

UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS

**INDICADORES DA QUALIDADE ESTRUTURAL DE UM
LATOSSOLO CULTIVADO COM OLEAGINOSAS EM
SISTEMA DE SUCESSÃO COM SOJA E MILHO**

ANDERSON CRISTIAN BERGAMIN

**DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2012**

**INDICADORES DA QUALIDADE ESTRUTURAL DE UM
LATOSSOLO CULTIVADO COM OLEAGINOSAS EM
SISTEMA DE SUCESSÃO COM SOJA E MILHO**

ANDERSON CRISTIAN BERGAMIN
Engenheiro agrônomo, M.Sc.

Orientador: PROF. DR. ANTONIO CARLOS TADEU VITORINO

Tese apresentada à Universidade Federal da Grande Dourados, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Produção Vegetal, para obtenção do título de Doutor.

DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2012

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central – UFGD

631.43 Bergamin, Anderson Cristian

B493i

Indicadores da qualidade estrutural de um latossolo cultivado com oleaginosas em sistema de sucessão com soja e milho / Anderson Cristian Bergamin – Dourados, MS : UFGD, 2012.

115 f.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Carlos Tadeu Vitorino.

Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal da Grande Dourados.

1. Solo – Uso. 2. Física do solo. 3. Latossolo. 4. Cultivo (Soja e milho). I. Título.

**INDICADORES DA QUALIDADE ESTRUTURAL DE UM LATOSSOLO
CULTIVADO COM OLEAGINOSAS EM SISTEMA DE SUCESSÃO COM
SOJA E MILHO**

por

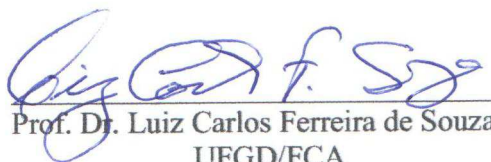
Anderson Cristian Bergamin

Tese apresentada como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de
DOUTOR EM AGRONOMIA

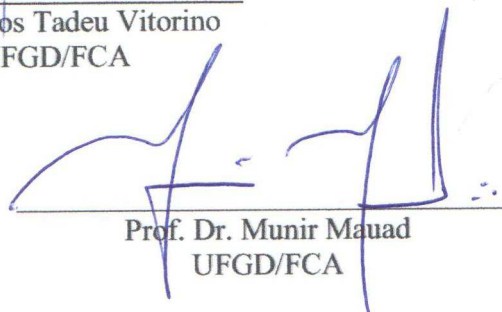
Aprovado em: 24/08/2012



Prof. Dr. Antonio Carlos Tadeu Vitorino
Orientador – UFGD/FCA



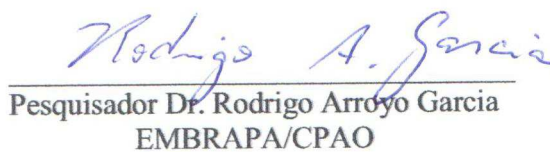
Prof. Dr. Luiz Carlos Ferreira de Souza
UFGD/FCA



Prof. Dr. Munir Mauad
UFGD/FCA



Prof. Dr. Milton César Costa Campos
UFAM/IEAA



Pesquisador Dr. Rodrigo Arroyo Garcia
EMBRAPA/CPAO

“Cada um de nós compõe a sua história, cada ser em si, carrega o dom de ser capaz, de ser feliz.” (Almir Sater e Renato Teixeira)

DEDICO.

A minha família!!!. Em especial a minha esposa Luara Pessatto Pará Bergamin, que esteve ao meu lado nessa caminhada, sendo compreensiva, me apoiando, incentivando, transmitindo amor, carinho e amizade. Aos meus pais Santo Bergamin e Inêz Aparecida Serafim Bergamin, ao meu irmão Éverton Marcos Bergamin, e meu sobrinho Matheus Felipe Ketes Bergamin que embora distantes, não deixaram faltar carinho e incentivo na realização deste trabalho. Eternamente grato pela força, inspiração e existência. Amo todos vocês!!!!!!

OFEREÇO.

Ao meu segundo “pai” e orientador Antonio Carlos Tadeu Vitorino pelo incentivo em todos os momentos e pela minha formação pessoal e profissional.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pelo dom da vida e por tantas realizações.

Ao meu orientador Prof. Antonio Carlos Tadeu Vitorino “Totó”, pela presença, amizade, confiança e profissionalismo.

Ao programa de Pós-Graduação em Agronomia da UFGD, pela oportunidade, e a secretária Lúcia pela atenção e paciência.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Agronomia da UFGD, pelo aprimoramento no conhecimento.

A Universidade Federal do Amazonas - UFAM, pelo afastamento concedido para conclusão do doutorado.

Ao Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente – UFAM, em especial ao diretor da Unidade, Prof. Dr. Milton César Costa Campos, pelo apoio concedido.

Aos mais que amigos Fábio Régis de Souza, Luciano dos Reis Venturoso, Lenita Aparecida Conus Venturoso, Daniel Dias Valadão Júnior e Franciele Caroline de Assis Valadão companheiros e companheiras desde a graduação em agronomia pela Universidade Federal de Rondônia.

Aos amigos de Pós-Graduação e do Laboratório de Física dos Solos, em especial Marcos Vinícios Garbiate, Leandro Paim e Eber Prado.

Aos alunos de graduação Daniel Luan Pereira Espindola, e em especial a Welliton Henrique de Oliveira e Laira Rodrigues Ferreira pela amizade e imenso apoio na execução da pesquisa.

Aos funcionários da UFGD “Seu Jesus – funcionário de campo”, “João Augusto – laboratorista de Física do Solo” e em especial ao “Bruno Cezar Pontim” que além de funcionário é um grande amigo.

Ao meu sogro Mário Jorge Paré e sogra Hilda Pessatto Paré, pelo apoio e pelo carinho recebido.

A toda minha Família.

Aos velhos e novos amigos que reencontrei e encontrei nesta caminhada.

A todos, próximos ou distantes que, de alguma forma contribuíram para que esses momentos fossem vividos.

Muito obrigado!!!!

SUMÁRIO

	PÁGINA
RESUMO GERAL	vii
ABSTRACT	viii
1 INTRODUÇÃO GERAL	1
2 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	6
3 ARTIGO 1	9
CAPACIDADE DE SUPORTE DE CARGA DE UM LATOSSOLO CULTIVADO COM OLEAGINOSAS EM SUCESSÃO A SOJA E MILHO	
3.1 Resumo	9
3.2 Abstract.	10
3.3 Introdução	11
3.4 Material e métodos.	14
3.5 Resultados e discussões	17
3.6 Conclusões.	30
3.7 Referências bibliográficas	31
4 ARTIGO 2	36
INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO DE UM LATOSSOLO CULTIVADO COM OLEAGINOSAS EM SUCESSÃO A SOJA E MILHO	
4.1 Resumo	36
4.2 Abstract.	37
4.3 Introdução	38
4.4 Material e métodos.	41
4.5 Resultados e discussões	45
4.6 Conclusões.	60
4.7 Referências bibliográficas	61
5 ARTIGO 3	67
CAPACIDADE DE SUPORTE DE CARGA DE UM LATOSSOLO CULTIVADO COM SOJA E MILHO EM SUCESSÃO A OLEAGINOSAS DE OUTONO-INVERNO	
5.1 Resumo	67
5.2 Abstract.	68
5.3 Introdução	69
5.4 Material e métodos.	71
5.5 Resultados e discussões	75

5.6 Conclusões.	88
5.7 Referências bibliográficas	89
6 ARTIGO 4	95
INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO DE UM LATOSSOLO CULTIVADO COM SOJA E MILHO EM SUCESSÃO A OLEAGINOSAS DE OUTONO-INVERNO	
6.1 Resumo	95
6.2 Abstract.	96
6.3 Introdução	97
6.4 Material e métodos.	99
6.5 Resultados e discussões	103
6.6 Conclusões.	118
6.7 Referências bibliográficas	119
7 CONCLUSÕES GERAIS	124

INDICADORES DA QUALIDADE ESTRUTURAL DE UM LATOSSOLO CULTIVADO COM OLEAGINOSAS EM SISTEMA DE SUCESSÃO COM SOJA E MILHO

RESUMO GERAL

A qualidade física do solo é um dos fatores da sustentabilidade agrícola e pode ser alterada por qualquer sistema de uso e manejo. Por outro lado, a busca de alternativas de cultivos de oleaginosas, para rotação de culturas em sistema plantio direto, podem ser implementados na região Centro-Oeste e as alterações estruturais do solo proporcionadas por esses cultivos especialmente em esquema de sucessão com soja e milho tornam-se de suma importância. Assim, objetivou-se com esta pesquisa avaliar o uso do intervalo hídrico ótimo como indicador de qualidade estrutural de um Latossolo cultivado em sistema plantio direto com diferentes sucessões de culturas oleaginosas. Além disso, desenvolver nessas sucessões, modelos de capacidade de suporte de carga em função da pressão de preconsolidação e da umidade volumétrica do solo. O estudo foi realizado em um Latossolo Vermelho distroférrico argiloso, na área da Fazenda Experimental de Ciências Agrárias da UFGD, no município de Dourados, MS, nos anos agrícolas de 2009/10 e 2010/11. O delineamento experimental foi de blocos casualizados, contendo 11 tratamentos, com quatro repetições. No primeiro ano do estudo (2009/10) os tratamentos consistiram de espécies oleaginosas cultivadas em sistema plantio direto no outono-inverno: girassol (*Helianthus annuus* L.), canola (*Brassica napus* L. e *Brassica rapa* L.), cártamo (*Carthamus tinctorius* L.), crambe (*Crambe abyssinica* Hochst.) e níger (*Guizotia abyssinica* Cass.), semeadas em sucessão as culturas da soja e do milho cultivadas no verão, e a sucessão soja/milho (verão/outono-inverno), a mais usual na região. No florescimento das culturas de outono-inverno, foram coletadas amostras de solo com estrutura preservada em cilindros metálicos, nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm. No segundo ano de estudo (2010/11), os tratamentos foram os cultivos da soja e do milho no verão, semeadas em sucessão às culturas oleaginosas de outono-inverno: girassol (*Helianthus annuus* L.), canola (*Brassica napus* L. e *Brassica rapa*), cártamo (*Carthamus tinctorius* L.), crambe (*Crambe abyssinica* Hochst.) e níger (*Guizotia abyssinica* Cass.), e a sucessão soja/milho (verão/outono-inverno). Após a colheita das culturas da soja e do milho verão foram coletadas amostras de solo com estrutura preservada, nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm. Houve aumento na macroporosidade e porosidade total do solo; e redução da densidade do solo quando se utilizou a cultura do níger em manejo de sucessão de culturas em sistema plantio direto. A cultura do níger tanto em sucessão quanto antecedendo aos cultivos da soja e do milho proporcionou menor capacidade de suporte de carga e maior intervalo hídrico ótimo nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm, melhorando a estrutura do solo. O intervalo hídrico ótimo é um indicador de qualidade física dos solos, podendo ser utilizado para identificar as principais limitações físicas e adotar melhores técnicas de manejo do solo. Com a obtenção de modelos de capacidade de suporte de carga, verifica-se que o melhor momento para as práticas de manejo do solo, em termos de conteúdo de água no solo, é distinto para as diversas oleaginosas cultivadas em sucessão com soja e milho, ocorrendo aumento na capacidade de carga do solo com a redução do conteúdo de água e aumento da densidade do solo.

Palavras-chave: rotação de culturas, intervalo hídrico ótimo, capacidade de suporte de carga, compactação.

PHYSICAL QUALITY INDICATORS IN LATOSOL UNDER OLEAGINOUS CROPS IN A SUCCESSION SYSTEM WITH SOYBEAN AND MAIZE

SUMMARY

The physical quality of the soil is one of the sustainable agricultural factors and it could be altered by use and management systems. On the other hand, the search for cultivation alternatives of oleaginous crops, for rotation between cultures in no-tillage system, can be implemented in the Central-West region of Brazil and these soil structural alterations can affect these cultivations, especially in projects involving succession crops with soybean and maize can become of utmost importance. Thus, it was the objective of this research to evaluate the use of the least limiting water range as an indicator the structural quality of a Latosol cultivated in no-tillage system with different successions of oleaginous crops. Moreover, develop these successions models of load bearing capacity between preconsolidation pressure and volumetric water content. The experiment was carried out in field conditions, in Dourados, Mato Grosso do Sul state, Brazil, in a clayed Red Latosol (Rhodic Acrustox), during the years of 2009/10 and 2010/11. A randomized complete block design was used, containing 11 treatments, with four replicates. In the first year of the study (2009/10), the treatments consisted of oleaginous crops cultivated in no-tillage system in the autumn-winter seasons: sunflower (*Helianthus annuus* L.), rapeseed (*Brassica napus* L. e *Brassica rapa* L.), safflower (*Carthamus tinctorius* L.), crambe (*Crambe abyssinica* Hochst.) and to níger (*Guizotia abyssinica* Cass.), sown in succession to the soybean and maize crops in the summer, and the succession of soybean/maize (summer/autumn-winter), most farmed in the region. In the flowering of the cultures of autumn-winter, undisturbed soil samples were collected, in depths of 0-5 and 5-10 cm. In the second year of study (2010/11), the treatments were the cultivation of the soybean and maize during the summer, sown in succession to the oleaginous crops of autumn-winter: sunflower (*Helianthus annuus* L.), rapeseed (*Brassica napus* L. e *Brassica rapa* L.), safflower (*Carthamus tinctorius* L.), crambe (*Crambe abyssinica* Hochst.) and to níger (*Guizotia abyssinica* Cass.), and the succession soybean/maize (summer/autumn-winter). After the harvest of the soybean and maize crops in the summer, undisturbed soil samples were collected, in depths of 0-5 and 5-10 cm. There was an increase in the macroporosity and total porosity of the soil, and a reduction of the soil density when was used the culture of níger in succession of cultures in no-tillage system. The culture of níger implanted before or after the crops of soybeans and maize resulted in a smaller load bearing capacity and increased least limiting water range at the depths of 0-5 and 5-10 cm, therefore improving soil structure. The least limiting water range is an indicator of physical quality of the soil, can be used to identify the main physical limitations and how to adopt improved soil management techniques. After attainment the models of load bearing capacity, it was verified that the optimum moment to soil management in terms of water content in the soil, is different for the diverse oilseeds grown in succession with soybean and maize, resulting in an increase in the load bearing capacity with a reduction of the water content and increase of the soil density.

Index terms: Crop rotation, least limiting water range, load bearing capacity, compaction.

INTRODUÇÃO GERAL

A agropecuária praticada no estado de Mato Grosso do Sul vem passando, nos últimos anos, por importantes processos de avanços tecnológicos que refletem em desenvolvimento sócio econômico significativo para a região Centro-Oeste do Brasil.

No sentido de reduzir os riscos impostos por condições edafoclimáticas algumas vezes desfavoráveis, bem como por características de mercado dos produtos de maior expressão no cenário regional, os produtores rurais podem diversificar suas atividades, antes focadas na sucessão da soja e milho, ou na pecuária extensiva, por meio de práticas mais diversificadas de exploração agropecuária.

Com a diversificação na atividade agrícola e a busca por fontes de energia renováveis coloca as espécies oleaginosas como o centro das atenções e interesses. Os óleos vegetais extraídos de grãos de espécies oleaginosas vêm se destacando como uma ótima opção na produção de biodiesel, em mistura, ou mesmo para substituir totalmente o diesel, criando oportunidades para o agronegócio no Mato Grosso do Sul.

De acordo com a Conab (2012), no Mato Grosso do Sul, 1,82 milhões de hectares são explorados com a cultura da soja e 1,25 milhões de hectares, com a cultura do milho. Do total da área ocupada com a cultura do milho, 68 mil hectares são cultivados com milho no verão (milho 1^a safra) e, 1,18 milhões de hectares são semeados com milho safrinha (milho 2^a safra). Desta forma, o estado de Mato Grosso do Sul dispõe de área para ser cultivada com culturas anuais para produção de biodiesel, com época de semeadura no período de outono-inverno, tais como o cártamo, girassol, canola, crambe e níger, sem a necessidade de abertura de novas áreas.

O cártamo (*Carthamus tinctorius* L.) é uma espécie da família *Asteraceae* cultivada no mundo todo devido a sua importância medicinal e industrial (CARNEIRO et al., 2012), além de, possuir adaptabilidade em diferentes condições ambientais e, principalmente, pela qualidade do óleo (SOUZA et al., 2010). Suas sementes, que possuem cerca de 30% de óleo, sendo uma planta de grande potencial na produção de biodiesel (DWIVEDI et al., 2005). O óleo de cártamo apresenta altos teores de ácidos linoléico (70%) e oléico (20%), e baixa porcentagem de ácido linolênico (3%) (BRADLEY et al., 1999).

O girassol (*Helianthus annuus* L.) é originário do oeste da América do Norte e possui boa capacidade de adaptação a vários tipos de solos e condições

ambientais. Em regiões produtoras de grãos no Brasil, tem sido observado que culturas da soja e do milho, quando cultivadas em sucessão à cultura do girassol, apresentam incremento na produtividade. No país há tendência de crescimento da área cultivada com girassol, visando atender o mercado de biocombustíveis, devido ao alto teor de óleo contido no grão que é de 35 a 47%. O girassol também tem a vantagem de poder entrar como cultura alternativa para o cultivo na safrinha (GAZZONI, 2008).

A canola (*Brassica napus* L.) é uma cultura adaptada a climas temperados, de regiões com latitudes entre 35° a 55°, pertencente à família das crucíferas, sendo mundialmente a terceira oleaginosa mais cultivada, tendo em seus grãos de 34 a 40% de óleo (TOMM et al., 2008). Seu óleo possui alto valor industrial e econômico, como óleo comestível é dos mais saudáveis, e também apresenta potencial como matéria-prima para a produção de biodiesel (SCHUCHARDT et al., 1998). O óleo de canola é o mais usual na Europa para produção de biodiesel (TOMM et al., 2008). Além disso, contribui para a redução da ocorrência de doenças nas culturas subseqüentes, principalmente nos cultivos de gramíneas semeadas no ano seguinte, aumentando a qualidade, produtividade e minimizando os custos de produção (TOMM, 2000).

O crambe (*Crambe abyssinica* Hochst) é uma espécie pertencente à família das crucíferas, originária do Mediterrâneo, o mesmo demonstra-se adaptável a diferentes condições climáticas (SOUZA et al., 2009), apresentando grande potencial para ser cultivado com a finalidade de produção de biodiesel, com percentual de óleo total entre 36% e 38% e com ótima qualidade para a produção deste combustível (COLODETTI et al., 2012). O crambe é tolerante à seca, à geadas e a sua precocidade são as grandes vantagens da planta, que floresce aos 35 dias e pode ser colhida aos 85 a 90 dias, com maturação uniforme (PITOL, 2008). Assim, o crambe apresenta-se como uma excelente alternativa para a rotação de culturas com grande potencial de expansão como alternativa na safrinha, não competindo com as culturas principais e as alimentares (ROSCOE e DELMONTES, 2008).

O níger (*Guizotia abyssinica* Cass.) é uma planta originária da Etiópia, pertencente à família Compositae, planta anual herbácea, cultivada principalmente na Etiópia e na Índia em rotação com cereais e leguminosas (SARIN et al., 2009). Na Etiópia, essa espécie é responsável por 50 a 60% do óleo produzido no país, enquanto que na Índia é responsável por 2% (RAMADAN e MORSEL, 2002). As sementes do níger possuem cerca de 40% de óleo, apresentando altos teores de ácido linoleico (75-80%), além de possuir 7-8% de ácido palmítico e 5-6% de ácido oleico (DUTTA et al.,

1994). O óleo é utilizado na alimentação, fabricação de tintas e sabonetes, ou como um lubrificante (RAMADAN e MORSEL, 2002).

Para a implantação dessas culturas ainda pouco exploradas, se faz necessário o conhecimento dos atributos físicos do solo, visando um manejo adequado. Para Stone e Silveira (2001), a intensificação da exploração agrícola aliada ao uso e ao manejo inadequado do solo tem provocado modificações com impactos negativos nos atributos físicos do solo. Optar pelo sistema plantio direto, que têm como princípio a manutenção de cobertura vegetal e seus resíduos sobre o solo, tem sido uma importante estratégia quando se refere à sustentabilidade dos sistemas agrícolas nas regiões tropicais (CAIRES et al., 2006). Para Guth (2010), uma alternativa para melhorar a qualidade estrutural do solo refere-se ao uso de rotação de culturas com espécies que tenham sistema radicular vigoroso, com capacidade de crescer em solos com alta resistência à penetração, criando poros por onde as raízes da cultura subsequente possam crescer. O autor relata ainda, que a rotação de culturas, quando manejada em sistema plantio direto, pode promover melhoria em solos fisicamente degradados.

Para minimizar a degradação física do solo oriunda do manejo inadequado do solo, tem sido proposta a utilização da curva de compressão do solo para mostrar alterações na estrutura do solo (DIAS JUNIOR e PIERCE, 1996). Na curva de compressão do solo encontram-se duas regiões distintas: a curva de compressão secundária, na qual ocorrem as deformações elásticas e recuperáveis e a curva de compressão virgem, na qual ocorrem as deformações plásticas, não recuperáveis (DIAS JUNIOR e PIERCE, 1995). É na região da curva de compressão secundária que o solo deve ser trabalhado ou trafegado para que não ocorra compactação adicional (DIAS JUNIOR e PIERCE, 1996).

Para avaliar a capacidade de suporte de carga dos solos, o ensaio de compressão uniaxial tem sido utilizado para obter a pressão de preconsolidação (σ_p) a partir da curva de compressão do solo (SANTOS, 2006). O desenvolvimento destes modelos de capacidade de suporte de carga é de suma importância para o manejo de práticas agrícolas, indicando a máxima pressão que o solo suporta em diferentes umidades sem causar compactação adicional. A degradação da estrutura do solo, pelo uso de máquinas agrícolas nas várias etapas do processo de produção em condições inadequadas de umidade, tem sido o principal responsável por acarretar perdas no potencial produtivo das culturas (IMHOFF et al., 2001; CHAMEN et al., 2003).

Um parâmetro importante no monitoramento da compactação do solo e na prevenção de perdas de produtividade é o intervalo hídrico ótimo (IHO) (BEUTLER et al., 2004). Para Silva et al. (1994), o IHO é um bom indicador da qualidade física do solo, o qual incorpora em um único parâmetro, as limitações ao crescimento das plantas por aeração, água disponível e resistência do solo à penetração. O IHO é definido pelo limite superior e inferior dos conteúdos de água no solo, considerados limitantes ao crescimento radicular. O limite superior é o menor valor entre o conteúdo de água na porosidade de aeração de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (GRABLE e SIEMER, 1968) e o conteúdo de água retida na capacidade de campo, tensão de 0,01 MPa (REICHARDT, 1988); e o limite inferior é o maior valor entre o conteúdo de água retido no ponto de murcha permanente, na tensão de 1,5 MPa (SAVAGE et al., 1996) e o conteúdo de água a partir do qual a resistência do solo à penetração é crítica ao crescimento radicular, ou seja, quando atinge 2,0 MPa (TAYLOR et al., 1966). Devido a essas características, o IHO representa grande avanço nos estudos da qualidade física do solo, sendo este considerado o indicador que melhor se correlaciona ao crescimento das plantas (TORMENA et al., 2007).

Como atualmente não se permite imaginar a adoção de uma nova tecnologia agrícola que não tenha por base um sistema sustentável de produção, a implantação de sistemas de produção de plantas capazes de auxiliar na mudança da matriz energética atual, deve seguir preceitos conservacionistas, por meio da aplicação de ações que conduzam no aumento da produção, renda e diminuição de impactos negativos das práticas agrícolas no meio ambiente.

Portanto, o estudo de indicadores de qualidade estrutural de solo cultivado com espécies oleaginosas, envolvendo parâmetros ligados à relação solo-água-planta relacionados principalmente à compactação do solo é de grande relevância para a sustentabilidade desses cultivos que provavelmente aumentarão suas áreas ao longo dos próximos anos. Assim, objetivou-se com esta pesquisa avaliar o uso de indicadores de qualidade estrutural de um Latossolo cultivado em sistema plantio direto com diferentes sucessões de culturas oleaginosas, por meio do IHO. Além disso, desenvolver nessas sucessões, modelos de capacidade de suporte de carga em função da pressão de preconsolidação e da umidade volumétrica do solo.

Este trabalho encerra quatro artigos, todos realizados em Latossolo Vermelho distroférrico de textura argilosa. No primeiro e segundo artigo são descritas as influências da adoção de cultivos no outono-inverno com espécies oleaginosas em

sucessão à soja e ao milho, na capacidade de suporte de carga e no IHO, respectivamente. O terceiro artigo avalia a capacidade de suporte de carga e o quarto o IHO, nos cultivos de verão tanto com soja quanto com milho em sucessão a diversas oleaginosas anuais de outono-inverno.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SILVA, A.P. Intervalo hídrico ótimo e a produção de soja e arroz em dois Latossolos. **Irriga**, v.9, p.181-192, 2004.

BRADLEY, V.L.; GUENTHNER, R.L.; JOHNSON, R.C.; HANNAN, R.M. Evaluation of safflower germplasm for ornamental use. In: JANICK, J. **Perspectives on new crops and new uses**. ASHS Press: Alexandria, 1999. p.433-435.

CAIRES, E.F.; GARBUIO, F.J.; ALLEONI, L.R.F.; CAMBRI, M.A. Calagem superficial e cobertura de aveia preta antecedendo os cultivos de milho e soja em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.87-98, 2006.

CARNEIRO, S.M.T.P.G.; SILVA, M.R.L.; ROMANO, E.B.; BORSATO, L.C.; MARIANOWSKI, T.; GOMES, J.C. Ocorrência de *Colletotrichum gloeosporioides* (Penz.) Sacc. em *Carthamus tinctorius* L. no estado do Paraná. **Summa phytopathol**, v.38, p.163-165, 2012.

CHAMEN, T.; ALAKUKKU, L.; PIRES, S.; SOMMER, C.; SPOOR, G.; TIJINK, F; WEISSKOPF, P. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: A review. Part 2. Equipment and field practices. **Soil and Tillage Research**, v.71, p.1-14, 2003.

COLODETTI, T.V.; MARTINS, L.D.; RODRIGUES, W.N.; BRINATE, S.V.B.; TOMAZ, M.A. Crambe: aspectos gerais da produção agrícola. **Enciclopédia biosfera**, v.8, p.258-269, 2012.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos, décimo primeiro levantamento, agosto de 2012**. Brasília, 2012. 29p. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 12 ago. 2012.

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

DIAS JUNIOR, M.S.; PIERCE, F.J. Revisão de literatura: O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.20, p.175-182, 1996.

DUTTA C.; HELMERSSON S.; KEBEDU E.; ALEMAW G.; APPELQVIST, L. Variation in lipid composition of niger seed (*Guizotia abyssinica* Cass.) samples collected from different regions in Ethiopia. **Journal of the American Oil Chemists Society**, v.71, p.839-843, 1994.

DWIVEDI, S.L.; UPADHYAYA, H.D.; HEGDE, D.M. Development of core collection using geographic information and morphological descriptors in safflower (*Carthamus tinctorius* L.) germplasm. **Genetic Resources and Crop Evolution**, v.52, p.821-830, 2005.

GAZZONI, D. L. Óleo de girassol como matéria-prima para biocombustíveis. In: **Girassol no Brasil**. Londrina: Embrapa Soja, 2005, p.145-162.

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**, v.32, p.180-186, 1968.

GUTH, P.L. **Perdas de solo e água por erosão hídrica em sistemas de culturas oleaginosas**. 2010. 83 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS.

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**, v.25, p.11-18, 2001.

PITOL, C. **Crambe: uma nova opção para produção de biodiesel**. Maracaju: Fundação MS, 2008. Disponível em: <<http://www.fundacaoms.com.br>>. Acesso em: 12 jan. 2008.

RAMADAN M.F., MÖRSEL J.-T. Proximate neutral lipid composition of niger (*Guizotia abyssinica* Cass.) seed. **Czech Journal of Food Sciences**, v.20, p.98-104, 2002.

REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.12, p.211-216, 1988.

ROSCOE, R.; DELMONTES, A.M.A. **Crambe é nova opção para biodiesel**. Agrianual 2009. São Paulo: Instituto FNP, 2008. p.40-41.

SANTOS, G.A. **Capacidade de suporte de carga de um Latossolo cultivado com cafeeiros sob métodos associados de controle de plantas daninhas**. 2006. 115 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo), Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG.

SARIN, R.; SHARMA, M.; KHAN, A.A. Studies on *Guizotia abyssinica* L. oil: Biodiesel synthesis and process optimization. **Bioresource Technology**, v.100, p.4187-4192, 2009.

SAVAGE, M.J.; RITCHIE, J.T.; LAND, W.L.; DUGAS, W.A. Lower limit of soil water available. **Agronomy Journal**, v.88, p.844-851, 1996.

SCHUCHARDT, U.; SERCHELI, R.; VARGAS, R.M. Transesterification of vegetable oils: a review. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v.9, p.199-210, 1998.

SILVA, A.P.; KAY, B.D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, v.58, p.1775-1781, 1994.

SOUZA, L.C.F.; DOMINGUES, N.L.C.; FREITAS, M.E.; TORRES, L.D.; TANAKA, K.S.; PEDROTTI, M.C.; PEDROSO, F.F. Avaliação da potencialidade das culturas de nabo forrageiro e do cartamo para a produção de biodiesel em sucessão de cultura com o milho. In: CONGRESSO DA REDE BRASILEIRA DE TECNOLOGIA DE

BIODIESEL, 4.; CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANTAS OLEAGINOSAS, ÓLEOS, GORDURAS E BIODIESEL, 7., 2010. Belo Horizonte. **Anais...** Biodiesel: inovação tecnológica e qualidade. Lavras: UFLA, 2010.

SOUZA, A.D.V.; FÁVARO, S.P.; ÍTAVO, L.C.; ROSCOE, R. Caracterização química de sementes e tortas de pinhão-mansão, nabo-forrageiro e crambe. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.44, p.1328-1335, 2009.

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

TAYLOR, H.M.; ROBERSON, G.M.; PARKER JR., J.J. Soil strength-root penetration relations to medium to coarse-textured soil materials. **Soil Science**, v.102, p.18-22, 1966.

TOMM, G.O. Perspectivas de desenvolvimento de produção de Canola no Brasil. **Óleos e Grãos**, v.9, p.26-30, 2000.

TOMM, G.O.; RAPOSO, R.W.C.; SOUZA, T.A.F.; OLIVEIRA, J.T.L.; RAPOSO, E.H.S.; SILVA NETO, C.P.; BRITO, A.C.; NASCIMENTO, R.S.; RAPOSO, A.W.S.; SOUZA, C.F. **Desempenho de genótipos de canola (*Brassica napus* L.) no Nordeste do estado da Paraíba, Nordeste do Brasil**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2008, 15 p. (Embrapa Trigo: Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento Online, 65).

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**, v.31, p.211-219, 2007.

ARTIGO 1

CAPACIDADE DE SUPORTE DE CARGA DE UM LATOSSOLO CULTIVADO COM OLEAGINOSAS EM SUCESSÃO A SOJA E MILHO

RESUMO

As operações mecanizadas em lavouras com condições inadequadas de umidade resultam na compactação do solo, com efeitos danosos à qualidade física. Assim, o objetivo deste estudo foi avaliar a influência da adoção das diferentes sucessões de culturas oleaginosas, na capacidade de suporte de carga de um Latossolo Vermelho distroférico de textura argilosa. O estudo foi realizado a campo, na área da Fazenda Experimental de Ciências Agrárias - UFGD, no município de Dourados, MS, no ano agrícola de 2009/10. O delineamento experimental foi de blocos casualizados, contendo 11 tratamentos, com quatro repetições. As espécies oleaginosas foram cultivadas em sistema plantio direto no outono-inverno sendo: girassol (*Helianthus annuus* L.), canola (*Brassica napus* L. e *Brassica rapa*), cártamo (*Carthamus tinctorius* L.), crambe (*Crambe abyssinica* Hochst.) e níger (*Guizotia abyssinica*), semeadas em sucessão às culturas da soja e do milho cultivadas no verão, e a sucessão soja/milho (verão/outono-inverno), a mais realizada na região. No florescimento das culturas de outono-inverno, foram coletadas amostras de solo com estrutura preservada em cilindros metálicos, nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm. De maneira geral, a capacidade de suporte de carga do solo na profundidade de 5-10 cm foi superior à camada de 0-5 cm em todas as sucessões de culturas. Os modelos de capacidade de suporte de carga do solo para as sucessões milho/girassol e milho/canola na profundidade de 0-5 cm não se diferenciaram estatisticamente. O cultivo de níger no outono-inverno em sucessão à soja ou milho, aumenta a macroporosidade e diminui a densidade do solo na camada de 0-10 cm, conseqüentemente, nessas sucessões o solo apresenta menor capacidade de suporte de carga. Os valores de pressão de preconsolidação entre as sucessões de culturas diminuem à medida que a umidade volumétrica do solo aumenta.

Palavras-chave: pressão de preconsolidação, compressibilidade, compactação do solo.

LOAD BEARING CAPACITY OF A LATOSOL UNDER OLEAGINOUS CROPS IN SUCCESSION TO SOYBEAN AND MAIZE

ABSTRACT

Farming mechanized operations with inadequate conditions of moisture will result in compacted soil that can damage of soil physical quality. The objective of this study was to evaluate the influence of the adoption of the different successions of oleaginous crops, in the load bearing capacity of a clayed Red Latosol (Rhodic Acrustox). The experiment was carried out in field conditions, in Dourados, Mato Grosso do Sul state, Brazil, in a clayed Red Latosol (Rhodic Acrustox), during the agricultural year of 2009/10. A randomized complete block design was used, containing 11 treatments, with four replicates. The oleaginous crops had been cultivated in no-tillage system in the autumn-winter seasons: sunflower (*Helianthus annuus* L.), rapeseed (*Brassica napus* L. e *Brassica rapa* L.), safflower (*Carthamus tinctorius* L.), crambe (*Crambe abyssinica* Hochst.) and to níger (*Guizotia abyssinica* Cass.), sown in succession to the soybean and maize crops in the summer, and the succession of soybean/maize (summer/autumn-winter), most farmed in the region. In the flowering of the cultures of autumn-winter, undisturbed soil samples were collected, in depths of 0-5 and 5-10 cm. The load bearing capacity of the soil at a depth of 5-10 cm was greater than 0-5 cm in all crop successions. The models of load bearing capacity of the soil for the successions maize/sunflower and maize/ rapeseed in the depth 0-5 cm showed no differences. The culture of níger in successions to the soybean or maize, increases macroporosity and decreases the soil density in the layer 0-10 cm, consequently, these successions crops showed lower load bearing capacity. The value of the preconsolidation pressure between the crop successions decreases as the soil moisture increases.

Index terms: preconsolidation pressure, compressibility, soil compactation.

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a utilização e a produção de combustíveis renováveis têm sido apoiadas por políticas públicas. Nessa realidade atual, o biodiesel surge como uma alternativa para a diminuição da dependência de derivados de petróleo e como um novo mercado para as culturas oleaginosas anuais, principalmente com época de semeadura no período de outono-inverno, tais como o girassol, canola, crambe, cártamo e níger. Alguns dos pressupostos para a sustentabilidade dos biocombustíveis, é que a produção de energia deve ser vista como atividade complementar sem detrimento da produção de alimentos (ARANTES, 2011) e que mantenham práticas agrícolas adequadas nos sistemas de produção (GUTH, 2010).

Essas espécies oleaginosas necessitam ainda de mais pesquisa, sendo necessário o conhecimento dos atributos físicos do solo para podermos manejá-lo corretamente e usá-lo de maneira adequada. A intensificação da exploração agrícola, por meio do cultivo de até três safras por ano (ARANTES, 2011), aliada ao uso e ao manejo inadequado do solo tem provocado compactação, causando modificações negativas nos atributos físicos do solo (STONE e SILVEIRA, 2001). Para Collares et al. (2006), Bergamin et al. (2010a) e Bergamin et al. (2010b) em consequência da compactação, há uma alteração estrutural do solo onde ocorre reorganização das partículas e de seus agregados, aumentando a densidade do solo e reduzindo a macroporosidade, inibindo assim, o desenvolvimento radicular das plantas.

Os atributos físicos do solo são alterados pelo manejo, e sistemas que proporcionam aumento do teor de carbono orgânico do solo também promovem melhor estruturação do solo (BERTOL et al., 2004). Para Araujo-Junior et al. (2011), a manutenção de culturas que proporcionem maior aporte de resíduos orgânicos, melhora a qualidade física do solo. A introdução de plantas de cobertura pode ser uma prática benéfica para a estrutura do solo, visto que algumas culturas podem aumentar a macroporosidade e a porosidade total, além de reduzir a densidade do solo (ARGENTON et al., 2005). A utilização de espécies com diferentes características de sistema radicular, incluídas em sistema de rotação e/ou sucessão, é importante para a estrutura do solo, pois as raízes podem contribuir para a formação de bioporos e na agregação do solo (FOLONI et al., 2006).

Modificações na estrutura do solo podem ocorrer em virtude do tráfego de máquinas (BERGAMIN et al. 2010a; SANTOS et al., 2010) e do uso frequente de equipamentos agrícolas (SOUZA et al., 2012) em solo com umidade elevada (CHAMEN et al., 2003; OLIVEIRA et al., 2004; STRECK et al., 2004; SAFFIH-HDADI et al., 2009), nesses casos as tensões aplicadas excedem sua capacidade de suporte de carga (HORN et al., 2004; LEBERT et al., 2007). A compactação ocasionada pelo tráfego de máquinas agrícolas é a principal causa da degradação física dos solos pela redução de seu espaço poroso (RAPER, 2005; CARNEIRO et al., 2009) e aumento da pressão de preconsolidação (BRAUNACK e MCGARRY, 2006; SILVA et al., 2009).

