

# Alterações na qualidade física de um latossolo amarelo sob pastagem

Lorena Chagas TORRES<sup>1</sup>, Katiane Raquel Mendes BARROS<sup>2</sup>, Herdjania Veras de LIMA<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - Universidade de São Paulo. Departamento de Solos e Nutrição Mineral de Plantas. Avenida Pádua Dias, 11-Piracicaba- São Paulo, Brasil.

<sup>2</sup> Universidade Federal Rural da Amazônia. Instituto de Ciências Agrárias. Avenida Presidente Tancredo Neves, 2501-Belém- Pará, Brasil.

\* Autor correspondente: [herdjania.lima@ufra.edu.br](mailto:herdjania.lima@ufra.edu.br)

## RESUMO

Indicadores de qualidade física do solo representam uma importante ferramenta no estudo das alterações que ocorrem no solo em função de ações de uso e manejo. Objetivou-se com este estudo utilizar o intervalo hídrico ótimo (IHO) e o índice-S (declividade da curva de retenção de água no solo no ponto de inflexão) para quantificar as alterações físicas do solo promovidas pelo sistema de pastagem, tendo como referência um solo sob mata. O estudo foi realizado em um Latossolo Amarelo distroférico típico sob mata nativa e pastagem, onde foram coletadas amostras deformadas e indeformadas nas profundidades de 0-5 e 25-30 cm, utilizadas para determinação do carbono orgânico do solo e análises físicas. Os valores de índice-S, com exceção do solo sob mata (0-5 cm), estiveram abaixo do limite sugerido para separar solos com boa e pobre qualidade estrutural. O IHO foi fortemente reduzido no solo sob pastagem, chegando a atingir valor zero. O principal fator limitante para a disponibilidade de água foi a resistência à penetração, que exceto em mata (0-5 cm), atuou como limite inferior do IHO em todas as áreas e profundidades avaliadas. Os indicadores de qualidade física do solo, IHO e índice-S, apresentaram conformidade quanto à avaliação da qualidade física dos solos estudados e indicaram as alterações físicas promovidas no solo sob sistema de pastagem.

**PALAVRAS-CHAVE:** Manejo do solo, compactação do solo, resistência do solo a penetração

## Changes in the physical quality of an Oxisol under grazing system

### ABSTRACT

Indicators of physical quality of soils are important tools in the study of changes that occur in soils brought about by use and management practices. The objective of this study was to use the least limiting water range (LLWR) and S value (the slope of the soil water retention curve at its inflection point) to quantify soil physical changes promoted by grazing system in comparison with soil under forest vegetation. The study was carried out in an Oxisol under native vegetation and grazing. At these sites disturbed and undisturbed samples were collected at depths of 0-5 and 25-30 cm. The samples were used for chemical and physical analyzes. The S-value varied depending on land use. Except under native vegetation (at 0-5 cm depth), the S-index values were below the limit suggested to permit discriminating between soils with good and poor structural quality. The LLWR was strongly reduced under grazing, reaching zero values. The main limiting factor to water availability was soil resistance, which except under natural vegetation (0-5 cm), was the factor that determined the lower threshold for water availability in all areas and studied depths. Regarding the assessment of the physical quality of soils, the indicators of soil physical quality, LLWR and S value, yielded similar results and were able to indicated physical changes that occurred in the soil under the grazing system.

**KEYWORDS:** Soil management, soil compaction, soil resistance

## INTRODUÇÃO

A diminuição da capacidade de infiltração de água, o escoamento superficial, a redução do sistema radicular e a dificuldade de mecanização são considerados indicativos de má qualidade física do solo (Dexter 2004a). Em pastagens, a degradação física do solo pode ocorrer principalmente pela compactação originada pelo pisoteio dos animais, comprometendo mais diretamente as camadas superficiais (Greenwood e McKenzie 2001). Essas modificações dependem da intensidade do pisoteio, da umidade e do tipo de solo. Os efeitos dos sistemas de pastagens na qualidade física do solo foram reportados mais recentemente na literatura por Leão *et al.* (2006), Zhou *et al.* (2010) e Costa *et al.* (2012).

O Intervalo Hídrico Ótimo (IHO), proposto Silva *et al.* (1994) a partir dos conceitos de Letey (1985), tem recebido destaque na avaliação da qualidade física do solo, pois integra em um único parâmetro as variações do conteúdo de água em função da densidade do solo em que ocorrem mínimas limitações ao desenvolvimento de plantas, considerando à porosidade de aeração, resistência à penetração e água disponível. Vários autores atestaram a eficiência do IHO como um indicador da qualidade física dos solos em áreas de pastagens (Leão *et al.* 2006; Olibone *et al.* 2010; Calonego *et al.* 2011).

O índice-S proposto por Dexter (2004a) também é utilizado para avaliar a qualidade física e estrutural do solo, sendo obtido a partir do ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo (CRA), que é determinada pela relação entre o conteúdo de água com base em massa e o logaritmo do potencial mátrico do solo. Portanto, o índice-S é definido como valor da inclinação da CRA em seu ponto de inflexão e reflete diretamente a distribuição dos poros de maior frequência no solo.

