adequado no LVAd, e alto no CXbd.

TABELA 3 Complexo sortivo e teores de matéria orgânica (MO) para dois solos cultivados com cana-de-açúcar no município de Goianésia, GO.

Horiz. ⁽¹⁾	Prof. m	T ⁽²⁾	Ca ⁺² cmolc dm ⁻³	Mg ⁺² cmolc dm ⁻³	H+Al	P mg dm ⁻³	K mg dm ⁻³	V ⁽³⁾ %	m ⁽⁴⁾	MO g dm ⁻³	pH H ₂ O
Cambissolo Háptico Distrófico (CXbd)											
Ap	0-0,2	6,1	2,0	0,9	3,0	6,0	80,2	51	3	14	5,8
Bi	0,4-0,6	5,0	1,1	0,7	3,1	0,7	46,9	37	7	1	5,5
Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico (LVAd)											
Ap	0-0,2	7,7	2,6	1,2	3,7	6,1	61,6	52	4	6	5,7
Bw	0,6-0,8	5,2	0,5	0,3	4,5	0,6	17,6	15	59	1	4,8

⁽¹⁾: Ap: Horizonte A com pedoturbação de origem antrópica; Bi: horizonte B incipiente; Bw: horizonte B latossólico; ⁽²⁾: T: Capacidade de troca catiônica (pH 7,0); ⁽³⁾: Saturação por bases; ⁽⁴⁾: Saturação por alumínio. Os valores representam média de 12 repetições.

Com relação aos atributos físicos, observam-se pequenas diferenças entre os solos (Tabela 4), o que se deve à semelhança textural entre eles (Tabela 1), uma vez que o fator que impede que o Cambissolo seja classificado como Latossolo é o horizonte B incipiente, cuja espessura é inferior a 0,5 m – mínimo exigido para B latossólico (EMBRAPA, 2006). Trata-se, portanto, de um Cambissolo resultante da remoção acentuada de material por erosão do antigo Latossolo, que já teve muito maior expressão geográfica na região (Resende et al., 1988).

Por outro lado, a macroporosidade no CXbd assumiu valores abaixo daquele considerado limitante ao desenvolvimento da cana-de-açúcar (0,10 m³ m⁻³) segundo Centurion et al. (2007) na profundidade de 0,3 a 0,4 m. Salienta-se que a ausência de revolvimento do solo nessa profundidade preservou os atributos físicos naturais desse solo. Em estudo com Cambissolos da região de Campos da Mantiqueira, em MG, Oliveira et al. (1994) salientaram que em condições naturais a baixa macroporosidade desses solos foi o fator responsável pela baixa infiltração de água e pela elevada suscetibilidade deles ao processo

erosivo. A redução da macroporosidade do Cambissolo na profundidade de 0,3 a 0,4 m deve-se ao incremento no teor de argila (Tabela 1), uma vez que a porosidade total não diferenciou entre as profundidades avaliadas. Esse incremento das frações finas na composição granulométrica eleva o potencial matricial e a retenção de água, resultando no aumento da microporosidade.

TABELA 4 Atributos físicos em três profundidades do Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico (LVAd) e do Cambissolo Háplico Tb Distrófico (CXbd), cultivados com cana-de-açúcar, no município de Goianésia, GO¹.

Solo	Ds	Total	Porosidade	
	----Mg m ⁻³ ----		-----m ³ m ⁻³ -----	Macro
Profundidade de 0 a 0,05 m				
CXbd	1,23 Ab	0,53 Aa	0,15 Ba	0,38 Ab
LVAd	1,28 Ab	0,52 Aa	0,21 Aa	0,31 Ba
Profundidade de 0,1 a 0,15 m				
CXbd	1,26 Bb	0,53 Aa	0,19 Aa	0,36 Ab
LVAd	1,48 Aa	0,44 Bb	0,13 Bc	0,31 Ba
Profundidade de 0,3 0,4 m				
CXbd	1,35 Aa	0,49 Aa	0,07 Bb	0,42 Aa
LVAd	1,36 Ab	0,50 Aa	0,18 Ab	0,32 Ba

⁽¹⁾ Para cada profundidade, médias seguidas das mesmas letras maiúsculas nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade; Para cada solo, independente da profundidade, médias seguidas das mesmas letras minúsculas não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade; Ds: Densidade do solo. Valores representam média de 12 repetições.