A curva de compressão do solo tem sido utilizada para mostrar alterações na sua estrutura devido à compactação (DIAS JUNIOR e PIERCE, 1996). Na curva de compressão do solo encontram-se duas regiões distintas: a curva de compressão secundária, na qual ocorrem as deformações elásticas e recuperáveis e a curva de compressão virgem, na qual ocorrem as deformações plásticas, não recuperáveis (DIAS JUNIOR e PIERCE, 1995). É na região da curva de compressão secundária que o solo deve ser trabalhado ou trafegado para que não haja compactação adicional (DIAS JUNIOR e PIERCE, 1996). A compressibilidade do solo depende do histórico de tensão, umidade, textura e densidade inicial do solo, sendo que, para uma mesma condição, é o teor de água que influencia na deformação que poderá ocorrer no solo (BRAIDA et al., 2006).

Para avaliar a capacidade de suporte de carga de solos, o ensaio de compressão uniaxial tem sido utilizado para obter a pressão de preconsolidação (σ_p) a partir da curva de compressão (DIAS JUNIOR, 1994; MIRANDA et al., 2003; SANTOS, 2006). Esses modelos de capacidade de suporte de carga são importantes, pois indicam a máxima pressão que o solo suporta em diferentes umidades sem causar compactação adicional (SUZUKI et al., 2008; SILVA et al., 2009). Considerando que a σ_p varia em função da umidade e que existe relação significativa e negativa entre as duas variáveis, pode-se afirmar que a σ_p pode ser estimada a partir da umidade, por meio de modelos matemáticos (LIMA e SILVA, 2006).

Essas informações são de grande valor na agricultura, e ainda precisam ser estudadas nesses novos cultivos de oleaginosas no outono-inverno, visto que, para Souza et al. (2012) as operações mecanizadas em lavouras podem resultar na compactação do solo, com efeitos danosos à qualidade física. Na agricultura moderna

não se pode pensar uma agricultura que não tenha por base um sistema sustentável de produção, com constante preocupação com a conservação dos recursos naturais. Portanto, o entendimento de como as culturas oleaginosas cultivadas no outono-inverno influenciam na capacidade de suporte de carga do solo torna-se essencial para o adequado manejo de cada sistema.

Neste contexto, objetivou-se com este estudo avaliar a influência da adoção das diferentes sucessões de culturas oleaginosas, na capacidade de suporte de carga de um Latossolo Vermelho distroférico de textura argilosa.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado na área da Fazenda Experimental de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), no município de Dourados, MS. O local situa-se em latitude 22°13'58"S, longitude de 54°59'30"W e altitude de 410 m. O clima é do tipo Cwa, segundo a classificação de Köppen. A região apresenta precipitação pluvial média anual de 1.400 mm e a temperatura média anual varia entre 18°C a 25°C (PEIXOTO, 2002). O solo foi um Latossolo Vermelho distroférico, cuja análise textural, determinada pelo método da pipeta (EMBRAPA, 1997) foi 531 g kg⁻¹ de argila, 249 g kg⁻¹ de silte e 220 g kg⁻¹ de areia nos primeiros 10 cm de profundidade.

A área foi manejada sob plantio direto por dez anos até o inverno de 2009, em um sistema de rotação de culturas envolvendo soja e milho no verão e milho safrinha e aveia no outono-inverno. No ano agrícola de 2009/10, o experimento foi realizado no delineamento de blocos casualizados, contendo 11 tratamentos, com quatro repetições. Os tratamentos consistiram de culturas oleaginosas cultivadas em sistema plantio direto no outono-inverno: girassol (*Helianthus annuus* L.), canola (*Brassica napus* L. e *Brassica rapa*), cártamo (*Carthamus tinctorius* L.), crambe (*Crambe abyssinica* Hochst.) e níger (*Guizotia abyssinica*), semeadas em sucessão às culturas da soja e do milho cultivadas no verão, e a sucessão soja/milho (verão/outono-inverno), a mais usual na região.

A semeadura da soja (cv. BMX Potência RR) e do milho verão (cv. DKB 390 YG) foram efetuadas em outubro de 2009, utilizando-se uma semeadora-adubadora de plantio direto, com sete linhas para soja, espaçadas entre si de 0,45 m e quatro linhas para o milho, espaçadas de 0,9 m. A quantidade de sementes utilizada foi suficiente para a obtenção de uma população de 300 mil plantas por hectare e 60 mil plantas por hectare para a soja e milho, respectivamente. A adubação para a soja consistiu de 0,3 Mg ha⁻¹ da fórmula 00-20-20 (NPK) e para o milho foi utilizado a mesma dose de adubo da fórmula 10-20-20 (NPK).

Após a colheita da soja e do milho verão em fevereiro de 2010 foram semeadas mecanicamente as culturas de outono-inverno. A semeadura do milho safrinha (cv. DKB 350 YG) foi realizada mecanicamente no dia 10 de março de 2010, em sucessão à cultura da soja, utilizando-se uma semeadora-adubadora de plantio

direto, com sete linhas, espaçadas entre si de 0,45 m, regulada para distribuir 0,2 Mg ha⁻¹ da fórmula 10-20-20 e uma quantidade de sementes suficiente para obter uma população de 70 mil plantas por hectare. No dia 01 de abril de 2010 foram semeadas as culturas oleaginosas anuais de outono-inverno em sucessão aos cultivos da soja e milho verão, utilizando-se uma semeadora-adubadora de plantio direto, seguindo as mesmas recomendações para o milho safrinha quanto ao espaçamento e adubação.

No florescimento das culturas de outono-inverno, foram coletadas amostras de solo com estrutura preservada em cilindros metálicos com 6,45 cm de diâmetro e 2,54 cm de altura, centralizando-os nas camadas de 0-5 e 5-10 cm. As amostras foram retiradas nas entrelinhas das culturas. As parcelas mediram 35 m de comprimento e 14 m de largura, perfazendo uma área total de 490 m². Em cada parcela e profundidade foram coletadas sete amostras, totalizando 56 amostras para cada tratamento (28 amostras x 2 profundidades).

Após o preparo das amostras, essas foram saturadas por meio da elevação gradual de uma lâmina de água até atingir cerca de dois terços da altura do anel para posterior estabilização do teor de água. As 28 amostras de cada tratamento e profundidade foram divididas em sete grupos de quatro amostras, e cada grupo submetido às seguintes tensões: 0,006; 0,01; 0,033; 0,066; 0,1; 0,3 e 1,5 MPa, utilizando mesa de tensão (0,006 MPa) e câmara de Richards para as demais tensões, conforme Klute (1986). Macroporos foram estimados como a diferença entre o conteúdo de água no solo saturado e o conteúdo de água no solo após a aplicação da tensão de 0,006 MPa, como proposto em Embrapa (1997).

Quando as amostras atingiram o equilíbrio nas referidas tensões, estas foram levadas para o consolidômetro automático, modelo CNTA-IHM/BR-001/07, para o ensaio de compressão uniaxial de acordo com Bowles (1986) e modificado por Dias Junior (1994). As pressões crescentes aplicadas a cada amostra foram: 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1.600 kPa, sendo cada uma aplicada até que 90% da deformação máxima fosse alcançada (TAYLOR, 1948). Após cada ensaio de compressão uniaxial, as amostras foram levadas à estufa a 105-110 °C, por 48 horas, para determinar a umidade volumétrica e a densidade do solo pelo método do anel volumétrico, conforme Embrapa (1997).

A curva de compressão do solo foi obtida colocando-se as pressões aplicadas no eixo das abscissas versus a densidade do solo obtida ao final de cada estágio de aplicação de cada pressão, no eixo das ordenadas, sendo determinada a

pressão de preconsolidação (σ_p) para cada amostra, utilizando-se o método proposto por Dias Junior e Pierce (1995). A seguir, as pressões de preconsolidação (σ_p) com os valores de umidade volumétrica (θ) foram ajustadas por meio do programa computacional Statistica 7.0 (STATSOFT, 2007), a uma regressão exponencial decrescente do tipo [$\sigma_p = 10^{(a+b\theta)}$], proposto por Dias Junior (1994), determinando-se os modelos de capacidade de suporte de carga do solo (CSC). As letras “a” e “b” representam os parâmetros empíricos de ajuste do modelo, ou seja, o coeficiente linear e angular, respectivamente.

As comparações entre os modelos foram feitas utilizando o teste de homogeneidade de modelos lineares descrito em Snedecor e Cochran (1989). Para obtenção dos modelos lineares a partir do modelo exponencial [$\sigma_p = 10^{(a+b\theta)}$], aplicou-se o logaritmo nos valores de pressão de preconsolidação, resultando em uma equação do tipo $\log \sigma_p = a + b\theta$. O teste de homogeneidade de modelos lineares considera dois modelos, e estes são comparados pela análise do intercepto “a”, do coeficiente angular “b” e homogeneidade dos dados (F).

Os resultados das análises de macroporosidade e densidade do solo foram submetidos à análise de variância, e quando significativa foi aplicado o teste de Scott-Knott com 5% de probabilidade para a comparação de médias, utilizando o aplicativo computacional Assistat 7.6 (SILVA e AZEVEDO, 2002).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na camada de 0-5 cm, os menores valores de densidade do solo e maiores de macroporosidade foram observados nas sucessões soja/milho, soja/cártamo, soja/crambe, soja/níger e milho/níger, enquanto os maiores valores de densidade do solo e menores de macroporosidade foram encontradas nas sucessões milho/cártamo e milho/crambe (Quadro 1). Na profundidade de 5-10 cm foram verificadas menores alterações na densidade do solo devido às sucessões de culturas, onde apenas a cultura do níger em sucessão a soja e ao milho apresentou menor valor de densidade do solo comparado às demais sucessões estudadas (Quadro 1). Nessa camada a macroporosidade foi maior na sucessão milho/níger e intermediária na sucessão soja/níger (Quadro 1).

QUADRO 1. Densidade do solo e macroporosidade em duas profundidades de um Latossolo Vermelho distroférico, submetido a diferentes sucessões de culturas

Sucessões de culturas	Profundidades (cm)			
	0-5	5-10	0-5	5-10
(Ver/Out-In)	Densidade do solo (Mg m^{-3}) ⁽¹⁾		Macroporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) ⁽²⁾	
Soja/Milho	1,26 c	1,43 a	0,19 a	0,09 c
Soja/Girassol	1,31 b	1,45 a	0,14 b	0,10 c
Soja/Canola	1,31 b	1,46 a	0,15 b	0,08 c
Soja/Cártamo	1,27 c	1,45 a	0,18 a	0,09 c
Soja/Crambe	1,28 c	1,46 a	0,18 a	0,08 c
Soja/Níger	1,25 c	1,38 b	0,20 a	0,12 b
Milho/Girassol	1,31 b	1,49 a	0,14 b	0,09 c
Milho/Canola	1,32 b	1,49 a	0,14 b	0,09 c
Milho/Cártamo	1,36 a	1,48 a	0,10 c	0,08 c
Milho/Crambe	1,36 a	1,48 a	0,12 c	0,08 c
Milho/Níger	1,25 c	1,36 b	0,19 a	0,14 a
CV (%)	1,97	2,25	9,75	10,25

Ver/Out-In: cultivo de verão/outono-inverno. ⁽¹⁾ Média de 28 repetições. ⁽²⁾ Média de 12 repetições. Médias na coluna, seguidas de mesma letra, não diferem pelo teste de Scott-Knott a 5%.

Isso pode estar relacionado à ocorrência de uma provável compactação na camada de 5-10 cm, tornando o solo bem estruturado e proporcionando maior capacidade de suporte carga (ARAÚJO-JUNIOR et al., 2008; SOUZA et al., 2012), reduzindo as diferenças das alterações que as sucessões de culturas proporcionam no solo. Esse resultado pode estar associado ao desenvolvimento do sistema radicular das

culturas, que principalmente em sistema de plantio direto apresenta maior concentração de raízes na camada superficial do solo (0-5 cm), alterando de maneira mais efetiva a estrutura do solo, como também observado por Collares et al. (2006) e Bergamin et al. (2010a).

Nas duas profundidades (0-5 e 5-10 cm) a cultura do níger em sucessão a soja e ao milho apresentou o menor valor de densidade do solo e maior de macroporosidade, mostrando que essa cultura tem potencial para melhorar o ambiente físico do solo. Carneiro et al. (2008) observaram que a cultura do níger produziu quantidade satisfatória de fitomassa ($> 14 \text{ Mg ha}^{-1}$) e promoveu aumentos da atividade microbiana do solo, melhorando sua estrutura. Para Araujo-Junior et al. (2011), a manutenção de culturas que proporcionem maior aporte de resíduos orgânicos para o solo, favorecem a diminuição dos valores de densidade do solo.

Apenas nas sucessões que utilizaram a cultura do níger, os valores de macroporosidade na camada de 5-10 cm (Quadro 1) foram acima do valor considerado crítico às plantas que é $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (PAGLIAI et al., 2003), indicando que, nas demais sucessões podem estar ocorrendo prováveis limitações ao arejamento do solo, principalmente em épocas mais úmidas, conforme relatado por Collares et al. (2008). Feng et al. (2002) citam que esse valor para solos argilosos já causa inibição ao suprimento adequado de oxigênio às plantas, sendo necessários valores mais altos que $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de porosidade de aeração. Além de proporcionar aeração no solo, a macroporosidade tem papel importante no crescimento do sistema radicular das plantas, pois as raízes crescem pelos espaços dos macroporos como relatado por Servadio et al. (2005), Bergamin et al. (2010a) e Bergamin et al. (2010b).

Todas as curvas ajustadas dos modelos de CSC apresentaram coeficientes de determinação (R^2) significativos a 1 % pelo teste F e variaram de 0,76 a 0,94 (Quadro 2). O intervalo de confiança dos coeficientes do ajuste dos modelos de CSC não inclui o valor igual a zero, possibilitando afirmar que estes foram estatisticamente significativos ($p < 0,01$) (Quadro 2), como descrito por Blainski et al. (2009) e Blainski et al. (2012).

Os menores valores do coeficiente linear “a” encontrados para as sucessões soja/cártamo e milho/níger na profundidade de 0-5 cm podem estar associados ao menor empacotamento das partículas sólidas do solo, representados pelos menores valores de densidade do solo, como observado para essas sucessões nessa profundidade (Quadro

1), indicando menor grau de compactação inicial, como também relatado por Araujo-Junior et al. (2011).

QUADRO 2. Estimativas dos coeficientes “a” e “b” dos modelos de capacidade de suporte de carga do solo [$\sigma_p = 10^{(a+b\theta)}$], com respectivos coeficientes de determinação (R^2) e número de amostras (n), coletadas em duas profundidades de um Latossolo Vermelho distroférico, submetido a diferentes sucessões de culturas

Sucessões de culturas	a			b			R^2	n
	Valor estimado	Intervalo de confiança		Valor estimado	Intervalo de confiança			
		Li	Ls		Li	Ls		
(Ver/Out-In)	..... 0 - 5 cm							
Soja/Milho	3,34	3,23	3,46	-1,99	-2,34	-1,64	0,85**	28
Soja/Girassol	3,62	3,46	3,78	-2,57	-3,05	-2,10	0,85**	28
Soja/Canola	3,20	3,15	3,25	-1,57	-1,73	-1,41	0,94**	28
Soja/Cártamo	3,02	2,92	3,12	-1,25	-1,54	-0,96	0,77**	28
Soja/Crambe	3,55	3,44	3,66	-2,52	-2,85	-2,19	0,91**	28
Soja/Níger	3,31	3,22	3,40	-2,13	-2,41	-1,84	0,91**	28
Milho/Girassol	3,42	3,28	3,56	-2,10	-2,53	-1,66	0,83**	28
Milho/Canola	3,28	3,19	3,36	-1,68	-1,93	-1,44	0,89**	28
Milho/Cártamo	3,32	3,25	3,39	-1,52	-1,72	-1,32	0,91**	28
Milho/Crambe	3,40	3,31	3,50	-1,92	-2,18	-1,65	0,90**	28
Milho/Níger	3,12	3,02	3,22	-1,58	-1,90	-1,26	0,81**	28
	..... 5 - 10 cm							
Soja/Milho	3,50	3,40	3,60	-1,97	-2,25	-1,69	0,90**	28
Soja/Girassol	3,81	3,68	3,94	-2,81	-3,18	-2,43	0,92**	28
Soja/Canola	3,57	3,43	3,71	-2,13	-2,51	-1,74	0,85**	28
Soja/Cártamo	3,70	3,53	3,87	-2,48	-2,95	-2,02	0,85**	28
Soja/Crambe	3,60	3,42	3,78	-2,24	-2,74	-1,73	0,78**	28
Soja/Níger	3,68	3,52	3,83	-2,78	-3,24	-2,33	0,88**	28
Milho/Girassol	4,09	3,90	4,29	-3,55	-4,08	-3,01	0,90**	28
Milho/Canola	4,05	3,91	4,20	-3,39	-3,79	-2,99	0,94**	28
Milho/Cártamo	3,97	3,80	4,13	-3,15	-3,59	-2,70	0,91**	28
Milho/Crambe	3,51	3,34	3,68	-1,91	-2,37	-1,46	0,76**	28
Milho/Níger	3,65	3,47	3,83	-2,70	-3,23	-2,18	0,83**	28

Ver/Out-In: cultivo de verão/outono-inverno; Li e Ls: limite inferior e superior do intervalo de confiança 95%, respectivamente; **: significativo pelo teste “F” a 1%.

Por outro lado, os maiores valores do parâmetro “a” foram encontrados para as sucessões milho/girassol e milho/canola na profundidade de 5-10 cm, manejo que proporcionou valores de densidade do solo semelhantes às demais sucessões de culturas, exceto soja/níger e milho/níger nessa profundidade (Quadro 2). Para Araujo-Junior et al. (2011), a densidade do solo influencia ambos os coeficientes dos modelos

de CSC. Observou-se que os modelos de CSC quando apresentaram menor diferença entre os valores do coeficiente linear e angular, ocorreu uma menor amplitude da σ_p durante as variações da umidade do solo ou menor inclinação das curvas dos modelos de CSC (Figuras 1 e 2), como também observado por Pacheco e Cantalice (2011).

Para avaliar as possíveis alterações da estrutura do solo causadas pelas diferentes sucessões de culturas com oleaginosas a da sucessão soja/milho, os modelos de CSC foram comparados utilizando o teste de homogeneidade de modelos lineares (SNEDECOR e COCHRAN, 1989) nas diferentes profundidades, dentro de cada sucessão (Quadro 3). Os modelos de CSC para as profundidades de 0-5 e 5-10 cm foram não homogêneos; em razão disso, essas profundidades apresentaram CSC diferentes (Quadro 3).

QUADRO 3. Teste de significância de acordo com Snedecor e Cochran (1989) entre os modelos de capacidade de suporte de carga [$\sigma_p = 10^{(a+b\theta)}$] das profundidades de 0-5 e 5-10 cm de um Latossolo Vermelho distroférrico, para as diferentes sucessões de culturas

Sucessões de culturas (Ver/Out-In)	Profundidades (cm)	F	F	
			Coeficiente angular, b	Coeficiente linear, a
Soja/Milho	0-5 x 5-10	NH	ns	**
Soja/Girassol	0-5 x 5-10	NH	ns	**
Soja/Canola	0-5 x 5-10	NH	**	**
Soja/Cártamo	0-5 x 5-10	NH	**	**
Soja/Crambe	0-5 x 5-10	NH	ns	**
Soja/Níger	0-5 x 5-10	NH	**	**
Milho/Girassol	0-5 x 5-10	NH	**	**
Milho/Canola	0-5 x 5-10	NH	**	**
Milho/Cártamo	0-5 x 5-10	NH	**	ns
Milho/Crambe	0-5 x 5-10	NH	ns	**
Milho/Níger	0-5 x 5-10	NH	**	**

Ver/Out-In: cultivo de verão/outono-inverno; F: testa a homogeneidade dos dados; b: coeficiente angular da regressão linearizada; a: intercepto da regressão linearizada; H: homogêneo; NH: não homogêneo; ns: não significativo; * e ** significativo a 1 e 5 %, respectivamente.

Esse resultado deve-se provavelmente à maior densidade inicial do solo e menor macroporosidade na camada de 5-10 cm (Quadro 1). Maiores densidades aumentam a aproximação das partículas sólidas e o atrito interno entre as partículas, aumentando os valores de compressibilidade do solo (ARAÚJO-JUNIOR et al., 2011; PACHECO e CANTALICE, 2011; SOUZA et al., 2012). Para Araujo-Junior et al. (2011) na camada mais superficial do solo há maior conteúdo de carbono orgânico no

solo que proporciona maior elasticidade ao solo. Para os autores, com a liberação das tensões, o solo com maior conteúdo de carbono orgânico tende a ter maior resiliência ou recuperação da estrutura, refletindo em menor resistência mecânica avaliada pelos modelos de CSC.

Os modelos de CSC para as sucessões milho/girassol e milho/canola na profundidade de 0-5 cm não se diferenciaram estatisticamente (Quadro 4), sendo, portanto, uma única equação ajustada a todos os valores de σ_p e θ , obtendo-se assim um único modelo de CSC para essas sucessões de culturas (Figura 1). As comparações entre os modelos de CSC das demais sucessões de culturas nas duas profundidades apresentaram diferenças significativas pelo teste F, não realizando mais nenhum agrupamento (Quadro 4 e 5).

QUADRO 4. Teste de significância de acordo com Snedecor e Cochran (1989) entre os modelos de capacidade de suporte de carga [$\sigma_p = 10^{(a+b\theta)}$] de um Latossolo Vermelho distroférico, na profundidade de 0-5 cm, para as diferentes sucessões de culturas

Sucessões de culturas (Ver/Out-In)	F	F	
		Coefficiente angular, b	Coefficiente linear, a
Milho/Girassol vs Milho/Canola	H	ns	ns
Milho/Girassol e Milho/Canola vs Milho/Cártamo	H	*	**
Milho/Girassol e Milho/Canola vs Milho/Crambe	NH	ns	**
Milho/Girassol e Milho/Canola vs Milho/Níger	NH	ns	**
Milho/Cártamo vs Milho/Crambe	NH	ns	**
Milho/Cártamo vs Milho/Níger	NH	ns	**
Milho/Crambe vs Milho/Níger	NH	ns	**
Soja/Milho vs Soja/Girassol	NH	*	**
Soja/Milho vs Soja/Canola	H	*	ns
Soja/Milho vs Soja/Cártamo	NH	**	**
Soja/Milho vs Soja/Crambe	NH	**	ns
Soja/Milho vs Soja/Níger	NH	ns	**
Soja/Milho vs Milho/Girassol e Milho/Canola	NH	ns	**
Soja/Milho vs Milho/Cártamo	NH	ns	**
Soja/Milho vs Milho/Crambe	NH	ns	**
Soja/Milho vs Milho/Níger	NH	ns	**
Soja/Girassol vs Soja/Canola	H	**	**
Soja/Girassol vs Soja/Cártamo	NH	**	**
Soja/Girassol vs Soja/Crambe	NH	ns	**
Soja/Girassol vs Soja/Níger	NH	ns	**
Soja/Girassol vs Milho/Girassol e Milho/Canola	NH	*	*
Soja/Girassol vs Milho/Cártamo	H	**	**
Soja/Girassol vs Milho/Níger	NH	**	**

Continua...

QUADRO 4. Continuação

Sucessões de culturas (Ver/Out-In)	F	F	
		Coefficiente angular, b	Coefficiente linear, a
Soja/Canola vs Soja/Cártamo	NH	ns	**
Soja/Canola vs Soja/Crambe	NH	**	ns
Soja/Canola vs Soja/Níger	NH	**	**
Soja/Canola vs Milho/Girassol e Milho/Canola	H	*	*
Soja/Canola vs Milho/Cártamo	NH	ns	**
Soja/Canola vs Milho/Crambe	NH	*	**
Soja/Canola vs Milho/Níger	NH	ns	**
Soja/Cártamo vs Soja/Crambe	NH	**	**
Soja/Cártamo vs Soja/Níger	NH	**	ns
Soja/Cártamo vs Milho/Girassol e Milho/Canola	NH	**	**
Soja/Cártamo vs Milho/Cártamo	NH	ns	**
Soja/Cártamo vs Milho/Crambe	NH	**	**
Soja/Cártamo vs Milho/Níger	NH	ns	ns
Soja/Crambe vs Soja/Níger	NH	*	**
Soja/Crambe vs Milho/Girassol e Milho/Canola	NH	**	*
Soja/Crambe vs Milho/Cártamo	NH	**	**
Soja/Crambe vs Milho/Crambe	NH	**	**
Soja/Crambe vs Milho/Níger	NH	**	**
Soja/Níger vs Milho/Girassol e Milho/Canola	NH	ns	**
Soja/Níger vs Milho/Cártamo	NH	**	**
Soja/Níger vs Milho/Crambe	NH	ns	**
Soja/Níger vs Milho/Níger	NH	*	ns

Ver/Out-In: cultivo de verão/outono-inverno; F: testa a homogeneidade dos dados; b: coeficiente angular da regressão linearizada; a: intercepto da regressão linearizada; H: homogêneo; NH: não homogêneo; ns: não significativo; * e ** significativo a 1 e 5 %, respectivamente.

QUADRO 5. Teste de significância de acordo com Snedecor e Cochran (1989) entre os modelos de capacidade de suporte de carga [$\sigma_p = 10^{(a+b^0)}$] de um Latossolo Vermelho distroférrico, na profundidade de 5-10 cm, para as diferentes sucessões de culturas

Sucessões de culturas (Ver/Out-In)	F	F	
		Coefficiente angular, b	Coefficiente linear, a
Soja/Milho vs Soja/Girassol	NH	**	ns
Soja/Milho vs Soja/Canola	NH	ns	ns
Soja/Milho vs Soja/Cártamo	NH	ns	ns
Soja/Milho vs Soja/Crambe	NH	*	ns
Soja/Milho vs Soja/Níger	NH	**	**
Soja/Milho vs Milho/Girassol	NH	**	ns
Soja/Milho vs Milho/Canola	NH	**	ns
Soja/Milho vs Milho/Cártamo	NH	**	ns
Soja/Milho vs Milho/Crambe	NH	ns	*
Soja/Milho vs Milho/Níger	NH	**	**
Soja/Girassol vs Soja/Canola	NH	*	ns

Continua...

QUADRO 5. Continuação

Sucessões de culturas (Ver/Out-In)	F	F	
		Coefficiente angular, b	Coefficiente linear, a
Soja/Girassol vs Soja/Cártamo	NH	ns	ns
Soja/Girassol vs Soja/Crambe	NH	ns	ns
Soja/Girassol vs Soja/Níger	NH	ns	**
Soja/Girassol vs Milho/Girassol	NH	**	ns
Soja/Girassol vs Milho/Canola	NH	**	ns
Soja/Girassol vs Milho/Cártamo	NH	ns	*
Soja/Girassol vs Milho/Crambe	NH	**	**
Soja/Girassol vs Milho/Níger	NH	ns	**
Soja/Canola vs Soja/Cártamo	NH	ns	ns
Soja/Canola vs Soja/Crambe	NH	ns	ns
Soja/Canola vs Soja/Níger	NH	ns	**
Soja/Canola vs Milho/Girassol	NH	**	ns
Soja/Canola vs Milho/Canola	NH	**	ns
Soja/Canola vs Milho/Cártamo	NH	**	ns
Soja/Canola vs Milho/Crambe	NH	ns	ns
Soja/Canola vs Milho/Níger	NH	ns	**
Soja/Cártamo vs Soja/Crambe	NH	ns	ns
Soja/Cártamo vs Soja/Níger	NH	ns	**
Soja/Cártamo vs Milho/Girassol	NH	**	ns
Soja/Cártamo vs Milho/Canola	NH	**	ns
Soja/Cártamo vs Milho/Cártamo	NH	**	ns
Soja/Cártamo vs Milho/Crambe	NH	ns	ns
Soja/Cártamo vs Milho/Níger	NH	ns	**
Soja/Crambe vs Soja/Níger	NH	ns	**
Soja/Crambe vs Milho/Girassol	NH	**	ns
Soja/Crambe vs Milho/Canola	NH	**	ns
Soja/Crambe vs Milho/Cártamo	NH	*	ns
Soja/Crambe vs Milho/Crambe	NH	ns	*
Soja/Crambe vs Milho/Níger	NH	ns	**
Soja/Níger vs Milho/Girassol	NH	**	**
Soja/Níger vs Milho/Canola	NH	**	**
Soja/Níger vs Milho/Cártamo	NH	ns	**
Soja/Níger vs Milho/Crambe	NH	*	**
Soja/Níger vs Milho/Níger	NH	ns	ns
Milho/Girassol vs Milho/Canola	NH	ns	ns
Milho/Girassol vs Milho/Cártamo	NH	*	*
Milho/Girassol e Milho/Crambe	NH	**	**
Milho/Girassol e Milho/Níger	NH	**	**
Milho/Canola e Milho/Cártamo	NH	ns	ns
Milho/Canola e Milho/Crambe	NH	**	ns
Milho/Canola e Milho/Níger	NH	*	**
Milho/Cártamo vs Milho/Crambe	NH	**	ns
Milho/Cártamo vs Milho/Níger	NH	ns	**
Milho/Crambe vs Milho/Níger	NH	*	**

Ver/Out-In: cultivo de verão/outono-inverno; F: testa a homogeneidade dos dados; b: coeficiente angular da regressão linearizada; a: intercepto da regressão linearizada; H: homogêneo; NH: não homogêneo; ns: não significativo; * e ** significativo a 1 e 5 %, respectivamente.

Em todos os modelos de CSC das sucessões de culturas estudadas, observou-se que a σ_p variou significativa e inversamente com a θ (Figuras 1 e 2). A σ_p do solo tornou-se maior à medida que o solo fica mais seco, isso acontece porque a água atua de duas formas sobre a resistência do solo ao cisalhamento: diminui a coesão entre as partículas sólidas; e forma filmes sobre as partículas sólidas, reduzindo o atrito entre elas (PACHECO e CANTALICE, 2011). Houve um decréscimo exponencial da σ_p com o aumento da θ (Figuras 1 e 2). Essa dinâmica na compressibilidade do solo também foi descrita por Dias Junior (1994), Debiase et al. (2008), Araujo-Junior et al. (2011), Pais et al. (2011), Pires et al. (2012) e Souza et al. (2012).

De maneira geral, observou-se que a CSC do solo na profundidade de 0-5 cm segue a ordem: milho/cártamo > milho/crambe > soja/girassol > milho/girassol = milho/canola > soja/crambe > soja/milho > soja/canola > soja/cártamo > soja/níger > milho/níger (Figura 1). Observou-se maior CSC para o solo sob as sucessões milho/cártamo e milho/crambe ao longo de todo o intervalo de umidade (Figura 1). A obtenção de distintos modelos de CSC devem-se provavelmente às diferentes densidades do solo encontradas em cada sucessão de cultura (Quadro 1), o que promoveu maior aproximação das partículas, diminuindo a macroporosidade (Quadro 1) e aumentando a CSC. Esse aumento na CSC do solo com o aumento da densidade inicial do solo também foi relatado por Araujo-Junior et al. (2011), Pacheco e Cantalice (2011) e Souza et al. (2012).

Na camada de 0-5 cm, comparando os modelos de CSC das culturas oleaginosas anuais de outono-inverno em sucessão à soja e ao milho (verão) com o modelo de CSC da sucessão mais praticada na região (soja/milho), observa-se que as sucessões milho/cártamo, milho/crambe, soja/girassol, milho/girassol+milho/canola e soja/crambe apresentaram maiores CSC (Figura 1). Isso contribuiu para que a suscetibilidade do solo à compactação seja diminuída; contudo, elevadas densidades também podem limitar o crescimento radicular das plantas (SUZUKI et al., 2008; BERGAMIN et al., 2010a; BERGAMIN et al., 2010b).

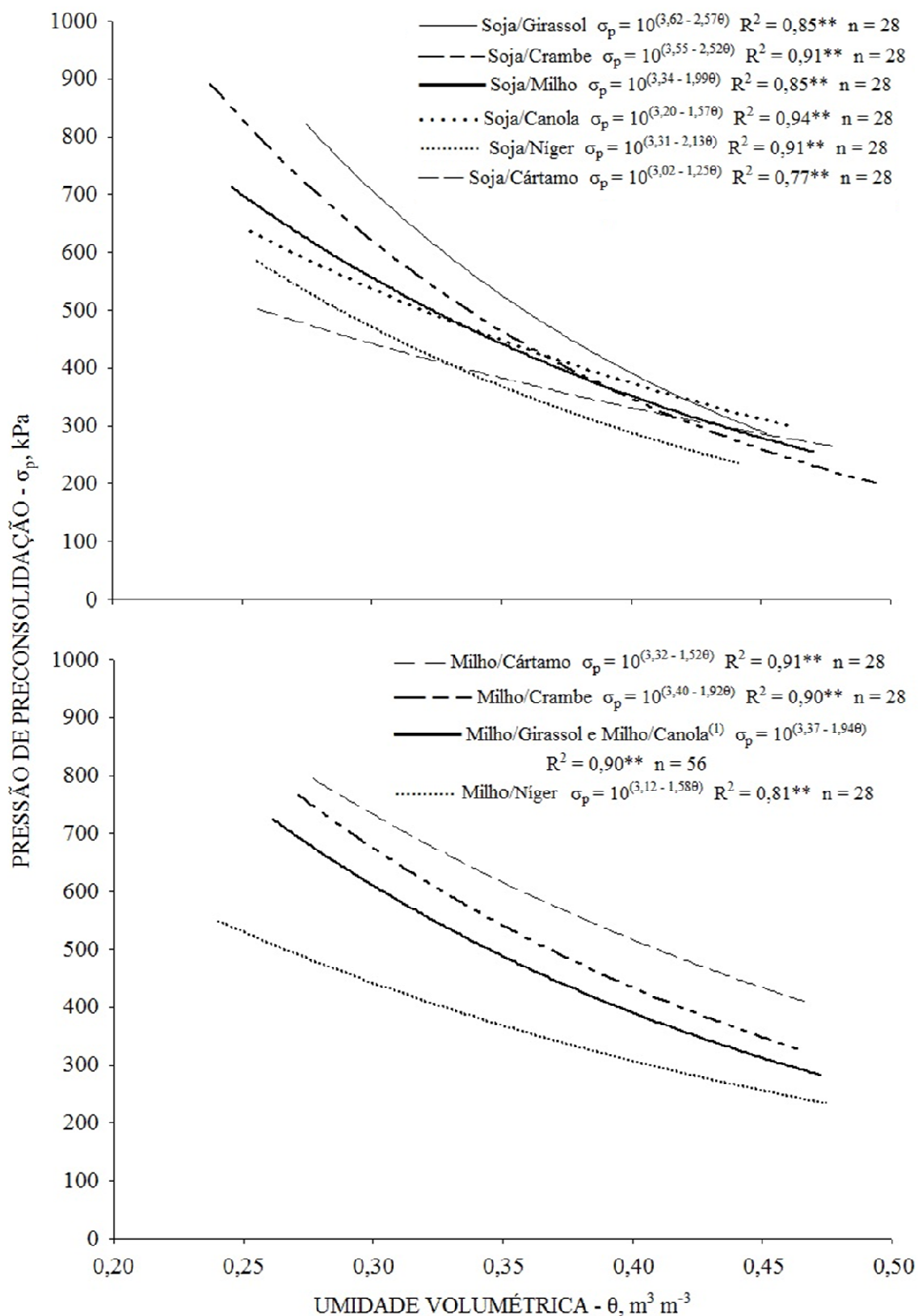


FIGURA 1. Modelos de capacidade de suporte de carga para um Latossolo Vermelho distroférico, na profundidade de 0-5 cm, cultivado com diferentes sucessões de culturas. ⁽¹⁾ Modelos não se diferenciaram estatisticamente pelo teste de Snedecor e Cochran (1989), sendo, uma única equação ajustada.

Do ponto de vista prático, visando condições de sustentabilidade da estrutura do solo, o monitoramento da umidade do solo, a tentativa de realização das atividades mecanizadas em condição de umidade inferior à limitante, indicada no modelo de CSC é eficiente em reduzir o risco de compactação causado pelo tráfego de máquinas (SOUZA et al., 2012).

Por exemplo, um pulverizador autopropelido (4x2) utilizado em operações agrícolas exerce em uma passada uma pressão de 452 kPa sobre a superfície do solo (SILVA et al., 2006), assim essa máquina deve trafegar no solo em condição de umidade inferior a 0,29; 0,29; 0,31; 0,34; 0,34; 0,36; 0,37; 0,38; 0,39 e 0,44 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ na sucessão milho/níger, soja/cártamo, soja/níger, soja/canola, soja/milho, soja/crambe, milho/girassol = milho/canola, soja/girassol, milho/crambe e milho/cártamo, respectivamente (Figura 1), para não causar compactação adicional na camada de 0-5 cm de profundidade. Assim, a mecanização dos tratos culturais deve ser realizada obedecendo a esses dados, para evitar a degradação estrutural do solo, especialmente quando se considera que a passagem da máquina pode ocorrer por mais de uma vez.

Observou-se nos modelos de CSC nas profundidades de 0-5 (Figura 1) e 5-10 cm (Figura 2), que em umidades no solo mais elevadas, as diferenças entre as sucessões de culturas nos valores de σ_p foram menores, no entanto, observa-se maior diferença entre as sucessões para umidades mais baixas, corroborando Pacheco e Cantalice (2011). Braida (2004), estudando um Argissolo de textura média, observou que sob maiores teores de água, as diferenças na σ_p entre amostras com maior e menor densidade diminuem. Para o mesmo autor, as partículas sólidas são recobertas pela água, que reduz o efeito do maior atrito entre as mesmas em solo mais denso, aproximando assim os valores da σ_p entre os tratamentos, como observado nesse trabalho com as diferentes sucessões de culturas.

Na profundidade de 5-10 cm houve aumento na CSC do solo em relação à profundidade de 0-5 cm em todas as sucessões de culturas e com isso aumentaram os valores de umidade volumétrica crítica para o tráfego (Figura 2). No entanto, não foi estabelecido valores de umidade crítica para as sucessões de culturas na camada de 5-10 cm, pois se deve considerar a camada menos resistente à compactação para que o tráfego de máquinas seja realizado, como também descrito por Araujo-Junior et al. (2011).

