

GLENIO GUIMARÃES SANTOS

**IMPACTO DE SISTEMAS DE INTEGRAÇÃO
LAVOURA-PECUÁRIA NA QUALIDADE
FÍSICA DO SOLO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, da Universidade Federal de Goiás, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Agronomia, área de concentração: Solo e Água.

Orientador:

Dr. Pedro Marques da Silveira

Co-orientador:

Dr. Robélio Leandro Marchão

Goiânia, GO – Brasil
Fevereiro - 2010

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
GPT/BC/UFG

S237i Santos, Glenio Guimarães.
Impacto de sistemas de integração lavoura-pecuária na qualidade física do solo [manuscrito] / Glenio Guimarães-Santos. - 2010.
122 f.: figs, tabs.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Marques da Silveira. Co-Orientador: Prof. Dr. Robélio Leandro Marchão.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Goiás,
Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos, 2010.
Bibliografia.

1. Solos – Qualidade 2. Solos – Física 3. Integração lavoura-pecuária 4. Compactação do solo 5. Título.

CDU: 631.458

GLENIO GUIMARÃES SANTOS

TÍTULO: "Impacto de sistemas de integração lavoura-pecuária na qualidade física do solo".

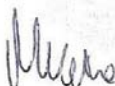
Tese DEFENDIDA e APROVADA em 26 de fevereiro de 2010, pela Banca Examinadora Constituída pelos Membros:


Prof. Huberto José Kliemann
EA/UFG


Dr. Luis Fernando Stone
Embrapa Arroz e Feijão


Dr. Rebellio Leandro Marchão
Embrapa Cerrados


Dr. Euzébio Medrado da Silva
Embrapa Cerrados


Dr. Pedro Marques da Silveira
Presidente – Embrapa Arroz e Feijão

Aos meus pais Conceição e Maria Aparecida

A minha filha Gabriela

A toda minha família e

A todos os meus amigos, professores e colaboradores

Dedico

“Aos companheiros de toda hora; aos amigos de todos os momentos; à cervejada do dia-a-dia; às churrascadas de confraternização; às pescarias inesquecíveis, quando se tem tempo; aos colegas sempre presentes; aos desconhecidos que almejam nos conhecer; aos conhecidos que anseiam não nos aceitar; aos educadores que nos instruem por toda vida; aos sábios que nos proporcionam a alegria de cultivar o bem; ao bem que nos ensina a diferença entre ser bom ou ruim; ao ruim que nos ensina como é bom não sermos mal; ao mal que nos ensina como é bom termos fé; à fé que nos ensina a grandeza do pai maior: aquele que jamais desiste de seus filhos, por maior que sejam suas atitudes inconsequentes, mas que os ama incondicionalmente do que fazem! À vida que já vivi; à vida que tenho; ao futuro que ainda me espera; às angustias que me aguardam; aos diferentes caminhos aos quais tenho que fazer minhas escolhas e, somente eu poderei fazê-las; ao bem maior que o universo nos proporciona: saúde, paz, amor e muita felicidade, muita felicidade mesmo! Sentimentos não se compram, se conquistam a cada instante! As premissas maiores da vida se baseiam na honestidade, na sinceridade, na sabedoria e na harmonia universal da amizade entre os seres. MEU PAI MAIOR, MEU DEUS, hoje, amanhã e para sempre, nos oriente sempre no caminho do bem e na harmonia divina presente no universo, AMÉM!!!”

À minha filha Gabriela Lopes de Carvalho Guimarães, razão da minha vida que me encoraja e me dá forças para seguir em frente na busca de meus objetivos.

Mesmo longe, estarei sempre presente, por toda eternidade!

AGRADECIMENTOS

PRIMEIRAMENTE A DEUS, QUE ME ILUMINOU, ESTEVE E SEMPRE ESTARÁ JUNTO A MIM.

A meus pais Conceição Alves dos Santos, Maria Aparecida Guimarães Santos e minha filha Gabriela Lopes de Carvalho Guimarães, que nunca desistiram de mim, por maior que fossem os momentos difíceis, estando ao meu lado sempre com paciência, amor e muito carinho.

Ao companheiro, pesquisador e orientador Dr. Pedro Marques da Silveira pela sua paciência e conselhos que foram fundamentais na elaboração e execução deste trabalho.

Ao Dr. Thierry Becquer, que através do Institut de Recherche pour le Développement - IRD, financiou grande parte da pesquisa e me co-orientou neste trabalho.

Ao Dr. Robélio Leandro Marchão, pela amizade e co-orientação em todas as fases do meu trabalho de tese.

Ao pesquisador Dr. Euzébio Medrado da Silva pelo companheirismo e determinação em me conduzir na busca incansável de novos conhecimentos e questionamentos às diversas metodologias aplicadas à física do solo.

Aos companheiros da Embrapa Arroz e Feijão e Embrapa Cerrados, especialmente àqueles dos laboratórios de química e física do solo que sempre me ajudaram nas coletas de campo e nas análises laboratoriais deste trabalho.

A Embrapa Arroz e Feijão e Embrapa Cerrados por me propiciarem o desenvolvimento do experimento em suas áreas experimentais e pelas análises químicas e físicas; ao CNPq por me conceder bolsa de estudo.

Ao Laboratório Solocria, através da amiga Cristiane Rodrigues que colaborou na realização de algumas análises químicas e mineralógicas deste trabalho.

Ao amigo Antônio Willman José Rios da Fundação IBGE pela grande colaboração na descrição dos perfis de solo.

Aos colegas da Pós-graduação da Escola de Agronomia da UFG Abadia (Reyzinha), Adriana, Carloeme, Cícero C. Figueiredo, Janne Louize, Jorge Antonini, Lino Carlos, Leisson, Mellissa Ananias, Pedro Moçambique, Pérola Calil, Rafael Ratke, Roberta, Sidney, enfim, a todos que de forma direta ou indireta contribuíram para a finalização do meu curso de doutorado.

Ao secretário da Pós-graduação Welinton Barbosa Mota, pela presteza, amizade e companheirismo.

Ao grande amigo Ulisses Vaz e sua esposa Luciana, os quais tiveram papel fundamental nos momentos mais difíceis no decorrer dos meus estudos, me estendendo a mão e acreditando nos meus sonhos que agora se tornam realidade.

E a todos que direta ou indiretamente contribuíram neste meu trabalho.

A todos o meu reconhecimento.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	8
LISTA DE FIGURAS.....	9
RESUMO GERAL.....	11
GENERAL ABSTRACT.....	12
1 INTRODUÇÃO GERAL.....	13
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	17
2.1 A ESTRUTURA DO SOLO E SUA RELAÇÃO COM A QUALIDADE FÍSICO-HÍDRICA.....	17
2.2 SISTEMA DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA E SUA INFLUÊNCIA NOS ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DO SOLO.....	23
2.3 INDICADORES DE QUALIDADE DO SOLO.....	26
2.4 REFERÊNCIAS.....	31
3 THE SOIL WATER RETENTION CURVE AS A SOIL PHYSICAL QUALITY INDICATOR: CONTRIBUTION TO THE S-THEORY... ABSTRACT.....	44
RESUMO.....	44
3.1 INTRODUCTION.....	45
3.2 MATERIAL AND METHODS.....	46
3.2.1 Characterization and localization of experimental area.....	47
3.2.2 Theory.....	47
3.2.2.1 Expression of θ according to different scales.....	47
3.2.2.2 Derivation of van Genuchten model to obtain the inflection point.....	48
3.2.2.3 Calculation of the <i>S</i> -values.....	50
3.3 RESULTS AND DISCUSSION.....	51

3.3.1	The soil.....	51
3.3.2	Application of the new equations to non-compacted and compacted soil samples.....	52
3.4	CONCLUSION.....	56
3.5	REFERENCES.....	56
4	QUALIDADE FÍSICA DO SOLO SOB PASTAGEM CONTÍNUA E SISTEMA DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA.....	59
	RESUMO.....	59
	ABSTRACT.....	59
4.1	INTRODUÇÃO.....	60
4.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	62
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	69
4.3.1	Alterações nos atributos físico-hídricos do solo em relação aos diferentes sistemas de produção.....	69
4.3.2	Impacto dos sistemas de produção sobre as curvas de retenção de água do solo.....	73
4.3.3	Relações entre os atributos físico-hídricas do solo.....	77
4.3.4	Aplicação do índice-S como indicador de qualidade física do solo em sistema de integração lavoura-pecuária.....	79
4.3.5	Diagramas comparativos dos atributos de qualidade física do solo (QFS) em sistema de integração lavoura-pecuária.....	86
4.4	CONCLUSÕES.....	88
4.5	REFERÊNCIAS.....	89
5	CONCLUSÕES GERAIS.....	97
	APÊNDICES.....	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Indicadores físicos e biológicos do solo, relacionados ao desenvolvimento e produção de plantas, usados para avaliar a qualidade dos solos.....	30
Table 3.1	Gravimetric soil-water content (g g^{-1}) from soil cores collected under compacted (0-5 cm) and non-compacted (70-75 cm) layers in a typical degraded pasture in Cerrado area.....	52
Table 3.2	Fitted parameter values (van Genuchten, 1980) for θ versus T , $\ln T$, or $\log T$, the respective inflection points and S -values for compacted (C) and non-compacted (NC) layers.....	52
Tabela 4.1	Sistemas de manejo e uso do solo das áreas estudadas.....	64
Tabela 4.2	Valores médios de atributos físico-hídricos conforme sistemas de manejo e uso do solo e da profundidade de amostragem.....	69
Tabela 4.3	Valores de probabilidade do teste F, com 3 e 10 graus de liberdade, nas comparações das curvas do conteúdo relativo de água entre os sistemas de manejo, avaliados nas camadas de 2,5-7,5, 12,5-17,5, 22,5-27,5 cm (diagonal superior) e 42,5-47,5, 72,5-77,5 e 142,5-147,5 cm (diagonal inferior).....	76

LISTA DE FIGURAS

Figure 3.1	Soil-water retention curves from compacted (A) and non-compacted (B) layers, showing where each respective inflection point lies (C and D).....	53
Figure 3.2	Inflection points of SWRC from compacted (A) and non-compacted (B) soils according to the new proposed formulation versus the ones proposed by Dexter and Bird (2001) and Dexter (2004).....	55
Figura 4.1	Disposição das áreas em que foram realizadas as amostragens do solo.....	63
Figura 4.2	Mapa da litologia e formação geológica – área Embrapa Arroz e Feijão.....	64
Figura 4.3	Esquema do processo utilizado em laboratório para determinação da curva de retenção de água do solo e densidade do solo, depois de verificada a condutividade hidráulica saturada.....	66
Figura 4.4	Curvas do conteúdo relativo de água (CRA) versus tensão da água no solo em sistemas de integração lavoura-pecuária nas profundidades de 2,5-7,5, 12,5-17,5, 22,5-27,5, 42,5-47,5, 72,5-77,5 e 142,5-147,5.....	75
Figura 4.5	A: regressão entre densidade do solo e porosidade total; B: regressão entre densidade do solo e macroporosidade e; C: regressão entre densidade do solo e microporosidade efetiva.....	78
Figura 4.6	A: regressão entre a relação Ma/Mi_e e a densidade do solo e; B: regressão entre a relação Ma/Mi_e e a umidade gravimétrica saturada do solo.....	78
Figura 4.7	Regressão entre a equação para cálculo do índice-S modificada e Dexter (2004a).....	80
Figura 4.8	A: regressão entre o índice-S modificado e a densidade do solo; B: regressão entre o índice-S modificado e a porosidade total; C: regressão entre o índice-S modificado e a macroporosidade; D: regressão entre o índice-S modificado e a relação Ma/Mi_e	81

Figura 4.9	<p>A: Índice-S em função das profundidades avaliadas, para os sistemas C2: sistema 5 - arroz em plantio convencional e C3: sistema 6 - <i>Brachiaria brizantha</i> (Hochst.) Stapf., em consórcio com milho. B: Índice-S em função das profundidades avaliadas, para os sistemas P1: sistema 1 - pastagem de <i>Brachiaria brizantha</i> (Hochst.) Stapf.; P2: sistema 2 - pastagem de <i>Brachiaria brizantha</i> (Hochst.) Stapf.; P3: sistema 3 - pastagem de <i>Brachiaria brizantha</i> (Hochst.) Stapf.; C1: sistema 4 - soja sob plantio direto; CP: área sob pastagem contínua de <i>Brachiaria decumbens</i> (Stapf) R.D. Webster; CE: cerrado nativo.....</p>	82
Figura 4.10	<p>Diagrama comparativo da qualidade física do solo de áreas sob diferentes sistemas de manejo e uso, nas seis profundidades avaliadas.....</p>	87

RESUMO GERAL

SANTOS, G. G. **Impacto de sistemas de integração lavoura-pecuária na qualidade física do solo**. 2010. 122 f. Tese (Doutorado em Agronomia: Solo e Água)–Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.¹