A macroporosidade relativamente mais elevada dos solos nas camadas superficiais é resultante da desagregação provocada pelas operações de preparo do solo (Tabela 4). Salienta-se que o tráfego de máquinas para o transporte das mudas durante a implantação do canal pode ter promovido compactação subsuperficial no LVAd, sendo visualizada pelo incremento na Ds e redução da porosidade à profundidade de 0,1 a 0,15 m, demonstrando a transmissão de

carga nas profundidades subsuperficiais nesse solo. Esses resultados indicam essa profundidade como a de maior suscetibilidade à compactação nesse Latossolo, corroborando estudo de Suzuki et al. (2008), enquanto no CXbd não foi observada essa diferença.

Observa-se, pela análise das curvas características de água no solo, maior retenção de água no CXbd em todas as profundidades para a faixa considerada de água disponível (Figura 1), o que, segundo Jaccoud & Castro (1976), deve-se ao maior ajuste entre e dentro dos agregados, promovido pela sua estrutura pedológica do tipo blocos, em comparação à estrutura granular do LVAd (Tabela 2), levando ao aumento das tensões de água no solo no primeiro caso.

Esse fato, confirmado por observações de campo, promove melhores condições para o crescimento e desenvolvimento da cultura durante períodos de veranico e, ainda, promove maior disponibilidade hídrica no início da estação seca, fazendo com que a cultura nessas condições sofra com o déficit hídrico muito depois, em comparação com as áreas de Latossolos. Tal característica do Cambissolo em estudo, detectada pelos agricultores ainda que de forma empírica, impulsionou as explorações canavieiras nos Cambissolos da região, onde o recobrimento da paisagem com esses solos é representativo, conforme apontado no levantamento de solos realizado pela EMBRAPA (1981).