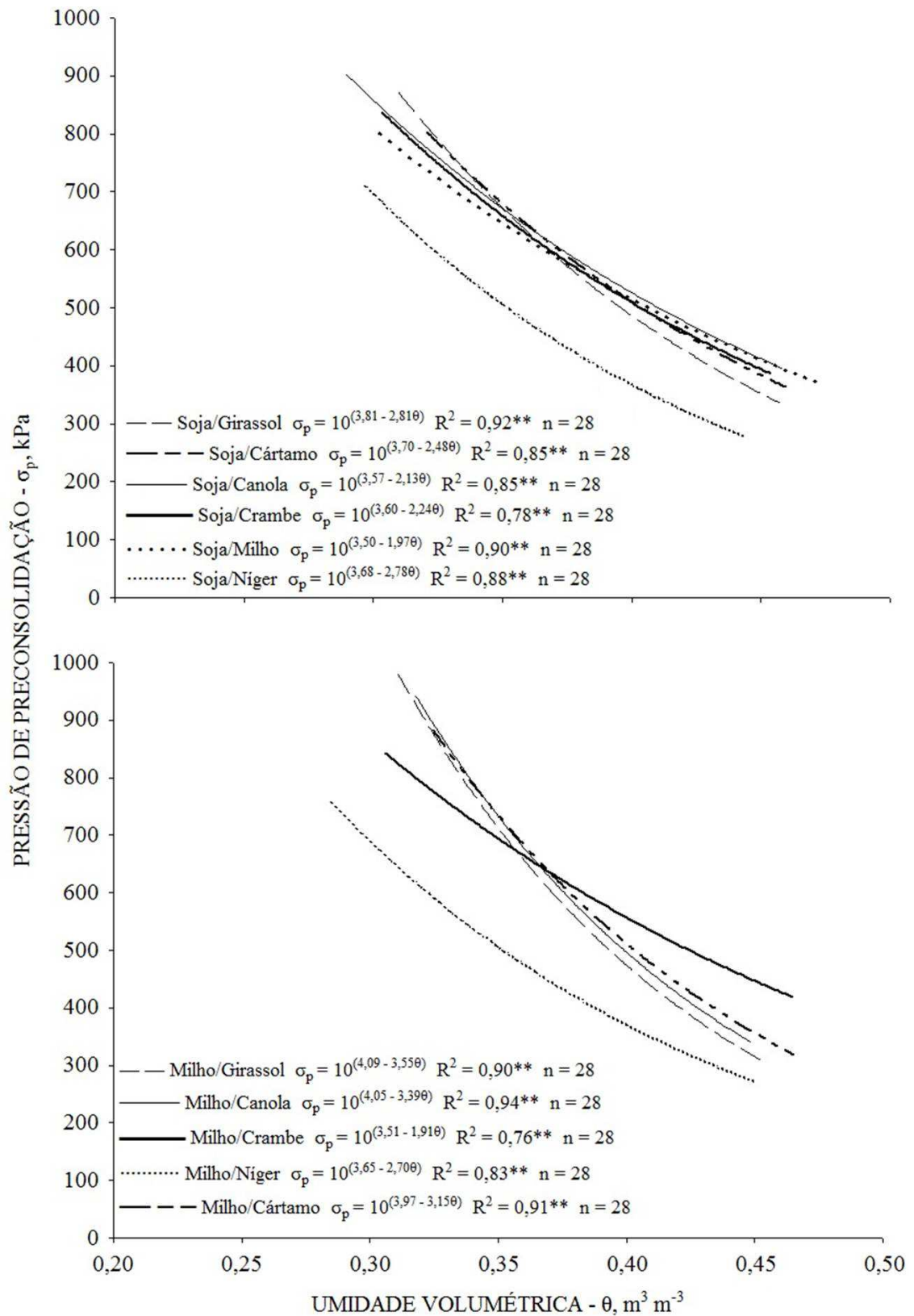


FIGURA 2. Modelos de capacidade de suporte de carga para um Latossolo Vermelho distroférico, na profundidade de 5-10 cm, cultivado com diferentes sucessões de culturas.

Devido ao modelo de CSC da sucessão milho/crambe na profundidade de 5-10 cm, a discussão dos resultados de pressão de preconsolidação foi dividida em duas regiões, uma antes e outra após a umidade volumétrica de $0,37 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, valor onde ocorreu a inversão na CSC dessa sucessão, comparado aos demais modelos. Com umidade volumétrica abaixo de $0,37 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, os modelos de CSC seguiram a ordem: milho/canola > milho/cártamo > milho/girassol > soja/girassol > soja/cártamo > milho/crambe > soja/canola > soja/crambe > soja/milho > milho/níger > soja/níger (Figura 2), enquanto para valores de umidade volumétrica superiores a $0,37 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, observou-se que a sucessão milho/crambe apresentou a maior CSC do solo, enquanto as demais sucessões, exceto as que apresentaram a cultura do níger, obtiveram valores de σ_p bastante próximos (Figura 2).

As menores CSC do solo ao longo de todo o intervalo de umidade volumétrica foram obtidas pelas sucessões soja/níger e milho/níger. Esse resultado deve-se à menor densidade inicial do solo nessas sucessões de culturas (Quadro 1), que leva ao aumento na proporção de macroporos do solo (Quadro 1), reduzindo a CSC do solo. Essa redução na CSC do solo com o aumento da macroporosidade também foi relatado por Rucknagel et al. (2007), Debiasi et al. (2008) e Severiano et al. (2011).

Comparando os modelos de CSC das culturas oleaginosas em sucessão à soja e ao milho verão com o modelo de CSC da sucessão mais praticada na região (soja/milho), observou-se que apenas as sucessões milho/níger e soja/níger apresentaram menores CSC do solo (Figura 2). Essas sucessões com a cultura do níger reduziram a densidade do solo, que promoveu aumento da macroporosidade (Quadro 1) e reduziu a compactação, tornando o solo mais suscetível à compressão; contudo, melhorou a qualidade física do solo.

Possivelmente esse resultado esteja relacionado à presença do sistema radicular da cultura atuando na redução da resistência mecânica do solo e também pelo aporte de material orgânico ao solo. Carneiro et al. (2008) observaram elevado aporte de material vegetal do níger ($> 14 \text{ Mg ha}^{-1}$), incrementando a atividade microbiana do solo e conseqüentemente melhorando sua estrutura. Para Souza et al. (2008) a cultura do níger apresenta os requisitos de uma espécie de cobertura do solo, pois produz uma quantidade de fitomassa superior a 6 Mg ha^{-1} e acumula mais de 100 kg de nitrogênio por hectare. Essa manutenção de culturas que proporcionem maior aporte de resíduos orgânicos para o solo favorece a redução da densidade do solo (ARAUJO-JUNIOR et al., 2011).

Lima et al. (2012) citam que o desenvolvimento do sistema radicular proporciona o rompimento de camadas compactadas com conseqüente maior volume explorado de solo e melhor aproveitamento da água e dos nutrientes. Ao sofrer decomposição, as raízes contribuem para o aporte de carbono no solo, estimulando a atividade de microrganismos, o que contribui para a formação de bioporos e a melhoria estrutural do solo, num ciclo crescente de benefícios, contribuindo para o restabelecimento do potencial produtivo e maior resiliência do solo (VEZZANI e MIELNICZUK, 2011; LIMA et al., 2012), melhorando a qualidade física do solo para as culturas subsequentes (FOLONI et al., 2006).

CONCLUSÕES

1. O cultivo de níger no outono-inverno em sucessão à soja ou milho, aumenta a macroporosidade e diminui a densidade do solo na camada de 0-10 cm, conseqüentemente, nessas sucessões o solo apresenta menor capacidade de suporte de carga.

2. As diferenças entre as sucessões de culturas com relação à pressão de preconsolidação diminuem à medida que a umidade volumétrica do solo aumenta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARANTES, A.M. **Cártamo (*Carthamus tinctorium* L.) produção de biomassa, grãos, óleo e avaliação nutritiva da silagem.** 2011. 34 f. Dissertação (Mestrado em Produção Animal Sustentável) - Instituto de Zootecnia, Nova Odessa-SP.

ARAÚJO-JUNIOR, C.F.; DIAS JUNIOR, M.S.; GUIMARÃES, P.T.G.; PIRES, B.S. Resistência à compactação de um Latossolo cultivado com cafeeiro, sob diferentes sistemas de manejos de plantas invasoras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.25-32, 2008.

ARAÚJO-JUNIOR, C.F.; DIAS JUNIOR, M.S.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALCÂNTARA, E.N. Capacidade de suporte de carga e umidade crítica de um Latossolo induzida por diferentes manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.115-131, 2011.

ARGENTON, J.; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C.; WILDNER, L.P. Comportamento de atributos relacionados com a forma da estrutura de Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo e plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.425-435, 2005.

BERGAMIN, A.C.; VITORINO, A.C.T.; FRANCHINI, J.C.; SOUZA, C.M.A.; SOUZA, F.R. Compactação em um Latossolo Vermelho distroférico e suas relações com o crescimento radicular do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.681-691, 2010a.

BERGAMIN, A.C.; VITORINO, A.C.T.; LEMPP, B.; SOUZA, C.M.A.; SOUZA, F.R. Anatomia radicular de milho em solo compactado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.45, p.299-305, 2010b.

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

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**, v.33, p.273-281, 2009.

BLAINSKI, E.; TORMENA, C.A.; GUIMARÃES, R.M.L.; NANNI, M.R. Qualidade física de um Latossolo sob plantio direto influenciada pela cobertura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.79-87, 2012.

BOWLES, J.E. **Engineering properties of soils and their measurements.** 3 ed. New York: McGraw-Hill, 1986. 218 p.

BRAIDA, J.A. **Acúmulo de resíduos vegetais na superfície e de matéria orgânica no solo e suas implicações no comportamento mecânico do solo sob plantio direto.**

2004. 106 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS.

BRAIDA, J.A.; REICHERT, J.M.; VEIGA, M. & REINERT, D.J. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio de proctor. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.605-614, 2006.

BRAUNACK, M.V.; MCGARRY, D. Traffic control and tillage strategies for harvesting and planting of sugarcane (*Saccharum officinarum*) in Australia. **Soil and Tillage Research**, v.89, p.86-102, 2006.

CARNEIRO, M.A.C.; CORDEIRO, M.A.S.; ASSIS, P.C.R.; MORAES, E.S.; PEREIRA, H.S.; PAULINO, H.B.; SOUZA, E.D. Produção de fitomassa de diferentes espécies de cobertura e suas alterações na atividade microbiana de solo de cerrado. **Bragantia**, v.67, p.455-462, 2008.

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**, v.33, p.147-157, 2009.

CHAMEN, T.; ALAKUKKU, L.; PIRES, S.; SOMMER, C.; SPOOR, G.; TIJINK, F; WEISSKOPF, P. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: A review. Part 2. Equipment and field practices. **Soil and Tillage Research**, v.71, p.1-14, 2003.

COLLARES, G.L.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; KAISER, D.R. Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, p.1663-1674, 2006.

COLLARES, G.L.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; KAISER, D.R. Compactação de um Latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.933-942, 2008.

DEBIASI, H.; LEVIEN, R.; TREIN, C.R.; CONTE, O.; MAZURANA, M. Capacidade de suporte e compressibilidade de um Argissolo, influenciadas pelo tráfego e por plantas de cobertura de inverno. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.2629-2637, 2008. (Número Especial)

DIAS JUNIOR, M.S. **Compression of three soils under longterm tillage and wheel traffic**. 1994. 114 f. Tese (Doctored Crop and Soil Science) - Michigan State University, East Lansing-MI.

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

DIAS JUNIOR, M.S.; PIERCE, F.J. Revisão de literatura: O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.20, p.175-182, 1996.

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

FENG, G.; WU, L.; LETEY, J. Evaluating aeration criteria by simultaneous measurement of oxygen diffusion rate and soil-water regime. **Soil Science**, v.167, p.495-503, 2002.

FOLONI, J.S.S.; LIMA, S.L.; BÜLL, L.T. Crescimento aéreo e radicular da soja e de plantas de cobertura em camadas compactadas de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.49-57, 2006.

GUTH, P.L **Perdas de solo e água por erosão hídrica em sistemas de culturas oleaginosas**. 2010. 83 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS.

HORN, R.; VOSSBRINK, J.; BECKER, S. Modern forestry vehicles and their impacts on soil physical properties. **Soil and Tillage Research**, v.79, p.207-219, 2004.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis - physical and mineralogical methods**. 2 ed. Madison: ASA – SSSA, 1986, p.635-662.

LEBERT, M.; BÖKEN, H.; GLANTE, F. Soil compaction - indicators for assessment of harmful changes to the soil in the context of the German Federal Soil Protection Act. **Journal of Environmental Management**, v.82, p.388-397, 2007.

LIMA, V.M.P.; OLIVEIRA, G.C.; SERAFIM, M.E.; CURI, N.; EVANGELISTA, A.R. Intervalo hídrico ótimo como indicador de melhoria da qualidade estrutural de Latossolo degradado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.71-78, 2012.

LIMA, C.L.R.; SILVA, A.P. Estimativa da capacidade de suporte de carga do solo a partir da avaliação da resistência à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.217-223, 2006.

MIRANDA, E.E.V.; DIAS JUNIOR, M.S.; GUIMARÃES, P.T.G.; PINTO, J.A.O.; ARAÚJO JUNIOR, C.F. ; LASMAR JUNIOR, E. Efeito do manejo e do tráfego nos modelos de sustentabilidade da estrutura de um Latossolo Vermelho cultivado com cafeeiros. **Ciência e Agrotecnologia**, p.1506-1515, 2003. (Edição especial)

OLIVEIRA, G.C.; DIAS JR., M.S.; RESCK, D.V.S.; CURI, N. Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.327-336, 2004.

PACHECO, E.P.; CANTALICE, J.R.B. Compressibilidade, resistência a penetração e intervalo hídrico ótimo de um Argissolo Amarelo cultivado com cana-de-açúcar nos tabuleiros costeiros de alagoas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.403-415, 2011.

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**, v.73, p.119–129, 2003.

PAIS, P.S.M.; DIAS JUNIOR, M.S.; SANTOS, G.A.; DIAS, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALCÂNTARA, E.N. Compactação causada pelo manejo de plantas invasoras em Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado com cafeeiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.1949-1957, 2011.

PEIXOTO, P.P.P. **Bases para aproveitamento e gerenciamento de recursos hídricos na região de Dourados-MS**. 2002. 98 f. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu-SP.

PIRES, B.S.; DIAS JUNIOR, M.S.; ROCHA, W.W.; ARAUJO JUNIOR, C.F.; CARVALHO, R.C.R. Modelos de capacidade de suporte de carga de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.635-642, 2012

RAPER, R.L. Agricultural traffic impacts on soil. **Journal of Terramechanics**, v.42, p.259–280, 2005.

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**, v.92, p.213-220, 2007.

SANTOS, G.A. **Capacidade de suporte de carga de um Latossolo cultivado com cafeeiros sob métodos associados de controle de plantas daninhas**. 2006. 115 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG.

SANTOS, G.A.; DIAS JUNIOR, M.S.; GUIMARÃES, P.T.G.; PAIS, P.S.M. Suscetibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Amarelo submetido a diferentes métodos de controle de plantas invasoras na cultura cafeeira. **Coffee Science**, v.5, p.123-136, 2010.

SAFFIH-HDADI, K.; DÉFOSSEZ, P.; RICHARD, G.; CUI, Y.J.; TANG, A.M.; CHAPLAIN, V. A method for predicting soil susceptibility to the compaction of surface layers as a function of water content and bulk density. **Soil and Tillage Research**, v.105, p.96-103, 2009.

SERVADIO, P.; MARSILI, A.; VIGNOZZI, N.; PELLEGRINI, S.; PAGLIAI, M. Effects on some soil qualities in central Italy following the passage of four wheel drive tractor fitted with single and dual tires. **Soil and Tillage Research**, v.84, p.87–100, 2005.

SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G.C.; DIAS JÚNIOR, M.S.; COSTA K.A.P.; SILVA, F.G.; FERREIRA FILHO, S.M. Structural changes in Latosols representative of the Cerrado Region: I - Relationships between soil physical attributes and least limiting water range. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.773-782, 2011.

SILVA, F.A.S.; AZEVEDO, C.A.V. Versão do programa computacional Assistat para o sistema operacional Windows. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.4, p.71-78, 2002.

SILVA, R.B. da; LANÇAS, K.P.; CARDOSO, V.M.F.; MIRANDA, E.E.V. de. Atributos físicos, mecânicos e dinâmicos do solo como indicadores do impacto do cultivo e do tráfego em perímetros irrigados. **Irriga**, v.11, p.384-401, 2006.

SILVA, R.B.; LANÇAS, K.P.; MIRANDA, E.E.V.; SILVA, F.A.M.; BAIIO, 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**, v.103, p.265-270, 2009.

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

SOUZA, E.D.; CARNEIRO, M.A.C.; BANYS, V.L. Fitomassa e acúmulo de nitrogênio, em espécies vegetais de cobertura do solo para um Latossolo Vermelho distroférico de Cerrado. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.30, p.525-531, 2008.

SOUZA, G.S.; SOUZA, Z.M.; SILVA, R.B.; ARAÚJO, F.S.; BARBOSA, R.S. Compressibilidade do solo e sistema radicular da cana-de-açúcar em manejo com e sem controle de tráfego. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v.47, p.603-612, 2012.

STATSOFT. **Statistica (data analysis software system) - version 8.0**. Tulsa: StatSof, 2007.

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

STRECK, C.A.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; KAISER, D.R. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ciência Rural**, v.34, p.755-760, 2004.

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**, v.32, p.963-973, 2008.

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

VEZZANI, F.M.; MIELNICZUK, J. Agregação e estoque de carbono em Argissolo submetido a diferentes práticas de manejo agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.213-223, 2011.

ARTIGO 2

INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO DE UM LATOSSOLO CULTIVADO COM OLEAGINOSAS EM SUCESSÃO A SOJA E MILHO

RESUMO

A qualidade física do solo é um dos fatores determinantes na sustentabilidade agrícola, assim o conhecimento das alterações estruturais do solo oriundas das sucessões de culturas oleaginosas é fundamental para o sucesso da produção. Assim, objetivou-se com este trabalho avaliar a influência da adoção das diferentes sucessões de culturas oleaginosas, sobre o intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférico de textura argilosa. O estudo foi realizado na área da Fazenda Experimental de Ciências Agrárias - UFGD, no município de Dourados, MS, no ano agrícola de 2009/10. O delineamento experimental foi de blocos casualizados, contendo 11 tratamentos, com quatro repetições. As culturas oleaginosas foram cultivadas em sistema plantio direto no outono-inverno, sendo: girassol (*Helianthus annuus* L.), canola (*Brassica napus* L. e *Brassica rapa*), cártamo (*Carthamus tinctorius* L.), crambe (*Crambe abyssinica* Hochst.) e níger (*Guizotia abyssinica*), semeadas em sucessão as culturas da soja e do milho cultivadas no verão, e a sucessão soja/milho (verão/outono-inverno), a mais utilizada na região. No florescimento das culturas de outono-inverno, foram coletadas amostras de solo com estrutura preservada em cilindros metálicos, nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm. As sucessões de culturas alteraram os atributos físicos do solo, exceto a microporosidade, nas duas profundidades avaliadas. De maneira geral, a aeração foi o fator mais limitante ao adequado crescimento das plantas nas duas profundidades. Analisando o intervalo hídrico ótimo em cada sucessão de cultura, na camada de 0-5 cm, observou-se que a menor qualidade estrutural do solo foi proporcionada pelas sucessões milho/cártamo e milho/crambe. O intervalo hídrico ótimo é um indicador de qualidade física dos solos cultivados no outono-inverno com culturas oleaginosas anuais em sucessão à soja e ao milho de verão; podendo ser utilizado para identificar as principais limitações físicas e adotar melhores técnicas de manejo do solo nessas sucessões. A cultura do níger cultivada no outono-inverno tanto em sucessão à cultura da soja quanto do milho de verão proporciona melhor estrutura do Latossolo Vermelho distroférico, em relação às demais sucessões de culturas.

Palavras-chave: resistência do solo à penetração, porosidade de aeração, densidade do solo.

LEAST LIMITING WATER RANGE OF A LATOSOL UNDER OLEAGINOUS CROPS IN SUCCESSION TO SOYBEAN AND MAIZE

ABSTRACT

Soil physical quality is one of the determinative factors for agricultural sustainability, where knowledge of changes in soil structure resulting from the succession of oleaginous crops is essential to the success of the production. This study aimed to evaluate the influence of the adoption of the different successions of oleaginous crops, in the least limiting water range of a clayed Red Latosol (Rhodic Acrustox). The experiment was carried out in field conditions, in Dourados, Mato Grosso do Sul state, Brazil, in a clayed Red Latosol (Rhodic Acrustox), during the agricultural year of 2009/10. A randomized complete block design was used, containing 11 treatments, with four replicates. The oleaginous crops had been cultivated in no-tillage system in the autumn-winter seasons: sunflower (*Helianthus annuus* L.), rapeseed (*Brassica napus* L. e *Brassica rapa* L.), safflower (*Carthamus tinctorius* L.), crambe (*Crambe abyssinica* Hochst.) and to níger (*Guizotia abyssinica* Cass.), sown in succession to the soybean and maize crops in the summer, and the succession of soybean/maize (summer/autumn-winter), most farmed in the region. In the flowering of the cultures of autumn-winter, undisturbed soil samples were collected in metallic cylinders, in depths of 0-5 and 5-10 cm. The crop successions altered the soil physical attributes, except the microporosity, in the two evaluated depths. In a generalized manner, the aeration was the most limiting factor to the growth of the plants in the two depths. Analyzing the least limiting water range in each succession of culture, in the layer of 0-5 cm, it was observed that the lesser soil quality was provided by successions of maize/safflower and maize/crambe. The least limiting water range is an indicator of physical quality of cultivated soil in the autumn-winter with annual oleaginous crops in succession to the soybean and maize in the summer; being able to be used to identify the main physical limitations and how to adopt improved soil management techniques in these successions. The culture of níger in successions to the soybean or maize provides better structure of the clayed Red Latosol, in relation to other crop successions.

Index terms: soil penetration resistance, air filled porosity, soil density.

INTRODUÇÃO

No sentido de reduzir os riscos impostos por condições edafoclimáticas algumas vezes desfavoráveis, bem como por características de mercado dos produtos de maior expressão no cenário regional, os produtores rurais da região Centro-Oeste podem diversificar suas atividades, que para Carneiro et al. (2008) é focada no cultivo da soja no verão e do milho em sucessão, na safrinha. Além disso, a crescente preocupação mundial com as questões ambientais, juntamente com a busca por fontes de energia renováveis, coloca o biodiesel no centro das atenções e interesses (ABDALLA et al., 2008), impulsionando a busca por espécies oleaginosas anuais, produtoras de óleo vegetal, principalmente com época de semeadura no período de outono-inverno. Assim, algumas espécies oleaginosas podem ser inseridas nos sistemas produtivos no outono-inverno, tais como o girassol, canola, crambe, cártamo e níger.

Diferentes sistemas produtivos alteram a estrutura do solo, que por sua vez, interfere em uma série de atributos físicos, químicos e biológicos (SINGH e MALHI, 2006). Assim, para a implantação dessas culturas ainda pouco exploradas, faz-se necessário o conhecimento dos atributos físicos do solo para que se possa manejá-lo e usá-lo de maneira adequada. Pois a intensificação da exploração agrícola, por meio do cultivo de até três safras por ano (ARANTES, 2011), aliada ao uso e manejo inadequado do solo pode provocar a compactação do solo (STONE e SILVEIRA, 2001), aumento da densidade e resistência do solo à penetração, com redução da macroporosidade (COLLARES et al., 2006; BERGAMIN et al., 2010a; BERGAMIN et al., 2010b), conseqüentemente, redução da produtividade das culturas.

O aumento da compactação modifica as curvas características de água no solo e reduz sua condutividade hidráulica, diminuindo a disponibilidade de água às plantas (DEXTER, 2004). Em solos compactados, valores de porosidade de aeração abaixo do nível considerado crítico ($0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), são atingidos principalmente em solos com maiores teores de água (IMHOFF et al., 2001). Tanto a deficiência de oxigênio quanto a elevada resistência do solo à penetração (BEUTLER et al., 2004a) diminuem o crescimento e a efetividade das raízes, impactando negativamente a absorção de nutrientes e água, e conseqüentemente a produção das plantas.

As alterações estruturais decorrentes do manejo inadequado também alteram a distribuição de tamanho e continuidade de poros (OLIVEIRA et al., 2004),

influenciando na dinâmica da água no solo, como resultado, o solo perde sua capacidade produtiva e tem a susceptibilidade à erosão aumentada, podendo desencadear perdas irreversíveis ao ambiente (LIMA et al., 2009). Os Latossolos com estrutura granular, geralmente, apresentam grande volume de poros com diâmetro elevado (porosidade de aeração) e também com diâmetro extremamente pequeno (OLIVEIRA et al., 2004). Essa distribuição dos poros nesses solos faz com que neles a disponibilidade de água para as plantas seja baixa (CARDUCCI et al., 2011) e a susceptibilidade a compactação seja alta (AJAYI et al., 2009; SEVERIANO et al., 2011a).

Um parâmetro importante no monitoramento da compactação do solo e na prevenção de perdas de produtividade é o intervalo hídrico ótimo (IHO) (BEUTLER et al., 2004a). O qual incorpora em um único parâmetro, as complexas e dinâmicas interações entre resistência do solo à penetração, aeração e disponibilidade de água, que alteram diretamente o crescimento e desenvolvimento das plantas (SILVA et al., 1994). Por outro lado, condições físicas restritivas ao bom crescimento e desenvolvimento das plantas reduzem a capacidade produtiva dos solos e a sustentabilidade ambiental (LIMA et al., 2012).

Em solos com qualidade física adequada, o IHO corresponde à água disponível, sendo o limite superior do IHO equivalente à capacidade de campo e o inferior, equivalente ao ponto de murcha permanente (KLEIN e CAMARA, 2007; CALONEGO et al., 2011). Entretanto, o IHO é diminuído quando a aeração substitui a capacidade de campo como seu limite superior e a resistência do solo à penetração substitui o ponto de murcha permanente como seu limite inferior (KLEIN e CAMARA, 2007; LIMA, 2011). Quando isso ocorre, há uma indicação de um processo de degradação da qualidade estrutural do solo, no que diz respeito ao crescimento das plantas (BEUTLER et al., 2004b; LEÃO et al., 2006).

Com a redução no IHO, as variações espaciais e temporais do conteúdo de água do solo podem predispor as culturas a estresses físicos, como pela falta de oxigênio em condições de solo muito úmido, ou pelo excessivo aumento da resistência do solo à penetração com a redução da umidade do solo (LAPEN et al., 2004; BENGOUGH et al., 2006). 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).

Diversos estudos mostram a eficácia do IHO como indicador de alterações nos atributos físicos do solo em diferentes sistemas de uso e manejo (SILVA et al.,

1994; SERAFIM et al., 2008a; CALONEGO et al., 2011; BLAINSKI et al., 2012; LIMA et al., 2012), no entanto, são poucos os estudos sobre a utilização do IHO como indicador de alterações na qualidade estrutural do solo causadas por culturas oleaginosas de outono-inverno. Assim, objetivou-se com este estudo avaliar a influência da adoção das diferentes sucessões de culturas oleaginosas, sobre o IHO de um Latossolo Vermelho distroférico.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em área da Fazenda Experimental de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), no município de Dourados, MS, no ano agrícola de 2009/2010. O local situa-se em latitude 22°13'58"S, longitude de 54°59'30"W e altitude de 410 m. O clima é do tipo Cwa, segundo a classificação de Köppen. A região apresenta precipitação pluvial média anual de 1.400 mm e as temperaturas médias anual variam de 18°C a 25°C nos meses mais frio e mais quente, respectivamente (PEIXOTO, 2002). O solo foi um Latossolo Vermelho distroférico, cuja textura, determinada pelo método da pipeta (EMBRAPA, 1997) foi 531 g kg⁻¹ de argila, 249 g kg⁻¹ de silte e 220 g kg⁻¹ de areia nos primeiros 10 cm de profundidade.

A área foi manejada sob plantio direto por dez anos até o inverno de 2009, em um sistema de rotação de culturas envolvendo soja e milho no verão, e milho safrinha e aveia no outono-inverno. O experimento foi realizado no delineamento de blocos casualizados, contendo 11 tratamentos, com quatro repetições. Os tratamentos consistiram de culturas oleaginosas cultivadas em sistema plantio direto no outono-inverno: girassol (*Helianthus annuus* L.), canola (*Brassica napus* L. e *Brassica rapa*), cártamo (*Carthamus tinctorius* L.), crambe (*Crambe abyssinica* Hochst.) e níger (*Guizotia abyssinica*), semeadas em sucessão às culturas da soja e do milho cultivadas no verão, e a sucessão soja/milho (verão/outono-inverno), a mais utilizada na região.

A semeadura da soja (cv. BMX Potência RR) e do milho verão (cv. DKB 390 YG) foram efetuadas em outubro de 2009, utilizando-se uma semeadora-adubadora de plantio direto, com sete linhas para soja, espaçadas entre si de 0,45 m e quatro linhas para o milho, espaçadas de 0,9 m. A quantidade de sementes utilizada foi suficiente para a obtenção de uma população de 300 mil plantas por hectare e 60 mil plantas por hectare para a soja e milho, respectivamente. A adubação para a soja consistiu de 0,3 Mg ha⁻¹ da fórmula 00-20-20 (NPK) e para o milho foi utilizado 0,3 Mg ha⁻¹ da fórmula 10-20-20 (NPK). Após a colheita da soja e do milho verão em fevereiro de 2010 foram semeadas as culturas do milho safrinha e as oleaginosas anuais de outono-inverno.

A semeadura do milho safrinha (cv. DKB 350 YG) foi realizada mecanicamente no dia 10 de março de 2010, em sucessão à cultura da soja, utilizando-se uma semeadora-adubadora de plantio direto, com sete linhas, espaçadas entre si de

0,45 m, regulada para distribuir 0,2 Mg ha⁻¹ da fórmula 10-20-20 e uma quantidade de sementes suficiente para obter uma população de 70 mil plantas por hectare. No dia 01 de abril de 2010 foram semeadas as oleaginosas de outono-inverno em sucessão aos cultivos da soja e milho verão, utilizando-se uma semeadora-adubadora de plantio direto, seguindo as mesmas recomendações para o milho safrinha quanto ao espaçamento e adubação.

No estágio de florescimento das culturas de outono-inverno, foram coletadas amostras de solo com estrutura preservada em cilindros metálicos com 6,45 cm de diâmetro e 2,54 cm de altura, centralizando-os nas camadas de 0-5 e 5-10 cm. As amostras foram retiradas nas entrelinhas das culturas. As parcelas mediram 35 m de comprimento e 14 m de largura, perfazendo uma área total de 490 m². Em cada parcela e profundidade foram coletadas sete amostras, totalizando 56 amostras para cada tratamento (28 amostras x 2 profundidades).

Após o preparo das amostras, essas foram saturadas por meio da elevação gradual de uma lâmina de água até atingir cerca de dois terços da altura do anel para posterior estabilização do teor de água. As 28 amostras de cada tratamento e profundidade foram divididas em sete grupos de quatro amostras, sendo cada grupo submetido aos seguintes potenciais matriciais: -0,006; -0,01; -0,033; -0,066; -0,1; -0,3 e -1,5 MPa, utilizando mesa de tensão (-0,006 MPa) e câmara de Richards para os demais potenciais, conforme Klute (1986). Na mesa de tensão (-0,006 MPa) foi obtida a microporosidade, conforme descrito em Embrapa (1997).

Quando as amostras atingiram o equilíbrio nas referidas tensões, essas foram pesadas, sendo determinada a resistência do solo à penetração, utilizando um penetrógrafo eletrônico com velocidade constante de penetração de 1 cm min⁻¹, com diâmetro de base da haste de 4 mm e semiângulo de 30°, desenvolvido por Serafim et al. (2008b). Os valores obtidos nos 5 mm superiores e inferiores da amostra foram descartados, visando eliminar o efeito da periferia da amostra (BRADFORD, 1986). A frequência de leituras de resistência do solo à penetração correspondeu à coleta de um valor a cada 0,25 segundos, obtendo-se 600 leituras por amostra, sendo utilizado o valor médio. Após a determinação da resistência do solo à penetração, as amostras foram levadas à estufa a 105-110 °C, por 48 h, para determinar a umidade volumétrica e a densidade do solo pelo método do anel volumétrico. A porosidade total e a macroporosidade foram obtidas como proposto em Embrapa (1997).

O IHO foi determinado com base nos procedimentos descritos em Silva et al. (1994). Os valores críticos de umidade associados com a tensão matricial, resistência do solo à penetração e porosidade de aeração, representados, respectivamente, pelo teor de água na capacidade de campo (θ_{CC}), potencial de -0,01 MPa (REICHARDT, 1988); pelo teor de água no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), potencial de -1,5 MPa (SAVAGE et al., 1996); pelo teor de água volumétrico no solo em que a resistência do solo à penetração (θ_{RP}) atinge 2,0 MPa (TAYLOR et al., 1966); e pelo teor de água volumétrico em que a porosidade de aeração (θ_{PA}) é de 0,10 m³ m⁻³ (GRABLE e SIEMER, 1968).

Para obter os valores de θ_{CC} e θ_{PMP} , utilizou-se o modelo matemático do tipo [$\theta = \exp(a+bDs)\Psi^c$], proposto por Silva et al. (1994), para ajuste dos dados originais, o qual incorpora a variável densidade do solo na função empregada por Ross et al. (1991), em que θ é a umidade volumétrica do solo (m³ m⁻³); Ds é a densidade do solo (Mg m⁻³); Ψ é o potencial matricial (MPa); e as letras “a”, “b” e “c” são os parâmetros empíricos de ajuste do modelo.

Os valores de RP de todas as amostras com θ e Ds conhecidas foram ajustados matematicamente, utilizando o modelo do tipo [$RP = d\theta^e Ds^f$], proposto por Busscher (1990), em que RP é a resistência do solo à penetração (MPa); θ é a umidade volumétrica do solo (m³ m⁻³); Ds é a densidade do solo (Mg m⁻³); e as letras “d”, “e” e “f” são os parâmetros empíricos de ajuste do modelo. Por meio dessa equação foi possível determinar o valor crítico de θ para que a RP não ultrapassasse 2,0 MPa (θ_{RP}), em função da Ds . Para isso, substituiu-se RP na equação pelo valor de 2,0 MPa, considerado como limitante para efeito de cálculo do IHO.

O valor de θ_{PA} foi obtido aplicando o modelo do tipo [$\theta_{PA} = (1 - (Ds/Dp)) - 0,10$], em que θ_{PA} é o teor de água volumétrico do solo em que a porosidade de aeração é de 0,10 m³ m⁻³; Ds é a densidade do solo (Mg m⁻³); Dp é a densidade de partículas (Mg m⁻³), sendo adotado o valor de 2,65 Mg m⁻³ como densidade média de partículas.

Na determinação dos limites superiores do IHO, considerou-se o θ_{CC} ou aquele em que a θ_{PA} é considerada adequada ao crescimento e desenvolvimento da cultura. Como limites inferiores foram considerados o θ_{PMP} ou aquele correspondente à θ_{RP} limitante ao crescimento e desenvolvimento das plantas. Após o cálculo dos limites superiores e inferiores do IHO, determinou-se a densidade crítica do solo (Dsc), que é a densidade do solo em que o IHO se iguala a zero, ou seja, quando o limite superior do IHO equivale numericamente ao limite inferior (SILVA et al., 1994).

Os resultados dos atributos físicos do solo foram submetidos à análise de variância e, quando significativa, foi aplicado o teste de Scott-Knott a 5%, para comparação de médias, utilizando o aplicativo computacional Assistat 7.6 (SILVA e AZEVEDO, 2002). Os ajustes dos modelos matemáticos e obtenção dos parâmetros “a”, “b”, “c”, “d”, “e” e “f”, foram realizados pelo método de regressão não linear, por meio do programa computacional Statistica 7.0 (STATSOFT, 2007).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

As sucessões de culturas alteraram os atributos físicos do solo, exceto a microporosidade, nas duas profundidades avaliadas (Quadro 1). Observou-se uma tendência de aumento nos valores de densidade do solo, e redução da macroporosidade e porosidade total, na profundidade de 5-10 cm, em relação a camada de 0-5 cm, sendo verificadas as maiores variações entre as sucessões na primeira camada (Quadro 1). Resultados semelhantes foram obtidos por Argenton et al. (2005) em Latossolo Vermelho argiloso e Silva et al. (2011) em um Latossolo Vermelho distroférico muito argiloso, que estudaram diversas sucessões de culturas em sistema plantio direto.

Na camada de 0-5 cm, os maiores valores de densidade do solo encontrados nas sucessões milho/cártamo e milho/crambe, propiciaram reduções na macroporosidade e porosidade total do solo, enquanto os menores valores de densidade do solo e maiores de macroporosidade e porosidade total foram observados nas sucessões soja/milho, soja/cártamo, soja/crambe, soja/níger e milho/níger (Quadro 1). Na camada de 5-10 cm apenas a cultura do níger em sucessão a soja e ao milho apresentou menor densidade do solo e maior macroporosidade e porosidade total, comparada às demais sucessões avaliadas (Quadro 1). Para a macroporosidade e porosidade total a sucessão milho/níger obteve maiores valores que a sucessão soja/níger, que foi superior às demais sucessões (Quadro 1).

Os resultados dos atributos físicos do solo indicam uma provável compactação do solo na camada de 5-10 cm, exceto quando foram utilizadas as sucessões soja/níger e milho/níger (Quadro 1). Bertol et al. (2004), observaram maior D_s na camada de 5-10 cm no sistema de plantio direto com diferentes rotações de culturas, comparado ao sistema de preparo convencional. Para Bergamin et al. (2010) e Garbiate et al. (2011), a compactação traz consequências negativas à porosidade do solo, com redução da porosidade total e da macroporosidade, fato não observado para a microporosidade.