Na medida em que se intensifica o uso agrícola, os atributos físico-hídricos do solo sofrem alterações, geralmente adversas ao crescimento vegetal e essas modificações ficam mais nítidas, quando os sistemas de uso do solo são comparados com o estado do solo ainda sob vegetação natural de cerrado. A utilização do sistema de integração lavoura-pecuária pode acarretar mudanças acentuadas nos atributos físicos, químicos e biológicos do solo e que podem afetar o desenvolvimento e, conseqüentemente, a produção das culturas que venham em sequência ao pastejo. Este estudo teve como objetivo geral analisar, quantitativamente, por meio de atributos físico-hídricos, as principais alterações na qualidade do solo, decorrentes da utilização de longo prazo em sistema de integração lavoura-pecuária, conduzidos em ambiente de Cerrado. O estudo foi realizado a partir da abertura de trincheiras na Fazenda Capivara, Embrapa Arroz e Feijão, e em área particular, ao lado da propriedade da Embrapa, onde amostras de solo foram coletadas nas profundidades: 2,5-7,5 cm, 12,5-17,5 cm, 22,5-27,5 cm, 42,5-47,5 cm, 72,5-77,5 cm e 142,5-147,5 cm. As avaliações foram realizadas em seis sistemas, com área média de 13,5 ha cada, sendo caracterizadas pelo seu uso atual como: sistema P1 (pastagem de *Brachiaria brizantha* com quatro anos de uso); sistema P2 (pastagem de *Brachiaria brizantha* com dois anos de uso); sistema P3 (pastagem de *Brachiaria brizantha* com três anos de uso); sistema C1 (Soja sob plantio direto); sistema C2 (arroz sob plantio convencional) e; sistema C3 (milho + *Brachiaria brizantha* sob plantio direto). Foi também usada uma sétima área de cinco ha, mantida sob pastagem contínua de *Brachiaria decumbens*, por 19 anos após implantação designada por CP e uma oitava área de cerrado nativo chamada de CE. De uma forma geral, os atributos físico-hídricos e dentre eles as curvas de retenção de água do solo e os respectivos valores do índice-S são alterados, quando submetidos ao manejo com implementos agrícolas e ao pastoreio animal, se comparados à área de cerrado nativo, considerada área de referência neste estudo. O uso do índice-S para avaliar a qualidade física do solo, do ponto de vista da sua estrutura de qualidade por meio da curva de retenção de água pode ser uma opção viável, uma vez que não têm algumas das limitações encontradas no uso de outros indicadores de qualidade do solo. Contudo, sua aplicação demanda um número maior de investigações regionalizadas para diferentes sistemas de manejo e plantas cultivadas, tipos de solo, clima, atividade biológica do solo, dentre outros, relacionando seus valores críticos a índices médios de produtividade agrícola, para que se possa utilizá-lo com segurança na determinação da qualidade física “efetiva” do solo.

Palavras-chave: curva de retenção de água do solo, degradação do solo, densidade do solo, índice-S, manejo, pastagem.

¹ Orientador: Dr. Pedro Marques da Silveira. Embrapa Arroz e Feijão/EA-UFG.
Co-orientador: Dr. Robélio Leandro Marchão. Embrapa Cerrados.
Co-orientador: Dr. Euzebio Medrado da Silva. Embrapa Cerrados.

GENERAL ABSTRACT

SANTOS, G. G. **Impact of livestock-crop integrated systems in the soil physical quality**. 2010. 122 f. Thesis (Doctored in Agronomy: Soil and Water)–Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.¹

When the agricultural usage becomes more intensive, the soil-water physical attributes can undergo significant modifications which are generally adverse to plant growth. The changes can be rather easily detected when the cultivated systems are compared with the same soil still under natural Cerrado vegetation. The use of the system of crop-livestock integration can lead to marked changes in the physical, chemical, and biological soil attributes that can affect the development and hence the productivity of the crops that come after the pasture. This study aimed at analyzing quantitatively by means of attributes of soil-water relations, the main changes in soil quality, resulting from long-term soil usage under integrated crop-livestock, conducted in Cerrado area. The study was carried out by sampling soil trenches dug in the Capivara Farm of Embrapa Rice and Beans, as well as, in a private farm, located nearby Embrapa property. The trenches were sampled in the following depths: 2.5-7.5 cm, 12.5-17.5 cm, 22.5-27.5 cm, 42.5-47.5 cm, 72.5-77.5 cm and 142.5-147.5 cm. The evaluations were carried in six production systems, with an average of 13.5 ha in each area, being characterized by its current usage as: P1 system (*Brachiaria brizantha* grazing managed for four years); P2 system (*Brachiaria brizantha* grazing managed for two years); P3 system (*Brachiaria brizantha* grazing managed for three years); C1 system (soybean under no-tillage); C2 system (rice under conventional tillage) and C3 system (maize + *Brachiaria brizantha* under no-tillage). It was also used a seventh area, kept under continuous grazing with *Brachiaria decumbens* managed for 19 years, identified as CP, and an eighth area of the native cerrado vegetation, identified as CE. Generally, the soil-water physical attributes, and among them, the soil-water retention curves and the respective *S*-index values are altered when managed with agricultural implements and animal grazing in comparison to native cerrado area, considered in this study as a reference area. The use of *S*-index to evaluate the soil physical quality from the point of view of its structure quality by means of the soil-water retention curve can be a viable option, since it does not have some of the restrictions found by using other soil quality indicators. However, its use requires a greater number of regionalized investigations for different tillage systems and crops, soil types, climate, soil biological activity, among others, in order to relate the critical values with average productivity, so it can be used safely to appraise the "effective" soil physical quality.

Key words: soil water retention curve, soil degradation, bulk density, *S*-index, management, pasture.

¹ Adviser: Dr. Pedro Marques da Silveira. Embrapa Arroz e Feijão / EA-UFG.
Co-Adviser: Dr. Robélio Leandro Marchão. Embrapa Cerrados.
Co-Adviser: Dr. Euzébio Medrado da Silva. Embrapa Cerrados.

1 INTRODUÇÃO GERAL

No Brasil, um dos maiores problemas existentes nas grandes áreas utilizadas para pastoreio, sob pastagem contínua, é a baixa capacidade de suporte em unidade animal (U. A.), devido principalmente à degradação dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo, a qual está quase sempre relacionada ao tipo de sistema de manejo adotado nessas áreas. No Bioma Cerrado, o uso intensivo de áreas para a produção vegetal e animal tem causado degradação da estrutura do solo, afetando negativamente o desenvolvimento vegetal e, predispondo o solo à erosão hídrica (Stone & Guimarães, 2005). Na medida em que se intensifica o uso agrícola, os atributos físico-hídricos do solo sofrem alterações, geralmente adversas ao crescimento vegetal e essas modificações ficam mais nítidas, quando os sistemas de uso do solo são comparados com o estado do solo ainda sob vegetação natural de cerrado (Spera et al., 2004; Figueiredo et al., 2009). De acordo com Flores (2004), a utilização do sistema de integração lavoura-pecuária pode acarretar mudanças acentuadas nos atributos físicos, químicos e biológicos do solo e que podem afetar o desenvolvimento radicular (Taylor & Brar, 1991; Silva et al., 2000a) e, conseqüentemente, a produção das culturas que venham em seqüência ao pastejo (Silva et al., 2000a; Albuquerque et al., 2001; Salton et al., 2002). Porém, Marchão et al. (2007) concluíram que sistemas de integração lavoura-pecuária provocam impacto na qualidade físico-hídrica do solo, apenas na profundidade de 0-5 cm, em relação à condição original observada no ambiente sob Cerrado preservado, podendo esses impactos, serem de maior ou menor intensidade, dependendo da textura e das condições de umidade do solo e do tipo de manejo adotado na área.

Essa problemática ainda representa um dos desafios da pesquisa na atualidade e as técnicas para avaliar a qualidade de um solo de maneira simples e confiável ainda continuam sendo objeto de investigações. Segundo Araujo et al. (2007), a qualidade do solo pode ser mensurada, quantificando-se as alterações de seus atributos físicos, químicos e biológicos, a médio e longo prazo. Os resultados sistemáticos desse tipo de monitoramento representam um papel central em estudos sobre qualidade do solo. Nesse aspecto, ainda existe um campo aberto no que concerne ao desenvolvimento de novos

índices para a avaliação da qualidade física do solo, principalmente no caso dos solos sob cerrado, ainda pouco explorados, notadamente no tocante aos estudos associados ao uso de atributos físico-hídricos como forma de aferição de sua sustentabilidade produtiva.

A avaliação da qualidade do solo, quando feita diretamente por meio de medidas de seus atributos, tais como: atributos bioquímicos e microbiológicos (Sánchez, 2003; Bending et al., 2004; Gil-Sotres et al., 2005), comunidades bacterianas e invertebradas (Black et al., 2003; Ruf et al., 2003), estratificação da proporção de material orgânico (Franzluebbers, 2002), biomassa microbiana (Mummey et al., 2002), atributos físicos e químicos (Stenberg, 1999; Schoenholtz et al., 2000), tipos de plantas de cobertura e matéria orgânica (Wilson et al., 2001) pode ser mais complexa. A qualidade do solo depende do uso do solo, da pluralidade de interrelações entre os fatores físicos, químicos e biológicos do solo que controlam esses processos e, dos aspectos relacionados à variação destes atributos, em tempo e espaço (Melloni et al., 2008), o que torna ainda mais difícil a tarefa de definir com exatidão quais são os atributos da qualidade do solo e em que intensidade eles afetam um determinado processo produtivo. Nesse aspecto, para fins de elucidação, destaca-se que indicadores da qualidade do solo são aqueles atributos que determinam a capacidade do solo para sustentar a produtividade das culturas no longo prazo (Carter et al., 1997; Imhoff, 2002).

A curva de retenção de água do solo (CRA), por ser um dado relativamente simples de ser obtido do ponto de vista operacional e de expressar importantes relações físico-hídricas da matriz do solo tem sido considerada por muitos pesquisadores como uma informação fundamental para o desenvolvimento e aplicação de indicadores da qualidade física do solo (Eavis, 1972; Phene & Beale, 1976; Letey, 1985; Silva et al., 1994; Tormena et al., 1998; Dexter & Bird, 2001; Dexter, 2004a, 2004b, 2004c; Reynolds et al., 2009). Com os dados obtidos por meio da CRA é possível gerar informações que permitem calcular os seguintes atributos: a densidade do solo (Davies et al., 1989; Mead & Chan, 1992; Harrison et al., 1994; Abaye et al., 1997; Bell et al., 1997; Mapfumo et al., 1998; Krzic et al., 1999; Nie et al., 2001); a condutividade hidráulica (Mead & Chan, 1992; Harrison et al., 1994; Bell et al., 1997; Betteridge et al., 1999; Francis et al., 1999; Krzic et al., 1999), a porosidade do solo (Hart et al., 1988; Davies et al., 1989; Mead & Chan, 1992; Francis et al., 1999) e as características de retenção de água do solo (Hart et al., 1988; Williams & Kalmbacher, 1996; Bell et al., 1997; Mapfumo et al., 2000), os quais são

amplamente utilizados como atributos indicadores da qualidade do solo, tornando o processo de avaliação da qualidade física do solo, mais simples, rápido e menos complexo.

Em estudos para desenvolver métodos para determinação da umidade ótima e umidade para cultivo de campo, baseada na curva de retenção de água do solo (CRA) ajustada pelo modelo de van Genuchten (1980), Dexter & Bird (2001) propuseram uma equação que permitiu calcular o ponto de inflexão da CRA, que corresponderia exatamente ao valor da segunda derivada, onde seu valor se iguala a zero. Na sequência, Dexter (2004a, 2004b, 2004c), utilizando da base matemática de Dexter & Bird (2001) em trabalhos sobre qualidade física do solo, propôs um novo índice para avaliar a qualidade física do solo, chamado de “índice- S ”. Este índice de qualidade física do solo foi desenvolvido para facilitar sua utilização, sem ambiguidade, em vários tipos de solos, com diferentes teores de matéria orgânica, diferentes graus de compactação e níveis de sodicidade e diferentes conteúdos de umidade do solo no momento de seu preparo. O índice- S é obtido a partir da curva de retenção da água no solo e representa o valor da inclinação da curva de retenção de água no seu ponto de inflexão. Segundo Dexter (2004a), maiores valores de S (maior inclinação) indicam melhor distribuição de tamanho de poros, condizente com condições estruturais que estabelecem um adequado funcionamento físico do solo. Assim sendo, fatores relacionados com o solo (textura e estrutura) e com manejo (matéria orgânica, compactação e preparo do solo) que influenciam a distribuição do tamanho de poros refletem em mudanças nos valores de S e, portanto, na qualidade física do solo (Streck et al., 2008).

No entanto, apesar de ampla adoção do índice- S , a formulação matemática proposta para calcular o valor de S (Dexter & Bird, 2001; Dexter, 2004a) apresenta algumas incoerências que necessitam ser esclarecidas. Ao derivar o índice- S , Dexter (2004a), assumiu explicitamente que os parâmetros de escala e de forma (α, n, m) da relação $\theta-h$ de van Genuchten não se alterariam após a mudança da escala aritmética para logarítmica da variável h . Esta hipótese não é verdadeira devido a natureza não linear do modelo do tipo van Genuchten. Assim sendo, a formulação matemática proposta por Dexter (2004a) para o cálculo do índice- S pode resultar em diferenças significativas ou não nas aplicações deste índice em avaliações da qualidade física do solo baseada na CRA.