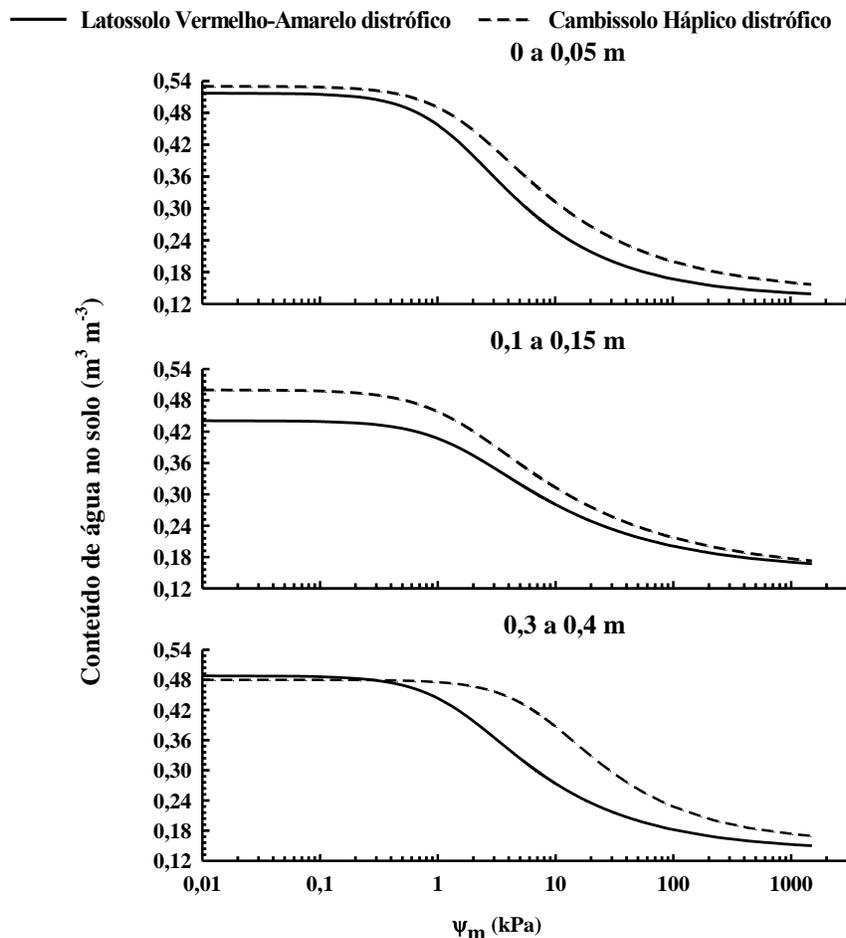


FIGURA 1 Curva característica de água [conteúdo de água no solo (θ) em função do potencial matricial (ψ_m)] no Cambissolo Háplico Tb Distrófico (CXbd) e no Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico (LVAd) nas profundidades de 0 a 0,05, 0,1 a 0,15 e 0,3 a 0,4 m, cultivados com cana-de-açúcar, no município de Goianésia, GO.

A determinação do ponto de inflexão da curva característica de água no solo mostra que, para o LVAd, a tensão de água no solo (ψ_{mi}) se situa próximo a 6 kPa em todas as profundidades (Tabela 5). Observa-se ainda que os conteúdos

de água no solo não diferiram entre o valor no ponto de inflexão (θ_i) e a 6 kPa ($\theta_{6\text{kPa}}$), corroborando os resultados encontrados por Mello et al. (2002), que consideram essa tensão para a determinação do conteúdo de água na capacidade de campo dos Latossolos.

TABELA 5 Tensão de água no solo correspondente ao ponto de inflexão da curva característica de água no solo (ψ_{mi}), conteúdo de água no solo nesse ponto (θ_i) e à tensão de 6 kPa ($\theta_{6\text{kPa}}$), em três profundidades do Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico (LVAd) e do Cambissolo Háplico Tb Distrófico (CXbd) do município de Goianésia, GO¹.

Solo	ψ_{mi} -----kPa-----	θ_i -----m ³ m ⁻³ -----	$\theta_{6\text{kPa}}$
Profundidade de 0 a 0,05 m			
LVAd	4,3	0,33a	0,31a
CXbd	6,9	0,37a	0,38a
Profundidade de 0,1 a 0,15 m			
LVAd	6,4	0,31a	0,31a
CXbd	8,4	0,34a	0,36a
Profundidade de 0,3 a 0,40 m			
LVAd	5,1	0,33a	0,32a
CXbd	20,4	0,33b	0,42a

⁽¹⁾ Para cada solo e profundidade, médias seguidas das mesmas letras minúsculas nas linhas não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. Valores representam média de 12 repetições.

O CXbd, por sua vez, apresentou maiores valores de tensão no ponto de inflexão em relação ao LVAd, ocorrendo incremento à medida que aumenta a profundidade do solo, com maiores diferenças entre os conteúdos avaliados na profundidade de 0,3–0,4 m. Esse comportamento deve-se a fatores relacionados com a estrutura do solo, já discutidos, o que tende a promover incremento no potencial matricial desse solo.

Segundo Silva et al. (2002), o manejo do solo promove alterações em vários atributos físicos, os quais interagem entre si, com consequente alteração no ambiente de crescimento das plantas. Considerando que, além dos conteúdos de água no solo na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente, a disponibilidade hídrica do solo para as plantas é influenciada pela disponibilidade de O_2 e pela resistência mecânica ao sistema radicular, também foi determinado o intervalo hídrico ótimo (IHO) (Figura 2).