A cultura do níger em sucessão à soja e ao milho proporcionou melhor estrutura do solo, como pode ser observado pelos valores de densidade do solo, macroporosidade e porosidade total na camada de 0-10 cm. Esse resultado possivelmente está relacionado ao aporte de material vegetal que essa cultura proporciona ao solo, como também pela provável influência do seu sistema radicular,

em reduzir à compactação. O crescimento do sistema radicular associado à atividade de microrganismos reduz à compactação, aumentando o potencial produtivo do solo (LIMA et al., 2012).

QUADRO 1. Densidade do solo (Ds), macroporosidade (Macro), microporosidade (Micro) e porosidade total (Pt) em duas profundidades de um Latossolo Vermelho distroférico, submetido a diferentes sucessões de culturas

Sucessões de culturas	Ds ⁽¹⁾ (Mg m ⁻³)	Macro ⁽²⁾	Micro ⁽²⁾	Pt ⁽²⁾
		(m ³ m ⁻³)		
(Ver/Out-In)	.....0 – 5 cm			
Soja/Milho	1,26 c	0,19 a	0,41 a	0,60 a
Soja/Girassol	1,31 b	0,14 b	0,41 a	0,55 b
Soja/Canola	1,31 b	0,15 b	0,41 a	0,56 b
Soja/Cártamo	1,27 c	0,18 a	0,42 a	0,60 a
Soja/Crambe	1,28 c	0,18 a	0,41 a	0,59 a
Soja/Níger	1,25 c	0,20 a	0,41 a	0,61 a
Milho/Girassol	1,31 b	0,14 b	0,42 a	0,56 b
Milho/Canola	1,32 b	0,14 b	0,42 a	0,56 b
Milho/Cártamo	1,36 a	0,10 c	0,42 a	0,52 c
Milho/Crambe	1,36 a	0,12 c	0,41 a	0,53 c
Milho/Níger	1,25 c	0,19 a	0,41 a	0,60 a
CV (%)	1,97	9,75	2,06	2,38
	..... 5 – 10 cm			
Soja/Milho	1,43 a	0,09 c	0,43 a	0,52 c
Soja/Girassol	1,45 a	0,10 c	0,42 a	0,52 c
Soja/Canola	1,46 a	0,08 c	0,43 a	0,51 c
Soja/Cártamo	1,45 a	0,09 c	0,43 a	0,52 c
Soja/Crambe	1,46 a	0,08 c	0,44 a	0,52 c
Soja/Níger	1,38 b	0,12 b	0,42 a	0,54 b
Milho/Girassol	1,49 a	0,09 c	0,42 a	0,51 c
Milho/Canola	1,49 a	0,09 c	0,42 a	0,51 c
Milho/Cártamo	1,48 a	0,08 c	0,43 a	0,51 c
Milho/Crambe	1,48 a	0,08 c	0,43 a	0,51 c
Milho/Níger	1,36 b	0,14 a	0,42 a	0,56 a
CV (%)	2,25	10,25	1,88	2,01

Ver/Out-In: cultivo de verão/outono-inverno. ⁽¹⁾ Média de 28 repetições. ⁽²⁾ Média de 12 repetições. Médias na coluna, seguidas de mesma letra, não diferem pelo teste de Scott-Knott a 5%.

Carneiro et al. (2008) citam que a cultura do níger tem a capacidade de produzir uma quantidade de fitomassa maior que 14 Mg ha⁻¹, e relatam ainda que tal aporte pode aumentar a atividade microbiana do solo, influenciando na qualidade estrutural do mesmo. Além de produzir uma quantidade elevada de fitomassa, a cultura do níger tem a capacidade de acumular mais de 100 kg ha⁻¹ de N, estando dentro dos

requisitos para ser considerada uma espécie de cobertura (SOUZA et al., 2008). Para Braida et al. (2006), Silva et al. (2011) e Araujo-Junior et al. (2011), a manutenção de elevada quantidade de palha na superfície do solo é importante para os sistemas de produção, pois esse material em decomposição origina uma série de compostos orgânicos, aumentando o teor de matéria orgânica do solo, proporcionando melhoria na sua estrutura, com diminuição da densidade do solo e aumento da aeração, favorecendo o desenvolvimento do sistema radicular.

Todas as curvas ajustadas, tanto de retenção de água (Quadros 2 e 3) como de resistência do solo à penetração (Quadros 4 e 5), apresentaram coeficientes de determinação (R^2) significativos a 1% pelo teste F. Com base no proposto por Grantz e Slinker (1990), Blainski et al. (2009) e Blainski et al. (2012) é possível afirmar que os coeficientes do ajuste da curva de retenção de água do solo (Quadros 2 e 3) foram estatisticamente significativos ($p < 0,01$), pois o intervalo de confiança dos coeficientes não inclui o valor igual a zero, exceto o coeficiente “b” na camada de 5-10 cm, nas sucessões milho/girassol, milho/canola e soja/crambe (Quadro 3).

QUADRO 2. Estimativas dos coeficientes de regressão para a curva de retenção de água no solo [$\theta = \exp(a+bDs)\Psi^c$], com respectivos coeficientes de determinação (R^2), na camada de 0-5 cm de um Latossolo Vermelho distroférico, submetido a diferentes sucessões de culturas

Coeficientes	Valor estimado	Intervalo de confiança		Valor estimado	Intervalo de confiança	
		Li	Ls		Li	Ls
		Soja/Milho			Milho/Girassol	
a	-2,5686	-2,8894	-2,2479	-1,9860	-2,3434	-1,6285
b	0,9735	0,7299	1,2172	0,5370	0,2699	0,8040
c	-0,0987	-0,1098	-0,0876	-0,0987	-0,1163	-0,0810
R^2	0,94**			0,87**		
		Soja/Girassol			Milho/Canola	
a	-2,2707	-2,7269	-1,8146	-2,3429	-2,7149	-1,9709
b	0,7717	0,4333	1,1101	0,8279	0,5567	1,0992
c	-0,0774	-0,0922	-0,0626	-0,0863	-0,1010	-0,0716
R^2	0,84**			0,88**		
		Soja/Canola			Milho/Cártamo	
a	-2,1435	-2,4257	-1,8612	-1,9004	-2,3671	-1,4338
b	0,6231	0,4103	0,8359	0,4902	0,1509	0,8294
c	-0,0967	-0,1107	-0,0826	-0,0899	-0,1029	-0,0769
R^2	0,91**			0,90**		

Continua...

QUADRO 2. Continuação

Coeficientes	Valor estimado	Intervalo de confiança		Valor estimado	Intervalo de confiança		
		Li	Ls		Li	Ls	
	 Soja/Cártamo Milho/Crambe		
a	-2,4442	-2,8944	-1,9940	-2,1054	-2,3933	-1,8175	
b	0,9110	0,5615	1,2604	0,6471	0,4403	0,8539	
c	-0,0983	-0,1153	-0,0813	-0,0864	-0,0969	-0,0759	
R ²	0,88**			0,93**			
	 Soja/Crambe Milho/Níger		
a	-2,0896	-2,3817	-1,7975	-2,3249	-2,5418	-2,1081	
b	0,6365	0,4122	0,8608	0,7939	0,6279	0,9598	
c	-0,0868	-0,0997	-0,0740	-0,0958	-0,1080	-0,0836	
R ²	0,91**			0,94**			
		..... Soja/Níger				
a	-2,1626	-2,4616	-1,8636				
b	0,6725	0,4427	0,9022				
c	-0,0910	-0,1039	-0,0781				
R ²	0,91**						

θ : teor de água no solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); Ds: densidade do solo (Mg m^{-3}); Ψ : potencial de água no solo (MPa); Li e Ls: limite inferior e superior do intervalo de confiança 95%, respectivamente; **: significativo pelo teste "F" a 1%.

QUADRO 3. Estimativas dos coeficientes de regressão para a curva de retenção de água no solo [$\theta = \exp(a+bDs)\Psi^c$], com respectivos coeficientes de determinação (R²), na camada de 5-10 cm de um Latossolo Vermelho distroférrico, submetido a diferentes sucessões de culturas

Coeficientes	Valor estimado	Intervalo de confiança		Valor estimado	Intervalo de confiança		
		Li	Ls		Li	Ls	
	 Soja/Milho Milho/Girassol		
a	-2,0179	-2,4910	-1,5359	-1,2993	-1,6995	-0,8991	
b	0,5917	0,25388	0,9295	0,1110	-0,1548	0,3768	
c	-0,0713	-0,0841	-0,0584	-0,0644	-0,0751	-0,0537	
R ²	0,87**			0,86**			
	 Soja/Girassol Milho/Canola		
a	-1,8084	-2,2988	-1,3179	-1,1570	-1,7760	-0,5381	
b	0,4511	0,1130	0,7892	0,0187	-0,3982	0,4363	
c	-0,0631	-0,0762	-0,0499	-0,0591	-0,0717	-0,0465	
R ²	0,82**			0,80**			
	 Soja/Canola Milho/Cártamo		
a	-1,9847	-2,3752	-1,5943	-1,9752	-2,5850	-1,3654	
b	0,5877	0,3190	0,8564	0,5877	0,1792	0,9962	
c	-0,0578	-0,0679	-0,0477	-0,0531	-0,0653	-0,0410	
R ²	0,89**			0,78**			

Continua...

QUADRO 3. Continuação

Coeficientes	Valor Estimado	Intervalo de confiança		Valor estimado	Intervalo de confiança		
		Li	Ls		Li	Ls	
	 Soja/Cártamo Milho/Crambe		
a	-1,9049	-2,3385	-14713	-2,0318	-2,4975	-1,5662	
b	0,5306	0,2383	0,8230	0,6235	0,3055	0,9415	
c	-0,0576	-0,0691	-0,0462	-0,0577	-0,0695	-0,0459	
R ²	0,81**			0,87**			
	 Soja/Crambe Milho/Níger		
a	-1,5391	-2,2989	-0,7794	-2,1083	-2,4689	-1,7477	
b	0,27337	-0,2426	0,7893	0,6779	0,4237	0,9321	
c	-0,0637	-0,0780	-0,0494	-0,0656	-0,0809	-0,0503	
R ²	0,78**			0,80**			
		..... Soja/Níger				
a	-2,2876	-2,6642	-1,9111				
b	0,7855	0,5168	1,0543				
c	-0,0676	-0,0774	-0,0577				
R ²	0,90**						

θ : teor de água no solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); Ds: densidade do solo (Mg m^{-3}); Ψ : potencial de água no solo (MPa); Li e Ls: limite inferior e superior do intervalo de confiança 95%, respectivamente; **: significativo pelo teste “F” a 1%.

A curva de retenção de água no solo foi significativa e positivamente influenciada pela Ds e negativamente pelo Ψ (Quadros 2 e 3), como também observado por Klein e Camara (2007); Calonego e Rosolem (2011); Betioli Júnior et al. (2012) e Lima et al. (2012). Para Blainski et al. (2012), em elevados potenciais matriciais, esse comportamento deve-se à redistribuição do tamanho de poros, com aumento na proporção de poros de menor diâmetro, que torna o solo mais eficiente na retenção de água. Já com o secamento do solo, a maior massa de sólidos por unidade de área, expressa pelo aumento de Ds, contribuiu para o aumento da θ (BLAINSKI et al., 2009).

O intervalo de confiança dos coeficientes “e” e “f” do ajuste da curva de resistência do solo à penetração não inclui o valor igual a zero, possibilitando afirmar que estes foram estatisticamente significativos ($p < 0,01$) (Quadros 4 e 5), como descrito por Blainski et al. (2009) e Blainski et al. (2012). Já o coeficiente “d” do ajuste da curva de resistência do solo à penetração foi significativo ($p < 0,01$) apenas nos modelos obtidos para as sucessões soja/níger e milho/cártamo, na profundidade de 0-5 (Quadro 4), e no modelo para a sucessão milho/cártamo, na camada de 5-10 cm (Quadro 5), pois nessas sucessões o intervalo de confiança não inclui o valor zero para o parâmetro “d”, enquanto nas demais sucessões os valores dos intervalos de confiança deste parâmetro

apresentaram valor igual a zero, não sendo significativos conforme Blainski et al. (2009) e Blainski et al. (2012).

QUADRO 4. Estimativas dos coeficientes de regressão para a curva de resistência do solo à penetração ($RP = d\theta^e Ds^f$), com respectivos coeficientes de determinação (R^2), na camada de 0-5 cm de um Latossolo Vermelho distroférico, submetido a diferentes sucessões de culturas

Coeficientes	Valor Estimado	Intervalo de confiança		Valor estimado	Intervalo de confiança		
		Li	Ls		Li	Ls	
		Soja/Milho			Milho/Girassol		
d	0,0039	-0,0008	0,0085	0,0112	-0,0037	0,0261	
e	-3,0055	-3,7786	-2,2324	-3,0432	-3,9441	-2,1423	
f	7,6723	5,6541	9,6904	3,4919	1,8848	5,0989	
R ²	0,84**			0,76**			
		Soja/Girassol			Milho/Canola		
d	0,0020	-0,0023	0,0064	0,0019	-0,0001	0,0038	
e	-3,4041	-4,6167	-2,1916	-3,7755	-4,4969	-3,0542	
f	9,4964	4,9352	12,0577	6,8113	5,6895	7,9331	
R ²	0,73**			0,91**			
		Soja/Canola			Milho/Cártamo		
d	0,0043	-0,0017	0,0104	0,0107	0,0013	0,0202	
e	-3,1777	-4,0023	-2,3530	-3,2918	-3,9436	-2,6400	
f	6,6106	4,7670	8,4542	3,6629	2,0757	5,2500	
R ²	0,82**			0,85**			
		Soja/Cártamo			Milho/Crambe		
d	0,0161	-0,0049	0,0372	0,0065	-0,0013	0,0143	
e	-2,2816	-3,1109	-1,4523	-3,0023	-3,7207	-2,2839	
f	5,3053	3,1741	7,4364	6,1457	4,5228	7,7685	
R ²	0,68**			0,82**			
		Soja/Crambe			Milho/Níger		
d	-0,0033	-0,0007	0,0073	0,0043	-0,0022	0,0107	
e	-3,0342	-3,7606	-2,3078	-2,8446	-3,8672	-1,8219	
f	8,0887	6,2989	9,8786	7,7589	6,1862	9,3315	
R ²	0,86**			0,82**			
		Soja/Níger					
d	0,0013	0,0004	0,0022				
e	-3,7911	-4,2559	-3,3262				
f	8,0588	7,2041	8,9135				
R ²	0,96**						

RP: resistência do solo à penetração (MPa); θ : teor de água no solo ($m^3 m^{-3}$); Ds: densidade do solo ($Mg m^{-3}$); Li e Ls: limite inferior e superior do intervalo de confiança 95%, respectivamente; **: significativo pelo teste "F" a 1%.

QUADRO 5. Estimativas dos coeficientes de regressão para a curva de resistência do solo à penetração ($RP = d\theta^e Ds^f$), com respectivos coeficientes de determinação (R^2), na camada de 5-10 cm de um Latossolo Vermelho distroférico, submetido a diferentes sucessões de culturas

Coeficientes	Valor estimado	Intervalo de confiança		Valor estimado	Intervalo de confiança	
		Li	Ls		Li	Ls
		Soja/Milho			Milho/Girassol	
d	0,0012	-0,0016	0,0041	0,0009	-0,0003	0,0020
e	-4,2962	-5,8387	-2,7536	-3,9997	-4,7870	-3,2123
f	6,6486	3,8446	9,4526	8,3759	6,1070	10,6447
R^2	0,69**			0,90**		
		Soja/Girassol			Milho/Canola	
d	0,0006	-0,0004	0,0016	0,0048	-0,0025	0,0122
e	-4,7516	-5,8591	-3,6440	-4,1396	-5,0193	-3,2599
f	7,2403	5,1145	9,3661	3,7061	1,2794	6,1327
R^2	0,85**			0,85**		
		Soja/Canola			Milho/Cártamo	
d	0,0024	-0,0003	0,0051	0,0150	0,0193	0,0493
e	-3,9225	-4,6711	-3,1738	-3,2841	-4,6612	-1,9069
f	6,1574	4,8068	7,5080	3,2493	0,0029	6,4957
R^2	0,87**			0,58**		
		Soja/Cártamo			Milho/Crambe	
d	0,0006	-0,0005	0,0017	0,0007	-0,0006	0,0021
e	-4,6054	-5,7905	-3,4203	-4,2856	-5,3545	-3,2167
f	7,5896	5,5456	9,6336	8,2906	5,9224	10,6589
R^2	0,86**			0,79**		
		Soja/Crambe			Milho/Níger	
d	-0,0068	-0,0050	0,0185	0,0004	-0,0002	0,0009
e	-3,2668	-4,3325	-2,2010	-4,7151	-5,7832	-3,6470
f	4,9294	2,2528	7,6061	9,1648	7,5847	10,7450
R^2	0,71**			0,90**		
		Soja/Níger				
d	0,0005	-0,0002	0,0012			
e	-4,4474	-5,3451	-3,5496			
f	8,0793	6,6255	9,5330			
R^2	0,89**					

RP: resistência do solo à penetração (MPa); θ : teor de água no solo ($m^3 m^{-3}$); Ds: densidade do solo ($Mg m^{-3}$); Li e Ls: limite inferior e superior do intervalo de confiança 95%, respectivamente; **: significativo pelo teste "F" a 1%.

Observou-se influência positiva da Ds e negativa de θ na curva de resistência do solo à penetração (Quadros 4 e 5), como já relatado em vários trabalhos (TORMENA et al., 2007; SERAFIM et al., 2008a; CALONEGO e ROSOLEM, 2011;

BETIOLI JÚNIOR et al., 2012). A relação positiva entre a densidade do solo com a resistência do solo à penetração pode ser atribuída ao efeito da compactação do solo, o que, condiciona maior fricção ou coesão entre as partículas sólidas (TORMENA et al., 2007; BLAINSKI et al., 2012), enquanto a redução da resistência do solo à penetração com a θ deve-se a redução da coesão entre as partículas, devido ao efeito lubrificante da água (BLAINSKI et al., 2012).

Na figura 1 verificou-se tendência de aumento no IHO com o aumento da densidade do solo até a θ_{RP} substituir a θ_{PMP} ou a θ_{PA} substituir a θ_{CC} . Neste ponto, encontra-se o maior valor de água disponível. Assim, o aumento da densidade do solo até certo limite é benéfico em termos de retenção de água, como também relatado por Leão et al. (2006) e Severiano et al. (2011b). Os valores de θ_{RP} aumentaram com a densidade do solo (Figuras 1 e 2), pois para manter a $RP = 2,0$ MPa é necessário aumentar o teor de água do solo (θ), a fim de minimizar a maior fricção entre as partículas resultante do aumento da densidade solo, enquanto com aumento da densidade do solo ocorre decréscimo de θ_{PA} (Figuras 1 e 2), indicando a necessidade de maior drenagem do solo para manter o adequado suprimento de oxigênio, devido à redução nos macroporos. Resultados semelhantes foram obtidos por Leão et al. (2006), Tormena et al. (2007), Betioli Júnior et al. (2012) e Lima et al. (2012).

Em todas as sucessões de culturas e profundidades o teor de água disponível ($AD = \theta_{CC} - \theta_{PMP}$) foi maior que IHO em pelo menos algum valor de densidade do solo analisada, sendo a aeração o fator mais limitante ao adequado crescimento das plantas (Figuras 1 e 2). A substituição de θ_{CC} pelo θ_{PA} como o limite superior do IHO é comum em solos argilosos, devido à baixa macroporosidade (Quadro 1), como também relatado por Calonego e Rosolem (2011). Para Blaisnk et al. (2009) a redução da porosidade de aeração prejudica o crescimento e desenvolvimento vegetal pela reduzida difusão de oxigênio. Em solos compactados e úmidos a θ_{PA} pode restringir o IHO (LAPEN et al., 2004).

Para Lima et al. (2012) solos com menor qualidade estrutural apresentam redução no IHO primeiramente pela θ_{PA} . Kaiser et al. (2009) trabalhando em sistema de plantio direto citaram que nesse sistema a resistência à penetração tem sido o limite inferior do IHO e a aeração o limite superior, pois, observa-se aumento da densidade do solo e redução da macroporosidade. Por esta razão, Silva et al. (1994) sugeriram o IHO como uma ferramenta mais sensível para as análises estrutura do solo.

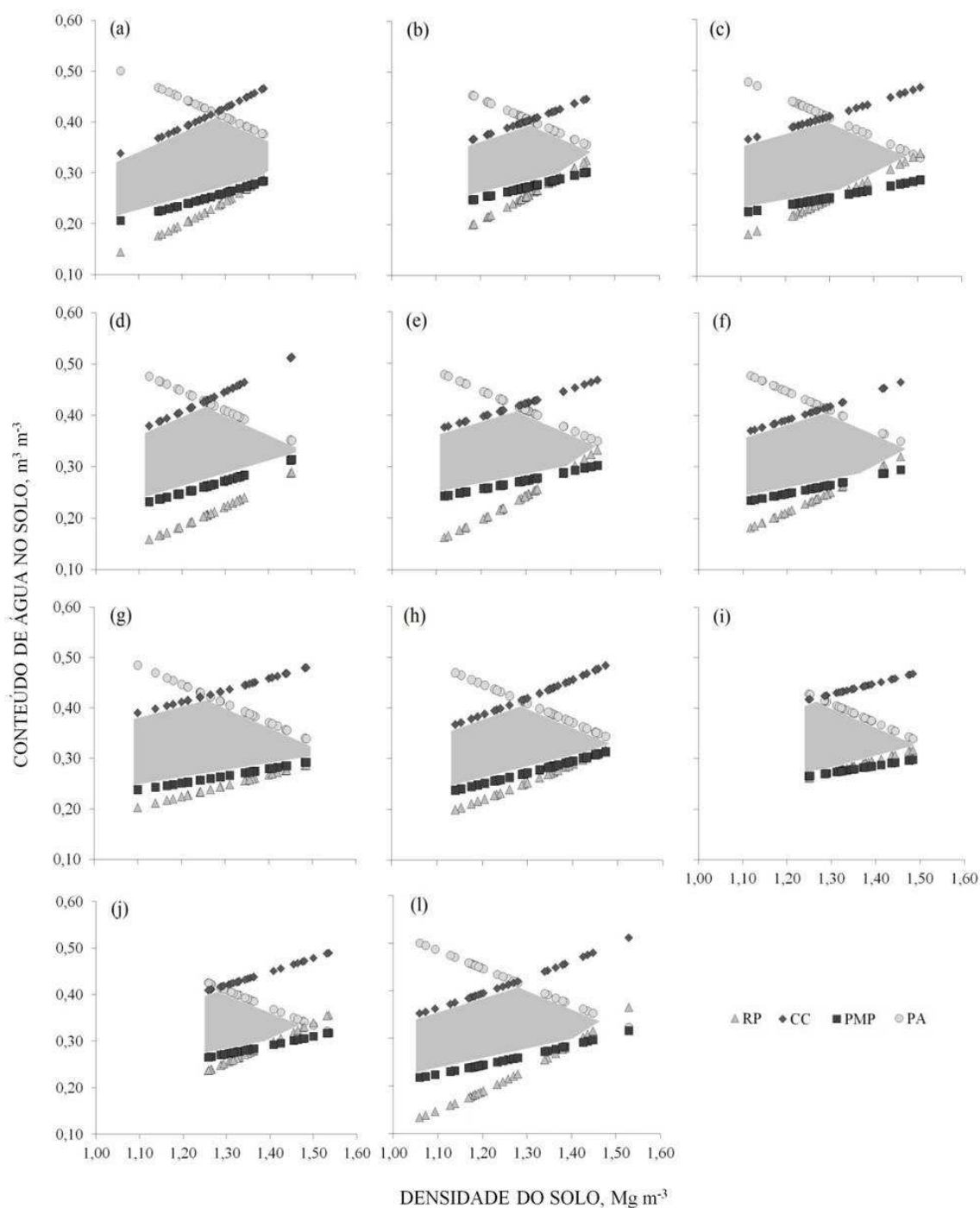


FIGURA 1. Variação dos teores de água do solo na capacidade de campo (θ_{CC}), ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), porosidade de aeração de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (θ_{PA}) e resistência do solo à penetração de $2,0 \text{ MPa}$ (θ_{RP}), em função de alterações na densidade de um Latossolo Vermelho distroférico cultivado com as sucessões soja/milho (a), soja/girassol (b), soja/canola (c), soja/cártamo (d), soja/crambe (e), soja/níger (f), milho/girassol (g), milho/canola (h), milho/cártamo (i), milho/crambe (j) e milho/níger (l), na profundidade de 0-5 cm. A área em cor cinza corresponde ao intervalo hídrico ótimo do solo.

Observou-se uma substituição do limite superior (θ_{CC}) e inferior (θ_{PMP}) do IHO, pela θ_{PA} e θ_{RP} , respectivamente, com o aumento da densidade do solo em todas as sucessões, exceto para as sucessões soja/cártamo e milho/girassol na camada de 0-5 que não tiveram seus limites inferiores do IHO substituídos pela θ_{RP} .

Analisando o IHO em cada sucessão de cultura, na camada de 0-5 cm, observa-se que a menor qualidade estrutural foi proporcionada pelas sucessões milho/cártamo e milho/crambe (Figuras 1i e 1j). Nessas sucessões verificou-se aumento na frequência de maiores valores de densidade do solo ($> 1,24 \text{ Mg m}^{-3}$ e $> 1,25 \text{ Mg m}^{-3}$, para milho/cártamo e milho/crambe, respectivamente) e de menores valores de IHO, comparado às demais sucessões. Esses resultados confirmam a menor estabilidade estrutural do solo nessas sucessões e, a maior frequência de menores valores de IHO neste sistema. Corroborando com Betioli Júnior et al. (2012), que constataram aumento no grau de compactação, utilizando resultados da densidade do solo, implicando na redução do IHO.

Em relação ao limite superior do IHO, na camada de 0-5 cm, em todas as sucessões de culturas estudadas, a θ_{CC} foi o limite de água no solo em valores mais baixos de densidade do solo, e a θ_{PA} foi o limite superior em maiores valores de densidade do solo (Figura 1), como também descrito por Calonego et al. (2011) estudando os cultivos de milho solteiro e milho com braquiária em um Nitossolo Vermelho argiloso.

O valor do θ_{PA} manteve-se acima do θ_{CC} para valores de densidade do solo de até 1,29; 1,31; 1,30; 1,26; 1,28; 1,29; 1,26; 1,29; 1,27; 1,29 e 1,28 Mg m^{-3} , para as sucessões soja/milho, soja/girassol, soja/canola, soja/cártamo, soja/crambe, soja/níger, milho/girassol, milho/canola, milho/cártamo, milho/crambe e milho/níger, respectivamente (Figura 1). Esses resultados são semelhantes aos obtidos por Tormena et al. (2007) em um Latossolo Vermelho muito argiloso com rotação de culturas em sistema de plantio direto; Calonego e Rosolem (2011) em um Nitossolo Vermelho argiloso com diferentes rotações de culturas e Betioli Júnior et al. (2012) em um Latossolo Vermelho distroférrico muito argiloso em sistema de plantio direto cultivado com milho.

Valores de densidade do solo até o limite em que a θ_{PA} começa a limitar o IHO, a microestrutura está estável e preservada e observa-se espaço poroso suficiente para as trocas gasosas no solo, não reduzindo o desenvolvimento das plantas (Tormena

et al., 1999), enquanto valores acima desse limite de densidade do solo reduzem o volume de macroporos, interferindo na drenagem do solo (Lima et al., 2012).

Os limites inferiores do IHO, na profundidade de 0-5 cm, foram impostos pela θ_{PMP} e pela θ_{RP} (Figura 1). A θ_{RP} só passa a ser limitante para densidades do solo acima de 1,39; 1,37; 1,32; 1,38; 1,37; 1,48; 1,30; 1,40 e 1,40 $Mg\ m^{-3}$, para as sucessões soja/milho, soja/girassol, soja/canola, soja/crambe, soja/níger, milho/canola, milho/cártamo, milho/crambe e milho/níger, enquanto nas sucessões soja/cártamo e milho/girassol o limite inferior foi dados pela θ_{PMP} em todos os valores de densidade do solo (Figura 1).

É importante resaltar que a adoção de sucessões de culturas que culminem na redução da densidade do solo, associadas à adoção de sistemas de manejo que proporcionem incremento de θ visando à manutenção da RP abaixo do limite crítico estabelecido ou à criação de poros alternativos para o crescimento das raízes, devem ser aplicadas (BLAINSKI et al., 2012). Para Tormena et al. (1998) onde a θ_{RP} apresenta-se como limite inferior do IHO, observam-se restrições ao crescimento das raízes, isto é, camadas compactadas ou adensadas. Assim, a θ_{RP} pode ser um indicativo do grau de compactação ou adensamento do solo, uma vez que ocorre aumento da RP com o aumento da densidade do solo (LIMA et al., 2009).

A densidade crítica do solo (D_{sc}), correspondente à D_s em que $IHO = 0$ foi igual entre as sucessões soja/canola, milho/crambe e milho/níger, com valor de 1,50 $Mg\ m^{-3}$, na camada de 0-5 cm (Figura 1). Nas demais sucessões não houve um valor de D_{sc} . A igualdade nos valores de D_{sc} entre as sucessões permite sugerir que esse limite é inerente ao solo, independentemente do manejo adotado, como também descrito em Klein e Camara (2007). Para Reichert et al. (2009) e Kaiser et al. (2009), as variações nos valores de D_{sc} ocorrem devido às diferenças no teor de argila entre os Latossolos.

O valor de D_{sc} de 1,5 $Mg\ m^{-3}$ é mais elevado daquele determinado por Kaiser et al. (2009) em Latossolo Vermelho muito argiloso de 1,40 $Mg\ m^{-3}$, Blainski et al. (2009) em Nitossolo Vermelho muito argiloso de 1,40 $Mg\ m^{-3}$ e por Severiano et al. (2011b) que encontraram valor de 1,42 $Mg\ m^{-3}$ em um Latossolo Vermelho distroférico argiloso, na região de Rio Verde – GO. Para Severiano et al. (2011b) quando o solo atinge o valor de D_{sc} dado pelo IHO já está ocorrendo limitação à macroporosidade do solo. Para estes autores a manutenção da macroporosidade em níveis adequados é favorável à obtenção de rendimentos satisfatórios, e contribui para a sustentabilidade ambiental.

Na camada de 5-10 cm, o IHO foi reduzido em comparação à profundidade de 0-5 cm (Figuras 1 e 2). De acordo com Tormena et al. (1998), as limitações devido a RP e a porosidade de aeração apresentam maior impacto no IHO em camadas mais profundas do solo. Para Klein e Camara (2007) em sistema plantio direto a profundidade de 10 cm apresenta o menor IHO, mostrando ser uma camada de solo restritiva ao desenvolvimento das plantas. Em sistema de plantio direto tem sido observado maior redução no IHO na camada de 5-10 cm (KAISER et al., 2009), o que se deve ao aumento da densidade do solo devido ao tráfego de máquinas e ao revolvimento do solo apenas na linha de semeadura (COLLARES et al., 2008; BERGAMIN et al., 2010a).

As sucessões soja/girassol, soja/cártamo, soja/crambe, milho/girassol, milho/canola, milho/cártamo e milho/crambe (Figuras 2b, 2d, 2e, 2g, 2h, 2i e 2j) apresentaram θ_{PA} como limite superior em 100% do IHO, na camada de 5-10 cm. Isso ocorreu devido à elevada compactação do solo nessas sucessões e nessa profundidade de amostragem, já que houve grande necessidade de reduzir o teor de água no solo para que a porosidade de aeração se mantivesse a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (limite superior do IHO).

O valor do θ_{PA} manteve-se acima do θ_{CC} para valores de densidade do solo de até 1,32; 1,34; 1,34 e 1,32 Mg m^{-3} , para as sucessões soja/milho, soja/canola, soja/níger e milho/níger (Figuras 2a, 2c, 2f e 2l). Quando o IHO passa a ser reduzido em seu limite superior pela θ_{PA} , indica que, os macroporos foram alterados pela compactação, os quais são os principais responsáveis pela aeração no solo, podendo limitar as trocas gasosas e prejudicar as plantas pela deficiência de oxigênio ou excesso de CO_2 (KAISER et al., 2009), principalmente em períodos de maior umidade.

Os limites inferiores do IHO, na profundidade de 5-10 cm, foram a θ_{PMP} e a θ_{RP} (Figura 1). Na sucessão milho/cártamo a θ_{RP} foi o limite inferior em 100% do IHO (Figura 2i). Nas demais sucessões, a θ_{RP} foi limitante ao IHO em valores mais altos de densidade do solo. A θ_{RP} só passa a ser limitante para densidades do solo acima de 1,39; 1,40; 1,42; 1,41; 1,47; 1,45; 1,45; 1,40, 1,42 e 1,41 Mg m^{-3} , para as sucessões soja/milho, soja/girassol, soja/canola, soja/cártamo, soja/crambe, soja/níger, milho/girassol, milho/canola, milho/crambe e milho/níger (Figuras 2a, 2b, 2c, 2d, 2e, 2f, 2g, 2h, 2j e 2l).

A θ_{RP} pode ser um indicativo do grau de compactação do solo (LIMA et al., 2012), uma vez que ocorre aumento da resistência do solo à penetração com o aumento da densidade do solo, aliado ao aumento da coesão entre as partículas (TORMENA et

al., 2007). Nessa condição, observam-se restrições ao crescimento das raízes (BERGAMIN et al., 2010a; BERGAMIN et al., 2010b).

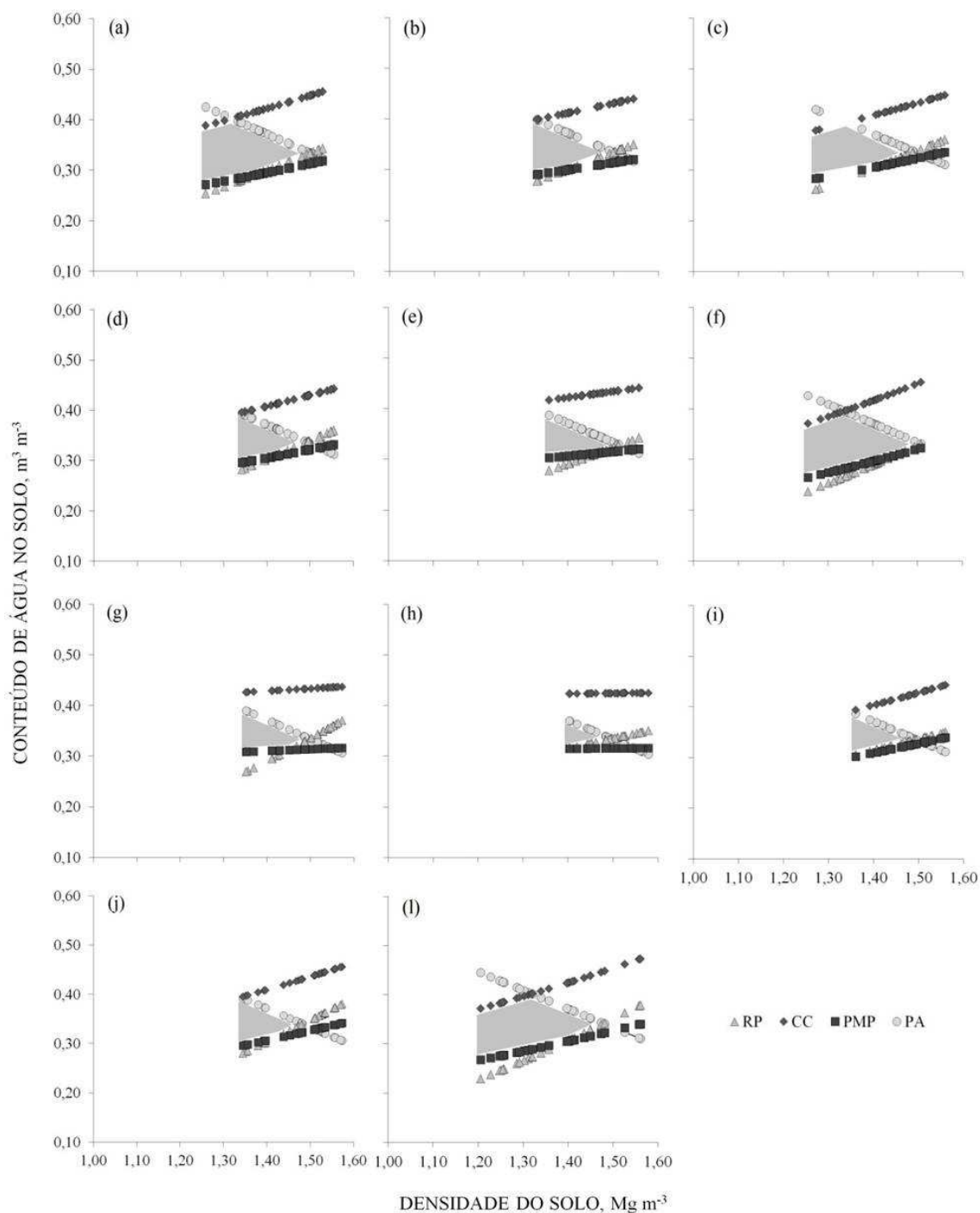


FIGURA 2. Variação dos teores de água do solo na capacidade de campo (θ_{CC}), ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), porosidade de aeração de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (θ_{PA}) e resistência do solo à penetração de $2,0 \text{ MPa}$ (θ_{RP}), em função de alterações na densidade de um Latossolo Vermelho distroférico cultivado com as sucessões soja/milho (a), soja/girassol (b), soja/canola (c), soja/cártamo (d), soja/crambe (e), soja/níger (f), milho/girassol (g), milho/canola (h), milho/cártamo (i), milho/crambe (j) e milho/níger (l), na profundidade de 5-10 cm. A área em cor cinza corresponde ao intervalo hídrico ótimo do solo.

Quanto a Dsc, praticamente não houve alterações nos valores da camada de 0-5 cm para a camada de 5-10 cm e também entre as sucessões de culturas (Figura 1 e 2). A Dsc na camada de 0-5 e 5-10 apresentou valores entre 1,49 a 1,51 Mg m⁻³ em todas as sucessões estudadas. Esta semelhança nos valores de Dsc entre as sucessões de culturas e profundidades foi obtida devido ao cultivo das mesmas serem no mesmo solo (tipo e classe textural), pois para Reichert et al. (2009) e Kaiser et al. (2009), as variações neste indicador em Latossolos são devido as diferenças nos seus teores de argila. Para Tormena et al. (2007) valores acima da Dsc indicam uma condição física altamente restritiva ao desenvolvimento das plantas.