Este estudo teve como objetivo geral analisar, quantitativamente, por meio de atributos físico-hídricos, as principais alterações na qualidade do solo, decorrentes da utilização de longo prazo em sistema de integração lavoura-pecuária, conduzidos em

ambiente de Cerrado. Nesse sentido, buscou-se especificamente: a) analisar e aplicar a teoria do índice-*S* de Dexter na avaliação da qualidade físico-hídrica dos solos; mantidos sob sistema de integração lavoura-pecuária em ambiente de Cerrado, em longo prazo; b) avaliar, quantitativamente, as principais alterações nos atributos físico-hídricos do solo em sistema de integração lavoura-pecuária de longo prazo em ambiente de Cerrado.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A ESTRUTURA DO SOLO E SUA RELAÇÃO COM A QUALIDADE FÍSICO-HÍDRICA

A busca por alternativas tecnológicas que possibilitem o uso racional do solo tem sido a tônica das discussões em torno do tema manejo correto do solo para uma agricultura sustentável. Dos componentes do manejo, o preparo do solo talvez seja a atividade que mais influencie no seu comportamento físico-hídrico, pois atua diretamente na estrutura do solo. Além das modificações na porosidade e na densidade, o manejo provoca alterações na estrutura do solo que afetam a retenção de água e a resistência mecânica, entre outros atributos físicos do solo (Silva et al., 1994; Oliveira et al., 2003).

De acordo com Doran & Parkin (1994), os atributos físicos do solo podem ser classificados como intermediários e permanentes. Como exemplos dos atributos físicos intermediários, alteráveis após o manejo do solo, por alguns anos, citam-se a densidade do solo, resistência do solo à penetração, permeabilidade, aeração, agregação do solo, porosidade, entre outros, tendo ainda, a umidade do solo, como atributo hídrico intermediário, alterável conforme o tipo de manejo do solo. Já a textura do solo, mineralogia, cor, densidade de partículas, podem ser citados como atributos físicos permanentes, inerentes ao “tipo” de solo e que servem para classificá-lo quanto à sua ordem. Em geral, os atributos físicos intermediários são os mais utilizados como indicadores da qualidade física do solo, por estarem sujeitos às maiores intempéries, provocados em função dos sistemas de manejos do solo.

A qualidade da estrutura do solo está relacionada com a forma, estabilidade, tamanho, arranjo e organização das partículas que compõem a matriz do solo (Campos et al., 1995). De modo geral, o solo mantido em estado natural, sob vegetação nativa, apresenta características físicas, como permeabilidade, estrutura, densidade e porosidade do solo, adequadas ao desenvolvimento normal das plantas (Andreola et al., 2000). Nessas condições, o volume de solo explorado pelas raízes é relativamente grande (Spera et al.,

2004). À medida que o solo vai sendo submetido a manejos inadequados, as propriedades físicas do solo podem sofrer alterações geralmente, desfavoráveis ao desenvolvimento vegetal.

Atributos do solo, como densidade, porosidade total, macro e microporosidade têm sido comumente usados para indicar possíveis restrições ao desenvolvimento de plantas. Nesse sentido, Unger & Kaspar (1994) destacaram que a compactação do solo afeta o crescimento das plantas, principalmente quando o suprimento de água e nutrientes é insuficiente. Além disso, ela concorre para reduzir o suprimento adequado de oxigênio (O_2) no solo, prejudicando o desenvolvimento vegetativo da parte aérea com redução significativa da produtividade (Hakansson & Voorhees, 1998; Beutler et al., 2004). Na compactação do solo, há aumento de massa por unidade de volume, resultando em aumento na densidade do solo, na resistência do solo à penetração de raízes e na microporosidade relativa, o que contribui para redução linear da porosidade total e da macroporosidade (Stone et al., 2002; Beutler et al., 2005). Quanto aos aspectos da funcionalidade dos poros destaca-se que os macroporos ($>100 \mu\text{m}$) desempenham o papel primordial de aeração da matriz do solo e de condução de água no processo de infiltração. Nesse mesmo sentido, os mesoporos ($>50 \mu\text{m}$ e $<100 \mu\text{m}$) exercem a principal função de redistribuição de água e os microporos ($<50 \mu\text{m}$), também conhecidos por poros capilares, têm como atribuição básica, o armazenamento ou retenção de água pelo solo a 6 kPa (Libardi, 2000; Andrade, 2008).

A porosidade de aeração ou porosidade livre de água (Libardi, 2000) é diretamente afetada pelo conteúdo de água no solo. Tomando-se a porosidade total como um valor fixo, pode-se dizer que parte dela pode ser ocupada por água e a outra parte por ar. Quando a porosidade de aeração é menor que 10%, a taxa de fluxo de oxigênio (O_2) em direção ao sistema radicular das plantas é severamente prejudicada, afetando assim os processos metabólicos e o crescimento das raízes das plantas (Leão, 2002).

Outro atributo do solo que merece ser destacado é a estabilidade de seus agregados. De acordo com estudos sobre a influência do manejo na agregação do solo, Tisdal & Oades (1980) indicaram que a influência do manejo do solo na estabilidade dos microagregados menores do 0,25 mm não é tão importante. No entanto, deve ser destacado que as partículas de argilas dispersas no solo são liberadas lentamente e agem como uma nuvem expansiva envolvendo os agregados (Arnold, 1978). Assim, a argila dispersa pode bloquear os poros que transmitem ou armazenam água no solo, resultando em estruturas

indesejáveis, funcionalmente semelhantes a superfícies compactadas (Tisdal & Oades, 1982). Deste modo, a microporosidade do solo, atributo importante para o armazenamento da água a ser disponibilizada para as plantas pode sofrer alterações negativas, provenientes do manejo do solo. Neste aspecto, mesmo que haja um armazenamento adequado de água nos microporos, se for produzida uma camada compactada na zona de crescimento radicular, poderá haver uma diminuição na capacidade de infiltração, redistribuição de água e aeração do solo, com reflexos negativos no crescimento radicular, devido à menor absorção de água e nutrientes do solo, o que pode comprometer diretamente a produção e produtividade vegetal.

Resultados de pesquisas têm demonstrado que a resistência dos agregados e a friabilidade do solo são influenciados por diversos fatores, como umidade do solo (Utomo & Dexter, 1981), teor de argila dispersa em água (Kay & Dexter, 1992; Barzegar et al., 1994), composição e concentração da solução do solo (Rahimi et al., 2000), ciclos de umedecimento e secagem do solo (Dexter, 1988a; Kay & Dexter, 1992), teor de argila e mineralogia (Kemper et al., 1987; Guérif, 1990; Ley et al., 1993), teor de matéria orgânica (Causarano, 1993; Perfect et al., 1995; Rahimi et al., 2000) e, presença de materiais ligantes e/ou cimentantes, como a sílica e aluminossilicatos pouco cristalinos (Kay & Dexter, 1992; Kay & Angers, 1999). Em geral, o aumento no teor de argila induz incremento na resistência tênsil dos agregados e, portanto, redução da friabilidade (Kemper et al., 1987; Guérif, 1990; Bartoli et al., 1992). Esse aumento parece ser função do incremento do número de cargas elétricas, o que favorece a formação de ligações entre partículas minerais e/ou partículas minerais e orgânicas (Imhoff, 2002).

Os óxidos de ferro e alumínio também foram assinalados como agentes importantes para a agregação do solo (Pinheiro-Dick & Schwertmann, 1996; Barral et al., 1998; Igwe et al., 1999; Muggler et al., 1999). Óxidos de ferro e alumínio atuam como agentes ligantes entre partículas minerais, influenciando a estruturação do solo ao incrementar a resistência das regiões de fratura (Kay & Angers, 1999). Em geral, esses óxidos parecem atuar em duas formas: i) os agregados podem ser formados em razão da atração entre partículas de óxidos positivamente carregadas e partículas da matriz do solo negativamente carregadas, principalmente daquelas que apresentam o tamanho que corresponde à fração argila; ii) os óxidos podem estar recobrimo a superfície das partículas minerais, unindo partículas de diferentes tamanhos (Kay & Angers, 1999; Muggler et al., 1999). Em ambas as formas, os óxidos de ferro e alumínio podem alterar a

carga superficial dos minerais, intensificando as ligações entre as partículas (Imhoff, 2002). Decorrente desse fenômeno, a resistência tênsil dos agregados aumenta. Por outro lado, alguns autores têm assinalado que os óxidos de ferro exercem pouca ou nenhuma influência na agregação do solo (Desphande et al., 1968; Muggler et al., 1997), ou que o efeito desses agentes agregantes foi devido à sua interação com a matéria orgânica do solo e/ou teor de argila (Guérif, 1990; Bartoli et al., 1992).

A adoção de sistemas de manejo que mantenham a proteção do solo através do contínuo aporte de resíduos orgânicos é fundamental para a manutenção de uma boa estrutura (Silva et al., 2000b). O contínuo fornecimento de material orgânico serve como fonte de energia para a atividade microbiana, que atua como agente de estabilização dos agregados (Campos et al., 1995). Castro Filho et al. (1998), estudando um Latossolo Roxo, concluíram que o acúmulo de resíduos vegetais na superfície como consequência da adoção do sistema plantio direto melhorou o estado de agregação graças ao incremento do teor de carbono orgânico, sobretudo na camada de 0-10 cm, independentemente da sucessão de culturas. Os valores de diâmetro médio geométrico dos agregados foram significativamente superiores em relação aos do plantio convencional.

Carpenedo & Mielniczuk (1990), avaliando a estabilidade estrutural dos agregados em condições de mata e campo nativo, verificaram que houve redução da agregação quando os solos foram submetidos à aração e à gradagem para o cultivo de trigo e soja. Após cinco anos de cultivo, Da Ros et al. (1997) observaram que o diâmetro médio geométrico dos agregados no tratamento com plantio direto foi estatisticamente equivalente ao do campo nativo, diminuindo com o aumento da intensidade de preparo do solo, com valores de 2,96 vezes menores no preparo convencional comparado ao campo nativo. Campos et al. (1995) constataram que no sistema plantio direto o diâmetro médio geométrico dos agregados foi cerca de duas vezes maior que no sistema de plantio convencional. Harris et al. (1996) utilizaram a porcentagem de agregados estáveis (>2 mm) em água para avaliar a qualidade do solo em sistemas de manejo; segundo esses autores, os valores foram 40%, 26% e 19%, para sistema conservacionista, plantio direto e solo arado, respectivamente.

Com relação a estudos sobre compactação do solo, Mitchell (1976) e Silva et al. (2005) afirmaram que a deposição de argila nas paredes dos poros e sobre os grãos de quartzo causa um arranjo mais compacto de partículas, aumentando o adensamento das camadas subsuperficiais. Esse fenômeno é mais expressivo em solos cuja argila está

num maior grau de dispersão, migrando facilmente sob condições de chuva ou irrigação (Helalia et al., 1988). As principais consequências da compactação nas propriedades físicas do solo, além do aumento da densidade do solo são: a diminuição do tamanho dos poros e redução da condutividade hidráulica (Soane et al., 1981; Dexter, 1988b; Klein & Libardi, 2002; Silva et al., 2005; Marchão et al., 2007). A compactação devida ao cultivo e manejo animal também pode causar modificações na retenção de água do solo, decorrentes de alterações sofridas na distribuição de diâmetro dos poros, principalmente redução da macroporosidade (Hillel, 1980; Figueiredo et al.; 2009). O aumento da retenção de água no solo devida à compactação tem sido verificado por alguns autores (Stone et al., 1994; Corsini & Ferraud, 1999). Todavia, a disponibilidade de água para as plantas vai depender do nível de compactação e da distribuição de diâmetro dos poros resultante (Hillel, 1980).

A compactação do solo pelo tráfego de máquinas, originada da compressão do solo insaturado é a principal causa da degradação física dos solos agrícolas, que aumenta com a intensidade de tráfego em condições inadequadas de umidade do solo (Flowers & Lal, 1998). Esta prática altera a estrutura que é o atributo físico do solo mais importante (Corrêa, 2002) e, conseqüentemente, a geometria e distribuição de poros por tamanho (Richard et al., 1999; Bouwman & Arts, 2000), modificando o comportamento físico-hídrico e a condutividade de água no solo, em maior ou menor grau conforme o nível de compactação (Richard et al., 2001; Beutler et al., 2005).

Silva et al. (2005), estudando o efeito de sistemas de uso e manejo nas propriedades físico-hídricas do solo, concluíram que os sistemas de manejo com cana-de-açúcar influenciaram as propriedades físicas do solo. Isto resultou no aumento da densidade do solo, com conseqüente redução do volume de mega e macroporos e aumento dos micro e criptoporos, em relação ao solo de mata e que, as alterações na distribuição de diâmetro dos poros promoveram uma redução da condutividade hidráulica saturada. Porém, provocou aumento na retenção de água do solo disponível para as plantas, demonstrando a necessidade de uma maior investigação de qual grau de compactação do solo é realmente negativa ao desenvolvimento das culturas.

Ao se avaliar atributos físico-hídricos em sistema de integração lavoura-pecuária, Lanzasova et al. (2007) verificaram que a compactação do solo decorrente do pisoteio bovino, durante os três anos de duração do estudo, segundo os valores de densidade do solo, limitou-se à camada superficial do solo, de 0–5 cm de profundidade.

Nas camadas subsequentes, não houve diferença significativa entre os valores observados, e, para as três frequências de pastejo, estes variaram entre 1,32 Mg m⁻³ e 1,35 Mg m⁻³. Neste mesmo estudo, avaliaram ainda, que a microporosidade do solo não foi significativamente alterada pelos sistemas de manejo das pastagens em nenhuma das camadas de solo estudadas. Contudo, a macroporosidade e a porosidade total sofreram influência do pisoteio bovino e, com a redução de pastoreio de 28 para 14 dias, diminuiram significativamente a macroporosidade e a porosidade total na camada superficial, passando de 0,11 m³ m⁻³ para 0,07 m³ m⁻³ e de 0,56 m³ m⁻³ para 0,51 m³ m⁻³, respectivamente, e ambas diferiram, significativamente, da área não pastejada.