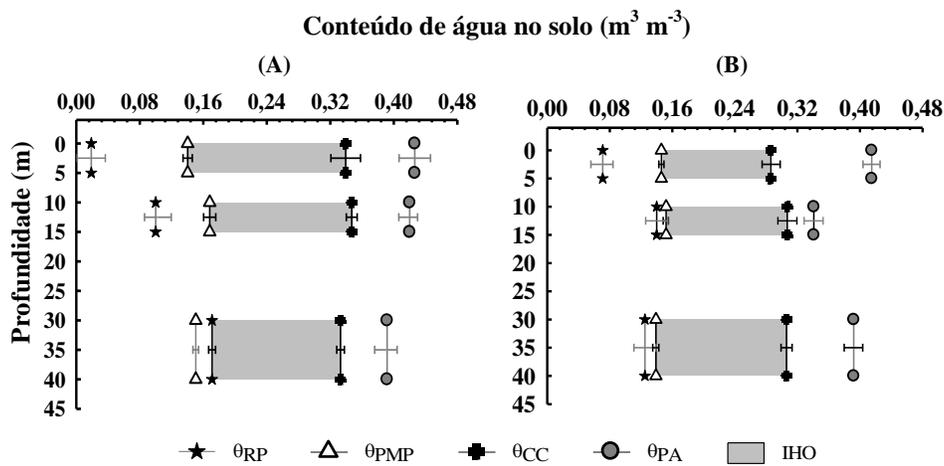


FIGURA 2 Variação do conteúdo de água no solo (θ , $m^3 m^{-3}$) para os limites críticos de ponto de resistência do solo à penetração (θ_{RP}), ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), capacidade de campo (θ_{CC}) e porosidade de aeração (θ_{PA}), nas profundidades de 0 a 0,05, 0,1 a 0,15 e 0,3 a 0,4 m do Cambissolo Háplico Tb Distrófico (CXbd) (A) e do Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico (LVAd) (B). IHO: intervalo hídrico ótimo.

Nas profundidades de 0 a 0,05 e 0,1 a 0,15 m do CXbd e em todas as profundidades avaliadas no LVAd, os limites superior e inferior de água

disponível no solo foram de θ_{CC} e θ_{PMP} , respectivamente, o que reflete a boa qualidade física desses solos nessas profundidades após o revolvimento (Silva et al., 2002). Na profundidade de 0,3–0,4 m do CXbd, o intervalo de água disponível é alterado, já que a resistência à penetração assume valor limitante (θ_{RP}) estando o solo sob baixo conteúdo de água, o que pode ser sintoma de adensamento (Figura 2a). Nessas condições, seriam esperadas restrições em termos de aeração do solo (θ_{PA}), o que não ocorreu em razão de a sua textura média favorecer maior aeração, uma vez que, no caso, parte da microporosidade do solo (microporos com diâmetro entre 15 e 50 μm) é ocupada com ar, quando o solo se encontrar em sua capacidade de campo.

Em termos de disponibilidade hídrica para a cultura, observa-se pelo comportamento do intervalo hídrico ótimo (Figura 2) uma superioridade do CXbd nas profundidades de 0 a 0,05 e 0,1 a 0,15 m. Quanto à profundidade de 0,3 a 0,4 m, os solos têm comportamento semelhante. Portanto, a caracterização físico-hídrica do solo realizada por meio do IHO subsidia observações de campo realizadas por técnicos do setor sucroalcooleiro da região, de que os efeitos da sazonalidade climática na cultura da cana-de-açúcar são amenizados em áreas de Cambissolo.

Entre os fatores de produção relacionados com a modernização da agricultura, destaca-se o crescimento da demanda pela mecanização, fazendo-se necessário o conhecimento da capacidade de suporte de carga do solo para minimizar os efeitos do tráfego de máquinas, que levam à sua compactação (Raper, 2005). Os procedimentos estatísticos de Snedecor & Cochran (1989) não apontaram diferenças de comportamento compressivo nas profundidades de 0 a 0,05 e 0,1 a 0,15 m do CXbd (Figura 3). Esse comportamento pode ser explicado pela uniformidade dos atributos físicos do solo nessas profundidades (Tabela 4) e pela sua influência na pressão de preconsolidação (Oliveira et al., 2003).