Apesar da semelhança nos valores de Dsc é necessário ressaltar que, nas sucessões soja/milho, soja/níger e milho/níger, os valores de Ds < 1,49-1,51 Mg m⁻³ estão distribuídos em uma faixa mais ampla de menores valores de Ds associados a maiores valores do IHO (Figura 2). Esses resultados relacionam-se a uma melhor estabilidade estrutural do solo nessas sucessões, que pode estar associado à menor densidade do solo (Quadro 1) nessas sucessões de culturas, que leva ao aumento na proporção de macroporos do solo, reduzindo as limitações ocasionadas pela θ_{RP} e θ_{PA} , mantendo o IHO mais próximo do teor de água disponível ($AD = \theta_{CC} - \theta_{PMP}$).

Essa redução no IHO em densidades do solo elevadas está relacionada ao fato de que os valores da θ_{CC} , θ_{PMP} e θ_{RP} aumentam e os valores do θ_{PA} reduzem, podendo causar IHO nulo, quando ocorre o encontro entre seu limite inferior e superior. Resultados semelhantes também foram obtidos por Silva et al. (1994), Leão et al. (2006), Tormena et al. (2007), Serafim et al. (2008a), Lima et al. (2012).

O IHO obtido na cultura do níger em sucessão à soja e ao milho, possivelmente está relacionado ao desenvolvimento do sistema radicular da cultura atuando na redução da resistência mecânica do solo e também pelo aporte de material orgânico ao solo, influenciando à atividade de microrganismos no solo. Carneiro et al. (2008) observaram elevado aporte de material vegetal do níger (> 14 Mg ha⁻¹), incrementando a atividade microbiana do solo e conseqüentemente melhorando sua estrutura. Strudley et al. (2008) relataram que a atividade da mesofauna e de raízes de culturas, podem promover uma rede de bioporos com maior continuidade e conectividade ao longo da matriz do solo, com reflexos no movimento de água, melhorando sua qualidade física.

Trabalhando com a cultura do níger, Souza et al. (2008) observaram que a mesma apresenta os requisitos de uma espécie de cobertura do solo, pois produz uma

quantidade elevada de fitomassa, além de acumular grande quantidade de nitrogênio. Essa manutenção de culturas que proporcionam maior aporte de resíduos orgânicos para o solo favorece a redução da densidade do solo (ARAUJO-JUNIOR et al., 2011).

A sucessão soja/milho também propiciou IHO semelhante aos obtidos pela cultura do níger, que para Betiolo Júnior et al. (2012) está relacionado ao crescimento do sistema radicular da cultura milho. Para os autores, a manutenção de um sistema de rotação de culturas, com adequada cobertura e a ausência de revolvimento do solo propiciam o estabelecimento e manutenção de boas condições físicas no solo via sistema poroso estável e contínuo. Essa melhora na qualidade física do solo pode ser proveniente da diferenciada ação do sistema radicular das plantas, nesse caso, de espécie leguminosa e gramínea (LANZANOVA et al., 2007).

Não apenas o desenvolvimento e ação das raízes são diferentes, mas também a quantidades de raízes por volume de solo (VENZKE FILHO et al., 2004). Assim, observou-se melhor estruturação do solo nas sucessões soja/milho, soja/níger e milho/níger, influenciando os atributos físico-hídricos do Latossolo Vermelho distroférico, ou seja, apresentando maior capacidade de armazenamento de água e aeração, e menor resistência do solo à penetração, contribuindo para o potencial produtivo do solo.

CONCLUSÕES

1. O intervalo hídrico ótimo é um indicador de qualidade física dos solos cultivados no outono-inverno com culturas oleaginosas em sucessão à soja e ao milho de verão; podendo ser utilizado para identificar as principais limitações físicas e adotar melhores técnicas de manejo do solo nessas sucessões.

2. A cultura do níger cultivada no outono-inverno tanto em sucessão à soja quanto ao milho de verão proporciona melhor estrutura do Latossolo Vermelho distroférico, em relação às demais sucessões de culturas.

3. A densidade crítica do Latossolo Vermelho distroférico é pouco influenciada pelas sucessões de culturas em sistema plantio direto.

4. Com o aumento da densidade do solo, o IHO em cultivos com sucessões de culturas oleaginosas é mais limitado pela porosidade de aeração do que pela resistência do solo à penetração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDALLA, A.L.; SILVA FILHO, J.C.; GODOI, A.R.; CARMO, C.A.; EDUARDO, J.L.P. Utilização de subprodutos da indústria de biodiesel na alimentação de ruminantes. **Revista Brasileira Zootecnia**, v.37, p.260-268, 2008. (Suplemento especial)
- AJAYI, A. E.; DIAS JUNIOR, M. S.; CURI, N.; ARAUJO JUNIOR, C.F.; SOUZA, T.T.T.; VASCONCELOS JUNIOR, A.I. Strength attributes and compaction susceptibility of Brazilian Latosols. **Soil and Tillage Research**, v.105, p.122-127, 2009.
- ARANTES, A.M. **Cártamo (*Carthamus tinctorium* L.) produção de biomassa, grãos, óleo e avaliação nutritiva da silagem**. 2011. 34 f. Dissertação (Mestrado em Produção Animal Sustentável). Instituto de Zootecnia, Nova Odessa-SP.
- ARAUJO–JUNIOR, C.F.; DIAS JUNIOR, M.S.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALCÂNTARA, E.N. Capacidade de suporte de carga e umidade crítica de um Latossolo induzida por diferentes manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.115-131, 2011.
- ARGENTON, J.; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C.; WILDNER, L.P. Comportamento de atributos relacionados com a forma da estrutura de Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo e plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.425-435, 2005.
- BENGOUGH, A.G.; BRAN SBY, M.F.; HAN S, J.; McKENNA , S.J.; ROBERTS, T.; VALENTINE, T.A. Root responses to soil physical conditions: Growth dynamics from field to cell. **Journal of Experimental Botany**, v.57, p.437-443, 2006.
- BERGAMIN, A.C.; VITORINO, A.C.T.; FRANCHINI, J.C.; SOUZA, C.M.A.; SOUZA, F.R. Compactação em um Latossolo Vermelho distroférrico e suas relações com o crescimento radicular do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.681-691, 2010a.
- BERGAMIN, A.C.; VITORINO, A.C.T.; LEMPP, B.; SOUZA, C.M.A.; SOUZA, F.R. Anatomia radicular de milho em solo compactado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.45, p.299-305, 2010b.
- BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J.A.; LEITE, D.; AMARAL, A.J.; ZOLDAN JUNIOR, W.A. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas às do campo nativo. **Revista Brasileira Ciência Solo**, v.28; p.155-163, 2004.
- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SILVA, A.P. Intervalo hídrico ótimo e a produção de soja e arroz em dois Latossolos. **Irriga**, v.9, p.181-192, 2004a.
- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SILVA, A.P.; ROQUE, C.G.; FERRAZ, M.V. Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo na produtividade de arroz de sequeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, p.575-583, 2004b.

BETIOLI JÚNIOR, E.; MOREIRA, W.E.; TORMENA, C.A.; FERREIRA, C.J.B.; SILVA, A.P.; GIAROLA, N.F.B. Intervalo hídrico ótimo e grau de compactação de um Latossolo vermelho após 30 anos sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.971-982, 2012.

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

BLAINSKI, E.; TORMENA, C.A.; GUIMARÃES, R.M.L.; NANNI, M.R. Qualidade física de um Latossolo sob plantio direto influenciada pela cobertura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.79-87, 2012.

BRADFORD, J.M. Penetrability. In: KLUTE, A., ed. **Methods of soil analysis**. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, 1986. p.463-478.

BRAIDA, J.A.; REICHERT, J.M.; VEIGA, M.; REINERT, D.J. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio proctor. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.605-614, 2006.

BUSSCHER, W.J. Adjustment of that-tipped penetrometer resistance data to a common water content. **Transactions of the ASAE**, v.33, p.519-524, 1990.

CALONEGO, J.C.; BORGHI, E.; CRUSCIOL, C.A.C. Intervalo hídrico ótimo e compactação do solo com cultivo consorciado de milho e braquiária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.2183-2190, 2011.

CALONEGO, J.C.; ROSOLEM, C.A. Least limiting water range in soil under crop rotations and chiseling. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.759-771, 2011

CARDUCCI, C.E.; OLIVEIRA, G.C.; SEVERIANO, E.C.; ZEVIANI, W.M. Modelagem da curva de retenção de água de Latossolos utilizando a equação duplo Van Genuchten. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.77-86, 2011.

CARNEIRO, M.A.C.; CORDEIRO, M.A.S.; ASSIS, P.C.R.; MORAES, E.S.; PEREIRA, H.S.; PAULINO, H.B.; SOUZA, E.D. Produção de fitomassa de diferentes espécies de cobertura e suas alterações na atividade microbiana de solo de cerrado. **Bragantia**, v.67, p.455-462, 2008.

COLLARES, G.L.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; KAISER, D.R. Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, p.1663-1674, 2006.

COLLARES, G.L.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; KAISER, D.R. Compactação de um Latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.933-942, 2008.

DEXTER, A.R. Soil physical quality: Part II. Friability, tillage, tith and hard-setting. **Geoderma**, v.120, p.215-225, 2004.

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

GARBIATE, M.V.; VITORINO, A.C.T.; TOMASINI, B.A.; BERGAMIN, A.C.; PANACHUKI, E. Erosão em entre sulcos em área cultivada com cana crua e queimada sob colheita manual e mecanizada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.2145-2155, 2011

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**, v.32, p.180-186, 1968.

GRANTZ, S.A.; SLINKER, B.K. **Primer of applied regression and analysis of variance**. New York: McGraw Hill, 1990. 777p.

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**, v.25, p.11-18, 2001.

KAISER, D.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; COLLARES, G.L.; KUNZ, M. Intervalo hídrico ótimo no perfil explorado pelas raízes de feijoeiro em um Latossolo sob diferentes níveis de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.845-855, 2009

KLEIN, V.A.; CAMARA, R.K. Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em Latossolo Vermelho sob plantio direto escarificado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.221-227, 2007

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis - physical and mineralogical methods**. 2 ed. Madison: ASA – SSSA, 1986, p.635-662.

LANZANOVA, M.E.; NICOLOSO, R.S.; LOVATO, T.; ELTZ, F.L.F.; AMADO, T.J.C.; REINERT, D.J. Atributos físicos do solo em sistema de integração lavoura-pecuária sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.1131-1140, 2007

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**, v.78, p.151-170, 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**, v.88, p.279-285, 2006.

LIMA, V.M.P.; OLIVEIRA, G.C.; SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, L.F.C. Intervalo hídrico ótimo e porosidade de solos cultivados em área de proteção ambiental do sul de minas gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.1087-1095, 2009.

LIMA, V.M.P. **Melhoria estrutural de Latossolo: indicadores de qualidade e estratégias de manejo**. 2011. 108 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG.

LIMA, V.M.P.; OLIVEIRA, G.C.; SERAFIM, M.E.; CURI, N.; EVANGELISTA, A.R. Intervalo hídrico ótimo como indicador de melhoria da qualidade estrutural de Latossolo degradado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.71-78, 2012.

OLIVEIRA, G.C.; DIAS JR., M.S.; RESCK, D.V.S.; CURI, N. Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.327-336, 2004.

PEIXOTO, P.P.P. **Bases para aproveitamento e gerenciamento de recursos hídricos na região de Dourados-MS**. 2002. 98 f. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu-SP.

REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.12, p.211-216, 1988.

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

ROSS, P.J.; WILLIAMS, J.; BRISTOW, K.L. Equations for extending water-retention curves to drynees. **Soil Science Society of American Journal**, v.55, p.923-927, 1991.

SAVAGE, M.J.; RITCHIE, J.T.; LAND, W.L.; DUGAS, W.A. Lower limit of soil water available. **Agronomy Journal**, v.88, p.844-851, 1996.

SERAFIM, M.E.; VITORINO, A.C.T.; PEIXOTO, P.P.P.; SOUZA, C.M.A.; CARVALHO, D.F. Intervalo hídrico ótimo em um Latossolo Vermelho distroférrico sob diferentes sistemas de produção. **Engenharia Agrícola**, v.28, p.654-665, 2008a.

SERAFIM, M.E.; VITORINO, A.C.T.; SOUZA, C.M.A.; PRADO, E.D.; VENTURIN, J.C.; YAMAMOTO, N.T. Desenvolvimento de um penetrógrafo eletromecânico de bancada. **Revista Ciências Técnicas Agropecuárias**, v.17, p.61-65, 2008b.

SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G.C.; DIAS JÚNIOR, M.S.; COSTA K.A.P.; BENITES, V.M.; FERREIRA FILHO, S.M. Structural changes in Latosols of the Cerrado Region: II – Soil compressive behavior and modeling of additional compaction. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.783-791, 2011a.

SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G.C.; DIAS JÚNIOR, M.S.; COSTA K.A.P.; SILVA, F.G.; FERREIRA FILHO, S.M. Structural changes in Latosols of the cerrado region: I – relationships between soil physical properties and least limiting water range. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.773-782, 2011b.

SILVA, F.A.S.; AZEVEDO, C.A.V. Versão do programa computacional Assistat para o sistema operacional Windows. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.4, p.71-78, 2002.

SILVA, A.P.; KAY, B.D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, v.58, p.1775-1781, 1994.

SILVA, D.A.; SOUZA, L.C.F.; VITORINO, A.C.T.; GONÇALVES, M.C. Aporte de fitomassa pelas sucessões de culturas e sua influência em atributos físicos do solo no sistema plantio direto. **Bragantia**, v.70, p.147-156, 2011

SINGH, B.; MALHI, S.S. Response of soil physical properties to tillage and residue management on two soils in a cool temperate environment. **Soil and Tillage Research**, v.85, p.143-153, 2006.

SOUZA, E.D.; CARNEIRO, M.A.C.; BANYNS, V.L. Fitomassa e acúmulo de nitrogênio, em espécies vegetais de cobertura do solo para um Latossolo Vermelho distroférico de Cerrado. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.30, p.525-531, 2008.

STATSOFT. **Statistica (data analysis software system) - version 8.0**. Tulsa: StatSof, 2007.

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

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

TAYLOR, H.M.; ROBERSON, G.M.; PARKER JR., J.J. Soil strength-root penetration relations to medium to coarse-textured soil materials. **Soil Science**, v.102, p.18-22, 1966.

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**, v.31, p.211-219, 2007.

TORMENA, C.A.; ROLOFF, G.; SÁ, J.C. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, p.301-309, 1998.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; GONÇALVES, A.C.A.; FOLEGATTI, M.V. Intervalo ótimo de potencial da água no solo: Um conceito para avaliação da qualidade física do solo e manejo da água na agricultura irrigada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.3, p.286-292, 1999.

VENZKE FILHO, S.; FEIGL, B.; PICCOLO, M.; FANTE Jr, L.; NETO, M.; CERRI, C. Root systems and microbial biomass under no-tillage system. **Scientia Agricola**, v.61, p.529-537, 2004.

ARTIGO 3

CAPACIDADE DE SUPORTE DE CARGA DE UM LATOSSOLO CULTIVADO COM SOJA E MILHO EM SUCESSÃO A OLEAGINOSAS DE OUTONO-INVERNO

RESUMO

A introdução de culturas oleaginosas anuais antecedendo o cultivo tanto da soja quanto do milho pode ser uma boa alternativa para diversificar o cultivo no sistema plantio direto. Objetivou-se com este trabalho avaliar a capacidade de suporte de carga de um Latossolo Vermelho distroférico argiloso, cultivado no verão com soja e milho em sucessão a culturas oleaginosas anuais de outono-inverno. O estudo foi realizado a campo, na área da Fazenda Experimental de Ciências Agrárias - UFGD, no município de Dourados, MS, no ano agrícola de 2010/2011. O delineamento experimental foi de blocos casualizados, contendo 11 tratamentos, com quatro repetições. Os tratamentos consistiram das culturas da soja e do milho cultivadas no verão em sistema plantio direto, semeadas em sucessão às culturas oleaginosas anuais de outono-inverno: girassol (*Helianthus annuus* L.), canola (*Brassica napus* L. e *Brassica rapa*), cártamo (*Carthamus tinctorius* L.), crambe (*Crambe abyssinica* Hochst.) e níger (*Guizotia abyssinica*), e a sucessão milho safrinha/soja (outono-inverno/verão), mais cultivada na região. Após a colheita das culturas da soja e do milho verão foram coletadas amostras de solo com estrutura preservada em cilindros metálicos, nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm. Houve menor capacidade de suporte de carga nas culturas da soja e do milho em sucessão à cultura do níger ao longo de todo o intervalo de umidade do solo e nas duas profundidades estudadas, sendo este resultado devido ao efeito integrado dos incrementos da macroporosidade e redução da densidade inicial do solo. De maneira geral, na profundidade de 5-10 cm, observou-se aumento nos valores de pressão de preconsolidação em relação à camada de 0-5 cm, aumentando os valores de umidade volumétrica crítica para o tráfego. As sucessões canola/milho e canola/soja na camada de 0-5 cm e canola/soja e girassol/soja na camada de 5-10 cm favoreceram o incremento da capacidade de suporte de carga e redução da macroporosidade, devido aos maiores valores de densidade do solo.

Palavras-chave: pressão de preconsolidação, compressibilidade, compactação do solo.

LOAD BEARING CAPACITY IN LATOSOL UNDER SOYBEAN AND MAIZE IN SUCCESSION OLEAGINOUS CROPS

ABSTRACT

The introduction of annual oleaginous crops preceding both the soybean and maize can be a good alternative to diversify cultivations in no-tillage system. The objective of this study was to evaluate the load bearing capacity of a clayed Red Latosol (Rhodic Acrustox), cultivated in the summer with soybean and maize in succession the annual oleaginous crops in autumn-winter. The experiment was carried out in field conditions, in Dourados, Mato Grosso do Sul state, Brazil, during the agricultural year of 2010/11. A randomized complete block design was used, containing 11 treatments, with four replicates. The treatments consisted of soybean and maize grown in summer in no-tillage system sown in succession for oleaginous crops autumn-winter: sunflower (*Helianthus annuus* L.), rapeseed (*Brassica napus* L. e *Brassica rapa* L.), safflower (*Carthamus tinctorius* L.), crambe (*Crambe abyssinica* Hochst.) and to níger (*Guizotia abyssinica* Cass.), and the succession maize/soybean (autumn-winter/ summer), most cultivated in the region. After the harvest of the cultures soybean and maize summer, undisturbed soil samples were collected in metallic cylinders, in depths of 0-5 and 5-10 cm. There was a lower load bearing capacity of soil of the cultures of the soybean and maize in succession to the culture of níger throughout the interval of soil moisture and in the two studied depths, being this result due to the integrated effect of the increments of the macroporosity and reduction of the initial density soil. In a generalized manner, in a depth of 5-10 cm, an increase in preconsolidation pressure in relation to the layer of 0-5 cm, increasing the values of critical volumetric moisture. The successions rapeseed/maize and rapeseed/soybean in the layer of 0-5 cm and rapeseed/soybean and sunflower/soybean in the layer of 5-10 cm had favored the increment of the load bearing capacity of and reduction of the macroporosity due to higher values of soil density.

Index terms: preconsolidation pressure, compressibility, soil compactation.

INTRODUÇÃO

A necessidade mundial por fontes alternativas de energia coloca o Brasil em posição de destaque em relação à produção de biodiesel, em razão das condições edafoclimáticas favoráveis ao cultivo de espécies oleaginosas anuais, principalmente com época de semeadura no período de outono-inverno, antecedendo aos cultivos da soja e do milho, que para Silva et al. (2006a) são os cultivos predominantes no verão. Além disso, as sucessões de culturas alteram a estrutura do solo, que por sua vez interferem nos atributos físicos, como densidade do solo (CALONEGO e ROSOLEM, 2011), macroporosidade (PICKLER et al., 2012) e capacidade de suporte de carga do solo (DEBIASE et al., 2008) e conseqüentemente, influenciando no desenvolvimento das culturas sucessoras (SILVA et al., 2007a).

Práticas agrícolas não adequadas ao sistema de produção sustentável podem levar a degradação do solo e conseqüentemente reduzir o desenvolvimento das culturas (COLLARES et al., 2008; BERGAMIN et al., 2010a). A diminuição da qualidade da estrutura do solo pode ocorrer tanto em superfície, quanto em subsuperfície, com o surgimento de camadas compactadas, resultando em menores taxas de infiltração de água e maiores de escoamento superficial e de erosão, que poderá acelerar ainda mais o processo de degradação do solo (PORTELA et al., 2010).

Em solos agrícolas, a pressão exercida na superfície do solo pelo tráfego de máquinas e equipamentos nas operações de manejo normalmente aumenta a densidade do solo e diminui a macroporosidade (STRECK et al., 2004; SERVADIO et al., 2005; FREDDI et al., 2007; BERGAMIN et al., 2010a). Essa alteração na estrutura é agravada, quando as operações mecanizadas nas lavouras são realizadas em solos com umidade elevada (STRECK et al., 2004; BEUTLER et al., 2007; FREDDI et al., 2007; COLLARES et al., 2008; SAFFIH-HDADI et al., 2009) associada a pressões superiores à pressão de preconsolidação (SILVA et al., 2003; HORN et al., 2004; LEBERT et al., 2007; SEVERIANO et al., 2011). Este processo é considerado um dos mais importantes fatores limitantes à produção das culturas exploradas (SEVERIANO et al., 2011).

A preservação da estrutura do solo está relacionada com a sua capacidade de suporte de carga, a qual pode ser obtida nos ensaios de compressão uniaxial (PIRES et al., 2012). A curva de compressão do solo é uma representação gráfica da relação entre a pressão aplicada ao solo e algum atributo relacionado com a sua estrutura, tais como a

densidade do solo ou índice de vazios, obtendo a partir dessa, a pressão de preconsolidação (σ_p), que tem sido considerada como indicador da compressibilidade do solo (SEVERIANO et al., 2011). As cargas que excedem o valor σ_p promovem a compactação adicional do solo (DIAS JUNIOR, 1994).

A suscetibilidade do solo à compactação é maior em condições de elevado conteúdo de água no solo (DIAS JUNIOR e PIERCE, 1996), devido à baixa capacidade de suporte de carga do solo. Assim, torna-se necessário a determinação da umidade antes que seja cultivado ou trafegado, bem como o entendimento dos danos causados à sua estrutura, caso as pressões aplicadas pelas máquinas agrícolas excedam a capacidade de suporte de carga do solo (SILVA et al., 2007b).

Práticas adequadas de manejo que reduzam a ocorrência ou os problemas da compactação do solo, melhorando sua estrutura como um todo e são de fundamental importância na recuperação de solos fisicamente degradados. Comparando resultados de campo nativo com algumas sucessões de culturas, Portela et al. (2010) verificaram que, de modo geral, todas as sequências de culturas foram eficazes na restauração da estrutura do solo durante o período de seus cultivos. Sendo que, a utilização de espécies com diferentes sistemas radiculares é fundamental para o planejamento de recuperação de áreas degradadas (TEIXEIRA et al., 2003). Williams e Weil (2004) observaram que plantas de soja conseguem se desenvolver em solo compactado, por meio dos bioporos deixados pelas raízes de canola (*Brassica rapa*), demonstrando o benefício que culturas antecessoras podem trazer às subsequentes. Para Lopes et al. (2007) as coberturas vegetais promovem melhorias no solo com redução da compactação, favorecendo o desenvolvimento das culturas posteriores.

Considerando que o aumento do tráfego de máquinas em condições inadequadas de umidade pode promover compactação do solo, justifica-se a necessidade de estudos que quantifiquem os níveis de pressões que podem ser aplicadas aos solos cultivados com soja e milho em sucessão a culturas oleaginosas anuais de outono-inverno sem que ocorra degradação da sua estrutura. Aliado a isso, sistemas de sucessão de culturas que contribuem para a manutenção ou melhoria da estrutura do solo, podem ser considerados fundamentais à sustentabilidade da atividade agrícola.

Assim, objetivou-se com este estudo avaliar a capacidade de suporte de carga de um Latossolo Vermelho distroférico argiloso, cultivado no verão tanto com soja quanto com milho em sucessão a culturas oleaginosas anuais de outono-inverno.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado em área da Fazenda Experimental de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), no município de Dourados, MS, no ano agrícola de 2010/2011. O local situa-se em latitude 22°13'58"S, longitude de 54°59'30"W e altitude de 410 m. O clima é do tipo Cwa, segundo a classificação de Köppen. A precipitação pluvial média anual na região é de 1.400 mm e as temperaturas médias anual que variam de 18°C a 25°C nos meses mais frio e mais quente, respectivamente (PEIXOTO, 2002).

O delineamento experimental foi de blocos casualizados, contendo 11 tratamentos, com quatro repetições. Os tratamentos consistiram das culturas da soja e do milho cultivadas no verão do ano agrícola 2010/2011 em sistema plantio direto, semeadas em sucessão a culturas oleaginosas anuais de outono-inverno: girassol (*Helianthus annuus* L.), canola (*Brassica napus* L. e *Brassica rapa*), cártamo (*Carthamus tinctorius* L.), crambe (*Crambe abyssinica* Hochst.) e níger (*Guizotia abyssinica*), e a sucessão milho safrinha/soja (outono-inverno/verão), a mais usual na região (Quadro 1).

QUADRO 1. Sequência de rotação e sucessão de culturas envolvendo espécies oleaginosas anuais de outono-inverno e, soja e milho cultivados no verão

Tratamentos	Ano agrícola 2009/2010		Ano agrícola 2010/2011
	Verão	Outono/inverno	Verão
1	Soja	Milho safrinha	Soja
2	Soja	Crambe	Milho
3	Soja	Girassol	Milho
4	Milho	Crambe	Soja
5	Milho	Girassol	Soja
6	Soja	Cártamo	Milho
7	Soja	Canola	Milho
8	Soja	Niger	Milho
9	Milho	Cártamo	Soja
10	Milho	Canola	Soja
11	Milho	Niger	Soja

O solo foi um Latossolo Vermelho distroférico, cuja textura, determinada pelo método da pipeta (EMBRAPA, 1997) foi 531 g kg⁻¹ de argila, 249 g kg⁻¹ de silte e 220 g kg⁻¹ de areia nos primeiros 10 cm de profundidade. A área foi manejada sob

plantio direto por dez anos até o inverno de 2009, em um sistema de rotação de culturas envolvendo soja e milho no verão, e milho safrinha e aveia no outono-inverno.

No verão do ano agrícola 2009/2010 foram cultivadas as culturas da soja e milho. Após a colheita da soja e do milho verão em fevereiro de 2010 foram semeadas as culturas oleaginosas anuais de outono-inverno e o milho safrinha. A semeadura do milho safrinha (cv. DKB 350 YG) foi realizada mecanicamente no dia 10 de março de 2010, em sucessão à cultura da soja, utilizando-se uma semeadora-adubadora de plantio direto, com sete linhas, espaçadas entre si de 0,45 m, regulada para distribuir 0,2 Mg ha⁻¹ da fórmula 10-20-20 e uma quantidade de sementes suficiente para obter uma população de 70 mil plantas por hectare. No dia 01 de abril 2010 foram semeadas as oleaginosas de outono-inverno em sucessão aos cultivos da soja e milho verão, utilizando-se uma semeadora-adubadora de plantio direto, seguindo as mesmas recomendações para o milho safrinha quanto ao espaçamento e adubação. A colheita das culturas de outono-inverno foi realizada mecanicamente e variou conforme o ciclo das espécies, sendo realizada entre os meses de julho e setembro de 2010.

As semeaduras da soja (cv. BMX Potência RR) e do milho verão (cv. DKB 390 VT PRO) foram efetuadas no dia 30 de outubro de 2010, em sucessão as espécies de outono-inverno mencionadas no quadro 1, utilizando-se uma semeadora-adubadora de plantio direto, com sete linhas para soja, espaçadas entre si de 0,45 m e quatro linhas para o milho, espaçadas de 0,9 m. A quantidade de sementes utilizada foi suficiente para a obtenção de uma população de 300 mil plantas por hectare e 60 mil plantas por hectare para a soja e milho, respectivamente. A adubação para a soja consistiu de 0,3 Mg ha⁻¹ da fórmula 00-20-20 (NPK) e para o milho foi utilizado 0,3 Mg ha⁻¹ da fórmula 10-20-20 (NPK).

Após a colheita das culturas da soja e do milho verão foram coletadas amostras de solo com estrutura preservada em cilindros metálicos com 6,45 cm de diâmetro e 2,54 cm de altura, nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm. As amostras foram retiradas nas entrelinhas das culturas. As parcelas mediram 35 m de comprimento e 14 m de largura, perfazendo uma área total de 490 m². Em cada parcela e profundidade foram coletadas sete amostras, totalizando 56 amostras para cada tratamento (28 amostras x 2 profundidades).

Após o preparo das amostras, essas foram saturadas por meio da elevação gradual de uma lâmina de água até atingir cerca de dois terços da altura do anel para posterior estabilização do teor de água. As 28 amostras de cada tratamento e

profundidade foram divididas em sete grupos de quatro amostras, e cada grupo submetido às seguintes tensões: 0,006; 0,01; 0,033; 0,066; 0,1; 0,3 e 1,5 MPa, utilizando mesa de tensão (0,006 MPa) e câmara de Richards para as demais tensões, conforme Klute (1986). Os macroporos foram estimados como a diferença entre o conteúdo de água do solo saturado e o conteúdo de água do solo após a aplicação da tensão de 0,006 MPa, como proposto em Embrapa (1997).

Quando as amostras atingiram o equilíbrio nas referidas tensões, estas foram levadas para o consolidômetro automático, modelo CNTA-IHM/BR-001/07, para o ensaio de compressão uniaxial de acordo com Bowles (1986) e modificado por Dias Junior (1994). As pressões crescentes aplicadas a cada amostra foram: 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1.600 kPa, sendo cada uma aplicada até que 90% da deformação máxima fosse alcançada (TAYLOR, 1948). Após cada ensaio de compressão uniaxial, as amostras foram levadas à estufa a 105-110 °C, por 48 horas, para determinar a umidade volumétrica e a densidade do solo pelo método do anel volumétrico (EMBRAPA, 1997).

A curva de compressão do solo foi obtida colocando-se as pressões aplicadas no eixo das abscissas versus a densidade do solo obtida ao final de cada estágio de aplicação de cada pressão, no eixo das ordenadas, sendo determinada a pressão de preconsolidação (σ_p) para cada amostra, utilizando-se o método proposto por Dias Junior e Pierce (1995). A seguir, as σ_p com os valores de umidade volumétrica (θ) foram ajustadas por meio do programa computacional Statistica 7.0 (STATSOFT, 2007), a uma regressão exponencial decrescente do tipo [$\sigma_p = 10^{(a+b\theta)}$], proposto por Dias Junior (1994), determinando-se os modelos de capacidade de suporte de carga do solo (CSC). As letras “a” e “b” representam os parâmetros empíricos de ajuste do modelo, ou seja, o coeficiente linear e angular, respectivamente.

As comparações entre os modelos foram feitas utilizando o teste de homogeneidade de modelos lineares descrito em Snedecor e Cochran (1989). Para obtenção dos modelos lineares a partir do modelo exponencial [$\sigma_p = 10^{(a+b\theta)}$], aplicou-se o logaritmo nos valores de σ_p , resultando em uma equação do tipo $\log \sigma_p = a + b\theta$. O teste de homogeneidade de modelos lineares considera dois modelos, e estes são comparados pela análise do intercepto “a”, do coeficiente angular “b” e homogeneidade dos dados (F).

Os resultados das análises de macroporosidade e densidade do solo foram submetidos à análise de variância, e quando significativa foi aplicado o teste de Scott-

Knott com 5% de probabilidade para a comparação de médias, utilizando o aplicativo computacional Assistat 7.6 (SILVA e AZEVEDO, 2002).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nas camadas de 0-5 e 5-10 cm, os menores valores de densidade do solo e maiores de macroporosidade foram observados nas culturas da soja e do milho verão cultivadas em sucessão à cultura do níger (Quadro 2), mostrando que o cultivo dessa cultura no outono-inverno melhora o ambiente do solo para as culturas sucessoras. Carneiro et al. (2008) observaram que a cultura do níger produziu quantidade satisfatória de fitomassa ($> 14 \text{ Mg ha}^{-1}$) e promoveu aumentos na atividade microbiana do solo, melhorando sua estrutura.

Souza et al. (2008) estudando diversas espécies vegetais de cobertura do solo em um Latossolo Vermelho distroférico de Cerrado, observaram que a cultura do níger obteve produção de fitomassa superior a 6 Mg ha^{-1} e acúmulo de nitrogênio superior a $100 \text{ kg de N ha}^{-1}$, sendo considerada dentro dos requisitos para espécies de cobertura. Para Araujo-Junior et al. (2011), a manutenção de culturas com maior aporte de resíduos orgânicos têm promovido alterações estruturais nos solos, modificando diversos dos seus atributos, especialmente a densidade do solo.

Os maiores valores de densidade do solo e menores de macroporosidade, na profundidade de 0-5 cm foram observados na cultura do milho em sucessão à canola e na cultura da soja em sucessão às culturas do girassol, canola e crambe, enquanto na camada de 5-10 cm a maior densidade do solo e menor porosidade de aeração foram observadas na cultura da soja em sucessão às culturas do girassol, canola e crambe (Quadro 2).

As gramíneas, por apresentarem maior densidade de raízes e melhor distribuição do sistema radicular no solo (SILVA e MIELNICZUK, 1997) favorecem a agregação do solo na camada superficial, proporcionando melhor qualidade física ao solo (ANDRADE et al., 2009). Sendo que, as rotações de culturas com ausência de espécies com sistema radicular fasciculado, proporcionam menor qualidade estrutural na camada de 0 a 5 cm (CALONEGO e ROSOLEM, 2008).

Estudando a influência dos cultivos da soja e do milho em sucessão a culturas de cobertura nos atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto, Pickler et al. (2012) verificaram que a cultura do milho apresentou-se mais eficiente no aumento da macroporosidade e redução da densidade do solo se comparada à cultura da soja. As alterações observadas são provavelmente provenientes

da ação diferenciada do sistema radicular das plantas pertencentes às famílias botânicas das leguminosas e gramíneas (LANZANOVA et al., 2007).

O cultivo da soja em sucessão ao milho safrinha proporcionou valores intermediários de densidade do solo e macroporosidade, comparado com as demais sucessões estudadas. Silva et al. (2011) estudando o cultivo de diferentes espécies vegetais, semeadas no verão ou no inverno em um Latossolo Vermelho distroférico muito argiloso, verificaram densidade do solo de $1,44 \text{ Mg m}^{-3}$ e macroporosidade de $0,12 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ na camada de 5-10 cm de profundidade, valores estes semelhantes aos obtidos neste trabalho.

QUADRO 2. Densidade do solo e macroporosidade em duas profundidades de um Latossolo Vermelho distroférico, cultivado com soja e milho em sucessão a diferentes culturas oleaginosas anuais de outono-inverno

Sucessões de culturas	Profundidades (cm)			
	0-5	5-10	0-5	5-10
(Out-In/Ver)	Densidade do solo (Mg m^{-3}) ⁽¹⁾		Macroporosidade ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) ⁽²⁾	
Milho/Soja	1,39 b	1,44 b	0,13 b	0,10 b
Girassol/Milho	1,37 b	1,46 b	0,14 b	0,10 b
Canola/Milho	1,43 a	1,45 b	0,10 c	0,10 b
Cártamo/Milho	1,38 b	1,44 b	0,13 b	0,10 b
Crambe/Milho	1,38 b	1,44 b	0,13 b	0,10 b
Níger/Milho	1,33 c	1,39 c	0,16 a	0,12 a
Girassol/Soja	1,42 a	1,48 a	0,10 c	0,08 c
Canola/Soja	1,44 a	1,49 a	0,10 c	0,08 c
Cártamo/Soja	1,38 b	1,46 b	0,14 b	0,10 b
Crambe/Soja	1,41 a	1,48 a	0,11 c	0,08 c
Níger/Soja	1,32 c	1,40 c	0,16 a	0,12 a
CV (%)	2,49	1,52	11,77	8,82

Out-In/Ver: cultivo de outono-inverno/verão. ⁽¹⁾ Média de 28 repetições. ⁽²⁾ Média de 12 repetições. Médias na coluna, seguidas de mesma letra, não diferem pelo teste de Scott-Knott a 5%.

Considerado o valor da macroporosidade $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ como sendo crítico para o melhor desenvolvimento das plantas (PAGLIAI et al., 2003), observou-se que na camada de 0,05-0,10 m apenas os cultivos da soja e do milho verão em sucessão à cultura do níger foram superiores a este limite crítico (Quadro 2), indicando prováveis limitações de arejamento do solo em épocas mais úmidas nas demais sucessões, como relatado por Collares et al. (2008). Feng et al. (2002) citam que esse valor para solos argilosos já causa inibição ao suprimento adequado de oxigênio às plantas, sendo necessários valores mais altos da porosidade de aeração. Além da aeração, a

macroporosidade tem papel importante no desenvolvimento do sistema radicular das plantas (SERVADIO et al., 2005; BERGAMIN et al., 2010a; BERGAMIN et al., 2010b).

Os parâmetros estimados “a” e “b” dos modelos de CSC [$\sigma_p = 10^{(a+b\theta)}$], nas duas profundidades, variaram de 3,58 a 4,70 e -2,27 a -4,94, respectivamente (Quadro 3). Os coeficientes de determinação (R^2) dos modelos de CSC foram todos significativos a 1% pelo teste pelo teste F e variaram de 0,74 a 0,93 (Quadro 3).