Outro fator limitante ao desenvolvimento e estabelecimento de culturas é a resistência oferecida pelo solo à penetração de sistemas radiculares. Embora varie com o solo e com a espécie cultivada, a resistência do solo à penetração é ocasionada pelo tráfego de máquinas agrícolas. Os atributos mais importantes para a caracterização dessa resistência são a densidade e o conteúdo de água do solo, sendo que a densidade do solo apresenta uma relação direta com a resistência à penetração (Borges et al., 1988), enquanto que o conteúdo de água exerce influência negativa a essa resistência (Tormena et al., 1998; Beutler et al., 2005).

Valores críticos de resistência à penetração variam de 1,5 MPa a 4,0 MPa (Topp et al., 1994; Arshad et al., 1996; Rosolem et al., 1999), sendo o valor de 2 MPa aceito como impeditivo ao crescimento radicular (Tormena et al., 1998); valores entre 2 MPa e 3 MPa foram considerados limitantes ao desenvolvimento radicular de trigo, milho e pastagem (Imhoff et al., 2000). Mielniczuk et al. (1985) verificaram, em Latossolo Roxo em casa de vegetação, menor produtividade de matéria seca da parte aérea de aveia e trigo na resistência à penetração de 3,03 MPa e milho em 2,35 MPa, no conteúdo de água de 0,28 kg kg⁻¹. Já, para Beutler et al. (2004), o valor de resistência do solo à penetração limitante à produtividade de grãos de arroz de sequeiro foi de 2,38 MPa e 2,07 MPa, respectivamente, no Latossolo Vermelho textura média e Latossolo Vermelho textura argilosa, no conteúdo de água retida na tensão de 0,01 MPa. No conteúdo de água retida na tensão de 0,05 MPa foram obtidas menores produções e o menor valor de resistência à penetração proporcionou maiores produções de arroz de sequeiro.

A estrutura do solo, modificada por atividades antrópicas em associação à compactação e a perda da estabilidade dos agregados alteram a distribuição do tamanho dos poros, bem como a retenção, o movimento e a disponibilidade de água no solo. Assim,

a curva de retenção de água do solo (CRA) tem papel crucial nos estudos de qualidade do solo, com vistas a nortear as práticas de uso e o manejo sustentável dos sistemas de produção agrícola.

A CRA é um atributo físico-hídrico que descreve a relação entre conteúdo de água e o potencial matricial que varia no tempo e no espaço, cujas informações possibilitam calcular valores de outros atributos do solo (Scott, 2000), como por exemplo, densidade do solo, porosidade total, saturação efetiva, e outros. O conteúdo de água retido em determinado potencial decorre da estrutura e da distribuição dos tamanhos de poros (Beutler et al., 2002). Os resultados de Rawls et al. (1991) mostraram que, em elevados potenciais, a CRA foi influenciada por poros estruturais associados ao efeito da matéria orgânica na formação e na estabilidade da estrutura do solo (Machado et al., 2008). Em baixo potencial, a composição granulométrica e a mineralogia do solo tornam-se mais importantes devido à superfície disponível para a adsorção de água (Gupta & Larson, 1979).

A maioria dos estudos descreve as relações entre as variáveis do solo e os coeficientes da equação da CRA numa ampla variação de solos. No entanto, sob um mesmo solo, os diferentes sistemas de uso e manejo podem promover modificações na sua estrutura e no comportamento físico-hídrico do solo (Machado et al., 2008). Essas CRA permitem a interpretação das relações entre a densidade do solo, os teores de carbono orgânico do solo, os teores de água e a resistência do solo à penetração em sistemas de manejo de solo. Ou seja, a interpretação correta dos diversos atributos físico-hídricos do solo, associada às suas interrelações permitem avaliar com maior precisão, a qualidade física do solo, sob diferentes sistemas de manejo, indicando o grau de degradação do solo em determinada área, quando comparada a solos sem alterações de ordem física, como, por exemplo, área sob vegetação nativa.

2.2 SISTEMA DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA E SUA INFLUÊNCIA NOS ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DO SOLO

O termo integração lavoura-pecuária é utilizado para designar a alternância de cultivo de grãos e pastejo de animais em pastagens de gramíneas e/ou leguminosas (Moraes et al., 1998). A rotação pastagens-culturas de grãos tem se revelado como uma das estratégias mais promissoras para desenvolver sistemas de produção menos intensivos no

uso de insumos e, por sua vez, mais sustentáveis no tempo (Cassol, 2003; Flores, 2004). Estima-se que na exploração pecuária, a cada entressafra, a deficiência de forrageira resulte na perda de cerca de US\$ 1 bilhão, decorrentes do emagrecimento e morte de bovinos (Kluthcouski et al., 2003).

Dois grandes aspectos chamam a atenção quando se discute sustentabilidade da produção agrícola: o uso do solo com a agricultura tradicional, com preparo contínuo do solo, e a degradação das pastagens. O monocultivo e práticas culturais inadequadas na agricultura, como o preparo tradicional do solo com contínuas ações de grades, têm causado queda na produtividade, degradação do solo e dos recursos naturais (Macedo, 2009). A degradação das pastagens é o fator mais importante, na atualidade, que compromete a sustentabilidade da produção animal, e pode ser explicada como um processo dinâmico de degeneração ou de queda relativa da produtividade (Macedo & Zimmer, 1990; Macedo, 2001, 2009). Dentre os fatores mais importantes relacionados com a degradação das pastagens destacam-se o manejo animal inadequado e a falta de reposição de nutrientes. A lotação animal excessiva, sem os ajustes para uma adequada capacidade de suporte, e a ausência de adubação de manutenção têm sido os aceleradores do processo de degradação (Macedo, 2009).

Albuquerque et al. (2001) relataram que a compactação causada pelo excessivo tráfego de máquinas e implementos agrícolas e pelo pisoteio animal em áreas sob integração lavoura-pecuária, têm sido algumas das principais causas da degradação da capacidade produtiva de solos agrícolas. De acordo com Greenwood et al. (1997), devido à energia cinética as pressões exercidas pelo pastoreio dos animais, na superfície do solo são comparáveis às daquelas das máquinas agrícolas. Por exemplo, as pressões exercidas pelo pé de uma ovelha e de um boi são, em média, da ordem de 66 kPa e 138 kPa, respectivamente (Willatt & Pullar, 1983; Noble & Tongway, 1986) e são similares às pressões exercidas pelo pneu de um veículo sem carga, que é da ordem de 58 kPa (Blunden et al., 1994) e pela energia de compactação de 140 kPa exercida por um trator, com peso em cada roda de 0,72 Mg, em 15 passadas (Raghavan et al., 1976; Braida, 2004). Essas pressões exercidas pelo pastoreio serão ainda maiores quando o animal estiver se locomovendo, e seu peso, apoiado nas suas patas. Não é surpreendente, portanto, que as pesquisas mostram degradação das propriedades físicas dos solos sob pastagens devido ao pastoreio dos animais (Lull, 1959; Langlands & Bennett, 1973; Curll & Wilkins, 1983; Proffitt et al., 1993).

Trein et al. (1991) observaram que, após aplicação de elevada taxa de lotação animal em curto período de tempo, houve aumento da resistência do solo à penetração mecânica, diminuição da macroporosidade e redução significativa da infiltração de água no solo na camada de 0-7,5 cm de um Argissolo Vermelho cultivado com pastagens de inverno. Bertol et al. (1998) observaram resultados semelhantes ao avaliarem diferentes taxas de oferta de forragem de uma pastagem natural da Região Fisiográfica Depressão Central do Rio Grande do Sul, quando aplicaram taxas menores de 4% e 8% em relação a taxas de 10% a 16% de oferta de forragem. Flores (2004) não encontrou diferença significativa na densidade e na porosidade de um Latossolo submetido ao pastejo de inverno em pastagem constituída por aveia-preta (*Avena strigosa* Schreber) e azevém (*Lolium multiflorum* Lam.), manejada a alturas variando de 10-40 cm. Cassol (2003) encontrou aumento na infiltração de água diretamente proporcional ao incremento da altura de resíduo da pastagem, evidenciando a degradação da qualidade do solo quando se utiliza elevada pressão de pastejo, em áreas de integração lavoura-pecuária sob sistema plantio direto.

Spera et al. (2009) observaram que o pisoteio pelo gado durante oito anos não contínuos aparentemente não alterou os atributos físicos do solo o suficiente para promover prejuízos ao rendimento de grãos das culturas, porém os animais foram retirados quando o solo estava muito úmido. Neste estudo, a cada ano, o pastejo ocorreu por duas ou três vezes no inverno, e três ou quatro vezes no verão, com duração de, no máximo, dois dias em cada pastejo e com dez a quinze animais. Depois da retirada dos animais da área foi feito um intervalo de 40–60 dias, de modo a permitir rebrota das forrageiras de inverno antes do estabelecimento das culturas de verão.

Dessa forma, os diferentes resultados apresentados anteriormente (Trein et al., 1991; Bertol et al., 1998; Cassol, 2003; Flores, 2004; Spera et al., 2009) demonstraram que os atributos físico-hídricos do solo em sistema de integração lavoura-pecuária (SILP) foram influenciados pelos sistemas de manejo adotados em cada área específica avaliada. Isto indica que o SILP apresentou comportamento diferenciado, em relação à qualidade física do solo, para cada área, para cada sistema de cultivo, manejo do solo e ao tipo de solo presente no local estudado. Estes trabalhos mostraram, ainda, que as diferentes espécies vegetais cultivadas e manejos antecessores à sua implantação, a capacidade de enraizamento das plantas cultivadas, a estruturação do solo e reciclagem de nutrientes, a produção de material orgânico e cobertura vegetal do solo, como também, o manejo das

áreas sob pastagem e a lotação animal por hectare, em função da umidade do solo e da produção de matéria seca influenciaram no grau da alteração dos atributos físico-hídricos do solo nos SILP, para as diferentes áreas avaliadas. Portanto, o SILP pode ser uma alternativa viável para renovação de áreas degradadas fisicamente, desde que implantado e manejado de forma correta, por meio dos conhecimentos disponíveis na literatura.

Segundo Kluthcouski et al. (2004), o SILP proporciona benefícios recíprocos entre lavoura e pecuária. Em geral, o processo de produção dos cultivos anuais, ao mesmo tempo em que repõem nutrientes, degrada as propriedades físicas (estruturação e compactação) e biológicas (decomposição da matéria orgânica) do solo. As forrageiras tropicais, por sua vez, apesar de exaurirem os nutrientes residuais deixados pelas lavouras na superfície do solo, reciclam os nutrientes do subsolo, repõem a matéria orgânica e promovem a aração biológica do solo graças à abundância e agressividade de seus sistemas radiculares e da atividade biológica decorrente.

2.3 INDICADORES DE QUALIDADE DO SOLO

Muitos indicadores da qualidade do solo são baseados em atributos bióticos e abióticos (Klemens et al., 2003; Sepp et al., 2005; Huerta et al., 2009), tais como: atributos bioquímicos e microbiológicos (Sánchez, 2003; Bending et al., 2004; Gil-Sotres et al., 2005), comunidades bacterianas e invertebradas (Black et al., 2003; Ruf et al., 2003), estratificação da proporção de material orgânico (Franzluebbers, 2002), biomassa microbiana (Mummey et al., 2002), atributos físicos e químicos (Stenberg, 1999; Schoenholtz et al., 2000), tipos de plantas de cobertura e matéria orgânica (Wilson et al., 2001).

Dois diferentes enfoques têm sido propostos para se estabelecerem critérios de referência: solos de área sob vegetação natural, por representar as condições ecológicas de estabilidade do ambiente; e características agronômicas que maximizem a produção e conservem o meio ambiente (Santana & Bahia Filho, 2002). Islam & Weil (2000) propuseram a utilização de dados das características físicas, químicas e biológicas, coletados em solos de uma área de floresta natural não perturbada, como referência para montagem de um índice geral da qualidade do solo. De acordo com Velasquez et al. (2005) e Cecillon et al. (2009), para se monitorar a evolução dos impactos dos modelos de desenvolvimento agrícola é necessário monitorar pontualmente a qualidade física, química

e biológica do solo, utilizando técnicas sensíveis e eficientes que possibilitem detectar mudanças significantes nestas condições. De acordo com esses autores, a aplicação do NIRS (Espectroscopia de Reflectância Infravermelha) pode ser uma ferramenta eficiente para se avaliar e caracterizar a qualidade do solo em grandes áreas, de forma confiável e econômica, facilitando a tomada de decisões sobre o manejo e conservação do solo. Huerta et al. (2009) afirmaram que a evolução da qualidade do solo pode, frequentemente, envolver análise de dados dos atributos do solo utilizando métodos estatísticos complexos (análises de co-inércia química, física, macrofauna e dados de estrutura do material orgânico). Como exemplo, o método “GISQ - Indicador Multifuncional de Qualidade do Solo” proposto por Velasquez et al. (2007), que permite um monitoramento de longa duração das modificações na qualidade física do solo e pode orientar a implementação de tecnologias restauradoras do solo.

A qualidade física do solo depende de indicadores que levem em conta a profundidade efetiva do sistema radicular, porosidade total, distribuição do tamanho de poros, densidade do solo, distribuição do tamanho de partículas, resistência do solo à penetração das raízes, intervalo hídrico ótimo, índice de compressão e estabilidade dos agregados (Richart et al., 2005). Para Secco et al. (2005), quando se objetiva estudar os atributos que fazem parte da estabilidade estrutural, como indicadores da qualidade física do solo sob diferentes sistemas de manejo, a eficiência ou não da avaliação dependerá do monitoramento ao longo do tempo. Esse monitoramento pode ser feito na propriedade agrícola ou em níveis mais abrangentes, como microbacia hidrográfica, região e outros. As práticas de manejo e de conservação do solo e da água devem ser planejadas e executadas, procurando-se manter ou mesmo melhorar seus atributos, de modo a aumentar a capacidade do solo em sustentar uma produtividade competitiva, de ordem física, química e biológica sem comprometer a qualidade do solo e da água.