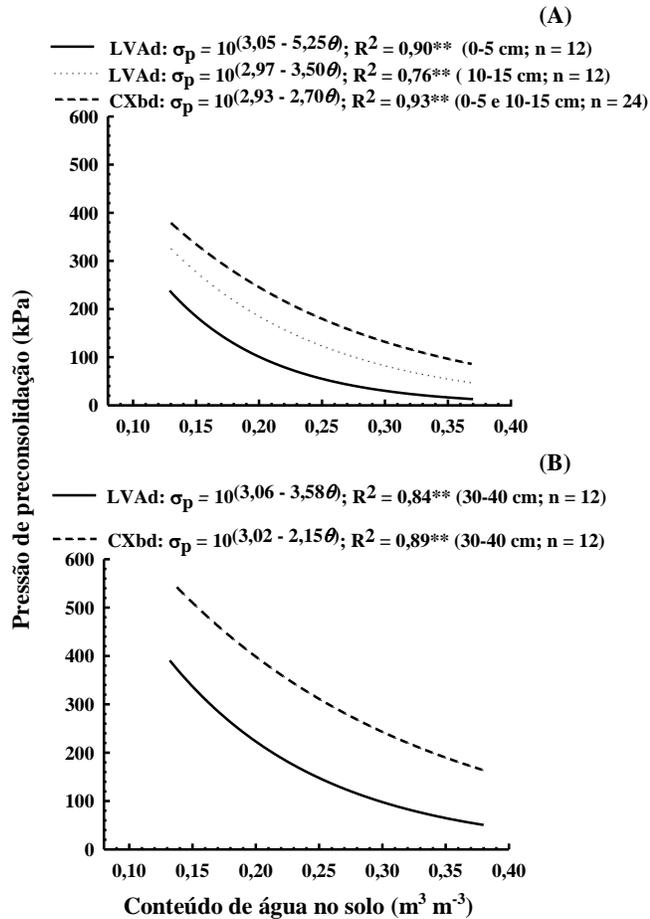


FIGURA 3 Modelos de capacidade de suporte de carga [variação de pressão de preconsolidação (σ_p) em função do conteúdo de água no solo] do Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico (LVAd) e do Cambissolo Háplico Tb Distrófico (CXbd), nas profundidade de 0 a 0,05, 0,1 a 0,15 e 0,3 a 0,4 m, no município de Goianésia, GO.

Por outro lado, mesmo apresentando maior capacidade de suporte de carga na profundidade de 0,1 a 0,15 m, em relação à camada superficial, o que se deve ao incremento na D_s (Tabela 4), observa-se maior suscetibilidade à

compactação do LVAd em todos os conteúdos de água no solo e profundidades avaliadas, o que é influenciado pela sua estrutura granular, enquanto no CXbd a estrutura em blocos (Tabela 2) confere a esse solo maior resistência à compactação (Severiano et al., 2008).

Considerando-se que as máquinas utilizadas na colheita da cana-de-açúcar aplicam elevadas pressões sobre o solo, verifica-se a possibilidade da ocorrência de compactação do LVAd mesmo sob baixos conteúdos de água do solo, impondo maior cautela na tomada de decisão do momento mais adequado para a realização de operações mecanizadas, uma vez que a capacidade de suporte de carga do solo pode ser excedida (Kondo & Dias Junior, 1999).

Para a profundidade de 0,3 a 0,4 m, onde não houve ação dos implementos de preparo do solo, os valores de σ_p foram superiores àqueles encontrados nas camadas mais superficiais. Entretanto, por ocasião da colheita mecanizada da cana-de-açúcar, quando são utilizados equipamentos que aplicam altas pressões ao solo, mesmo nessa profundidade existe a possibilidade de ocorrer compactação adicional, caso esta seja realizada sob conteúdos mais elevados de água no solo (Alakukku et al., 2003; Raper, 2005).

O conhecimento da capacidade de suporte de carga do solo pode auxiliar no planejamento das atividades durante a safra canavieira, de modo que possibilite as operações mecanizadas em épocas em que os efeitos dessas operações sejam minimizados. Enquanto o CXbd teria esses efeitos minimizados, quando submetido às operações mecanizadas sob conteúdos mais elevados de água no solo, o LVAd poderia sofrer alterações estruturais mesmo quando mecanizado sob conteúdos mais baixos de água no solo. Esses resultados indicam a possibilidade de cultivo do CXbd com variedades de cana-de-açúcar que alcancem a maturação em épocas de safra, quando o solo se encontra em condições de conteúdos mais elevados de água no solo, como é o caso da colheita no final do período chuvoso (março/abril). Por sua vez, o LVAd

deveria ser cultivado com variedades cujo ponto de maturação coincida com a estação seca.