QUADRO 3. Estimativas dos coeficientes “a” e “b” dos modelos de capacidade de suporte de carga do solo [$\sigma_p = 10^{(a+b\theta)}$], com respectivos coeficientes de determinação (R^2) e número de amostras (n), coletadas em duas profundidades de um Latossolo Vermelho distroférico, cultivado com soja e milho em sucessão a diferentes culturas oleaginosas anuais de outono-inverno

Sucessões de culturas	a			b			R^2	n
	Valor estimado	Intervalo de confiança		Valor estimado	Intervalo de confiança			
		Li	Ls		Li	Ls		
(Out-In/Ver)	0 - 5 cm							
Milho/Soja	3,58	3,42	3,74	-2,27	-2,72	-1,81	0,83**	28
Girassol/Milho	4,19	3,98	4,40	-4,03	-4,64	-3,43	0,88**	28
Canola/Milho	4,63	4,24	5,02	-4,84	-5,89	-3,80	0,80**	28
Cártamo/Milho	4,27	3,89	4,65	-4,21	-5,28	-3,14	0,76**	28
Crambe/Milho	3,92	3,64	4,19	-3,28	-4,07	-2,48	0,75**	28
Níger/Milho	3,92	3,61	4,22	-3,47	-4,37	-2,57	0,74**	28
Girassol/Soja	4,03	3,78	4,28	-3,44	-4,14	-2,74	0,82**	28
Canola/Soja	3,88	3,69	4,06	-2,98	-3,50	-2,46	0,86**	28
Cártamo/Soja	4,01	3,78	4,25	-3,48	-4,15	-2,82	0,84**	28
Crambe/Soja	3,91	3,71	4,11	-3,13	-3,68	-2,58	0,86**	28
Níger/Soja	3,61	3,43	3,80	-2,69	-3,25	-2,13	0,82**	28
	5 - 10 cm							
Milho/Soja	4,43	4,16	4,71	-4,44	-5,20	-3,67	0,86**	28
Girassol/Milho	3,93	3,78	4,09	-3,02	-3,45	-2,59	0,90**	28
Canola/Milho	4,70	4,43	4,98	-4,94	-5,66	-4,22	0,90**	28
Cártamo/Milho	4,16	3,86	4,46	-3,66	-4,47	-2,85	0,79**	28
Crambe/Milho	4,44	4,06	4,82	-4,29	-5,31	-3,28	0,79**	28
Níger/Milho	4,12	3,86	4,38	-3,73	-4,47	-2,99	0,84**	28
Girassol/Soja	4,00	3,79	4,20	-3,08	-3,64	-2,52	0,85**	28
Canola/Soja	3,98	3,85	4,11	-3,03	-3,39	-2,68	0,93**	28
Cártamo/Soja	3,94	3,76	4,13	-3,05	-3,56	-2,55	0,87**	28
Crambe/Soja	3,84	3,71	3,98	-2,67	-3,02	-2,32	0,91**	28
Níger/Soja	4,00	3,75	4,25	-3,36	-4,04	-2,67	0,83**	28

Out-In/Ver: cultivo de outono-inverno/verão; Li e Ls: limite inferior e superior do intervalo de confiança 95%, respectivamente; **: significativo pelo teste “F” a 1%.

O intervalo de confiança dos coeficientes do ajuste dos modelos de CSC não inclui o valor igual a zero, possibilitando afirmar que estes (Quadro 3) foram estatisticamente significativos ($p < 0,01$), como descrito por Blainski et al. (2009) e Blainski et al. (2012). Observou-se maior CSC, quando o modelo apresentou maior coeficiente linear “a” e menor coeficiente angular “b” (Figuras 1 e 2), como também verificado por Souza et al. (2012). No entanto, se os valores do coeficiente linear e angular forem próximos, mostrou-se redução na amplitude da σ_p durante as variações da umidade do solo ou menor inclinação da curva do modelo de CSC (Figuras 1 e 2), como também observado por Pacheco e Cantalice (2011).

Para verificar as possíveis alterações da estrutura do solo causadas pelos cultivos da soja e do milho em sucessão às culturas oleaginosas anuais de outono-inverno, todas as comparações entre os modelos de CSC foram realizadas de acordo com Snedecor e Cochran (1989) (Quadros 4, 5 e 6).

QUADRO 4. Teste de significância de acordo com Snedecor e Cochran (1989) entre os modelos de capacidade de suporte de carga [$\sigma_p = 10^{(a+b\theta)}$] das profundidades de 0-5 e 5-10 cm de um Latossolo Vermelho distroférico, cultivado com soja e milho em sucessão a diferentes culturas oleaginosas anuais de outono-inverno

Sucessões de culturas (Out-In/Ver)	Profundidades (cm)	F	F	
			Coeficiente angular, b	Coeficiente linear, a
Milho/Soja	0-5 x 5-10	NH	**	*
Girassol/Milho	0-5 x 5-10	NH	**	**
Canola/Milho	0-5 x 5-10	NH	ns	**
Cártamo/Milho	0-5 x 5-10	NH	*	**
Crambe/Milho	0-5 x 5-10	NH	ns	**
Níger/Milho	0-5 x 5-10	NH	ns	**
Girassol/Soja	0-5 x 5-10	NH	ns	**
Canola/Soja	0-5 x 5-10	NH	ns	**
Cártamo/Soja	0-5 x 5-10	NH	ns	**
Crambe/Soja	0-5 x 5-10	NH	ns	**
Níger/Soja	0-5 x 5-10	NH	ns	**

Out-In/Ver: cultivo de outono-inverno/verão; F: testa a homogeneidade dos dados; b: coeficiente angular da regressão linearizada; a: intercepto da regressão linearizada; H: homogêneo; NH: não homogêneo; ns: não significativo; * e ** significativo a 1 e 5 %, respectivamente.

Os modelos de CSC para as profundidades de 0-5 e 5-10 cm foram estatisticamente diferentes (Quadro 4), o que pode ser justificado pelo fato de terem sido observados valores de densidade do solo e macroporosidade (Quadro 2) diferentes

entre as duas camadas analisadas, influenciando nos modelos de CSC, como também verificado por Rücknagel et al. (2007) e Debiasi et al. (2008). A não homogeneidade dos modelos de CSC entre as profundidades também pode estar relacionada à matéria orgânica do solo, pois para Araujo-Junior et al. (2011), na camada de 0-3 cm há maior conteúdo de carbono orgânico no solo que proporciona maior elasticidade ao solo, refletindo em menor resistência mecânica avaliada pelos modelos de CSC.

As comparações dos modelos de CSC nos cultivos da soja e do milho em sucessão a diferentes culturas anuais de outono-inverno, para as profundidades de 0-5 e 5-10 cm, estão apresentadas nos quadros 5 e 6, respectivamente. Houve diferenças estatísticas entre os modelos de CSC em pelo menos um dos seguintes parâmetros: homogeneidade dos dados, coeficiente angular e linear, quando estes são comparados dois a dois, segundo os procedimentos de Snedecor e Cochran (1989).

QUADRO 5. Teste de significância de acordo com Snedecor e Cochran (1989) entre os modelos de capacidade de suporte de carga [$\sigma_p = 10^{(a+b\theta)}$] de um Latossolo Vermelho distroférrico, na profundidade de 0-5 cm, cultivado com soja e milho em sucessão a diferentes culturas oleaginosas anuais de outono-inverno

Sucessões de culturas (Out-In/Ver)	F	F	
		Coeficiente angular, b	Coeficiente linear, a
Milho/Soja vs Girassol/Milho	NH	**	*
Milho/Soja vs Canola/Milho	NH	**	*
Milho/Soja vs Cártamo/Milho	NH	**	ns
Milho/Soja vs Crambe/Milho	NH	**	*
Milho/Soja vs Níger/Milho	NH	**	**
Milho/Soja vs Girassol/Soja	NH	**	ns
Milho/Soja vs Canola/Soja	NH	ns	*
Milho/Soja vs Cártamo/Soja	NH	**	ns
Milho/Soja vs Crambe/Soja	NH	ns	ns
Milho/Soja vs Níger/Soja	NH	ns	**
Girassol/Milho vs Canola/Milho	NH	ns	**
Girassol/Milho vs Cártamo/Milho	NH	ns	ns
Girassol/Milho vs Crambe/Milho	NH	ns	ns
Girassol/Milho vs Níger/Milho	NH	ns	**
Girassol/Milho vs Girassol/Soja	NH	ns	**
Girassol/Milho vs Canola/Soja	NH	**	**
Girassol/Milho vs Cártamo/Soja	NH	ns	ns
Girassol/Milho vs Crambe/Soja	NH	**	**
Girassol/Milho vs Níger/Soja	NH	**	**
Canola/Milho vs Cártamo/Milho	NH	ns	**

Continua...

QUADRO 5. Continuação

Sucessões de culturas (Out-In/Ver)	F	F	
		Coefficiente angular, b	Coefficiente linear, a
Canola/Milho vs Crambe/Milho	NH	*	**
Canola/Milho vs Níger/Milho	NH	*	**
Canola/Milho vs Girassol/Soja	NH	**	**
Canola/Milho vs Canola/Soja	NH	**	ns
Canola/Milho vs Cártamo/Soja	NH	**	**
Canola/Milho vs Crambe/Soja	NH	**	**
Canola/Milho vs Níger/Soja	NH	**	**
Cártamo/Milho vs Crambe/Milho	NH	*	ns
Cártamo/Milho vs Níger/Milho	NH	ns	**
Cártamo/Milho vs Girassol/Soja	NH	*	**
Cártamo/Milho vs Canola/Soja	NH	**	**
Cártamo/Milho vs Cártamo/Soja	NH	**	ns
Cártamo/Milho vs Crambe/Soja	NH	**	**
Cártamo/Milho vs Níger/Soja	NH	**	**
Crambe/Milho vs Níger/Milho	NH	ns	**
Crambe/Milho vs Girassol/Soja	NH	ns	**
Crambe/Milho vs Canola/Soja	NH	ns	**
Crambe/Milho vs Cártamo/Soja	NH	ns	ns
Crambe/Milho vs Crambe/Soja	NH	ns	**
Crambe/Milho vs Níger/Soja	NH	ns	**
Níger/Milho vs Girassol/Soja	NH	ns	**
Níger/Milho vs Canola/Soja	NH	*	**
Níger/Milho vs Cártamo/Soja	NH	ns	**
Níger/Milho vs Crambe/Soja	NH	*	**
Níger/Milho vs Níger/Soja	NH	*	ns
Girassol/Soja vs Canola/Soja	NH	ns	ns
Girassol/Soja vs Cártamo/Soja	NH	ns	ns
Girassol/Soja vs Crambe/Soja	NH	ns	ns
Girassol/Soja vs Níger/Soja	NH	*	**
Canola/Soja vs Cártamo/Soja	NH	ns	**
Canola/Soja vs Crambe/Soja	NH	ns	ns
Canola/Soja vs Níger/Soja	NH	ns	**
Cártamo/Soja vs Crambe/Soja	NH	ns	*
Cártamo/Soja vs Níger/Soja	NH	ns	**
Crambe/Soja vs Níger/Soja	NH	ns	**

Out-In/Ver: cultivo de outono-inverno/verão; F: testa a homogeneidade dos dados; b: coeficiente angular da regressão linearizada; a: intercepto da regressão linearizada; H: homogêneo; NH: não homogêneo; ns: não significativo; * e ** significativo a 1 e 5 %, respectivamente.

QUADRO 6. Teste de significância de acordo com Snedecor e Cochran (1989) entre os modelos de capacidade de suporte de carga [$\sigma_p = 10^{(a+b\theta)}$] de um Latossolo Vermelho distroférrico, na profundidade de 5-10 cm, cultivado com soja e milho em sucessão a diferentes culturas oleaginosas anuais de outono-inverno

Sucessões de culturas (Out-In/Ver)	F	F	
		Coeficiente angular, b	Coeficiente linear, a
Milho/Soja vs Girassol/Milho	NH	*	*
Milho/Soja vs Canola/Milho	NH	*	**
Milho/Soja vs Cártamo/Milho	NH	ns	ns
Milho/Soja vs Crambe/Milho	NH	ns	**
Milho/Soja vs Níger/Milho	NH	ns	**
Milho/Soja vs Girassol/Soja	NH	ns	**
Milho/Soja vs Canola/Soja	NH	*	**
Milho/Soja vs Cártamo/Soja	NH	*	*
Milho/Soja vs Crambe/Soja	NH	**	**
Milho/Soja vs Níger/Soja	NH	ns	ns
Girassol/Milho vs Canola/Milho	NH	**	ns
Girassol/Milho vs Cártamo/Milho	NH	*	ns
Girassol/Milho vs Crambe/Milho	NH	**	ns
Girassol/Milho vs Níger/Milho	NH	ns	**
Girassol/Milho vs Girassol/Soja	NH	ns	*
Girassol/Milho vs Canola/Soja	NH	ns	**
Girassol/Milho vs Cártamo/Soja	NH	ns	ns
Girassol/Milho vs Crambe/Soja	NH	ns	**
Girassol/Milho vs Níger/Soja	NH	ns	**
Canola/Milho vs Cártamo/Milho	NH	*	**
Canola/Milho vs Crambe/Milho	NH	ns	ns
Canola/Milho vs Níger/Milho	NH	**	**
Canola/Milho vs Girassol/Soja	NH	**	ns
Canola/Milho vs Canola/Soja	NH	**	*
Canola/Milho vs Cártamo/Soja	NH	**	ns
Canola/Milho vs Crambe/Soja	NH	**	*
Canola/Milho vs Níger/Soja	NH	**	**
Cártamo/Milho vs Crambe/Milho	NH	ns	ns
Cártamo/Milho vs Níger/Milho	NH	ns	**
Cártamo/Milho vs Girassol/Soja	NH	ns	**
Cártamo/Milho vs Canola/Soja	NH	*	**
Cártamo/Milho vs Cártamo/Soja	NH	ns	ns
Cártamo/Milho vs Crambe/Soja	NH	**	**
Cártamo/Milho vs Níger/Soja	NH	ns	**
Crambe/Milho vs Níger/Milho	NH	ns	**
Crambe/Milho vs Girassol/Soja	NH	*	ns
Crambe/Milho vs Canola/Soja	H	*	*
Crambe/Milho vs Cártamo/Soja	NH	*	ns
Crambe/Milho vs Crambe/Soja	H	**	*

Continua...

QUADRO 6. Continuação

Sucessões de culturas (Out-In/Ver)	F	F	
		Coefficiente angular, b	Coefficiente linear, a
Crambe/Milho vs Níger/Soja	NH	ns	**
Níger/Milho vs Girassol/Soja	NH	ns	**
Níger/Milho vs Canola/Soja	H	ns	**
Níger/Milho vs Cártamo/Soja	NH	ns	**
Níger/Milho vs Crambe/Soja	NH	*	**
Níger/Milho vs Níger/Soja	NH	ns	ns
Girassol/Soja vs Canola/Soja	NH	ns	ns
Girassol/Soja vs Cártamo/Soja	NH	ns	**
Girassol/Soja vs Crambe/Soja	NH	ns	ns
Girassol/Soja vs Níger/Soja	NH	ns	**
Canola/Soja vs Cártamo/Soja	NH	ns	**
Canola/Soja vs Crambe/Soja	NH	ns	ns
Canola/Soja vs Níger/Soja	NH	ns	**
Cártamo/Soja vs Crambe/Soja	NH	ns	**
Cártamo/Soja vs Níger/Soja	NH	ns	**
Crambe/Soja vs Níger/Soja	NH	*	**

Out-In/Ver: cultivo de outono-inverno/verão; F: testa a homogeneidade dos dados; b: coeficiente angular da regressão linearizada; a: intercepto da regressão linearizada; H: homogêneo; NH: não homogêneo; ns: não significativo; * e ** significativo a 1 e 5 %, respectivamente.

Em todos os modelos de CSC nos cultivos de soja e milho em sucessão as diferentes culturas oleaginosas anuais de outono-inverno foram observadas que a σ_p variou significativa e inversamente com a θ (Figuras 1 e 2). Isso ocorre porque a água atua como lubrificante no solo e reduz o atrito interno entre as partículas e a resistência do solo ao cisalhamento (PACHECO e CANTALICE, 2011), permitindo maior acomodação das partículas do solo no processo de compressibilidade (LIMA et al., 2006; SILVA et al., 2009).

Houve um decréscimo exponencial da σ_p com o aumento da θ (Figuras 1 e 2), seguindo o modelo de compressibilidade do solo proposto por Dias Junior (1994) e aplicado por diversos autores (DEBIASE et al., 2008; ARAUJO-JUNIOR et al., 2011; PAIS et al., 2011; PIRES et al., 2012 e SOUZA et al., 2012). Esses resultados reforçam as recomendações de Oliveira et al. (2003) e Ajayi et al. (2009) de que as operações mecanizadas devem ser realizadas com base na CSC, pois em condições de elevados teores de água no solo, a sustentabilidade agrícola e ambiental pode ser colocada em risco, por comprometer a qualidade estrutural do solo. Salienta-se, ainda, que, fixando-se um mesmo teor de água no solo, os menores valores de σ_p são indicativos de solos mais porosos (LIMA, 2011).

De maneira geral, a melhor qualidade física do solo observada pelos modelos de CSC na profundidade de 0-5 cm segue a ordem: níger/soja > níger/milho > crambe/milho > milho/soja > girassol/milho > cártamo/soja > cártamo/milho > crambe/soja > girassol/soja > canola/soja > canola/milho (Figura 1). Houve menor CSC nas áreas cultivadas com soja e com milho em sucessão à cultura do níger ao longo de todo o intervalo de umidade do solo (Figura 1), sendo este resultado relacionado ao efeito integrado dos incrementos da macroporosidade e redução da densidade do solo (Quadro 2). Estes atributos, juntamente com o conteúdo de água, são considerados determinantes na compressibilidade do solo, pois regulam a magnitude com que a matriz do solo resistirá à deformação (SEVERIANO et al., 2010; SEVERIANO et al., 2011). De acordo com Pacheco e Cantalice (2011) densidades do solo elevadas aumentam o atrito interno entre partículas sólidas e a compressibilidade do solo.

Comparando os modelos de CSC em áreas cultivadas com soja e com milho em sucessão às culturas oleaginosas anuais de outono-inverno, em relação ao modelo de CSC cultivado com soja em sucessão ao milho safrinha, na profundidade de 0-5 cm, observou-se que as sucessões girassol/milho, cártamo/soja, cártamo/milho, crambe/soja, girassol/soja, canola/soja e canola/milho apresentaram maiores CSC (Figura 1).

Essa maior CSC é devido ao aumento da densidade do solo e redução da macroporosidade que promovem aumento do grau de compactação (SUZUKI et al., 2008), contribuindo para que a suscetibilidade do solo à compactação seja diminuída; contudo, elevadas densidades do solo podem causar degradação estrutural do solo, como redução na macroporosidade (PACHECO e CANTALICE, 2011), limitando o desenvolvimento do sistema radicular das plantas (BERGAMIN et al., 2010a; BERGAMIN et al., 2010b; SOUZA et al., 2012). Essa menor susceptibilidade à compactação resulta em menor deformação quando altas pressões (superiores à pressão de preconsolidação) são aplicadas ao solo (SUZUKI et al., 2008).

Com base nos modelos de CSC dos cultivos da soja e do milho em sucessão às culturas oleaginosas anuais de outono-inverno, na profundidade de 0-5 (Figura 1), observou-se que em teores de água no solo mais elevados, houve uma aproximação nos valores da σ_p entre as sucessões de culturas estudadas, no entanto, se tem maior diferença entre as sucessões de culturas para umidades mais baixas, corroborando com Braida (2004) e Pacheco e Cantalice (2011). Para Braida (2004), quando o solo contém elevados teores de água, as diferenças na σ_p entre amostras com maior e menor densidade diminuem, aproximando assim os valores da σ_p entre os tratamentos.

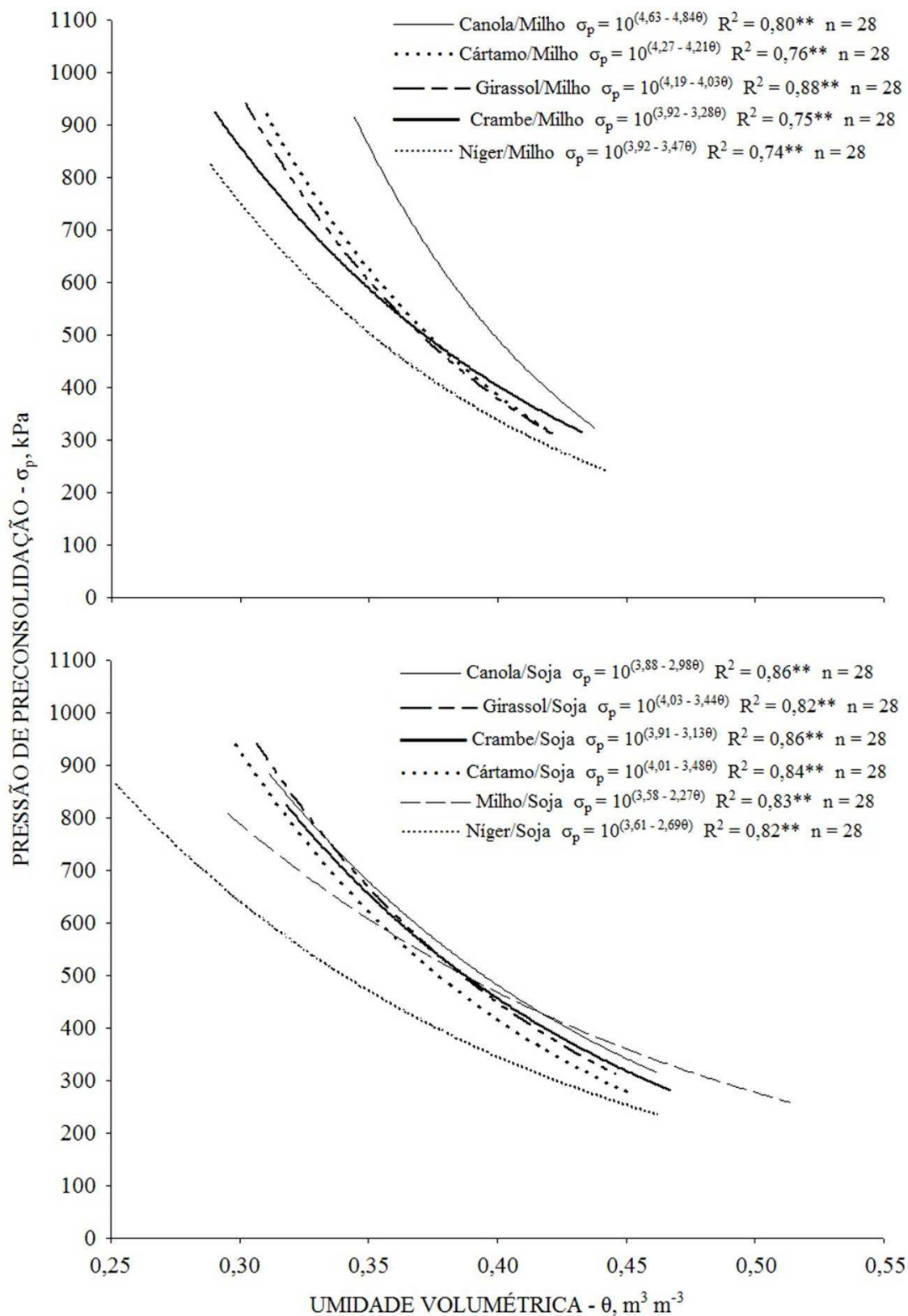


FIGURA 1. Modelos de capacidade de suporte de carga para um Latossolo Vermelho distroférico, na profundidade de 0-5 cm, cultivado com soja e milho em sucessão a diferentes culturas oleaginosas anuais de outono-inverno.

Na profundidade de 5-10 cm (Figura 2) houve aumento nos valores de pressão de preconsolidação do solo em relação à camada de 0-5 cm.

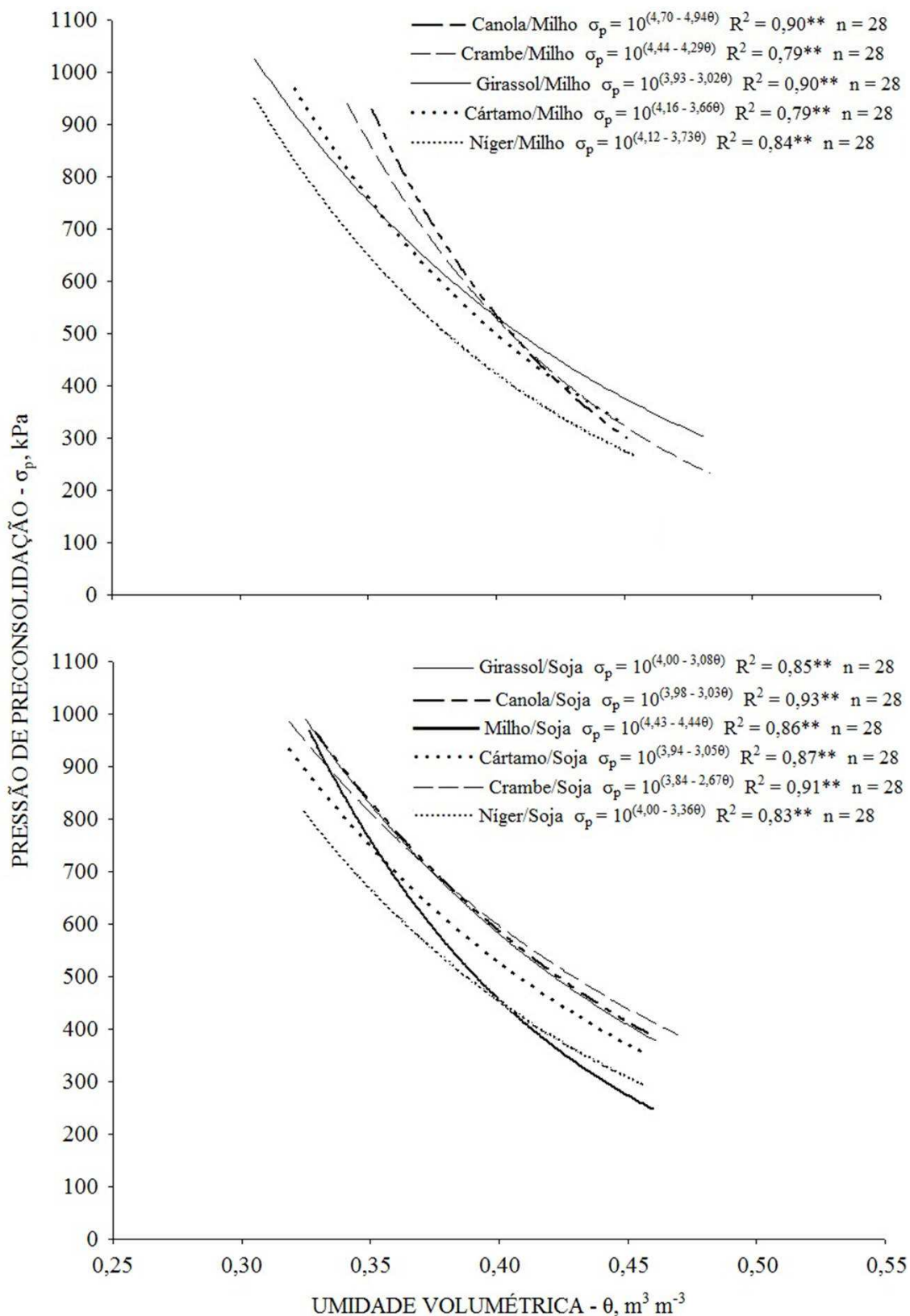


FIGURA 2. Modelos de capacidade de suporte de carga para um Latossolo Vermelho distroférico, na profundidade de 5-10 cm, cultivado com soja e milho em sucessão a diferentes culturas oleaginosas anuais de outono-inverno.

Assim, não foram estabelecidos valores de umidade crítica para as sucessões de culturas na camada de 5-10 cm, pois de acordo com Araujo-Junior et al. (2011), deve-se considerar a camada de solo com menor CSC para que o tráfego de máquinas seja realizado. De maneira geral, observou-se que a CSC na profundidade de 5-10 cm segue a ordem: níger/milho < níger/soja < cártamo/milho < milho/soja < girassol/milho < cártamo/soja < crambe/milho < canola/milho < crambe/soja < girassol/soja < canola/soja (Figura 2).

Os menores valores de σ_p foram obtidos pelas culturas da soja e do milho em sucessão à cultura do níger (Figura 2). Esse resultado deve-se à melhor qualidade estrutural do solo proporcionada por essas sucessões, como pode ser observado pelos valores de densidade inicial do solo e macroporosidade (Quadro 2). A diminuição da σ_p à medida que aumenta o espaço poroso interagregados, que é constituído principalmente por macroporos, também foi relatada por Rucknagel et al. (2007), Debiasi et al. (2008) e Severiano et al. (2011).

Comparando os modelos de CSC dos cultivos da soja e do milho em sucessão às culturas oleaginosas anuais de outono-inverno, em relação ao modelo de CSC do cultivo da soja em sucessão ao milho safrinha, na profundidade de 5-10 cm, observou-se que apenas as sucessões níger/milho e níger/soja apresentaram menores CSC do solo (Figura 2). Vale salientar que nas duas profundidades estudadas as culturas da soja e do milho foram favorecidas pela cultura antecessora do níger. Verificou-se que o uso dessa cultura no outono-inverno antecedendo os cultivos de verão promoveu menores valores de densidade do solo e maiores de macroporosidade (Quadro 2), reduzindo a CSC (Figuras 1 e 2).

Esse resultado pode estar relacionado à presença do sistema radicular da cultura atuando na redução da resistência mecânica do solo, além disso, a cultura pode ter proporcionado um maior aporte de resíduo vegetal, como relatado por Carneiro et al. (2008) e Souza et al. (2008), melhorando a qualidade física do solo. A matéria orgânica do solo atua no arranjo das partículas minerais, com redução da densidade do solo (BRAIDA, 2004), resultando na diminuição da σ_p (DEBIASI et al., 2008). Assim, observa-se que a manutenção de culturas que proporcionem maior aporte de resíduos orgânicos para o solo favorece a redução da densidade do solo (ARAUJO-JUNIOR et al., 2011).

A melhoria da estruturação do solo, influenciada pelo crescimento do sistema radicular associados à atividade de microrganismos, melhora os atributos físico-

hídricos do solo, ou seja, aumenta a capacidade de armazenamento de água, reduz a resistência do solo à penetração de raízes e favorece a aeração, restabelecendo o seu potencial produtivo (LIMA et al., 2012). Para Willians e Weil (2004) e Vezzani e Mielniczuk (2011), essa maior atividade biológica (sistema radicular e atividade dos microrganismos), provavelmente, potencializa a formação de bioporos com ampla variação de tamanho.

CONCLUSÕES

1. Os cultivos tanto da soja quanto do milho de verão em sucessão à cultura do níger no outono-inverno propiciam menor capacidade de suporte de carga do solo na camada de 0-10 cm.

2. As sucessões canola/milho e canola/soja na camada de 0-5 cm e canola/soja e girassol/soja na camada de 5-10 cm favorecem o incremento da capacidade de suporte de carga do solo e redução da macroporosidade, devido aos maiores valores de densidade do solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ANDRADE, R.S.; STONE, L.F.; SILVEIRA, P.M. Culturas de cobertura e qualidade física de um Latossolo em plantio direto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, p.411-418, 2009.

ARAUJO–JUNIOR, C.F.; DIAS JUNIOR, M.S.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALCÂNTARA, E.N. Capacidade de suporte de carga e umidade crítica de um Latossolo induzida por diferentes manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.115-131, 2011.

BERGAMIN, A.C.; VITORINO, A.C.T.; FRANCHINI, J.C.; SOUZA, C.M.A.; SOUZA, F.R. Compactação em um Latossolo Vermelho distroférico e suas relações com o crescimento radicular do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.681-691, 2010a.

BERGAMIN, A.C.; VITORINO, A.C.T.; LEMPP, B.; SOUZA, C.M.A.; SOUZA, F.R. Anatomia radicular de milho em solo compactado. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v.45, p.299-305, 2010b.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; CENTURION, M.A.P.C.; LEONEL, C.L.; SÃO JOÃO, A.C.G.; FREDDI, O.S. Intervalo hídrico ótimo no monitoramento da compactação e da qualidade física de um Latossolo Vermelho cultivado com soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.1223-1232, 2007.

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**, v.33, p.273-281, 2009.

BLAINSKI, E.; TORMENA, C.A.; GUIMARÃES, R.M.L; NANNI, M.R. Qualidade física de um Latossolo sob plantio direto influenciada pela cobertura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.79-87, 2012.

BOWLES, J.E. **Engineering properties of soils and their measurements**. 3 ed. New York: McGraw-Hill, 1986. 218 p.

BRAIDA, J.A. **Matéria orgânica e resíduos vegetais na superfície do solo e suas relações com o comportamento mecânico do solo sob plantio direto**. 2004. 106 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS.

CALONEGO, J.C.; ROSOLEM, C.A. Estabilidade de agregados do solo após manejo com rotações de culturas e escarificação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.1399-1407, 2008.

CALONEGO, J.C.; ROSOLEM, C.A. Least limiting water range in soil under crop rotations and chiseling. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.759-771, 2011.

CARNEIRO, M.A.C.; CORDEIRO, M.A.S.; ASSIS, P.C.R.; MORAES, E.S.; PEREIRA, H.S.; PAULINO, H.B.; SOUZA, E.D. Produção de fitomassa de diferentes espécies de cobertura e suas alterações na atividade microbiana de solo de cerrado. **Bragantia**, v.67, p.455-462, 2008.

COLLARES, G.L.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; KAISER, D.R. Compactação de um Latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.933-942, 2008.

DEBIASI, H.; LEVIEN, R.; TREIN, C.R.; CONTE, O.; MAZURANA, M. Capacidade de suporte e compressibilidade de um Argissolo, influenciadas pelo tráfego e por plantas de cobertura de inverno. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.2629-2637, 2008. (Número Especial)

DIAS JUNIOR, M.S. **Compression of three soils under longterm tillage and wheel traffic**. 1994. 114 f. Tese (Doutorado Crop and Soil Science) - Michigan State University, East Lansing-MI.

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

DIAS JUNIOR, M.S.; PIERCE, F.J. Revisão de literatura: O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.20, p.175-182, 1996.

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

FENG, G.; WU, L.; LETEY, J. Evaluating aeration criteria by simultaneous measurement of oxygen diffusion rate and soil-water regime. **Soil Science**, v.167, p.495-503, 2002.

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

HORN, R.; VOSSBRINK, J.; BECKER, S. Modern forestry vehicles and their impacts on soil physical properties. **Soil and Tillage Research**, v.79, p.207-219, 2004.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis - physical and mineralogical methods**. 2 ed. Madison: ASA – SSSA, 1986, p.635-662.

LANZANOVA, M.E.; NICOLOSO, R.S.; LOVATO, T.; ELTZ, F.L.F.; AMADO, T.J.C.; REINERT, D.J. Atributos físicos do solo em sistema de integração lavoura-

pecuária sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.1131-1140, 2007.

LEBERT, M.; BÖKEN, H.; GLANTE, F. Soil compaction - indicators for assessment of harmful changes to the soil in the context of the German Federal Soil Protection Act. **Journal of Environmental Management**, v.82, p.388-397, 2007.

LIMA, V.M.P. **Melhoria estrutural de Latossolo: indicadores de qualidade e estratégias de manejo**. 2011. 108 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG.

LIMA, V.M.P.; OLIVEIRA, G.C.; SERAFIM, M.E.; CURTI, N.; EVANGELISTA, A.R. Intervalo hídrico ótimo como indicador de melhoria da qualidade estrutural de Latossolo degradado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.71-78, 2012.

LIMA, C.L.R. de; SILVA, A.P. da; IMHOFF, S.C.; LEÃO, T.P. Estimativa da capacidade de suporte de carga do solo a partir da avaliação da resistência à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.217-223, 2006.

LOPES, R.A.P.; PINHEIRO NETO, R.; BRACCINI, A.L.; SOUZA, E.G. Efeito de diferentes coberturas vegetais e sistemas de preparo do solo na produção da cultura da soja. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.29, p.507-515, 2007.

OLIVEIRA, G. C.; DIAS JUNIOR, M. S.; RESCK, D. V. S.; CURTI, N. Alterações estruturais e comportamento compressivo de um Latossolo vermelho do Cerrado sob diferentes sistemas de manejo por 20 anos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.38, p.291-299, 2003.

PACHECO, E.P.; CANTALICE, J.R.B. Compressibilidade, resistência a penetração e intervalo hídrico ótimo de um Argissolo Amarelo cultivado com cana-de-açúcar nos tabuleiros costeiros de alagoas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.403-415, 2011.

PAIS, P.S.M.; DIAS JUNIOR, M.S.; SANTOS, G.A.; DIAS, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALCÂNTARA, E.N. Compactação causada pelo manejo de plantas invasoras em Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado com cafeeiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.1949-1957, 2011.

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**, v.73, p.119-129, 2003.

PEIXOTO, P.P.P. **Bases para aproveitamento e gerenciamento de recursos hídricos na região de Dourados-MS**. 2002. 98 f. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu-SP.

PICKLER, E.P.; NÓBREGA, L.E.P.; LIMA, G.P.; KONOPATZKI, M.R.S.; PACHECO, F.P. Influência da cobertura de inverno nos atributos físicos do solo em

culturas de milho e soja sob plantio direto. **Engenharia na agricultura**, v.20, p.33-45, 2012.

PIRES, B.S.; DIAS JUNIOR, M.S.; ROCHA, W.W.; ARAUJO JUNIOR, C.F.; CARVALHO, R.C.R. Modelos de capacidade de suporte de carga de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.635-642, 2012.

PORTELA, J.C.; COGO, N.P.; BAGATINI, T.; CHAGAS, J.P.; PORTZ, G. Restauração da estrutura do solo por sequências culturais implantadas em semeadura direta, e sua relação com a erosão hídrica em distintas condições físicas de superfície. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.1353-1364, 2010.

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**, v.92, p.213-220, 2007.

SAFFIH-HDADI, K.; DÉFOSSEZ, P.; RICHARD, G.; CUI, Y.J.; TANG, A.M.; CHAPLAIN, V. A method for predicting soil susceptibility to the compaction of surface layers as a function of water content and bulk density. **Soil and Tillage Research**, v.105, p.96-103, 2009.