De acordo com Stenberg (1999) e Schoenholtz et al. (2000), os indicadores da qualidade física do solo deveriam abranger os atributos físicos, químicos e biológicos do solo; incorporar a variabilidade das propriedades; ser sensíveis a variações em longo prazo provocadas pelas alterações sazonais; ser mensuráveis precisamente através de uma ampla variedade de classes e condições de solos; ser simples de medir; ter um baixo custo e ser adaptáveis para diversos sistemas. Singer & Ewing (2000) e Imhoff (2002) sugeriram a utilização de indicadores da qualidade física do solo que incluíssem os atributos físicos que influenciam diretamente a produção das culturas, como o grau e a magnitude com a qual a

matriz do solo resiste à deformação; a capacidade do solo em fornecer adequada aeração e quantidade de água para o crescimento e expansão do sistema radicular das plantas. Segundo Topp et al. (1997), Schoenholtz et al. (2000) e Singer & Ewing (2000), os atributos mais amplamente utilizados como indicadores de qualidade física do solo deveriam ser aqueles que levassem em conta a profundidade efetiva de enraizamento, a porosidade total e a distribuição e tamanho dos poros, a distribuição do tamanho das partículas, a densidade do solo, a resistência do solo à penetração das raízes, o intervalo hídrico ótimo, o índice de compressão e a estabilidade dos agregados. Prevendo o grau das perturbações ambientais provocadas pelo manejo inadequado das atividades agropecuárias e de que o recurso solo é limitado, alguns de seus componentes requerem períodos de tempo muito prolongados para serem renovados que excedem várias vezes, o tempo de vida do ser humano, razão pela qual a qualidade do solo tem se tornado um tema de interesse geral (Singer & Ewing, 2000).

Segundo Letey (1985), o potencial da água no solo, a taxa de difusão de oxigênio, a temperatura e a resistência do solo à penetração das raízes, os quais afetam diretamente o crescimento das plantas, seriam indicadores mais adequados da qualidade física do solo para a produção das culturas. Assim sendo, Silva et al. (1994) propuseram o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) como um indicador da qualidade estrutural do solo para a produtividade das culturas. Esse indicador integra o efeito do potencial matricial, aeração e resistência do solo à penetração das raízes num único parâmetro, possibilitando estabelecer as condições de umidade do solo limitantes ao crescimento das plantas. O IHO foi definido como a faixa de conteúdo de água do solo determinada por dois limites: o superior e o inferior. O limite superior do IHO é a umidade do solo na capacidade de campo ou a umidade do solo na qual a porosidade de aeração é de 10%, e o limite inferior é a umidade no ponto de murchamento permanente ou a umidade do solo na qual a resistência do solo à penetração atinge o valor de 2,0 MPa (Imhoff, 2002).

Existem vários modelos para avaliação da qualidade do solo (QS), conforme descrito por Tótola & Chaer (2002); entretanto, esses modelos são de complexa aplicação e enfatizam a qualidade do solo voltada para a produção, sendo sua aplicação direcionada, sobretudo, para a pesquisa. Skopp et al. (1990), utilizando modelos de difusão e dados experimentais propôs que a produção máxima de nitrogênio disponível para culturas pela mineralização microbiana aeróbia da matéria orgânica ocorre (independentemente do “tipo” de solo) quando aproximadamente 66% do espaço poroso do solo está cheio de

água, ou alternativamente, quando cerca de 34% do espaço poroso está cheio de ar. Reynolds et al. (2002) realizaram estudos similares ao de Skopp et al. (1990) e concluíram que os critérios propostos, $FC/POR_t = 0,66$ (FR: umidade volumétrica do solo; POR_t : porosidade total do solo) e $AC_t/POR_t = 0,34$ (AC_t : aeração total do solo), para capacidade de armazenamento "ideal" de água e ar do solo foram úteis como bons indicadores de qualidade física do solo. Eles foram coerentes com critérios estabelecidos, como os usados para OC (carbono orgânico), BD (densidade do solo seco), AC (aeração do solo) e PAWC (umidade do ponto de murcha permanente), e incorporaram parâmetros físicos do solo adicionais (FC e POR_t) e outros aspectos da qualidade do solo (produção microbiana de nitrogênio), que ainda não haviam sido explícitos em critérios existentes. Segundo esses autores, mais trabalhos serão necessários para determinar se a produtividade das culturas a campo e/ou de saúde ambiental rural seriam constantemente melhoradas, mantendo essas relações e os outros parâmetros do indicador dentro de seus respectivos intervalos ideais.

Dexter (2004a) e Reynolds et al. (2009) definiram como premissa essencial da teoria do índice-S utilizado como indicador da qualidade física ou estrutural do solo, como sendo “determinada primariamente por manejos induzidos de poros na estrutura do solo (porosidade estrutural ou macroporos), em vez de poros alterados na textura "matriz" do solo (porosidade textural ou microporos)”. Os poros da estrutura incluem redes tridimensionais de microfissuras, rupturas e espaços interagregados, criados pela mobilização, atividade de congelamento-degelo, adição de práticas de melhoramento benéficas ao solo, drenagem, desenvolvimento de raiz, e outros. Em grande parte, a estrutura dos poros determina a forma da curva de liberação de água do solo pela tensão presente entre a saturação ($h = 0$) e o ponto de inflexão (h_i). Os poros da matriz do solo, por outro lado, incluem os espaços dentro dos agregados (intra-agregados “microporos”) e entre partículas individuais de areia, silte, argila e matéria orgânica (ou seja, da estrutura principal) e elas, em grande parte controlam a liberação de água do solo em maiores tensões, do que à tensão do ponto de inflexão.

Além dos indicadores de qualidade do solo considerados quantitativos e mais científicos comentados anteriormente, indicadores qualitativos que possam ser observados diretamente na propriedade (Tabela 2.1) são de alta importância e devem servir de guia para o manejo dos solos agrícolas e estarem bem consolidados na memória dos produtores (Reinert, 2006). A análise de indicadores qualitativos e quantitativos deve ser feita em momentos estratégicos durante o ciclo das culturas e alguns indicadores devem ser

observados ao longo do tempo. Um bom exemplo de indicador se refere ao escoamento superficial durante eventos de chuva de alta intensidade, mas outros, como acúmulo de água com drenagem lenta, aparência das plantas, entre outros, também podem dar uma boa indicação do estado da qualidade do solo. Segundo Reichert et al. (2003), o indicador de qualidade de maior sucesso é a observação de como as raízes “se relacionam” com o ambiente do solo abaixo da superfície, ou seja, a determinação do que se convencionou chamar de estudo do perfil das raízes.

Tabela 2.1. Indicadores físicos do solo, relacionados ao desenvolvimento e produção de plantas, usados para avaliar a qualidade dos solos¹.

Indicador	Época de avaliação	Qualidade estrutural		
		Pobre	Média	Boa
Indicadores físicos				
1. Compactação subsuperficial	Boa umidade do solo	Solo resistente; aparência laminar; difícil de penetrar objeto pontiagudo	Alguma resistência a objetos pontiagudos	Solo friável
2. Boa estrutura	Boa umidade do solo	Aspecto maciço	Superfícies de fraqueza clara	Granular
3. Aeração	Crescimento de plantas	Poucos poros visíveis e drenagem limitada	Alguns bioporos	Solo aberto e bioporos comuns
4. Profundidade efetiva	Qualquer	Subsolo exposto	Evidências de perda horizonte	Horizonte A profundo
5. Infiltração	Após chuva	Água escoou ou permanece na superfície	Água penetra	Sem escoamento ou empoçamento
6. Drenagem	Após chuva	Solo úmido por longo tempo	Algum empoçamento	Água se move rapidamente
7. Retenção de água	Crescimento de plantas	Estresse após poucos dias	Plantas “sentem” seca	Estresse somente em seca extrema
8. Cobertura superficial	Qualquer	Exposto	Alguma cobertura, <30%	100% cobertura

¹Extraído de Reichert et al. (2003).

Muito empenho tem sido dedicado para geração de índices que possam avaliar a qualidade física do solo. Segundo Karlen et al. (1997), um índice, para que possa ser

utilizado na avaliação de um processo ou atributo, deve: (a) de algum modo influenciar o processo para o qual a avaliação está sendo feita, (b) permitir a comparação com alguma condição definida como padrão e (c) ser sensível e permitir a detecção de diferenças em escala pontual no tempo e no espaço. A maior dificuldade tem sido encontrar um índice que inclua os atributos físicos do solo e que se relacione com o crescimento e desenvolvimento das plantas (Reinert et al., 2006; Streck et al., 2008).

2.4 REFERÊNCIAS

ABAYE, A. O.; ALLEN, V. G.; FONTENOT, J. P. Grazing sheep and cattle together or separately: effect on soil and plants. **Agronomy Journal**, Madison, v. 89, n. 3, p. 380-386, 1997.

ALBUQUERQUE, J. A.; SANGOI, L.; ENDER M. Efeitos da integração lavoura-pecuária nas propriedades físicas do solo e características da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 3, p. 717-723, 2001.

ANDRADE, R. S. **Efeitos de culturas de cobertura na qualidade física do solo sob plantio direto**. 75 f. Tese (Doutorado em Solo e Água) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos, 2008.

ANDREOLA, F.; COSTA, L. M.; OLSZEWSKI, N. Influência da cobertura vegetal de inverno e da adubação orgânica e, ou, mineral sobre as propriedades físicas de uma Terra Roxa Estruturada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 4, p. 857-865, 2000.

ARAUJO, R.; GOEDERT, W. J.; LACERDA, M. P. C. Qualidade de um solo sob diferentes usos e sob Cerrado Nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 5, p. 1099-1108, 2007.

ARNOLD, P. W. Surface-electrolyte interactions. In: GREENLAND, D. J.; HAYES, M. H. B. (Ed.). **The chemistry of soil constituents**. Chichester: Wiley, 1978. p. 355-404.

ARSHAD, M. A.; LOWERY, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J. W.; JONES, A. J. (Ed.). **Methods for assessing soil quality**. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p. 123-141. (SSSA Special publication, 49).

BARRAL, M. T.; ARIAS, M.; GUÉRIF, J. Effects of iron and organic matter on the porosity and structural stability of soil aggregates. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 46, n. 3/4, p. 261-272, 1998.

BARTOLI, F.; BURTIN, G.; GUÉRIF, J. Influence of organic matter on aggregation in Oxisols rich in gibbsite or in goethite. II. Clay dispersion, aggregate strength and water stability. **Geoderma**, Amsterdam, v. 54, n. 1/4, p. 259-274, 1992.

- BARZEGAR, A. R.; MURRAY, R. S.; CHURCHMAN, G. J.; RENGASAMY, P. The strength of remolded soils as affected by exchangeable cations and dispersible clay. **Australian Journal of Soil Research**, Victoria, v. 32, n. 2, p. 185-199, 1994.
- BELL, M. J.; BRIDGE, B. J.; HARCH, G. R.; ORANGE, D. N. Physical rehabilitation of degraded krasnozems using ley pastures. **Australian Journal of Soil Research**, Victoria, v. 35, n. 5, p. 1093-1113, 1997.
- BENDING, G. D.; TURNER, M. K.; RAYNS, F.; MARX, M. C.; WOOD, M. Microbial and biochemical soil quality indicators and their potential for differentiating areas under contrasting agricultural management regimes. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 36, n. 11, p. 1785-1792, 2004.
- BERTOL, I.; GOMES, K. E.; DENARDIN, R. B. N.; MACHADO, L. A. Z.; MARASCHIN, G. E. Propriedades físicas do solo relacionadas a diferentes níveis de oferta de forragem numa pastagem natural. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 33, n. 8, p. 779-786, 1998.
- BETTERIDGE, K.; MACKAY, A. D.; SHEPHERD, T. G.; BARKER, D. J.; BUDDING, P. J.; DEVANTIER, B. P.; COSTALL, D. A. Effect of cattle and sheep treading on surface configuration of a sedimentary hill soil. **Australian Journal of Soil Research**, Victoria, v. 37, n. 4, p. 743-760, 1999.
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SOUZA, Z. M.; ANDRIOLI, I.; ROQUE, C. G. Retenção de água em dois tipos de Latossolos sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 3, p. 829-834, 2002.
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Resistência à penetração em Latossolos: valor limitante à produtividade de arroz de sequeiro. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 6, p. 1793-1800, 2004.
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; ROQUE, C. G.; FERRAZ, M. V. Densidade relativa ótima de Latossolos Vermelhos para a produtividade de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 6, p. 843-849, 2005.
- BLACK, H. I. J.; PAREKHA, N. R.; CHAPLOWA, J. S.; MONSON, F.; WATKINS, J.; CREAMERA, R.; POTTERA, E. D.; POSKITTA, J. M.; ROWLANDA, P.; AINSWORTH, G.; HORNUNGA, M. Assessing soil biodiversity across Great Britain: national trends in the occurrence of heterotrophic bacteria and invertebrates in soil. **Journal of Environmental Management**, Amsterdam, v. 67, n. 3, p. 255-266, 2003.
- BLUNDEN, B. G.; MCBRIDE, R. A.; DANIEL, H.; BLACKWELL, P. S. Compaction of an earthy sand by rubber tracked and tyred vehicles. **Australian Journal of Soil Research**, Victoria, v. 32, n. 5, p. 1095-1108, 1994.
- BORGES, E. N.; NOVAIS, R. F.; REGAZZI, A. J.; FERNANDES, B.; BARROS, N. F. Respostas de variedades de soja à compactação de camadas de solo. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 35, n. 202, p. 553-568, 1988.