Em adição, verifica-se que, embora o CXbd apresente limitações para o uso intensivo com a cana-de-açúcar, de acordo com o sistema de capacidade de uso utilizado no Brasil (Tabela 2), ele apresenta bom potencial de exploração em termos de disponibilidade hídrica e capacidade de suporte de carga. Salieta-se que esse sistema de classificação de terras apresenta maior potencialidade de utilização sob o enfoque conservacionista (Resende et al., 2007), o que é compreensível, haja vista a geralmente maior declividade e menor profundidade efetiva, resultando em menor tolerância de perdas de solo, no caso do Cambissolo, por erosão hídrica. Por esses motivos, o uso e o manejo desses solos necessitam de cuidados especiais, com adoção de práticas intensivas de controle do processo erosivo, como a manutenção de resíduos na superfície (Lal, 2000), obtido pela adoção do sistema de cana-crua (Souza et al., 2005), além da realização de terraceamento agrícola (Bertoni & Lombardi Neto, 1999).

6 CONCLUSÕES

1. O cultivo contínuo com cana-de-açúcar no Cambissolo Háplico, mesmo com o enquadramento desse solo na classe IVe do sistema de capacidade de uso das terras utilizado no Brasil, deve-se ao fato de essa cultura promover pequeno revolvimento do solo e aumentar a sua cobertura quando colhida crua.

2. O Latossolo Vermelho-Amarelo nas condições de estudo, em razão de sua estrutura granular, mostrou-se mais suscetível à compactação, necessitando de adequação no tráfego de máquinas.

3. O Cambissolo Háplico, devido à sua estrutura em blocos, apresentou maior disponibilidade de água para as plantas em comparação com o Latossolo Vermelho-Amarelo, o que tende a trazer maiores benefícios à cultura.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALAKUKKU, L.; WEISSKOPF, P.; CHAMEN, W. C. T.; TIJINK, F. G. J.; LINDEN, J. P. van der; PIRES, S.; SOMMER, C.; SPOOR, G. Prevention strategies for field traffic induced subsoil compaction: a review: part I – machine/soil interactions. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, n. 1/2, p. 145-160, Oct. 2003.

BERNER, P. G. M.; VIEIRA, S. R.; LIMA, E.; ANJOS, L. H. C. Variabilidade espacial de propriedades físicas e químicas de um Cambissolo sob dois sistemas de manejo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, n. 5, p. 837-844, set./out. 2007.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 4. ed. São Paulo: Ícone, 1999. 355 p.

CAMPOS, D. C. **Potencialidade do sistema de colheita sem queima da cana-de-açúcar para o sequestro de carbono**. 2003. 103 p. Tese (Doutorado em Microbiologia Agrícola) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.

CANELLAS, L. P.; VELLOSO, A. C. X.; MARCIANO, C. R.; RAMALHO, J. F.G. P.; RUMJANEK, V. M.; REZENDE, C. E.; SANTOS, G. A. Propriedades químicas de um Cambissolo cultivado com cana-de-açúcar, com preservação do palhicho e adição de vinhaça por longo tempo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 27, n. 5, p. 935-944, set./out. 2003.

CENTURION, J. F.; FREDDI, O. S.; ARATANI, R. G.; METZNER, A. F. M.; BEUTLER, A. N.; ANDRIOLI, I. Influência do cultivo da cana-de-açúcar e da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos Vermelhos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, n. 2, p. 199-209, mar./abr. 2007.

DIAS JUNIOR, M. S. **Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic**. 1994. 114 p. Thesis (Ph.D. in Crop and Soil Science) - Michigan State University, East Lansing.

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. **Soil Technology**, Amsterdam, v. 8, n. 2, p. 139-151, Nov. 1995.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Manual de métodos de análises de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e Abastecimento, 1997. 212 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e Abastecimento, 2006. 306 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Mapa de solos do Brasil**. Rio de Janeiro, 1981.

FERREIRA, M. M.; MARCOS, Z. Z. Estimativa da capacidade de campo de Latossolo Roxo distrófico e Regossolo através do ponto de inflexão da curva característica de umidade. **Ciência e Prática**, Lavras, v. 7, n. 1, p. 96-101, jan. 1983.