SERVADIO, P.; MARSILI, A.; VIGNOZZI, N.; PELLEGRINI, S.; PAGLIAI, M. Effects on some soil qualities in central Italy following the passage of four wheel drive tractor fitted with single and dual tires. **Soil and Tillage Research**, v.84, p.87-100, 2005.

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**, v.14, p.39-45, 2010.

SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G.C.; DIAS JÚNIOR, M.S.; COSTA K.A.P.; BENITES, V.M.; FERREIRA FILHO, S.M. Structural changes in Latosols of the Cerrado Region: II – Soil compressive behavior and modeling of additional compaction. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.773-782, 2011.

SILVA, P.R.F.; ARGENTA, G.; SANGOI, L.; STRIEDER, M.L.; SILVA, A.A. Estratégias de manejo de coberturas de solo no inverno para cultivo do milho em sucessão no sistema de semeadura direta. **Ciência Rural**, v.36, p.1011-1020, 2006a.

SILVA, F.A.S.; AZEVEDO, C.A.V. Versão do programa computacional Assistat para o sistema operacional Windows. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.4, p.71-78, 2002.

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

SILVA, A.A.; SILVA, P.R.F.; SUHRE, E.; ARGENTA, G.; STRIEDER, M.L.; RAMBO, L. Sistemas de coberturas de solo no inverno e seus efeitos sobre o rendimento de grãos do milho em sucessão. **Ciência Rural**, v.37, p.928-935, 2007a.

SILVA, R.B.; DIAS JUNIOR, M.S.; SILVA, F.A.M. & FOLE, S.M. Influência do tráfego de máquinas agrícolas e as propriedades físicas, hídricas e mecânicas de um Latossolo dos Cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.973-983, 2003.

SILVA, R.B.; LANÇAS, K.P.; CARDOSO, V.M.F.; MIRANDA, E.E.V. de. Atributos físicos, mecânicos e dinâmicos do solo como indicadores do impacto do cultivo e do tráfego em perímetros irrigados. **Irriga**, v.11, p.384-401, 2006b.

SILVA, R.B.; LANÇAS, K.P.; MIRANDA, E.E.V.; SILVA, F.A.M.; BAILO, 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**, v.103, p.265-270, 2009.

SILVA, I.F.; MIELNICZUK, J. Ação do sistema radicular de plantas na formação e estabilização de agregados do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.20, p.113-117, 1997.

SILVA, D.A.; SOUZA, L.C.F.; VITORINO, A.C.T.; GONÇALVES, M.C. Aporte de fitomassa pelas sucessões de culturas e sua influência em atributos físicos do solo no sistema plantio direto. **Bragantia**, v.70, p.147-156, 2011.

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

SOUZA, E.D.; CARNEIRO, M.A.C.; BANYS, V.L. Fitomassa e acúmulo de nitrogênio, em espécies vegetais de cobertura do solo para um Latossolo Vermelho distroférico de Cerrado. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.30, p.525-531, 2008.

SOUZA, G.S.; SOUZA, Z.M.; SILVA, R.B.; ARAÚJO, F.S.; BARBOSA, R.S. Compressibilidade do solo e sistema radicular da cana-de-açúcar em manejo com e sem controle de tráfego. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v.47, p.603-612, 2012.

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**, v.32, p.963-973, 2008.

STATSOFT. **Statistica (data analysis software system) - version 8.0**. Tulsa: StatSof, 2007.

STRECK, C.A.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; KAISER, D.R. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ciência Rural**, v.34, 755-760, 2004.

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

TEIXEIRA, C.F.A.; PAULETTO, E.A.; SILVA, J.B. Resistência mecânica à penetração de um Argissolo Amarelo distrófico típico sob diferentes sistemas de produção em plantio direto. **Ciência Rural**, v.33, p.1165-1167, 2003.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Agregação e estoque de carbono em Argissolo submetido a diferentes práticas de manejo agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.213-223, 2011.

WILLIAMS, S.M.; WEIL, R.R. Crop cover root channels may alleviate soil compaction effects on soybean crop. **Soil Science Society of America Journal**, v.68, p.1403-1409, 2004.

ARTIGO 4

INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO DE UM LATOSSOLO CULTIVADO COM SOJA E MILHO EM SUCESSÃO A OLEAGINOSAS DE OUTONO-INVERNO

RESUMO

Práticas de manejo para melhorar e manter a qualidade física do solo são fundamentais para a sustentabilidade de sistemas agrícolas, sendo o intervalo hídrico ótimo um indicador dessa qualidade. Objetivou-se com este trabalho avaliar o intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférico argiloso, cultivado no verão com soja e milho em sucessão a culturas anuais de outono-inverno culturas oleaginosas anuais de outono-inverno. O estudo foi realizado a campo, na área da Fazenda Experimental de Ciências Agrárias - UFGD, no município de Dourados, MS, no ano agrícola de 2010/2011. O delineamento experimental foi de blocos casualizados, contendo 11 tratamentos, com quatro repetições. Os tratamentos consistiram das culturas da soja e do milho cultivadas no verão em sistema plantio direto, semeadas em sucessão às culturas oleaginosas anuais de outono-inverno: girassol (*Helianthus annuus* L.), canola (*Brassica napus* L. e *Brassica rapa*), cártamo (*Carthamus tinctorius* L.), crambe (*Crambe abyssinica* Hochst.) e níger (*Guizotia abyssinica*), e a sucessão milho safrinha/soja (outono-inverno/verão), a mais comum na região. Após a colheita das culturas da soja e do milho verão foram coletadas amostras de solo com estrutura preservada em cilindros metálicos, nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm. As sucessões girassol/soja, canola/soja e crambe/soja apresentaram a maior densidade do solo e menor macroporosidade e porosidade total, nas duas profundidades avaliadas. Observou-se que a porosidade de aeração foi o atributo que mais limitou a intervalo hídrico ótimo em todas as sucessões. Com o aumento nos valores de densidade do solo o intervalo hídrico ótimo foi reduzido pela porosidade de aeração e pela resistência do solo à penetração. O intervalo hídrico ótimo é um adequado indicador de alterações da estrutura do Latossolo Vermelho distroférico ocasionadas pelos cultivos da soja e do milho em sucessão às culturas oleaginosas anuais de outono-inverno. O cultivo tanto da soja quanto do milho em sucessão à cultura do níger apresenta melhor estrutura do solo, por aumentar a sua disponibilidade hídrica dada pelo intervalo hídrico ótimo.

Palavras-chave: qualidade física do solo, disponibilidade hídrica, porosidade de aeração.

LEAST LIMITING WATER RANGE IN LATOSOL UNDER SOYBEAN AND MAIZE IN SUCCESSION OLEAGINOUS CROPS

SUMMARY

Management practices to improve and to keep the soil physical quality they are the basics for to promote sustainable agricultural systems, being that the least limiting water range is an indicator of this quality. The objective of this study was to evaluate the least limiting water range of a clayed Red Latosol (Rhodic Acrustox), cultivated in the summer with soybean and maize in succession the annual oleaginous crops in autumn-winter. The experiment was carried out in field conditions, in Dourados, Mato Grosso do Sul state, Brazil, during the agricultural year of 2010/11. A randomized complete block design was used, containing 11 treatments, with four replicates. The treatments consisted of soybean and maize grown in summer in no-tillage system sown in succession for oleaginous crops autumn-winter: sunflower (*Helianthus annuus* L.), rapeseed (*Brassica napus* L. e *Brassica rapa* L.), safflower (*Carthamus tinctorius* L.), crambe (*Crambe abyssinica* Hochst.) and to níger (*Guizotia abyssinica* Cass.), and the succession maize/soybean (autumn-winter/ summer), most farmed in the region. After the harvest of the cultures soybean and maize summer, undisturbed soil samples were collected in metallic cylinders, in depths of 0-5 and 5-10 cm. The successions sunflower/soybean, rapeseed/soybean and crambe/soybean had presented a higher soil density and lower macroporosity and total porosity, in the two evaluated depths. It was observed that the air filled porosity was attribute that more limited the least limiting water range in all the successions. With the increase in the values of soil density the least limiting water range was reduced by the air filled porosity and soil penetration resistance. Least limiting water range is an adequate indicator of the alterations of the structure of the clayed Red Latosol caused by the crops of the soybean and maize in succession to the annual oleaginous crops of autumn-winter. Both cultures soybean and maize in succession to the culture of níger showed better structure of the soil, increasing its water availability given by the least limiting water range.

Index terms: soil physical quality, water availability, air filled porosity.

INTRODUÇÃO

Na agricultura brasileira, as culturas de soja e de milho ocupam lugar de destaque na produção de grãos (CARNEIRO et al., 2008), sendo grande parte desta produção originada de cultivos realizados sob o sistema plantio direto. Nesse sistema a semeadura é feita sem preparo do solo, mantendo os restos culturais na superfície, reduzindo a erosão (LLANILLO et al., 2006) e proporcionando maior acúmulo de matéria orgânica e de nutrientes no solo (BAYER et al., 2000). Entretanto, a ausência de preparo do solo (BEUTLER et al., 2007), associada à maior intensidade de uso da terra, contribuem para alterar a qualidade estrutural do solo, o que acarreta aumento da compactação do solo (COLLARES et al., 2006), especialmente em solos com elevados teores de argila (SECCO et al., 2004).

Aliado ao uso do sistema plantio direto, produtores do Centro-Oeste do Brasil têm experimentado a diversificação das suas atividades, pois cultivo de espécies oleaginosas anuais, principalmente com época de semeadura no período de outono-inverno, antecedendo aos cultivos da soja e do milho de verão, vêm se apresentando como alternativa à produção de biodiesel, com grandes oportunidades para o agronegócio regional.

Além disso, essas oleaginosas por meio de suas raízes e do aporte de material vegetal podem atuar como agentes recuperadores da qualidade física do solo, pois para Strudley et al. (2008) e Andrade et al. (2009), a bioporosidade criada pela atividade radicular e mesofauna do solo e a possibilidade das raízes de algumas culturas penetrarem camadas mais compactadas, têm sido o motivo de se considerar a rotação de culturas fundamental em sistema plantio direto. Wohlenberg et al. (2004) citam que, para preservar a qualidade do solo e eliminar a necessidade de mobilizações no sistema plantio direto, é recomendado o uso da rotação de culturas, a qual pode melhorar a estrutura do solo.

Um indicador de qualidade física do solo para o crescimento das plantas é o intervalo hídrico ótimo (IHO) (SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 1998; CALONEGO e ROSOLEM et al., 2011; SEVERIANO et al., 2011; BETIOLI JÚNIOR et al., 2012; LIMA et al., 2012) que é definido como o conteúdo de água no solo em que não ocorrem limitações ao crescimento das plantas devido à disponibilidade de água, aeração e resistência do solo à penetração das raízes (SILVA et al., 1994; TORMENA

et al., 1998; LEÃO et al., 2005; TORMENA et al., 2007), sendo parâmetro físico do solo que integra em uma única medida os efeitos da estrutura do solo nos fatores físicos que diretamente influenciam o crescimento das raízes das plantas (PETEAN, 2011).

No IHO, o conteúdo de água do solo para o crescimento das plantas depende da densidade do solo (LEÃO et al., 2005). Em cada valor de densidade do solo, um valor de IHO é calculado e definido, a partir dos limites superior e inferior de água no solo, sendo que, geralmente, o aumento de densidade do solo resulta em redução do IHO, em direção a valores de densidade do solo em que o IHO se iguala a zero (LIMA et al., 2012). A densidade crítica (Dsc) é definida como a densidade do solo em que o IHO se iguala a zero, ou seja, quando o limite superior do IHO equivale numericamente ao limite inferior (SILVA et al., 1994).

Valores de densidade do solo maiores que a Dsc indicam sérios problemas de degradação estrutural do solo (BLAINSKI et al., 2009) e, conseqüentemente, para a produtividade das culturas. Quanto maior a freqüência de valores de densidade do solo acima da Dsc, há indicativo de reduzida qualidade estrutural do solo, proporcionando maiores riscos às culturas serem expostas a situações de estresses físicos por reduzida oxigenação do solo ou por elevados valores de resistência do solo à penetração (CAVALIERI et al., 2006; KLEIN e CAMARA, 2007). Devido a essas características, o IHO representa grande avanço nos estudos da qualidade física do solo, sendo este considerado o indicador que melhor se correlaciona ao crescimento das plantas (TORMENA et al., 2007).

No estágio atual de evolução dos sistemas agrícolas, em que se busca aprimorar a sua qualidade, é necessário se conhecer as alterações impostas ao ambiente físico do solo pelo crescimento e desenvolvimento das plantas (LIMA et al., 2012). Assim, este estudo foi realizado com o objetivo de avaliar o IHO de um Latossolo Vermelho distroférrico, cultivado no verão com soja e milho em sucessão a culturas oleaginosas anuais de outono-inverno.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado na área da Fazenda Experimental de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), no município de Dourados, MS, no ano agrícola de 2009/2010. O local situa-se em latitude 22°13'58"S, longitude de 54°59'30"W e altitude de 410 m. O clima é do tipo Cwa, segundo a classificação de Köppen. A região apresenta precipitação pluvial média anual de 1.400 mm e as temperaturas médias anual variam de 18°C a 25°C nos meses mais frio e mais quente, respectivamente (PEIXOTO, 2002).

O delineamento experimental foi de blocos casualizados, contendo 11 tratamentos, com quatro repetições. Os tratamentos consistiram das culturas da soja e do milho cultivadas no verão do ano agrícola 2010/2011 em sistema plantio direto, semeadas em sucessão a culturas oleaginosas anuais de outono-inverno: girassol (*Helianthus annuus* L.), canola (*Brassica napus* L. e *Brassica rapa*), cártamo (*Carthamus tinctorius* L.), crambe (*Crambe abyssinica* Hochst.) e níger (*Guizotia abyssinica*), e a sucessão soja/milho (verão/outono-inverno), a mais usual na região (Quadro 1).

QUADRO 1. Sequência de rotação e sucessão de culturas envolvendo espécies oleaginosas anuais de outono-inverno e, soja e milho cultivados no verão

Tratamentos	Ano agrícola 2009/2010		Ano agrícola 2010/2011
	Verão	Outono/inverno	Verão
1	Soja	Milho safrinha	Soja
2	Soja	Crambe	Milho
3	Soja	Girassol	Milho
4	Milho	Crambe	Soja
5	Milho	Girassol	Soja
6	Soja	Cártamo	Milho
7	Soja	Canola	Milho
8	Soja	Niger	Milho
9	Milho	Cártamo	Soja
10	Milho	Canola	Soja
11	Milho	Niger	Soja

O solo utilizado neste estudo foi um Latossolo Vermelho distroférrico argiloso. O resultado da análise granulométrica na camada de 0-10 cm, determinada pelo método da pipeta (EMBRAPA, 1997) indicou 531 g kg⁻¹ de argila, 249 g kg⁻¹ de

silte e 220 g kg^{-1} de areia. A área foi manejada sob plantio direto por dez anos até o inverno de 2009, em um sistema de rotação de culturas envolvendo soja e milho no verão, e milho safrinha e aveia no outono-inverno.

No verão do ano agrícola 2009/2010 foram cultivadas as culturas da soja e milho. Após a colheita da soja e do milho verão em fevereiro de 2010 foram semeadas as culturas oleaginosas anuais de outono-inverno e o milho safrinha. A semeadura do milho safrinha (cv. DKB 350 YG) foi realizada mecanicamente no dia 10 de março de 2010, em sucessão à cultura da soja, utilizando-se uma semeadora-adubadora de plantio direto, com sete linhas, espaçadas entre si de 0,45 m, regulada para distribuir $0,2 \text{ Mg ha}^{-1}$ da fórmula 10-20-20 e uma quantidade de sementes suficiente para obter uma população de 70 mil plantas por hectare. No dia 01 de abril 2010 foram semeadas as oleaginosas de outono-inverno em sucessão aos cultivos da soja e milho verão, utilizando-se uma semeadora-adubadora de plantio direto, seguindo as mesmas recomendações para o milho safrinha quanto ao espaçamento e adubação. A colheita das culturas de outono-inverno foi realizada mecanicamente e variou conforme o ciclo das espécies, sendo realizada entre os meses de julho e setembro de 2010.

As semeaduras da soja (cv. Potência RR) e do milho verão (cv. DKB 390 VT PRO) foram efetuadas no dia 30 de outubro de 2010, em sucessão as espécies de outono-inverno mencionadas no Quadro 1, utilizando-se uma semeadora-adubadora de plantio direto, com sete linhas para soja, espaçadas entre si de 0,45 m e quatro linhas para o milho, espaçadas de 0,9 m. A quantidade de sementes utilizada foi suficiente para a obtenção de uma população de 300 mil plantas por hectare e 60 mil plantas por hectare para a soja e milho, respectivamente. A adubação para a soja consistiu de $0,3 \text{ Mg ha}^{-1}$ da fórmula 00-20-20 (NPK) e para o milho foi utilizado $0,3 \text{ Mg ha}^{-1}$ da fórmula 10-20-20 (NPK).

Após a colheita das culturas da soja e do milho verão foram coletadas amostras de solo com estrutura preservada, por meio de cilindros metálicos com 6,45 cm de diâmetro interno e 2,54 cm de altura, nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm. As amostras foram retiradas nas entrelinhas das culturas. As parcelas mediram 35 m de comprimento e 14 m de largura, perfazendo uma área total de 490 m^2 . Em cada parcela e profundidade foram coletadas sete amostras, totalizando 56 amostras para cada tratamento (28 amostras por profundidade).

Após o preparo das amostras, essas foram saturadas por meio da elevação gradual de uma lâmina de água até atingir cerca de dois terços da altura do anel para

posterior estabilização do teor de água. As 28 amostras de cada tratamento e profundidade foram divididas em sete grupos de quatro amostras. Cada grupo de amostras foi submetido à drenagem da água em um dos seguintes potenciais matriciais: -0,006; -0,01; -0,033; -0,066; -0,1; -0,3 e -1,5 MPa, utilizando mesa de tensão (-0,006 MPa) e pressões aplicadas às amostras colocadas sobre placas porosas em câmara de Richards para os demais potenciais, conforme Klute (1986). Na mesa de tensão (-0,006 MPa) foi obtida a microporosidade (Micro), conforme descrito em Embrapa (1997).

Após atingirem o equilíbrio em cada potencial, as amostras foram pesadas e, em seguida, foi determinada a resistência do solo à penetração, utilizando um penetrógrafo eletrônico com velocidade constante de penetração de 1 cm min^{-1} , com diâmetro de base da haste de 4 mm e semiângulo de 30° , desenvolvido por Serafim et al. (2008a). Os valores obtidos nos 5 mm superiores e inferiores da amostra foram descartados, visando eliminar o efeito da periferia da amostra (BRADFORD, 1986). A frequência de leituras de resistência do solo à penetração correspondeu à coleta de um valor a cada 0,25 segundos, obtendo-se 600 leituras por amostra, sendo utilizado o valor médio.

Posteriormente, as amostras foram secas em estufa a 105-110 °C, por 48 h, para determinação da massa de sólidos e da massa de água no solo. A densidade do solo foi determinada pela razão entre a massa de sólidos e o volume do cilindro. A umidade volumétrica foi obtida pelo produto do teor de água em base de massa e a densidade do solo. A porosidade total e a macroporosidade foram obtidas como proposto em Embrapa (1997).

O IHO foi determinado adotando os procedimentos descritos em Silva et al. (1994). Os valores de θ associados com o potencial matricial, a RP e a porosidade de aeração foram, respectivamente: a umidade na capacidade de campo (θ_{CC}) ou teor de água no potencial de -0,01 MPa (REICHARDT, 1988); a umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) ou teor de água no potencial de -1,5 MPa (SAVAGE et al., 1996); teor de água volumétrico do solo em que a resistência do solo à penetração (θ_{RP}) atinge 2,0 MPa (TAYLOR et al., 1966); e pelo teor de água volumétrico em que a porosidade de aeração (θ_{PA}) é de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (GRABLE e SIEMER, 1968).

A curva de retenção de água, expressa pela relação entre a umidade volumétrica e o potencial matricial da água no solo, foi descrita matematicamente por meio de uma função não linear, do tipo $[\theta = \exp(a+bDs)\Psi^c]$, proposto por Silva et al. (1994), para ajuste dos dados originais, incorporando a variável Ds na função

empregada por Ross et al. (1991), em que θ é a umidade volumétrica do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); D_s é a densidade do solo (Mg m^{-3}); Ψ é o potencial matricial da água no solo (MPa); e as letras “a”, “b” e “c” são os parâmetros empíricos de ajuste do modelo. Essa equação foi utilizada para obter os valores de θ_{CC} e θ_{PMP} , necessários para a determinação do IHO.

A relação funcional entre a RP, θ e D_s estabelece a curva de resistência do solo à penetração, a qual foi ajustada matematicamente, utilizando o modelo do tipo $[RP = d\theta^e D_s^f]$, proposto por Busscher (1990), em que RP é a resistência do solo à penetração (MPa); θ é a umidade volumétrica do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); D_s é a densidade do solo (Mg m^{-3}); e as letras “d”, “e” e “f” são os parâmetros empíricos de ajuste do modelo. Por meio dessa equação foi possível determinar o valor crítico de θ para que a RP não ultrapassasse 2,0 MPa (θ_{RP}), em função da D_s , para isso, substitui-se RP, na equação, pelo valor de 2,0 MPa, considerado como limitante para efeito de cálculo do IHO.

O valor de θ_{PA} , o teor de água volumétrico no solo em que a porosidade de aeração é de $0,10 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$, foi obtido por $[\theta_{PA} = (1 - D_s/D_p) - 0,10]$, em que D_s é a densidade do solo (Mg m^{-3}); D_p é a densidade de partículas (Mg m^{-3}). Considerou-se o valor médio de densidade de partículas do solo de $2,65 \text{ Mg m}^{-3}$.

Na determinação dos limites superiores do IHO, considerou-se o θ_{CC} , ou aquele em que a θ_{PA} é considerada adequada ao crescimento e desenvolvimento da cultura. Como limites inferiores foram considerados o θ_{PMP} ou aquele correspondente à θ_{RP} limitante ao crescimento e desenvolvimento das plantas. Após o cálculo dos limites superiores e inferiores do IHO, determinou-se a D_{sc} , que é a densidade do solo em que o IHO se iguala a zero, ou seja, quando o limite superior do IHO equivale numericamente ao limite inferior (SILVA et al., 1994).

Os resultados dos atributos físicos do solo foram submetidos à análise de variância e, quando significativa, foi aplicado o teste de Scott-Knott a 5%, para comparação de médias, utilizando o aplicativo computacional Assistat 7.6 (SILVA e AZEVEDO, 2002). Os ajustes dos dados para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração foram realizados pelo método de regressão não linear, por meio do programa computacional Statistica 7.0 (STATSOFT, 2007).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A densidade do solo, a macroporosidade e a porosidade total foram alteradas pelas sucessões de culturas em sistema plantio nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm, fato não observado para a microporosidade (Micro), sendo que, os menores valores de densidade do solo e maiores de macroporosidade e porosidade total foram observados nas culturas da soja e do milho verão cultivadas em sucessão à cultura do níger (Quadro 2). A cultura do níger proporcionou melhor estrutura do solo para o desenvolvimento das culturas da soja e do milho em sucessão. Trabalhos como os de Boer et al. (2007) e Torres et al. (2008) demonstraram os efeitos benéficos proporcionados por algumas plantas de cobertura e de seus resíduos deixados sobre o solo, nos seus atributos físicos e no rendimento das culturas que posteriormente são cultivadas.

A melhoria na estrutura do solo proporcionada pela cultura do níger, pode estar relacionada à produção elevada de fitomassa, como também relatado por Carneiro et al. (2008); e pelo acúmulo de nitrogênio, como descrito por Souza et al. (2008). Algumas plantas podem melhorar a estrutura do solo (WOHLENBERG et al., 2004), devido, principalmente, à ação mecânica das raízes e, indiretamente, pelo fornecimento de nutrientes à fauna do solo, por meio de um maior aporte de resíduo vegetal (SOUSA NETO et al., 2008).

Para Cunha et al. (2012), as recomendações de manejo devem ser direcionadas para práticas que favoreçam a atividade biológica do solo, pois os organismos podem ser os responsáveis pela melhoria da qualidade física do solo. Essa maior atividade biológica (sistema radicular e atividade dos microrganismos), provavelmente, potencializa a formação de bioporos, favorecendo a aeração do solo (VEZZANI e MIELNICZUK, 2011).

Houve uma relação inversa entre a densidade do solo e a macroporosidade e porosidade do solo, onde, nas camadas com maiores valores de densidade do solo, ocorreram menores volumes de macroporosidade e porosidade total (Quadro 2), como também observado por Secco et al. (2004); Bergamin et al. (2010a); Bergamin et al. (2010b). Na camada de 0-5 cm, os maiores valores de densidade do solo foram obtidos nas sucessões canola/milho, girassol/soja, canola/soja e crambe/soja.

QUADRO 2. Densidade do solo (Ds), macroporosidade (Macro), microporosidade (Micro) e porosidade total (Pt) em duas profundidades de um Latossolo Vermelho distroférico, cultivado com soja e milho em sucessão a diferentes culturas oleaginosas anuais de outono-inverno

Sucessões de culturas	Ds ⁽¹⁾ (Mg m ⁻³)	Macro ⁽²⁾	Micro ⁽²⁾	Pt ⁽²⁾
		(m ³ m ⁻³)		
(Out-In/Ver)	.....0 – 5 cm			
Milho/Soja	1,39 b	0,13 b	0,42 a	0,55 b
Girassol/Milho	1,37 b	0,14 b	0,40 a	0,54 c
Canola/Milho	1,43 a	0,10 c	0,42 a	0,52 c
Cártamo/Milho	1,38 b	0,13 b	0,40 a	0,53 c
Crambe/Milho	1,38 b	0,13 b	0,41 a	0,54 c
Níger/Milho	1,33 c	0,16 a	0,41 a	0,57 a
Girassol/Soja	1,42 a	0,10 c	0,43 a	0,53 c
Canola/Soja	1,44 a	0,10 c	0,43 a	0,53 c
Cártamo/Soja	1,38 b	0,14 b	0,41 a	0,55 b
Crambe/Soja	1,41 a	0,11 c	0,42 a	0,53 c
Níger/Soja	1,32 c	0,16 a	0,42 a	0,58 a
CV (%)	2,49	11,77	3,30	2,93
	..... 5 – 10 cm			
Milho/Soja	1,44 b	0,10 b	0,42 a	0,52 b
Girassol/Milho	1,46 b	0,10 b	0,42 a	0,52 b
Canola/Milho	1,45 b	0,10 b	0,42 a	0,52 b
Cártamo/Milho	1,44 b	0,10 b	0,42 a	0,52 b
Crambe/Milho	1,44 b	0,10 b	0,42 a	0,52 b
Níger/Milho	1,39 c	0,12 a	0,42 a	0,54 a
Girassol/Soja	1,48 a	0,08 c	0,43 a	0,51 c
Canola/Soja	1,49 a	0,08 c	0,43 a	0,51 c
Cártamo/Soja	1,46 b	0,10 b	0,42 a	0,52 b
Crambe/Soja	1,48 a	0,08 c	0,43 a	0,51 c
Níger/Soja	1,40 c	0,12 a	0,41 a	0,53 a
CV (%)	1,52	8,82	2,05	1,88

Ver/Out-In: cultivo de verão/outono-inverno. ⁽¹⁾ Média de 28 repetições. ⁽²⁾ Média de 12 repetições. Médias na coluna, seguidas de mesma letra, não diferem pelo teste de Scott-Knott a 5%.

Na camada de 5-10 cm os maiores valores de densidade do solo foram observados nas sucessões girassol/soja, canola/soja e crambe/soja e também foram observados os valores de macroporosidade do solo inferiores a 0,10 m³ m⁻³, indicando prováveis limitações ao arejamento do solo em épocas mais úmidas (PAGLIAI et al., 2003; COLLARES et al., 2008) e maior risco de limitações ao crescimento radicular (SECCO et al., 2004; BERGAMIN et al., 2010a; BERGAMIN et al., 2010b). Para Garbiate et al. (2011), o aumento da densidade do solo traz consequências negativas à

porosidade do solo, com redução da porosidade total e da macroporosidade, enquanto a microporosidade não sofre alterações.

Os coeficientes de determinação (R^2) das curvas de retenção de água (Quadros 3 e 4) e de resistência do solo à penetração (Quadros 5 e 6) apresentaram valores de F significativos ($p < 0,01$). O ajuste da curva de retenção de água (Quadros 3 e 4) aos dados mostrou-se significativo ($p < 0,01$) uma vez que os intervalos de confiança dos parâmetros das funções não incluíram o valor zero, conforme Blainski et al. (2009) e Blainski et al. (2012), exceto o coeficiente “b” na camada de 5-10 cm, na sucessão canola/milho (Quadro 4).

QUADRO 3. Estimativas dos coeficientes de regressão para a curva de retenção de água no solo [$\theta = \exp(a+bDs)\Psi^c$], com respectivos coeficientes de determinação (R^2), na camada de 0-5 cm de um Latossolo Vermelho distroférico, cultivado com soja e milho em sucessão a diferentes culturas oleaginosas anuais de outono-inverno

Coeficientes	Valor estimado	Intervalo de confiança		Valor estimado	Intervalo de confiança		
		Li	Ls		Li	Ls	
	 Milho/Soja Girassol/Soja		
a	-1,8310	-2,1837	-1,4783	-2,0016	-2,3399	-1,6632	
b	0,4607	0,2067	0,7146	0,6229	0,3867	0,8592	
c	-0,0765	-0,0879	-0,0651	-0,0487	-0,0575	-0,0398	
R^2	0,91**			0,87**			
	 Girassol/Milho Canola/Soja		
a	-2,0861	-2,3563	-1,8158	-1,5947	-1,9410	-1,2485	
b	0,7180	0,5227	0,9134	0,3273	0,0837	0,5709	
c	-0,0379	-0,0461	-0,0297	-0,0536	-0,0624	-0,0449	
R^2	0,86**			0,89**			
	 Canola/Milho Cártamo/Soja		
a	-1,5696	-1,8340	-1,3051	-2,0314	-2,2863	-1,7765	
b	0,3635	0,1811	0,5459	0,6323	0,4543	0,8103	
c	-0,0378	-0,0419	-0,0336	-0,0628	-0,0705	-0,0551	
R^2	0,93**			0,92**			
	 Cártamo/Milho Crambe/Soja		
a	-1,9999	-2,2274	-1,7724	-2,0581	-2,3574	-1,7588	
b	0,6471	0,4836	0,8106	0,6618	0,4517	0,8719	
c	-0,0400	-0,0462	-0,0337	-0,0524	-0,0604	-0,0444	
R^2	0,91**			0,90**			
	 Crambe/Milho Níger/Soja		
a	-1,7368	-1,9153	-1,5584	-1,9878	-2,2251	-1,7506	

Continua...

QUADRO 3. Continuação

Coeficientes	Valor estimado	Intervalo de confiança		Valor estimado	Intervalo de confiança	
		Li	Ls		Li	Ls
b	0,4480	0,3209	0,5751	0,5642	0,3874	0,7410
c	-0,0406	-0,0484	-0,0327	-0,0762	-0,0866	-0,0657
R ²	0,87**			0,92**		
..... Níger/Milho						
a	-2,1078	-2,3124	-1,9033			
b	0,7199	0,5664	0,8733			
c	-0,0421	-0,0492	-0,0351			
R ²	0,92**					

θ : teor de água no solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); Ds: densidade do solo (Mg m^{-3}); Ψ : potencial de água no solo (MPa); Li e Ls: limite inferior e superior do intervalo de confiança 95%, respectivamente; **: significativo pelo teste “F” a 1%.

A curva de retenção de água no solo foi influenciada positivamente pela Ds e negativamente pelo Ψ (Quadros 3 e 4), cujos resultados são similares aos verificados por Silva et al. (1994); Tormena et al. (1998); Tormena et al. (2007); Serafim et al. (2008b); Calonego e Rosolem (2011); Betioli Júnior et al. (2012) e Lima et al. (2012).

QUADRO 4. Estimativas dos coeficientes de regressão para a curva de retenção de água no solo [$\theta = \exp(a+bDs)\Psi^c$], com respectivos coeficientes de determinação (R²), na camada de 5-10 cm de um Latossolo Vermelho distroférrico, cultivado com soja e milho em sucessão a diferentes culturas oleaginosas anuais de outono-inverno

Coeficientes	Valor estimado	Intervalo de confiança		Valor estimado	Intervalo de confiança	
		Li	Ls		Li	Ls
..... Milho/Soja .....				..... Girassol/Soja		
a	-1,6708	-2,0679	-1,2736	-1,5503	-1,8178	-1,2828
b	0,4052	0,1274	0,6830	0,3147	0,1335	0,4959
c	-0,0440	-0,0525	-0,0355	-0,0529	-0,0598	-0,0459
R ²	0,85**			0,92**		
..... Girassol/Milho .....				..... Canola/Soja		
a	-1,9579	-2,4890	-1,4268	-1,6910	-2,0369	-1,3451
b	0,5818	0,2195	0,9441	0,4101	0,1798	0,6404
c	-0,0596	-0,0694	-0,0498	-0,0514	-0,0586	-0,0442
R ²	0,87**			0,90**		
..... Canola/Milho .....				..... Cártamo/Soja		
a	-1,0482	-1,4660	-0,6304	-2,0466	-2,3648	-1,7284
b	0,0102	-0,2786	0,2990	0,6562	0,4381	0,8744
c	-0,0389	-0,0461	-0,0317	-0,0503	-0,0567	-0,0438
R ²	0,84**			0,93**		

Continua...

QUADRO 4. Continuação

Coeficientes	Valor estimado	Intervalo de confiança		Valor estimado	Intervalo de confiança		
		Li	Ls		Li	Ls	
	 Cártamo/Milho Crambe/Soja		
a	-1,7828	-2,0027	-1,5629	-1,9793	-2,6660	-1,2927	
b	0,5016	0,3476	0,6555	0,6111	0,1439	1,0783	
c	-0,0376	-0,0427	-0,0323	-0,0520	-0,0630	-0,0410	
R ²	0,93**			0,82**			
	 Crambe/Milho Níger/Soja		
a	-1,8538	-2,2270	-1,4806	-1,6070	-1,9239	-1,2900	
b	0,5552	0,3003	0,8101	0,3571	0,1335	0,5807	
c	-0,0455	-0,0535	-0,0374	-0,0523	-0,0619	-0,0427	
R ²	0,85**			0,84**			
		..... Níger/Milho				
a	-1,9440	-2,2577	-1,6302				
b	0,5808	0,3592	0,8023				
c	-0,0583	-0,0670	-0,0496				
R ²	0,89**						

θ : teor de água no solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); Ds: densidade do solo (Mg m^{-3}); Ψ : potencial de água no solo (MPa); Li e Ls: limite inferior e superior do intervalo de confiança 95%, respectivamente; **: significativo pelo teste “F” a 1%.

A influência positiva da densidade do solo sobre a curva de retenção de água pode ser atribuída à redistribuição do tamanho de poros com aumento na proporção de poros de menor diâmetro, de modo a se tornarem mais eficientes na retenção de água em elevados Ψ . Em baixos Ψ , a influência da densidade do solo sobre a curva de retenção de água pode ser atribuída à maior massa de sólidos com elevada superfície de adsorção, uma vez que a compactação geralmente não altera a microporosidade dentro dos agregados (BLAINSKI et al., 2009).

O ajuste da curva de resistência do solo à penetração (Quadros 5 e 6) aos dados mostrou que os parâmetros “e” e “f” foram estatisticamente significativos ($p < 0,01$), pois seus intervalos de confiança não incluíram o valor zero, como proposto por Blainski et al. (2009) e Blainski et al. (2012). No entanto, o coeficiente “d” foi significativo ($p < 0,01$) apenas no ajuste da regressão para a sucessão níger/soja, na profundidade de 0-5 cm (Quadros 5).

A curva de resistência do solo à penetração foi positivamente correlacionada com a Ds e negativamente correlacionada com θ (Quadros 5 e 6), também verificado por Silva et al. (1994); Tormena et al. (1998); Tormena et al. (2007); Calonego e Rosolem (2011) e Lima et al. (2012).

QUADRO 5. Estimativas dos coeficientes de regressão para a curva de resistência do solo à penetração ($RP = d\theta^e Ds^f$), com respectivos coeficientes de determinação (R^2), na camada de 0-5 cm de um Latossolo Vermelho distroférico, cultivado com soja e milho em sucessão a diferentes culturas oleaginosas anuais de outono-inverno

Coeficientes	Valor estimado	Intervalo de confiança		Valor estimado	Intervalo de confiança		
		Li	Ls		Li	Ls	
	 Milho/Soja Girassol/Soja		
d	0,0053	-0,0026	0,0132	0,0007	-0,0002	0,0016	
e	-3,8272	-4,7094	-2,9449	-4,7489	-5,6795	-3,8183	
f	4,5564	2,4739	6,6388	7,7913	6,1406	9,4421	
R^2	0,83**			0,87**			
	 Girassol/Milho Canola/Soja		
d	$6,4 \times 10^{-6}$	$-1,4 \times 10^{-5}$	$2,7 \times 10^{-5}$	0,0018	-0,0009	0,0043	
e	-7,7794	-9,7600	-5,7988	-4,5846	-5,5135	-3,6558	
f	12,7335	8,7963	16,6707	5,7383	3,7036	7,7729	
R^2	0,79**			0,84**			
	 Canola/Milho Cártamo/Soja		
d	$4,0 \times 10^{-7}$	$4,0 \times 10^{-7}$	$4,0 \times 10^{-7}$	0,0014	$-6,0 \times 10^{-5}$	0,0029	
e	-8,5957	-10,6189	-6,5725	-3,9760	-4,7195	-3,2326	
f	18,5244	12,4643	24,5844	7,9312	6,5484	9,3139	
R^2	0,85**			0,93**			
	 Cártamo/Milho Crambe/Soja		
d	0,0004	-0,0003	0,0010	0,0013	-0,0003	0,0029	
e	-5,7314	-7,0186	-4,4441	-4,7552	-5,6604	-3,8500	
f	6,8352	5,0615	8,6089	6,0573	4,4220	7,6925	
R^2	0,84**			0,88**			
	 Crambe/Milho Níger/Soja		
d	0,0002	-0,0002	0,0006	0,0032	0,0001	0,0062	
e	-6,0008	-7,3774	-4,6241	-3,1765	-3,7881	-2,5649	
f	7,4741	5,8873	9,0609	7,4957	6,2148	8,7765	
R^2	0,85**			0,90**			
	 Níger/Milho					
d	$4,9 \times 10^{-5}$	$-1,3 \times 10^{-5}$	$1,1 \times 10^{-4}$				
e	-6,6302	-7,4896	-5,7709				
f	9,4370	8,1102	10,7638				
R^2	0,94**						

RP: resistência do solo à penetração (MPa); θ : teor de água no solo ($m^3 m^{-3}$); Ds: densidade do solo ($Mg m^{-3}$); Li e Ls: limite inferior e superior do intervalo de confiança 95%, respectivamente; **: significativo pelo teste "F" a 1%.