BOUWMAN, L. A.; ARTS, W. B. M. Effects of soil compaction on the relationships between nematodes, grass production and soil physical properties. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 14, n. 3, p. 213-222, 2000.

BRAIDA, J. A. **Matéria orgânica e resíduos vegetais na superfície do solo e suas relações com o comportamento mecânico do solo sob plantio direto**. 107 f. Tese (Doutorado em Ciência do solo) - Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

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

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

CARTER, M. R.; GREGORICH, E. G.; ANDERSON, D. W.; DORAN, J. W.; JANZEN, H. H.; PIERCE, F. J. Concepts of soil quality and their significance. In: GREGORICH, E. G.; CARTER, M. R. (Ed.). **Soil quality for crop production and ecosystem health**. Amsterdam: Elsevier Science, 1997. p. 1-19.

CASSOL, L. C. **Relação solo-planta-animal num sistema de integração lavoura-pecuária em semeadura direta com calcário na superfície**. 157 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A. L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo Roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 3, p. 527-538, 1998.

CAUSARANO, H. Factors affecting the tensile strength of soil aggregates. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 28, n. 1, p. 15-25, 1993.

CECILLON, L.; BARTHES, B. G.; GOMEZ, C.; ERTLEN, D.; GENOT, V.; HEDDE, M.; STEVENS, A.; BRUN, J. J. Assessment and monitoring of soil quality using near infrared reflectance spectroscopy (NIRS). **European Journal of Soil Science**, Iowa, v. 60, n. 5, p. 770-784, 2009.

CORRÊA, J. C. Efeito de sistemas de cultivo na estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho-Amarelo em Querência, MT. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 2, p. 203-209, 2002.

CORSINI, P. C.; FERRAUDO, A. S. Efeitos de sistemas de cultivo na densidade e macroporosidade do solo e no desenvolvimento radicular do milho em Latossolo Roxo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 2, p. 289-298, 1999.

- CURLL, M. L.; WILKINS, R. J. The comparative effects of defoliation, treading and excreta on a *Lolium perenne*-*Trifolium repens* pasture grazed by sheep. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 100, n. 2, p. 451-460, 1983.
- DA ROS, C. O.; SECCO, D.; FIORIN, J. E.; PETRERE, C.; CADORE, M. A.; PASA, L. Manejo do solo a partir de campo nativo: efeito sobre a forma e estabilidade da estrutura ao final de cinco anos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 21, n. 2, p. 241-247, 1997.
- DAVIES, A.; ADAMS, W. A.; WILMAN, D. Soil compaction in permanent pasture and its amelioration by slitting. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 113, n. 2, p. 189-197, 1989.
- DESPHANDE, T. L.; GREENLAND, D. J.; QUIRK, J. P. Changes in soil properties associated with the removal of iron and aluminum oxides. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 19, n. 1, p. 108-122, 1968.
- DEXTER, A. R. Strength of soil aggregates and of aggregate beds. **Catena**, Jerusalém, supplement 11, p. 35-52, 1988a.
- DEXTER, A. R. Advances in characterization of soil structure. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 11, n. 1, p. 199-238, 1988b.
- DEXTER, A. R.; BIRD, N. R. A. Methods for predicting the optimum and the range of soil water contents for tillage based on the water retention curve. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 57, n. 4, p. 203-212, 2001.
- DEXTER, A. R. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, n. 3/4, p. 201-214, 2004a.
- DEXTER, A. R. Soil physical quality: Part II. Friability, tillage, tith and hardsetting. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, n. 3/4, p. 215-225, 2004b.
- DEXTER, A. R. Soil physical quality: Part III. Unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S-theory. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, n. 3/4, p. 227-239, 2004c.
- DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J. W.; COEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. (Ed.). **Defining soil quality for sustainable environment**. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p. 3-21. (SSSA Special Publication, 35).
- EAVIS, B. W. Soil physical conditions affecting seedling root growth: I. Mechanical impedance, aeration and moisture availability as influenced by bulk density and moisture level in a sandy loam soil. **Plant & Soil**, The Hague, v. 36, n. 1/3, p. 613-622, 1972.
- FIGUEIREDO, C. C.; SANTOS, G. G.; PEREIRA, S.; NASCIMENTO, J. L.; ALVES JÚNIOR, J. Propriedades físico-hídricas em Latossolo do Cerrado sob diferentes sistemas

de manejo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 2, p. 146-151, 2009.

FLORES, J. P. C. **Atributos de solo e rendimento de soja em um sistema de integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo em plantio direto com aplicação de calcário na superfície**. 95 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

FLOWERS, M. D.; LAL, R. Axle load and tillage effects on soil physical properties and soybean grain yield on a mollic ochraqualf in northwest Ohio. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 48, n. 1/2, p. 21-35, 1998.

FRANCIS, G. S.; TABLEY, F. J.; WHITE, K. M. Restorative crops for the amelioration of degraded soil conditions in New Zealand. **Australian Journal of Soil Research**, Victoria, v. 37, n. 6, p. 1017-1034, 1999.

FRANZLUEBBERS, A. J. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 66, n. 2, p. 95-106, 2002.

GIL-SOTRES, F.; TRASAR-CEPEDA, C.; LEIROS, M. C.; SEOANE, S. Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 37, n. 5, p. 877-887, 2005.

GREENWOOD, K. L.; MACLEOD, D. A.; HUTCHINSON, K. J. Long-term stocking rate effects on soil physical properties. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, Collingwood, v. 37, n. 4, p. 413-419, 1997.

GUÉRIF, J. Factors influencing compaction-induced increases in soil strength. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 16, n. 1/2, p. 167-178, 1990.

GUPTA, S. C.; LARSON, W. E. Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent, and bulk density. **Water Research**, Washington, v. 15, n. 6, p. 1633-1635, 1979.

HAKANSSON, I.; VOORHEES, W. B. Soil compaction. In: LAL, R.; BLUM, W. H.; VALENTINE, C.; STEWARD, B. A. (Ed.). **Methods for assessment of soil degradation**. Boca Raton: CRS Press, 1998. p. 167-179. (Advances in Soil Science).

HARRIS, R. F.; KARLEN, D. L.; MULLA, D. J. A conceptual framework for assessment and management of soil quality and health. In: DORAN, J. W.; JONES, A. J. (Ed.). **Methods for assessing soil quality**. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p. 61-82. (SSSA Special Publication, 49).

HARRISON, D. F.; CAMERON, K. C.; McLAREN, R. G. Effects of subsoil loosening on soil physical properties, plant root growth, and pasture yield. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, Wellington, v. 37, n. 3, p. 559-567, 1994.

HART, P. B. S.; AUGUST, J. A.; ROSS, C. W. Some biochemical and physical properties of Tokomaru silt loam under pasture and after 10 years of cereal cropping. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, Wellington, v. 31, n. 1, p. 77-86, 1988.

HELALIA, A. M.; LETEY, J.; GRAHAM, R. C. Crust formation and clay migration effects on infiltration rate. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 52, n. 1, p. 251-255, 1988.

HILLEL, D. **Fundamentals of soil physics**. New York: Academic Press, 1980. 413 p.

HUERTA, E.; KAMPICHLER, C.; GEISSEN, V.; OCHOA-GAONA, S.; JONG, B.; HERNÁNDEZ-DAUMÁS, S. Towards an ecological index for tropical soil quality based on soil macrofauna. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, n. 8, p. 1056-1062, 2009.

IGWE, C. A.; AKAMIGBO, F. O. R.; MBAGWU, J. S. C. Chemical and mineralogical properties of soils in southeastern Nigeria in relation to aggregate stability. **Geoderma**, Amsterdam, v. 92, n. 1/2, p. 111-123, 1999.

IMHOFF, S. D. C.; SILVA, A. P.; TORMENA, C. A. Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 7, p. 1493-1500, 2000.

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

ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 79, n. 1, p. 9-16, 2000.

KARLEN, D. L.; MAUSBACH, M. J.; DORAN, J. W.; CLINE, R. G.; HARRIS, R. F.; CHUMAN, G. E. Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 61, n. 1, p. 4-10, 1997.

KAY, B. D.; ANGERS, D. A. Soil structure. In: SUMNER, M. E. (Ed.). **Handbook of soil science**. Boca Raton: CRC Press, 1999. p. 229-276.

KAY, B. D.; DEXTER, A. R. The influence of dispersible clay and wetting/drying cycles on the tensile strength of a Red-Brown Earth. **Australian Journal of Soil Research**, Victoria, v. 30, n. 3, p. 297-310, 1992.

KEMPER, W. D.; ROSENAU, R. C.; DEXTER, A. R. Cohesion development in disrupted soils as affected by clay and organic matter content and temperature. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 51, n. 4, p. 860-867, 1987.

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

- KLEMENS, E.; STIERHOF, T.; DAUBER, J.; KREIMES, K.; WOLTERS, V. On the quality of soil biodiversity indicators: abiotic and biotic parameters as predictors of soil faunal richness at different spatial scales. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 98, n. 1/3, p. 273-283, 2003.
- KLUTHCOUSKI, J.; STONE, L. F.; AIDAR, H. **Integração lavoura-pecuária**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2003. 570 p.
- KLUTHCOUSKI, J.; STONE, L. F.; AIDAR, H.; COBUCCI, T. **Integração lavoura-pecuária e o manejo de plantas daninhas**. Piracicaba: Potafós, 2004. 20 p. (Encarte Técnico. Informações Agronômicas, 106).
- KRZIC, M.; NEWMAN, R. F.; BROERSMA, K.; BOMKE, A. A. Soil compaction of forest plantations in interior British Columbia. **Journal of Range Management**, Lakewood, v. 52, n. 6, p. 671-677, 1999.
- LANGLANDS, J. P.; BENNETT, I. L. Stocking intensity and pastoral production. I. Changes in the soil and vegetation of a sown pasture grazed by sheep at different stocking rates. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 81, n. 2, p. 193-204, 1973.
- 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**, Viçosa, v. 31, n. 5, p. 1131-1140, 2007.
- LEÃO, T. P. **Intervalo hídrico ótimo em diferentes sistemas de pastejo e manejo da pastagem**. 58 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 2002.
- LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Advances in Soil Science**, New York, v. 1, n. 1, p. 277-294, 1985.
- LEY, G. J.; MULLINS, C. E.; LAL, R. Effects of soil properties on the strength of weakly structures tropical soils. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 28, n. 1, p. 1-13, 1993.
- LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. 2. ed. Piracicaba: ESALQ, Departamento de Ciências Exatas, 2000. 509 p.
- LULL, H. W. **Soil compaction on forest and range lands**. Washington: Forest Service, United States Department of Agriculture, 1959. 33 p. (Miscellaneous Publication, 768).
- MACEDO M. C. M.; ZIMMER, A. H. Implantação de pastagem de *Brachiaria brizantha* cv. Marandu em plantio simultâneo com milho em sucessão à soja em Mato Grosso do Sul. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, 27., 1990, Campinas. **Anais...** Campinas: Sociedade Brasileira de Zootecnia, 1990. p. 290.
- MACEDO, M. C. M. Integração lavoura e pecuária: alternativa para sustentabilidade da produção animal. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DA PASTAGEM -

PLANEJAMENTO DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO EM PASTAGENS, 18., 2001, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: FEALQ, 2001. p. 257-283.

MACEDO, M. C. M. Integração lavoura e pecuária: o estado da arte e inovações tecnológicas. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 38, suplemento especial, p. 133-146, 2009.

MACHADO, J. L.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; SCAPIM, C. A. Inter-relações entre as propriedades físicas e os coeficientes da curva de retenção de água de um Latossolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 2, p. 495-502, 2008.

MAPFUMO, E.; CHANASYK, D. S.; NAETH, M. A.; BARON, V. S. Forage growth and yield components as influenced by subsurface compaction. **Agronomy Journal**, Madison, v. 90, n. 6, p. 805-812, 1998.

MAPFUMO, E.; CHANASYK, D. S.; BARON, V. S.; NAETH, M. A. Grazing impacts on selected soil parameters under short-term forage sequences. **Journal of Range Management**, Lakewood, v. 53, n. 5, p. 466-470, 2000.

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

MEAD, J. A.; CHAN, K. Y. Cultivation techniques and grazing affect surface structure of an Australian hardsetting soil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 25, n. 2/3, p. 217-230, 1992.

MELLONI, R.; MELLONI, E. G. P.; ALVARENGA, M. I. N. Indicadores da qualidade do solo. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 29, n. 244, p. 17-29, 2008.

MIELNICZUK, J.; CARPENEDO, V.; PEDO, F. Desenvolvimento de raízes em solos compactados. **Lavoura Arrozeira**, Porto Alegre, v. 38, n. 357, p. 42-43, 1985.

MITCHELL, J. K. **Fundamentals of soil behavior**. New York: John Wiley, 1976. 422 p.

MORAES, A.; LESAMA, M. F.; ALVES, S. J. Lavoura-pecuária em sistemas integrados na pequena propriedade. In: ENCONTRO LATINO AMERICANO SOBRE PLANTIO DIRETO NA PEQUENA PROPRIEDADE, 3., 1998, Pato Branco. **Anais...** Pato Branco: CEFET-PR, 1998. 1 CD-ROM.