JACCOUD, A.; CASTRO, A. F. Curvas de caracterização de umidade de solos da área da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, município de Itaguaí. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 11, n. 1, p. 1-9, jan. 1976.

KONDO, M. K.; DIAS JUNIOR, M. S. Compressibilidade de três Latossolos em função da umidade e uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 23, n. 2, p. 211-218, abr./jun. 1999.

LAL, R. Soil management in the developing countries. **Soil Science**, Baltimore, v. 165, n. 1, p. 57-72, Jan. 2000.

LEPSCH, I. F. (Coord.). **Manual para levantamento utilitário de meio físico e classificação de terras no sistema de capacidade de uso: 4ª aproximação**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1991. 175 p.

MACEDO, J. Os solos da região dos cerrados. In: ALVARES, V. H.; FONTES, L. E. F.; FONTES, M. P. F. (Ed.). **O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado**. Viçosa, MG: SBCS/UFV, 1996. p. 135-155.

MELLO, C. R.; OLIVEIRA G. C.; RESCK, D. V. S.; LIMA J. M.; DIAS JUNIOR, M. S. Estimativa da capacidade de campo baseada no ponto de inflexão da curva característica. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 26, n. 4, p. 836-841, jul./ago. 2002.

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

OLIVEIRA, G. C.; FERREIRA, M. M.; CURTI, N. Caracterização físico-hídrica de Cambissolos da microrregião Campos da Mantiqueira (MG). **Ciência e Prática**, Lavras, v. 18, n. 4, p. 341-348, out./dez. 1994.

RAPER, R. L. Agricultural traffic impacts on soil. **Journal of Terramechanics**, Oxford, v. 42, n. 3/4, p. 259-280, July/Oct. 2005.

RESENDE, M.; CURTI, N.; REZENDE, S. B.; CORRÊA, G. F. **Pedologia**: base para distinção de ambientes. 5. ed. Lavras: UFLA, 2007. 322 p.

RESENDE, M.; CURTI, N.; SANTANA, D. P. **Pedologia e fertilidade do solo**: interações e aplicações. Brasília: MEC/ESAL/POTAFOS, 1988. 84 p.

SANTOS, R. D.; LEMOS, R. C.; SANTOS, U. G.; KER, J. C. ; ANJOS, L. H. C. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 5. ed. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. 92 p.

SEVERIANO, E. C.; OLIVEIRA, G. C.; DIAS JUNIOR, M. S.; OLIVEIRA, L. F. C.; CASTRO, M. B. Pressão de preconsolidação e intervalo hídrico ótimo como indicadores de alterações estruturais do solo em decorrência das operações de colheita da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 4, p. 1419-1427, jul./ago. 2008.

SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 58, n. 6, p. 1775-1781, Nov./Dec. 1994.

SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; IMHOFF, S. Intervalo hídrico ótimo. In: MORAES, M. H.; MÜLLER, M. M. L.; FOLONI, J. S. S. **Qualidade física do solo: métodos de estudo – sistemas de preparo e manejo do solo**. Jaboticabal: FUNEP, 2002. cap. 1, p. 1-20.

SINGER, M.; EWING, S. Soil quality. In: SUMMER, M. E. (Ed.). **Handbook of soil science**. Boca Raton: CRC, 2000. p. 271-298.

SNEDECOR, G. W.; COCHRAN, W. G. **Statistical methods**. 8. ed. Ames: Iowa State University, 1989. 503 p.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Brasília: EMBRAPA Informação Tecnológica, 2004. 416 p.

SOUZA, Z. M.; PRADO, R. M.; PAIXÃO, A. C. S.; CESARIN, L. G. Sistemas de colheita e manejo da palhada de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n. 3, p. 271-278, mar. 2005.

SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; LIMA, C. L. R. Estimativa da susceptibilidade à compactação e do suporte de carga do solo com base em propriedades físicas de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 3, p. 963-973, maio/jul. 2008.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 22, n. 4, p. 573-581, out./dez. 1998.