A correlação positiva entre a resistência à penetração e a densidade pode ser atribuída à compactação, aumentando a coesão entre as partículas (BLAINSKI et al.,

2012). Contrariamente, a redução da resistência à penetração com θ deve-se ao efeito lubrificante da água, que reduz a coesão entre as partículas (TORMENA et al., 2007).

QUADRO 6. Estimativas dos coeficientes de regressão para a curva de resistência do solo à penetração ($RP = d\theta^e Ds^f$), com respectivos coeficientes de determinação (R^2), na camada de 5-10 cm de um Latossolo Vermelho distroférico, cultivado com soja e milho em sucessão a diferentes culturas oleaginosas anuais de outono-inverno

Coeficientes	Valor estimado	Intervalo de confiança		Valor estimado	Intervalo de confiança		
		Li	Ls		Li	Ls	
	 Milho/Soja Girassol/Soja	
d	0,0051	-0,0038	0,0141	0,0016	-0,0006	0,0038	
e	-4,3344	-5,6920	-2,9769	-4,6958	-5,6591	-3,7325	
f	3,6304	0,8216	6,4392	5,8375	4,0270	7,6479	
R ²	0,68**			0,85**			
	 Girassol/Milho Canola/Soja	
d	0,0185	-0,0029	0,0398	0,0028	-0,0011	0,0065	
e	-2,9452	-3,6056	-2,2848	-4,5345	-5,3925	-3,6765	
f	3,9636	1,4984	6,4288	4,8361	2,4231	7,2490	
R ²	0,80**			0,86**			
	 Canola/Milho Cártamo/Soja	
d	0,0032	-0,0006	0,0069	0,0015	-0,0005	0,0035	
e	-4,9702	-5,8643	-4,0761	-4,4407	-5,3185	-3,5629	
f	3,7647	1,9035	5,6259	6,7329	4,6128	8,8530	
R ²	0,87**			0,85**			
	 Cártamo/Milho Crambe/Soja	
d	0,0002	-7,8x10 ⁻⁵	0,0005	0,0005	-0,0006	0,0017	
e	-5,8405	-6,7284	-4,9526	-4,4343	-5,4411	-3,4274	
f	8,2579	6,6385	9,8773	9,3948	5,4605	13,3291	
R ²	0,91**			0,80**			
	 Crambe/Milho Níger/Soja	
d	0,0004	-7,4x10 ⁻⁵	0,0008	0,0007	-0,0001	0,0014	
e	-5,5377	-6,4992	-4,5762	-5,3699	-6,2813	-4,4584	
f	7,9126	6,2659	9,5593	6,2639	4,9351	7,5927	
R ²	0,92**			0,91**			
	 Níger/Milho					
d	0,0065	-0,0018	0,0147				
e	-3,1837	-4,0591	-2,3083				
f	5,8086	3,7611	7,8560				
R ²	0,80**						

RP: resistência do solo à penetração (MPa); θ : teor de água no solo ($m^3 m^{-3}$); Ds: densidade do solo ($Mg m^{-3}$); Li e Ls: limite inferior e superior do intervalo de confiança 95%, respectivamente; **: significativo pelo teste "F" a 1%.

Observou-se que a água disponível entre a θ_{CC} e θ_{PMP} aumentou de acordo com a densidade do solo, em todas as sucessões de culturas (Figuras 1 e 2), que é indicado pelo sinal positivo da D_s na curva de retenção de água ajustada aos dados (Quadros 3 e 4), estando de acordo com Tormena et al. (1998) e Roque et al. (2011) e Betioli Júnior et al. (2012). Os valores de θ_{RP} aumentaram com a D_s . Esse resultado é típico de solos com aumento da compactação, que necessitam estar com umidade elevada para que a resistência do solo à penetração não atinja o valor limitante de 2,0 MPa (CALONEGO et al., 2011). Por outro lado, a θ em que o volume de poros com ar é de 10% reduz com o aumento da D_s , pelo fato de que para manter o adequado suprimento de oxigênio é necessário aumentar a drenagem do solo, como relatado por Lima et al. (2012) e Betioli Júnior et al. (2012).

Para as sucessões de culturas e profundidades estudadas, o IHO teve a θ_{RP} como limite inferior e a θ_{PA} foi o limite superior em maiores valores de densidade do solo (Figuras 1 e 2), como também observado por Kaiser et al. (2009) trabalhando em sistema plantio direto e por Calonego et al. (2011) estudando os cultivos de milho solteiro e milho com braquiária em um Nitossolo Vermelho argiloso. Em condições de densidade do solo mais elevadas o teor de água disponível ($AD = \theta_{CC} - \theta_{PMP}$) foi maior que IHO, confirmando que o IHO é um indicador mais sensível para as análises de estrutura do solo, como proposto por Silva et al. (1994). A θ_{PA} foi o fator que mais reduziu o IHO, devido à baixa macroporosidade (Quadro 2).

Para Lima et al. (2012), a redução no IHO primeiramente pela θ_{PA} é um indício de solos com menor qualidade estrutural. Calonego e Rosolem (2011) citam que em solos argilosos, em elevados valores de densidade do solo, a θ_{PA} torna-se o limite superior do IHO, devido à redução da macroporosidade. Para Klein e Camara (2007) quando a θ_{PA} torna-se limitante, indica-se redução significativa dos macroporos responsáveis pela aeração, proporcionando um ambiente menos favorável ao desenvolvimento das plantas.

Na figura 1 estão apresentados os IHO para cada sucessão de cultura, na camada de 0-5 cm. Foi possível observar as maiores limitações impostas pela estrutura do solo ao IHO quando cultivado com as sucessões canola/milho, girassol/soja, canola/soja e crumbe/soja (Figuras 1c, 1g, 1h e 1j). Isso pode ser justificado pelos valores de densidade do solo e macroporosidade nessas sucessões (Quadro 2), assim, verificou-se que com o aumento na densidade do solo e a redução da macroporosidade, o IHO é reduzido, como também relatado por Collares et al. (2006) e Lima et al. (2012).

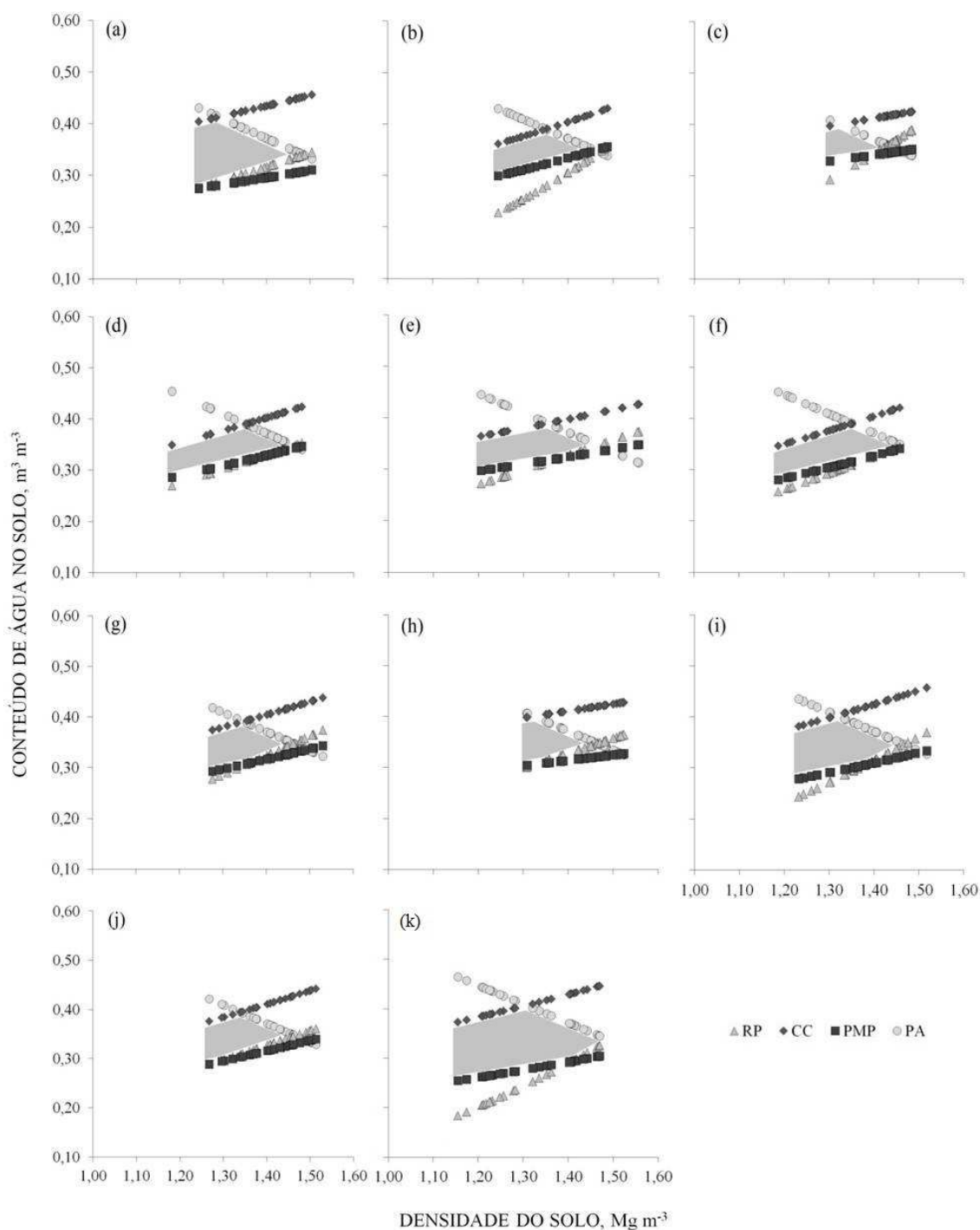


FIGURA 1. Variação dos teores de água do solo na capacidade de campo (θ_{CC}), ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), porosidade de aeração de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (θ_{PA}) e resistência do solo à penetração de $2,0 \text{ MPa}$ (θ_{RP}), em função de alterações na densidade de um Latossolo Vermelho distroférico cultivado com as sucessões milho/soja (a), girassol/milho (b), canola/milho (c), cártamo/milho (d), crambe/milho (e), níger/milho (f), girassol/soja (g), canola/soja (h), cártamo/soja (i), crambe/soja (j) e níger/soja (k), na profundidade de 0-5 cm. A área em cor cinza corresponde ao intervalo hídrico ótimo do solo.

O crescimento do sistema radicular da cultura do milho, pode aumentar o IHO e reduzir o grau de compactação (BETIOLI JÚNIOR et al., 2012). Pickler et al. (2012) em um Latossolo Vermelho distroférico avaliaram as culturas da soja e do milho em sucessão a diferentes plantas de cobertura e verificaram que a cultura do milho propiciou menor valor de densidade do solo e maiores de porosidade total e macroporosidade, quando comparado à soja, sendo este resultado justificado por um possível efeito do sistema radicular do milho, além de ter propiciado maior quantidade de palha.

O valor do θ_{PA} manteve-se acima do θ_{CC} para valores de densidade do solo de até 1,30; 1,36; 1,32; 1,36; 1,36; 1,36; 1,35; 1,33; 1,32; 1,34 e 1,31 $Mg\ m^{-3}$, para as sucessões milho/soja, girassol/milho, canola/milho, cártamo/milho, crambe/milho, níger/milho, girassol/soja, canola/soja, cártamo/soja, crambe/soja e níger/soja, respectivamente (Figura 1). Valores estes semelhantes aos observados por Blainski et al. (2009) que foi de 1,35 $Mg\ m^{-3}$ em um Nitossolo Vermelho distroférico muito argiloso cultivado com feijão e por Kaiser et al. (2009) em um Latossolo Vermelho muito argiloso manejado em sistema plantio direto.

A maior ocorrência de valores de densidade do solo em que $\theta_{PA} < \theta_{CC}$ sugere que, nas sucessões canola/milho (Figura 1b), girassol/soja (Figura 1g), canola/soja (Figura 1h) e crambe/soja (Figura 1j), estas culturas estão mais propícias a sofrerem estresses por aeração em condições de elevada umidade do solo, como também relatado por Tormena et al. (2007). Esse estresse é ocasionado quando o valor de densidade do solo está acima do limite de densidade estabelecido pela θ_{PA} , proporcionando redução no volume de macroporos (ROQUE et al., 2011) e da drenagem do solo (LIMA et al., 2012; BLAISNKI et al., 2012).

O θ_{RP} apresenta-se como limite inferior do IHO (Figura 1) nas profundidades onde se observam restrições ao crescimento das raízes, a exemplo do que foi descrito por Tormena et al. (1998) e Lima et al. (2012). Para a camada de 0-5 cm, do Latossolo Vermelho distroférico em estudo cultivado com soja e milho em sucessão a diferentes culturas oleaginosas, isso ocorre para valores de densidade do solo acima de 1,26; 1,40; 1,42; 1,40; 1,43; 1,38; 1,34; 1,39; 1,29 e 1,40 $Mg\ m^{-3}$, em que o θ_{RP} manteve-se acima do θ_{PMP} , para as sucessões milho/soja, canola/milho, cártamo/milho, crambe/milho, níger/milho, girassol/soja, canola/soja, cártamo/soja, crambe/soja e níger/soja, respectivamente. No entanto, para a sucessão girassol/milho o limite inferior foi o θ_{PMP} em todos os valores de densidade do solo (Figura 1).

Portanto, o θ_{RP} pode ser um indicativo do grau de compactação dessa profundidade do solo, uma vez que ocorre aumento da resistência do solo à penetração com o aumento da densidade do solo (LIMA et al., 2009), aliado ao aumento da coesão proporcionada pela aproximação das partículas sólidas, à medida que o solo é compactado (TORMENA et al., 2007). Medidas que promovam a redução da resistência do solo à penetração ou ampliação dos seus limites críticos devem ser implementadas a fim de ampliar o IHO (BLAINSKI et al., 2012). Assim, deve ser incentivado o uso de sucessões de culturas que proporcionam redução da densidade do solo e manutenção da resistência do solo à penetração abaixo do limite crítico estabelecido, podendo criar poros alternativos para o crescimento das raízes em solos compactados.

A partir do conhecimento do IHO do solo, encontrou-se a densidade do solo em que o IHO é zero, denominada densidade do solo crítica (Dsc) para o crescimento das plantas, as quais foram de 1,48; 1,46; 1,43; 1,46; 1,46; 1,46; 1,46; 1,47 e 1,46 Mg m⁻³ para as sucessões milho/soja, girassol/milho, canola/milho, cártamo/milho, crambe/milho, girassol/soja, canola/soja, cártamo/soja e crambe/soja, na camada de 0-5 cm (Figura 1). Esses valores de Dsc são semelhantes ao encontrado por Severiano et al. (2011) que encontraram valor de Dsc = 1,42 Mg m⁻³ em um Latossolo Vermelho distroférico argiloso, na região de Rio Verde-GO e por Leão et al. (2004) que encontraram Dsc de 1,43 Mg m⁻³ em um Latossolo Vermelho distrófico argiloso, na região de Campo Grande-MS. A proximidade nos valores de Dsc entre as sucessões de culturas mostra que o seu valor é mais influenciado por propriedades intrínsecas ao solo, como já relatado por Roque et al. (2011) e independe do manejo adotado, como também descrito em Klein e Camara (2007).

Na camada de 0-5 cm, nos cultivos tanto do milho quanto da soja em sucessão ao níger não foram obtidos valores de Dsc, observando nesses cultivos menores restrições ao desenvolvimento das plantas, comparadas às demais sucessões. Enquanto as sucessões canola/milho, girassol/soja, canola/soja e crambe/soja apresentaram maiores frequências de Ds > Dsc, indicando que as maiores restrições, decorrentes da aeração e da resistência do solo à penetração, estiveram associadas a essas sucessões (Figura 1c, 1g, 1h e 1j), que podem estar limitando o desenvolvimento e crescimento das plantas, por meio da restrição à disponibilidade hídrica, devido ao menor IHO.

Para Roque et al. (2011) espécies cultivadas em solos com pequeno IHO são mais vulneráveis à redução de produtividade por falta ou excesso de água do que solo

com maior valor de IHO. Camara e Klein (2005) e Tormena et al. (2007) relataram que a menor proporção de valores de $D_s > D_{sc}$ reduz a ocorrência de condições físicas altamente restritivas às plantas. Assim, quanto maior a D_{sc} , menor será a probabilidade de a planta permanecer em condições de estresse (CALONEGO et al., 2011).

De maneira geral, o IHO foi reduzido na camada de 5-10 cm em relação à camada de 0-5 cm (Figuras 1 e 2), como também observado por Serafim et al. (2008b) e Kaiser et al. (2009) em Latossolo Vermelho muito argiloso sob sistema plantio direto. As diferenças no IHO foram menores entre as sucessões nessa camada (Figura 2), porque os limites inferiores foram mais próximos dos limites superiores do IHO, em todas as sucessões, mostrando elevado estado de compactação nessa camada.

As excessões foram os cultivos do milho e da soja em sucessão à cultura do níger (Figuras 2f e 2k), que proporcionaram uma maior amplitude de IHO, resultando em um ambiente físico mais favorável para o crescimento das plantas. Esse resultado pode estar relacionado aos menores valores de densidade do solo e maiores de macroporosidade e porosidade total proporcionados pela cultura do níger antecedendo os cultivos da soja e do milho (Quadro 2), aumentando o IHO.

Essas alterações nos atributos físicos do solo e conseqüentemente no IHO podem ter sido ocasionadas pelo maior aporte de resíduo vegetal da cultura e pelo desenvolvimento do seu sistema radicular, melhorando a atividade microbiana do solo e sua qualidade física. Carneiro et al. (2008) destacaram a cultura do níger pelo seu elevado potencial em produzir massa seca vegetal (acima de 14 Mg ha^{-1}) e aumentar a atividade microbiana do solo.

A maior atividade do sistema radicular e microrganismos do solo podem promover a formação de bioporos de diferentes tamanhos (VEZZANI e MIELNICZUK, 2011), influenciando o movimento de água (STRUDLEY et al., 2008). Enquanto a matéria orgânica do solo atua no arranjo das partículas minerais, proporcionando uma melhor estrutura (DEBIASI et al., 2008). Essa alteração na estrutura melhora os atributos físico-hídricos do solo, ou seja, aumenta a capacidade de armazenamento de água, reduz a resistência do solo à penetração de raízes e favorece a aeração, restabelecendo o seu potencial produtivo (LIMA et al., 2012).

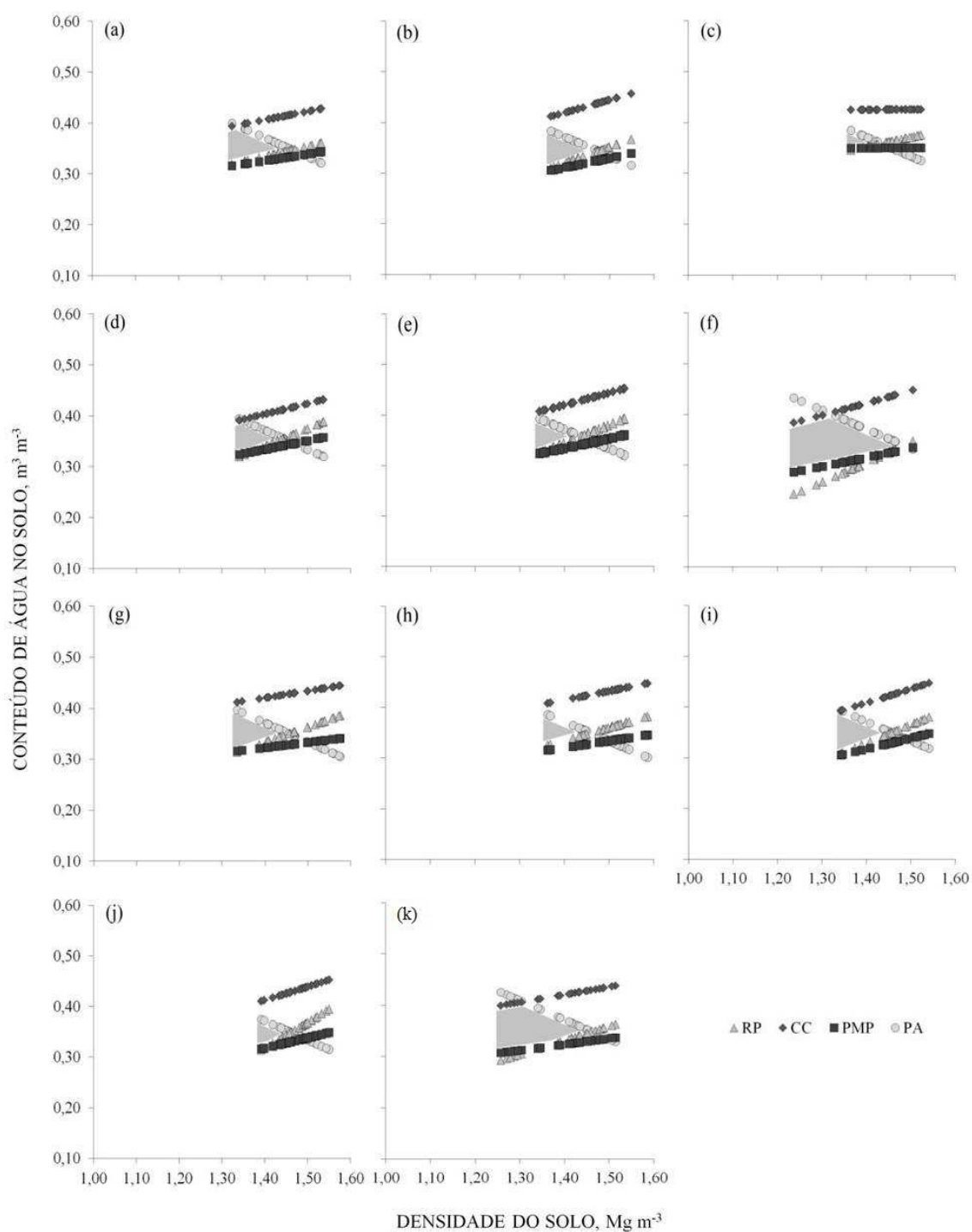


FIGURA 2. Variação dos teores de água do solo na capacidade de campo (θ_{CC}), ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), porosidade de aeração de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (θ_{PA}) e resistência do solo à penetração de $2,0 \text{ MPa}$ (θ_{RP}), em função de alterações na densidade de um Latossolo Vermelho distroférico cultivado com as sucessões milho/soja (a), girassol/milho (b), canola/milho (c), cártamo/milho (d), crambe/milho (e), níger/milho (f), girassol/soja (g), canola/soja (h), cártamo/soja (i), crambe/soja (j) e níger/soja (k), na profundidade de 5-10 cm. A área em cor cinza corresponde ao intervalo hídrico ótimo do solo.

O valor do θ_{PA} manteve-se acima do θ_{CC} para valores de densidade do solo de até 1,36; 1,36; 1,32 e 1,31 $Mg\ m^{-3}$, para as sucessões milho/soja, cártamo/milho, níger/milho e níger/soja, respectivamente (Figura 1a, 1d, 1f e 1k), na camada de 5-10 cm. As demais sucessões apresentaram θ_{PA} como limite superior em 100% dos valores de densidade do solo, mostrando elevada compactação do solo nessas sucessões e nessa camada.

Tal resultado deve-se, provavelmente, ao fato de que, com o aumento da densidade do solo, ocorre decréscimo da porosidade de aeração a valores menores que $0,10\ m^3\ m^{-3}$. Esses resultados são semelhantes aos obtidos por SILVA et al. (1994), TORMENA et al. (2007) e ROQUE et al. (2011) na determinação do IHO. Quando a θ_{PA} passa a limitar o IHO, observou-se redução do volume de macroporos, salientando-se que estes são efetivos na drenagem do solo (LIMA et al., 2012) e difusão de gases no solo (BLAINSKI et al., 2012).

Na profundidade de 5-10 cm, o θ_{RP} apresenta-se como limite inferior do IHO em 100% dos valores de densidade do solo nas sucessões milho/soja, girassol/milho, crambe/milho, canola/soja e cártamo/soja (Figuras 2a, 2b, 2e, 2h e 2i). Este resultado é típico de solos compactados que requerem umidade elevada para manter θ_{RP} abaixo do valor limite crítico (BEUTLER et al., 2006; CALONEGO e ROSOLEM, 2011). Nas demais sucessões estudadas, a θ_{RP} foi limitante ao IHO em valores mais altos de densidade do solo, passando a ser limitante acima de 1,40; 1,40; 1,47; 1,36; 1,41 e 1,38 $Mg\ m^{-3}$, para as sucessões canola/milho, cártamo/milho, níger/milho, girassol/soja, crambe/soja e níger/soja (Figuras 2c, 2d, 2f, 2g, 2j e 2k).

Avaliando a Dsc na profundidade de 5-10 cm, observaram-se poucas alterações nos valores deste indicador em relação à profundidade de 0-5 cm e também entre as sucessões de culturas (Figuras 1 e 2). A Dsc na camada de 5-10 apresentou valores de 1,48; 1,49; 1,44; 1,47; 1,45; 1,50; 1,47; 1,47; 1,46; 1,47 e 1,47 $Mg\ m^{-3}$ para as sucessões milho/soja, girassol/milho, canola/milho, cártamo/milho, crambe/milho, níger/milho, girassol/soja, canola/soja, cártamo/soja, crambe/soja e níger/soja. Estes valores indicam o limite crítico ao adequado crescimento e desenvolvimento das plantas (LIMA et al., 2012), enquanto valores acima indicam uma condição física altamente restritiva (TORMENA et al., 2007).

Observaram-se nas sucessões milho/níger (Figura 2f) e níger/soja (Figura 2k) menores valores de densidade do solo acima da Dsc comparado-as às demais sucessões, mostrando que nas sucessões onde se utilizou a cultura do níger como cultura

antecessora, houve menor chance de ocorrer condições limitantes ao desenvolvimento das plantas. Isso mostra uma melhor estabilidade estrutural do solo nessas sucessões, reduzindo as limitações ocasionadas pela θ_{RP} e θ_{PA} , mantendo o IHO mais próximo do teor de água disponível ($AD = \theta_{CC} - \theta_{PMP}$), melhorando a capacidade produtiva do solo.

CONCLUSÕES

1. O intervalo hídrico ótimo é um adequado indicador de alterações da estrutura do Latossolo Vermelho distroférico ocasionadas pelos cultivos da soja e do milho em sucessão às culturas oleaginosas anuais de outono-inverno.

2. As sucessões girassol/soja, canola/soja e crambe/soja apresentam maior densidade do solo e menores macroporosidade e porosidade total, na camada de 0-10 cm.

3. O cultivo tanto da soja quanto do milho em sucessão a cultura do níger apresenta melhor estrutura do solo, por aumentar a sua disponibilidade hídrica dada pelo intervalo hídrico ótimo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, R.S.; STONE, L.F.; SILVEIRA, P.M. Culturas de cobertura e qualidade física de um Latossolo em plantio direto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, p.411-418, 2009.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; AMADO, T.J.C.; MARTIN-NETO, L.; FERNANDES, S.V. Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v.54, p.101-109, 2000.

BERGAMIN, A.C.; VITORINO, A.C.T.; FRANCHINI, J.C.; SOUZA, C.M.A.; SOUZA, F.R. Compactação em um Latossolo Vermelho distroférico e suas relações com o crescimento radicular do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.681-691, 2010a.

BERGAMIN, A.C.; VITORINO, A.C.T.; LEMPP, B.; SOUZA, C.M.A.; SOUZA, F.R. Anatomia radicular de milho em solo compactado. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v.45, p.299-305, 2010b.

BETIOLI JÚNIOR, E.; MOREIRA, W.E.; TORMENA, C.A.; FERREIRA, C.J.B.; SILVA, A.P.; GIAROLA, N.F.B. Intervalo hídrico ótimo e grau de compactação de um Latossolo Vermelho após 30 anos sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.971-982, 2012.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SILVA, A.P.; BARBOSA, J.C. Intervalo hídrico ótimo e produtividade de cultivares de soja. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, p.639-645, 2006.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; CENTURION, M.A.P.C.; LEONEL, C.L.; SÃO JOÃO, A.C.G.; FREDDI, O.S. Intervalo hídrico ótimo no monitoramento da compactação e da qualidade física de um Latossolo Vermelho cultivado com soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.1223-1232, 2007.

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**, v.33, p.273-281, 2009.

BLAINSKI, E.; TORMENA, C.A.; GUIMARÃES, R.M.L.; NANNI, M.R. Qualidade física de um Latossolo sob plantio direto influenciada pela cobertura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.79-87, 2012.

BOER, C.A.; ASSIS, R.L.; SILVA, G.P.; BRAZ, A.J.B.P.; BARROSO, A.L.L.; CARGNELUTTI FILHO, A.; PIRES, F.R. Ciclagem de nutrientes por plantas de cobertura na entressafra em um solo de cerrado. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v.42, p.1269-1276, 2007.

BRADFORD, J.M. Penetrability. In: KLUTE, A., ed. **Methods of soil analysis**. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, 1986. p.463-478.

BUSSCHER, W.J. Adjustment of that-tipped penetrometer resistance data to a common water content. **Transactions of the ASAE**, v.33, p.519-524, 1990.

CALONEGO, J.C.; BORGHI, E.; CRUSCIOL, C.A.C. Intervalo hídrico ótimo e compactação do solo com cultivo consorciado de milho e braquiária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.2183-2190, 2011.

CALONEGO, J.C.; ROSOLEM, C.A. Least limiting water range in soil under crop rotations and chiseling. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.759-771, 2011

CAMARA, R.K.; KLEIN, V.A. Propriedades físico-hídricas do solo sob plantio direto escarificado e rendimento da soja. **Ciência Rural**, v.35, p.813-819, 2005.

CARNEIRO, M.A.C.; CORDEIRO, M.A.S.; ASSIS, P.C.R.; MORAES, E.S.; PEREIRA, H.S.; PAULINO, H.B.; SOUZA, E.D. Produção de fitomassa de diferentes espécies de cobertura e suas alterações na atividade microbiana de solo de cerrado. **Bragantia**, v.67, p.455-462, 2008.

CAVALIERI, K.M.V.; TORMENA, C.A.; VIDIGAL FILHO, P.S.; GONÇALVES, A.C.A.; COSTA, A.C.S. Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.137-147, 2006.

COLLARES, G.L.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; KAISER, D.R. Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v.41, p.1663-1674, 2006.

COLLARES, G.L.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; KAISER, D.R. Compactação de um Latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.933-942, 2008.

CUNHA, E.Q.; STONE, L.F.; FERREIRA, E.P.B.; DIDONET, A.D.; MOREIRA, J.A.A. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo sob produção orgânica impactados por sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, p.56-63, 2012.

DEBIASI, H.; LEVIEN, R.; TREIN, C.R.; CONTE, O.; MAZURANA, M. Capacidade de suporte e compressibilidade de um Argissolo, influenciadas pelo tráfego e por plantas de cobertura de inverno. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.2629-2637, 2008. (Número Especial)

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

GARBIATE, M.V.; VITORINO, A.C.T.; TOMASINI, B.A.; BERGAMIN, A.C.; PANACHUKI, E. Erosão em entre sulcos em área cultivada com cana crua e queimada sob colheita manual e mecanizada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.2145-2155, 2011

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**, v.32, p.180-186, 1968.

KAISER, D.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; COLLARES, G.L.; KUNZ, M. Intervalo hídrico ótimo no perfil explorado pelas raízes de feijoeiro em um Latossolo sob diferentes níveis de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.845-855, 2009.

KLEIN, V.A.; CAMARA, R.K. Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em Latossolo Vermelho sob plantio direto escarificado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.221-227, 2007.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis - physical and mineralogical methods**. 2 ed. Madison: ASA – SSSA, 1986, p.635-662.

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**, v.28, p.415-423, 2004.

LEÃO, T.P.; SILVA, A.P.; PERFECT, E.; TORMENA, C.A. An algorithm for calculating the least limiting water range of soil using SAS. **Agronomy Journal**, v.97, p.1210-1215, 2005.

LIMA, V.M.P.; OLIVEIRA, G.C.; SERAFIM, M.E.; CURI, N.; EVANGELISTA, A.R. Intervalo hídrico ótimo como indicador de melhoria da qualidade estrutural de Latossolo degradado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.71-78, 2012.

LIMA, V.M.P.; OLIVEIRA, G.C.; SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, L.F.C. Intervalo hídrico ótimo e porosidade de solos cultivados em área de proteção ambiental do sul de minas gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.1087-1095, 2009.

LLANILLO, R.F; RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; GUIMARÃES, M.F.; FERREIRA, R.R.M. Evolução de propriedades físicas do solo em função dos sistemas de manejo em culturas anuais. **Semina: Ciências Agrárias**, v.27, p.205-220, 2006.

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**, v.73, p.119–129, 2003.

PEIXOTO, P.P.P. **Bases para aproveitamento e gerenciamento de recursos hídricos na região de Dourados-MS**. 2002. 98 f. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu-SP.

PETEAN, L.P. **Qualidade física de um Latossolo Vermelho distroférico sob integração lavoura-pecuária**. 2011. 128 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas), Universidade Estadual de Maringá, Maringá-PR.

PICKLER, E.P.; NÓBREGA, L.E.P.; LIMA, G.P.; KONOPATZKI, M.R.S.; PACHECO, F.P. Influência da cobertura de inverno nos atributos físicos do solo em culturas de milho e soja sob plantio direto. **Engenharia na agricultura**, v.20, p.33-45, 2012.

REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.12, p.211-216, 1988.

ROQUE, A.A.O.; SOUZA, Z.M.; ARAÚJO, F.S.; SILVA, G.R.V. Atributos físicos do solo e intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distrófico sob controle de tráfego agrícola. **Ciência Rural**, v.41, p.1536-1542, 2011.

ROSS, P.J.; WILLIAMS, J. & BRISTOW, K.L. Equations for extending water-retention curves to drynees. **Soil Science Society of American Journal**, v.55, p.923-927, 1991.

SAVAGE, M.J.; RITCHIE, J.T.; LAND, W.L.; DUGAS, W.A. Lower limit of soil water available. **Agronomy Journal**, v.88, p.844-851, 1996.

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

SERAFIM, M.E.; VITORINO, A.C.T.; PEIXOTO, P.P.P.; SOUZA, C.M.A.; CARVALHO, D.F. Intervalo hídrico ótimo em um Latossolo Vermelho distroférico sob diferentes sistemas de produção. **Engenharia Agrícola**, v.28, p.654-665, 2008b.

SERAFIM, M.E.; VITORINO, A.C.T.; SOUZA, C.M.A.; PRADO, E.D.; VENTURIN, J.C.; YAMAMOTO, N.T. Desenvolvimento de um penetrógrafo eletromecânico de bancada. **Revista Ciências Técnicas Agropecuárias**, v.17, p.61-65, 2008a.

SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G.C.; DIAS JÚNIOR, M.S.; COSTA K.A.P.; SILVA, F.G.; FERREIRA FILHO, S.M. Structural changes in Latosols of the cerrado region: I – relationships between soil physical properties and least limiting water range. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.773-782, 2011.

SILVA, F.A.S.; AZEVEDO, C.A.V. Versão do programa computacional Assistat para o sistema operacional Windows. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.4, p.71-78, 2002.

SILVA, A.P.; KAY, B.D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, v.58, p.1775-1781, 1994.

SOUZA NETO, E.S.; ANDRIOLI, I.; BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F. Atributos físicos do solo e produtividade de milho em resposta a culturas de pré-safra. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v.43, p.255-260, 2008.

SOUZA, E.D.; CARNEIRO, M.A.C.; BANYS, V.L. Fitomassa e acúmulo de nitrogênio, em espécies vegetais de cobertura do solo para um Latossolo Vermelho distroférico de Cerrado. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.30, p.525-531, 2008.

STATSOFT. **Statistica (data analysis software system) - version 8.0**. Tulsa: StatSof, 2007.

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

TAYLOR, H.M.; ROBERSON, G.M.; PARKER JR., J.J. Soil strength-root penetration relations to medium to coarse-textured soil materials. **Soil Science**, v.102, p.18-22, 1966.

TORRES, J. L. R.; PEREIRA, M. G.; FABIAN, A. J. Produção de resíduo vegetal por plantas de cobertura e mineralização de seus resíduos em plantio direto. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v.43, p.421-428, 2008.

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**, v.31, p.211-219, 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**, v.22, p.573-581, 1998.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Agregação e estoque de carbono em Argissolo submetido a diferentes práticas de manejo agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.213-223, 2011.

WOHLENBERG, E.V.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BLUME, E. Dinâmica da agregação de um solo franco-arenoso em cinco sistemas de culturas em rotação e em sucessão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.891-900, 2004.

CONCLUSÕES GERAIS

1. A utilização da cultura do níger em manejo de sucessão de culturas em sistema plantio direto proporciona menor capacidade de suporte de carga e maior intervalo hídrico ótimo.

2. O intervalo hídrico ótimo é um indicador de qualidade física dos solos cultivados com culturas oleaginosas anuais de outono-inverno; podendo ser utilizado para identificar as principais limitações físicas e adotar melhores técnicas de manejo do solo.

3. O melhor momento para as práticas de manejo do solo, em termos de conteúdo de água no solo, é distinto para as diversas oleaginosas anuais de outono-inverno cultivadas em sucessão com soja e milho.