MUGGLER, C. C.; PAPE, T. H.; BUURMAN, P. Laser grain-size determination in soil genetic studies 2. Clay content, clay formation, and aggregation in some Brazilian Oxisols. **Soil Science**, Baltimore, v. 162, n. 3, p. 219-228, 1997.

- MUGGLER, C. C.; VAN GRIETHUYSEN, C.; BUURMAN, P.; PAPE, T. H. Aggregation, organic matter, and iron oxide morphology in Oxisols from Minas Gerais, Brazil. **Soil Science**, Baltimore, v. 164, n. 10, p. 759-770, 1999.
- MUMMEY, D.; STAHL, P. D.; BUYER, J. S. Soil microbiological properties 20 years after surface mine reclamation: spatial analysis of reclaimed and undisturbed sites. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 34, n. 11, p. 1717-1725, 2002.
- NIE, Z. N.; WARD, G. N.; MICHAEL, A. T. Impact of pugging by dairy cows on pastures and indicators of pugging damage to pasture soil in south-western Victoria. **Australian Journal of Agricultural Research**, Melbourne, v. 52, n. 1, p. 37-43, 2001.
- NOBLE, J. C.; TONGWAY, D. J. Herbivores in arid and semi-arid rangelands. In: RUSSELL, J. S.; ISBELL, R. F. (Ed.). **Australian Soils: the human impact**. St Lucia: University of Queensland Press, 1986. p. 243-270.
- OLIVEIRA, G. C.; DIAS JUNIOR, M. S.; CURTI, N.; RESCK, D. V. S. Compressibilidade de um Latossolo Vermelho argiloso de acordo com a tensão de água no solo, uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 5, p. 773-781, 2003.
- PHENE, C. J.; BEALE, W. High-frequency irrigation for water nutrient management in humid regions. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 40, n. 3, p. 430-436, 1976.
- PERFECT, E.; KAY, B. D.; SILVA A. P. Influence of soil properties on the statistical characterization of dry aggregate strength. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 59, n. 2, p. 532-537, 1995.
- PINHEIRO-DICK, D.; SCHWERTMANN, U. Microaggregates from Oxisols and Inceptisols: dispersion through selective dissolutions and physicochemical treatments. **Geoderma**, Amsterdam, v. 74, n. 1/2, p. 49-63, 1996.
- PROFFITT, A. P. B.; BENDOTTI, S.; HOWELL, M. R.; EASTHAM, J. The effect of sheep trampling and grazing on soil physical properties and pasture growth for a red-brown earth. **Australian Journal of Agricultural Research**, Victoria, v. 44, n. 2, p. 317-331, 1993.
- RAGHAVAN, G. S. V.; MCKYES, E.; AMIR, I.; CHASSE, M.; BROUGHTON, N. S. Prediction of compaction due to off-road vehicle traffic. **Transactions American Society of Agricultural Engineers**, New York, v. 19, n. 4, p. 610-613, 1976.
- RAHIMI, H.; PAZIRA, E.; TAJIK, F. Effect of soil organic matter, electrical conductivity and sodium adsorption ratio on tensile strength of aggregates. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 54, n. 3/4, p. 145-153, 2000.
- RAWLS, W. J.; GISH, T. J.; BRAKENSIEK, D. L. Estimating soil water retention from soil physical properties and characteristics. **Advances in Soil Science**, New York, v. 16, p. 213-234, 1991.

REICHERT, J. M.; REINERT, J. M.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência & Ambiente**, Santa Maria, v. 27, n. 1, p. 29-48, 2003.

REINERT, D. J.; REICHERT, D. J.; VEIGA, M.; SUZUKI, L. E. A. S. Qualidade física dos solos. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 16., Aracaju, 2006. **Resumos...** Aracaju: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. 1 CD-ROM.

REYNOLDS, W. D.; BOWMAN, B. T.; DRURY, C. F.; TAN, C. S.; LU, X. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. **Geoderma**, Amsterdam, v. 110, n. 1/2, p. 131-146, 2002.

REYNOLDS, W. D.; DRURY, C. F.; TAN, C. S.; FOX, C. A.; YANG, X. M. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. **Geoderma**, Amsterdam, v. 152, n. 3/4, p. 252-263, 2009.

RICHARD, G.; BOIZARD, H.; ROGER-ESTRADE, J.; BOIFFIN, J.; GUÉRIF, J. Field study of soil compaction due to traffic in northern France: pore space and morphological analysis of the compacted zones. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 51, n. 1/2, p. 151-160, 1999.

RICHARD, G.; COUSIN, I.; SILLON, J. F.; BRUAND, A.; GUÉRIF, J. Effect of compaction on the porosity of a silty soil: influence on unsaturated hydraulic properties. **European Journal of Soil Science**, Iowa, v. 52, n. 1, p. 49-58, 2001.

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

ROSOLEM, C. A.; FERNANDEZ, E. M.; ANDREOTTI, M.; CRUSCIOL, C. A. C. Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 5, p. 821-828, 1999.

RUF, A.; BECK, L.; DREHER, P.; HUND-RINKE, K.; RÖMBKE, J.; SPELDA, J. A biological classification concept for the assessment of soil quality: "biological soil classification scheme" (BBSK). **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 98, n. 1/3, p. 263-271, 2003.

SALTON, J. C.; FABRICIO, A. C.; MACHADO, L. A. Z.; OLIVEIRA, H. Pastoreio da aveia e compactação do solo. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v. 69, p. 32-34, 2002.

SÁNCHEZ, P. A.; PALMA, C. A.; BUOL, S. W. Fertility capability soil classification: a tool to help assess soil quality in the tropics. **Geoderma**, Amsterdam, v. 114, n. 3/4, p. 157-185, 2003.

SANTANA, D. P.; BAHIA FILHO, A. C. Qualidade do solo: uma visão holística. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 15-18, 2002. (Boletim Informativo).

SCHOENHOLTZ, S. H.; VAN MIEGROET, H.; BURGER, J. A. A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. **Forest Ecology & Management**, Wageningen, v. 138, 1/3, p. 335-356, 2000.

SCOTT, D. H. Soil water principles. In: **Soil physics: agricultural and environmental applications**. Ames: Iowa State University Press, 2000. p. 165-212.

SECCO, D.; DA ROS, C. O.; SECCO, J. K.; FIORIN, J. E. Atributos físicos e produtividade de culturas em um Latossolo Vermelho argiloso sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 407-414, 2005.

SEPP, K.; IVASK, M.; KAASIK, A.; MIKK, M.; PEEPSON, A. Soil biota indicators for monitoring the Estonian agri-environmental programme. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 108, n. 3, p. 264-273, 2005.

SILVA, A. J. N.; CABEDA, M. S. V.; LIMA, F. W. F. Efeito de sistemas de uso e manejo nas propriedades físico-hídricas de um Argissolo Amarelo de tabuleiro costeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 6, p. 833-842, 2005.

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

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

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Densidade do solo, atributos químicos e sistema radicular do milho afetados pelo pastejo e manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 1, p. 191-199, 2000a.

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

SKOPP, J.; JAWSON, M. D.; DORAN, J. W. Steady-state aerobic microbial activity as a function of soil water content. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 54, n. 6, p. 1619-1625, 1990.

SOANE, B. D.; van OUWERKERK, C. Soil compaction problems in world agriculture. In: SOANE, B. D.; van OUWERKERK, C. (Ed.). **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. p. 1-21.

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

- SPERA, S. T.; SANTOS, H. P.; FONTANELI, R. S.; TOMM, G. O. Integração lavoura e pecuária e os atributos físicos de solo manejado sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 1, p. 129-136, 2009.
- STENBERG, B. Monitoring soil quality of arable land: microbiological indicators. **Soil & Plant Science**, Newark, v. 49, n. 1, p. 1-24, 1999.
- STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M.; ZIMMERMANN, F. J. P. Características físico-hídricas e químicas de um Latossolo após adubação e cultivos sucessivos de arroz e feijão, sob irrigação por aspersão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 18, n. 3, p. 533-539, 1994.
- STONE, L. F.; GUIMARÃES, C. M.; MOREIRA, J. A. A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro. I: Efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 2, p. 207-212, 2002.
- STONE, L. F.; GUIMARÃES, C. M. **Influência de sistemas de rotação de culturas nos atributos físicos do solo**. Santo Antonio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão. 2005. 15 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 16).
- STRECK, C. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; HORN, R. Relações do parâmetro s para algumas propriedades físicas de solos do Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, número especial, p. 2603-2612, 2008.
- TAYLOR, H. M.; BRAR, G. S. Effect of soil compaction on root development. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 19, n. 2/3, p. 111-119, 1991.
- TISDALL, J. M.; OADES, J. M. The effect of crop rotation on aggregation in a red-brown earth. **Australian Journal of Soil Research**, Victoria, v. 18, n. 4, p. 423-433, 1980.
- TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 33, n. 2, p. 141-163, 1982.
- TOPP, G. C., GALGANOV, Y. T.; WIRES, K. C.; CULLEY, J. L. B. Nonlimiting water range (NLWR): an approach for assessing soil structure. In: **Soil quality evaluation program**. Canada, Ottawa: Centre for Land and Biological Resources Research, Agriculture and Agri-Food, 1994. 96 p. (Technical Report, 2).
- TOPP, G. C.; REYNOLDS, W. D.; COOK, F. J.; KIRBY, J. M.; CARTER, M. R. Physical attributes of soil quality. In: GREGORICH, E. G.; CARTER, M. R. (Ed.). **Soil quality for crop production and ecosystem health**. Amsterdam: Elsevier Science, 1997. p. 21-58.
- TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 4, p. 573-581, 1998.
- TÓTOLA, M. R.; CHAER, G. M. Microrganismos e processos microbiológicos como indicadores da qualidade dos solos. In: ALVAREZ V, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R.;

BARROS, N. F.; MELLO, J. W. V.; COSTA, L. M. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 2, 2002. p. 196-276.

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

UNGER, W. P.; KASPAR, T. C. Compaction and root growth: a review. **Agronomy Journal**, Madison, v. 86, n. 5, p. 759-766, 1994.

UTOMO, W. H.; DEXTER, A. R. Soil friability. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 32, n. 3, p. 203-213, 1981.

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

VELASQUEZ, H.; LAVELLE, P.; BARRIOS, E.; JOFFRE, R.; REVERSAT, F. Evaluating soil quality in tropical agroecosystems of Colombia using NIRS. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 37, n. 5, p. 889-898, 2005.

VELÁSQUEZ, E.; LAVELLE, P.; AMÉZQUITA, E.; BARRIOS, E.; ANDRADE, M. GISQ, a multifunctional indicator of soil quality. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 39, n. 12, p. 3066-3080, 2007.

WILLATT, S. T.; PULLAR, D. M. Changes in soil physical properties under grazed pastures. **Australian Journal of Soil Research**, Victoria, v. 22, n. 4, p. 343-348, 1983.

WILLIAMS, M. J.; KALMBACHER, R. S. Renovation effects on bahiagrass productivity. **Agronomy Journal**, Madison, v. 88, n. 2, p. 191-198, 1996.

WILSON, S. M. C. G.; PYATT, D. G.; MALCOLM, D. C.; CONNOLLY, T. The use of ground vegetation and humus type as indicators of soil nutrient regime for an ecological site classification of British forests. **Forest Ecology & Management**, Wageningen, v. 140, n. 2/3, p. 101-116, 2001.

3 THE SOIL WATER RETENTION CURVE AS A SOIL PHYSICAL QUALITY INDICATOR: CONTRIBUTION TO THE S-THEORY¹

ABSTRACT

The deterioration of the soil-physical properties upon agricultural practices can have serious consequences for the overall soil quality and land use sustainability. This issue has motivated the proposition of various soil indicators as tools for appraising soil-physical quality. Among them, the *S*-index, derived from the slope of the soil-water retention curve at its inflexion point, has been largely used. However, the derived *S*-index mathematical equation shows some misunderstanding that need to be clarified. In this paper, we develop correct equations to compute the slope of the soil-water retention curve based on fitted van Genuchten model, considering the absolute value of the soil-water-potential represented as either arithmetic, natural or decimal logarithm scales. The *S*-index values calculated with the expressions developed in this paper and the ones proposed by Dexter are different but close. This means that the results recorded by applying the original *S*-theory probably did not lead to appreciable misinterpretations. However, for future applications of Dexter's *S*-theory, we advise to use the new equations developed in this paper to compute the *S*-index because they are mathematically consistent.

Key words: compaction, slope of soil-water retention curve, bulk density, soil *S*-index, inflection point.

RESUMO

CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA COMO INDICADORA DA QUALIDADE FÍSICA DO SOLO: UMA CONTRIBUIÇÃO A TEORIA *S*

A deterioração das propriedades físicas do solo devido às práticas agrícolas pode ter consequências graves para a qualidade e sustentabilidade de uso dos solos. Esta questão tem motivado a proposta de vários indicadores de solo como ferramentas para avaliar a qualidade física do solo. Entre eles, o índice-*S*, derivado de inclinação da curva de retenção de água do solo em seu ponto de inflexão, tem sido amplamente utilizado. No entanto, a equação matemática derivada do índice-*S* mostra algumas particularidades que precisam ser esclarecidos. Neste documento, desenvolveram-se equações para calcular a inclinação da curva de retenção de água do solo baseadas no modelo de van Genuchten ajustado, tendo como referência o valor absoluto do potencial matricial representado nas escalas logaritma aritmética, natural ou decimal. Os valores do índice-*S* calculado com as expressões desenvolvidas neste documento e as propostas por Dexter são diferentes, mas

¹ Artigo submetido à Revista Geoderma, em 02 de dezembro de 2009.

de pequena magnitude. Isso significa que os resultados registrados pela aplicação original da teoria “S” provavelmente não conduziram a interpretações incorretas. No entanto, para futuras aplicações da teoria “S” de Dexter, aconselha-se a se utilizar as novas equações desenvolvidas neste documento para calcular o índice-S.