ANEXOS

ANEXO A		Página
FIGURA 1A	Planilha eletrônica de fluxo livre, utilizada para estimar a pressão de preconsolidação, pressão benéfica e pressão crítica, conforme modificações propostas no capítulo 4.	134

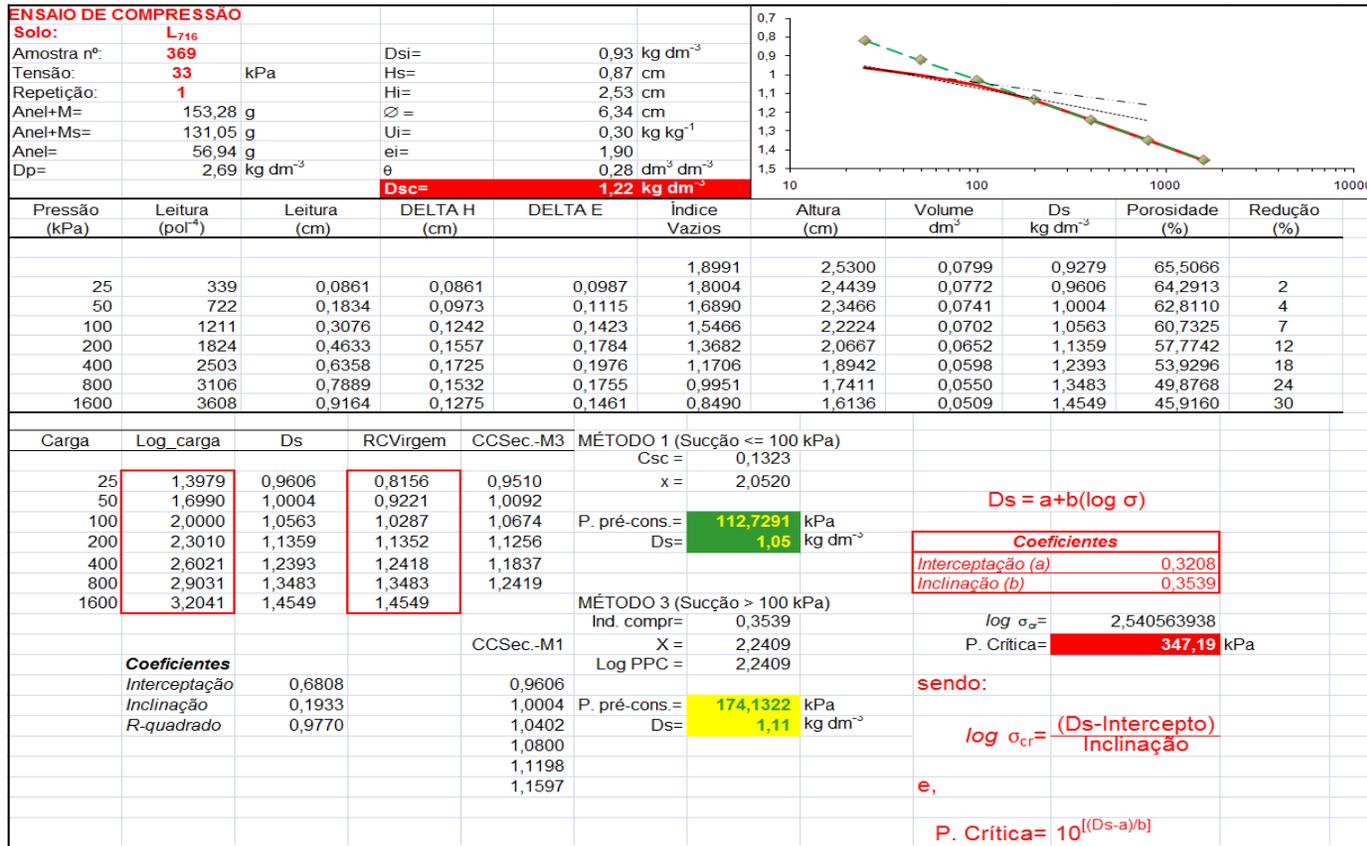


FIGURA 1A. Planilha eletrônica de fluxo livre, utilizada para estimar a pressão de preconsolidação, pressão benéfica e pressão crítica, conforme modificações propostas no capítulo 4.