Palavras-chave: compactação do solo, curvatura da curva de retenção de água do solo, densidade do solo, índice-S, ponto de inflexão.

3.1 INTRODUCTION

The quality of soil physical properties is one of the main aspects that should be observed and evaluated, notably when one is willing to keep the soil conditions adequate for plant growth. The decline in soil physical properties can have serious consequences for the overall soil quality and the land use sustainability (Reynolds et al., 2002). Recently, several papers have proposed soil physical indicators as a way to appraise soil quality, using a variety of soil physical attributes and several methods of classification (Reynolds et al., 2002; Dexter, 2004a, 2004b, 2004c; Dexter & Czyz, 2007).

The most popular index proposed to evaluate soil physical quality is based on the slope of the soil-water retention curve (SWRC) at its inflexion point (Dexter & Bird, 2001; Dexter, 2004a). The inflection point has been considered as the “breakthrough” matric potential at which air first penetrates throughout the whole soil (White et al., 1972; Dullien, 1992). This approach guided Dexter & Bird (2001) to conclude that the optimum water content for tillage would be related to SWRC and could be predicted from its shape. Later on, Dexter (2004a) developed an S-index theory to evaluate soil physical quality based on the slope of the SWRC, evaluated at its inflexion point, when the natural or decimal logarithm of soil-water suction, h , is plotted as a function of the gravimetric water content, θ .

The basic mathematical equations derived by Dexter & Bird (2001) and Dexter (2004a) in developing the S-index fitted SWRC to van Genuchten equation (van Genuchten, 1980) can be calculated as:

$$h_i = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{1}{m} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3.1)$$

with h_i , the inflexion point value of the modulus of the matric soil-water potential (h), corresponding to $\exp(h)$ for $\ln(h)$ being the natural logarithm of h as done in Dexter & Bird (2001) & Dexter (2004a); α , m , and n taken as the fitted parameters from

the original van Genuchten equation in h - θ formulation. Furthermore, Dexter & Bird (2001) demonstrated that the value of θ at inflexion point (θ_i) can be found as:

$$\theta_i = (\theta_s - \theta_r) \left[1 + \frac{1}{m} \right]^{-m} + \theta_r \quad (3.2)$$

with θ_s and θ_r , being, respectively, saturated and residual gravimetric water contents. Then Dexter (2004a) used this derived slope expression to calculate the slope (S) of the SWRC at the inflexion point, resulting in the following expression which has been largely used thereafter:

$$S = -n(\theta_s - \theta_r) \left[1 + \frac{1}{m} \right]^{-(1+m)} \quad (3.3)$$

The preceding developments (Eqs. 3.1, 3.2, and 3.3) summarize the basis of the S -theory (Dexter, 2004a).

Parallel to these developments, experimental field studies were conducted to verify the possible relations between S -index and soil texture, bulk density, organic matter, and root growth (Dexter, 2004a). These studies were followed by many other applications (Dexter, 2004c; Dexter et al., 2005; Dexter & Czyz, 2007; Dexter et al., 2007; Tormena et al., 2008; Han et al., 2008; Dexter & Richard, 2009).

However, in spite of this large adoption, the proposed mathematical formulation (Eq. 3.3) used to calculate S -index (Dexter & Bird, 2001; Dexter, 2004a) shows some misunderstanding that need to be clarified. In deriving S -index from θ - $\ln h$ relation as proposed by Dexter (2004a), it was implicitly assumed that the scaling and power fitting parameters (i.e. α, n, m) of van Genuchten θ - h relation would remain unchanged after shifting the h -variable from arithmetic to logarithm scale (ln or log). This assumption is not true due to the nonlinear nature of van Genuchten model. In this paper, we develop new equations to calculate the correct slope at the inflection point of the SWRC fitted to van Genuchten model, considering the independent variable h represented in the following alternative scales of h : arithmetic, natural logarithm, and decimal logarithm. The new S -index equations are applied to non-compacted and compacted soil to compare their results with the others proposed by Dexter (2004a).

3.2 MATERIAL AND METHODS

3.2.1 Characterization and localization of experimental area

In order to exemplify the application of the proposed S -theory, a typical soil profile was selected from a cultivated area that has been identified to have a compacted surface soil layer caused by land use. The soil profile is located (latitude 16°29'37" S, longitude 49°18'38" W, and altitude 776 m) in a private farm property, nearby *Embrapa Rice and Beans* Agricultural Research Center, at Santo Antônio de Goiás, GO, Brazil. The soil is a clayey Oxisol (Typic Acrustox) (Soil Survey Staff, 1998), *Latossolo Vermelho Distroférico típico* according to the Brazilian Soil Classification (Santos et al., 2006) or Kaolinitic Ferralsol (IUSS WORKING GROUP WRB, 2006). The native vegetation was a typical *Cerrado* until 1985. After the vegetation was removed, the area was cultivated with annual crops under conventional tillage during the first two years and, thereafter, with pasture formed by *Brachiaria decumbens* cv. Basilisk stapf. The area was managed under intensive animal grazing and without any fertilizer addition. This management led to pasture-soil degradation condition of the top soil. In 2006, soil cores were collected using stainless steel 100 cm³ cylinders (diameter = 5.1 cm, height = 5.0 cm) from the top surface and subsurface layers for determining soil-water retention curve.

3.2.2 Theory

3.2.2.1 Expression of θ according to different scales

Let's consider van Genuchten model (van Genuchten, 1980) given as follows:

$$\theta = (\theta_s - \hat{\theta}_r) \left[1 + (\hat{\alpha}T)^{\hat{n}} \right]^{-\hat{m}} + \hat{\theta}_r \quad (3.4)$$

with θ , gravimetric soil-water content (g g⁻¹); θ_s , measured gravimetric saturated soil-water content (g g⁻¹); $\hat{\theta}_r$, fitted gravimetric soil-water content (g g⁻¹); $\hat{\alpha}$, fitted scaling parameter (kPa⁻¹); \hat{n} and $\hat{m} = 1 - 1/\hat{n}$ (Mualem, 1976), fitted shape parameters; and T , a dummy variable to be used alternatively to represent the modulus of the soil-water matric potential, in which $T = h$ -variable in Dexter (2004a), given in the following scales: T (hPa), $\ln T$ (ln hPa), or $\log T$ (log hPa). When decimal logarithm scale is used, then $\log T = pF$, as proposed by Schofield (1935).

In order to facilitate our presentation and discussion, one can admit that van Genuchten model (Eq. 3.4) can be represented in a general way as follows:

$$\theta = g \left(T \mid \theta_s, \hat{\theta}_r, \hat{n}, \hat{\alpha}, \hat{m} \right) \quad (3.5)$$

with g , meaning the relationship (θ vs T), given that the parameters θ_s (g g^{-1}), $\hat{\theta}_r$ (g g^{-1}), \hat{n} (dimensionless), $\hat{\alpha}$ (hPa^{-1}), and \hat{m} (dimensionless) be known. The “hat” sign on the top of the letter is used to identify a fitted parameter value. Recall that the parameter \hat{m} can also be fitted, however in this study it was constraint to $1-1/n$.

Similarly, the relation (θ vs $\ln T$), represented by f , using van Genuchten model (Eq. 3.4), with T being replaced by $\ln T$, can be expressed as follows:

$$\theta = f \left(\ln T \mid \theta_s, \hat{\theta}_{r1}, \hat{n}_1, \hat{\alpha}_1, \hat{m}_1 \right) \quad (3.6)$$

The corresponding new fitted parameters are: $\hat{\theta}_{r1}$ (g g^{-1}), \hat{n}_1 (dimensionless), $\hat{\alpha}_1$ (hPa^{-1}), and \hat{m}_1 (dimensionless). These parameters have the same meaning as in Eq. (3.5), but with values not necessarily the same, except θ_s which, in this case, is measured. It should be emphasized that after replacing T by $\ln T$, the parameters in Eq. (3.6) have to be refitted and, thus, new values obtained. As a consequence, the relationship between $\ln T$ and T is not unique, that is, T cannot be obtained from $\ln T$ because the parameters ($\hat{\theta}_{r1}, \hat{n}_1, \hat{\alpha}_1, \hat{m}_1$) are valid only for the independent variable $\ln T$.

Furthermore, by replacing T by $\log T$ in Eq. 3.4, the resulting relation, k , can be represented as follows:

$$\theta = k \left(\log T \mid \theta_s, \hat{\theta}_{r1}, \hat{n}_1, \hat{\alpha}_2, \hat{m}_1 \right) \quad (3.7)$$

In this case, the only new fitted parameter is $\hat{\alpha}_2$, that is, changing the scale from $\ln T$ to $\log T$, the values of the other fitting parameters do not change. It can be easily shown that $\hat{\alpha}_2 = \hat{\alpha}_1 \ln 10$ which reflects directly the transformation in scale from natural to decimal logarithm, that is, $\log T = (\ln T) (\ln 10)^{-1}$.

3.2.2.2 Derivation of van Genuchten model to obtain the inflection point

Taking Eqs. (3.5), (3.6), and (3.7) as general representations of van Genuchten model (Eq. 3.4), we can write the following derivatives:

$$\dot{g} = \frac{d\theta}{dT} = -\hat{m}\hat{n}(\hat{\alpha}^{\hat{n}})(\theta_s - \hat{\theta}_r) \left\{ \left[1 + (\hat{\alpha}T)^{\hat{n}} \right]^{\hat{m}-1} \right\} T^{\hat{n}-1} \quad (3.8)$$

with \dot{g} , being the first derivative of θ in relation to T ,

$$\dot{f} = \frac{d\theta}{d(\ln T)} = -\hat{m}_1\hat{n}_1(\hat{\alpha}_1^{\hat{n}_1})(\theta_s - \hat{\theta}_{r1}) \left\{ \left[1 + (\hat{\alpha}_1 \ln T)^{\hat{n}_1} \right]^{\hat{m}_1-1} \right\} \ln T^{\hat{n}_1-1} \quad (3.9)$$

with \dot{f} , the first derivative of θ in relation to $\ln T$, and:

$$\dot{k} = \frac{d\theta}{d(\log T)} = -\hat{m}_1\hat{n}_1(\hat{\alpha}_2^{\hat{n}_1})(\theta_s - \hat{\theta}_{r1}) \left\{ \left[1 + (\hat{\alpha}_2 \log T)^{\hat{n}_1} \right]^{\hat{m}_1-1} \right\} \log T^{\hat{n}_1-1} \quad (3.10)$$

with \dot{k} , the first derivative of θ in relation to $\log T$.

It is important to state that the derivative $\dot{f} = d\theta/d(\ln T)$ cannot be accomplished by simply applying the chain-rule from Eq. (3.5) as it was done by Dexter & Bird (2001) and Dexter (2004a) because the parameter values obtained by fitting either g (Eq. 3.5) or f (Eq. 3.6), subjected to Eq. 3.4, are not necessarily the same. This can be also said for functions g (Eq. 3.5) and k (Eq. 3.7), except that here the only difference between \dot{f} and \dot{k} lies in the magnitude of the scaling parameters $\hat{\alpha}_1$ and $\hat{\alpha}_2$.

It is known that any continuous and differentiable mathematical function throughout its real domain has its inflection points located where the second derivative is null. Furthermore, if that function decreases monotonically, as it is the case of van Genuchten model, then there is only one inflexion point. Thus, at the inflection point for function g , we can set:

$$\ddot{g} = \frac{d^2\theta}{dT^2} = -\hat{m}\hat{n}(\hat{\alpha}^{\hat{n}})(\theta_s - \hat{\theta}_r) \left\{ (-\hat{m}\hat{n} - \hat{n})(\hat{\alpha}^{\hat{n}}) \left[1 + (\hat{\alpha}T)^{\hat{n}} \right]^{\hat{m}-2} T^{2\hat{n}-2} + (\hat{n}-1) \right. \\ \left. (T^{\hat{n}-2}) \left[1 + (\hat{\alpha}T)^{\hat{n}} \right]^{\hat{m}-1} \right\} = 0 \quad (3.11)$$

with \ddot{g} , the second derivative of θ in relation to T . After simplifying Eq. (3.11), one obtains:

$$(-\hat{m}\hat{n} - \hat{n})(\hat{\alpha}^{\hat{n}}) \left[1 + (\hat{\alpha}T)^{\hat{n}} \right]^{\hat{m}-2} (T^{2\hat{n}-2}) + (\hat{n}-1)(T^{\hat{n}-2}) \left[1 + (\hat{\alpha}T)^{\hat{n}} \right]^{\hat{m}-1} = 0 \quad (3.12)$$

Eq. 3.12 can be solved for T to get the exact location of its inflection point $(T)_i$ as follows:

$$(T)_i = \frac{1}{\hat{\alpha}} (\hat{m})^{\frac{1}{\hat{n}}} \quad (3.13)$$

Similarly, we can compute the second derivative of Eqs. (3.9) and (3.10) to obtain:

$$(\ln T)_i = \frac{1}{\hat{\alpha}_1} (\hat{m}_1)^{\frac{1}{\hat{n}_1}} \quad (3.14)$$