A utilização do índice-S torna possível a comparação direta de diferentes tipos de solos e sistemas de uso e manejo na avaliação da qualidade física do solo. Dexter (2004b) sugeriu para a avaliação da qualidade física do solo as seguintes categorias de índice-S, baseado em diferentes tipos de solos:  $S \geq 0,050$  muito bom,  $0,050 > S \geq 0,035$  bom,  $0,035 > S \geq 0,020$  pobre e  $0,020 > S$  muito pobre. É importante ressaltar que estes valores limitantes de índice-S foram desenvolvidos com base em solos de regiões de clima temperado e, portanto, sua aplicação para solos tropicais deve ser cuidadosa, sendo necessária uma quantidade considerável de estudos que corroborem a eficiência destes valores indicadores ou sugiram novos limites mais adequados para solos desenvolvidos sob clima tropical. Andrade e Stone (2009) verificaram a adequação do índice-S no diagnóstico da qualidade física de solos de Cerrado de diferentes classes texturais e observaram que o valor limite de 0,045 para o índice-S mostrou-se adequado entre solos com boa qualidade estrutural e com

grau de degradação, enquanto que solos com  $S \leq 0,025$  indicam solos inteiramente degradados fisicamente.

Solos com pobre qualidade física apresentam baixa infiltração de água, escoamento superficial, baixa aeração, resistência ao crescimento de raízes e dificuldade de mecanização. Enquanto que, boa qualidade física é atribuída a solos com características opostas as citadas acima (Dexter 2004 a). Vários autores confirmaram que o índice-S discrimina os efeitos de uso e manejo sobre a qualidade física do solo, dentre os quais, Tormena *et al.* (2008), Pereira *et al.* (2011) e Silva *et al.* (2011). Neste estudo testou-se a hipótese de que o sistema de pastagem altera a níveis críticos a qualidade física do solo e esta pode ser quantificada pelo IHO e índice-S. Assim, objetivou-se utilizar o IHO e o índice-S para quantificar as alterações físicas do solo promovidas pelo sistema de pastagem, tendo como referência um solo sob mata.

## MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em duas áreas adjacentes, localizadas no município de Paragominas, Nordeste Paraense. O clima da região é do tipo Aw, segundo a classificação de Köppen, isto é, tropical chuvoso com estação seca bem definida, com temperatura média anual de 26,5 °C. A precipitação pluvial média anual é de 1.800 mm com duas estações, uma chuvosa que vai de dezembro a maio e outra menos chuvosa de junho a novembro. A umidade relativa do ar varia de 70% a 90%. O relevo predominante da região varia de plano a suave ondulado, com altitude média em torno de 200 m (Rodrigues *et al.* 2002).

A amostragem foi realizada em um Latossolo Amarelo distroférico típico sob mata primária (floresta equatorial subperenifolia) e sob pastagem (*Panicum maximum*, cultivar Mombaça). O tempo de implantação da pastagem é de oito anos com sistema pastejo extensivo e uma unidade animal por hectare. Anteriormente ao sistema de pastagem, a área foi utilizada para o cultivo de milho.

Em cada área (mata e pastagem) foram coletadas 18 amostras deformadas e 18 indeformadas em superfície (0-5 cm) e em subsuperfície (25-30 cm), totalizando 36 amostras indeformadas e 36 amostras deformadas em cada área, divididas nas duas profundidades. O espaçamento entre os pontos de coleta foi de 25 x 30 m, sendo as amostras deformadas e indeformadas coletadas no mesmo ponto. As amostras indeformadas foram coletadas em anéis metálicos de 5 cm de altura e 5 cm de diâmetro com auxílio do amostrador de Uhland.

As amostras deformadas foram secas ao ar, destorroadas e peneiradas em malha de 2 mm para determinação do carbono orgânico do solo e análise granulométrica. A análise granulométrica foi realizada pelo método do densímetro (Gee e Bauder 1986). O teor de carbono orgânico foi determinado por titulação com sulfato ferroso amoniacal a 0,1N Embrapa

(1997). A distribuição granulométrica, classe textural e carbono orgânico são apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1.** Distribuição granulométrica, classe textural e carbono orgânico (C<sub>org</sub>) do solo sob mata (MT) e pastagem (PA) nas profundidades de 0-5 e 25-30 cm.

Área	g kg <sup>-1</sup>			C <sub>org</sub>	Classe textural
	Areia	Silte	Argila		
0-5 cm					
MT	664	118	219	38	Franco-argilo-arenosa
PA	688	125	187	21	Franco-arenosa
25-30 cm					
MT	580	140	280	16	Franco-argilo-arenosa
PA	619	98	283	6	Franco-argilo-arenosa

As amostras indeformadas foram saturadas em bandejas através da elevação gradual de uma lâmina de água, durante 24h, e divididas em grupos de seis, sendo três amostras por cada área e profundidade amostrada, em seguida foram submetidas aos potenciais mátricos ( $\psi$ ): -0,03; -0,01 MPa em mesa de tensão e -0,1; -0,3; -0,7; -1,5 MPa em câmaras de pressão (Soil Moisture equipment Co. Santa Barbara, CA, USA), conforme Klute (1986), até atingirem o equilíbrio, cujo momento era definido quando se constatava a completa ausência de drenagem na mesa de tensão e nas câmaras de pressão.

Depois de atingido o equilíbrio das amostras em cada potencial mátrico, foi determinada a massa úmida das amostras. Posteriormente a resistência à penetração foi medida com auxílio de um penetrômetro eletrônico de bancada, montado e desenvolvido no Departamento de Ciência do Solo da ESALQ/USP por Figueiredo *et al.* (2011). As medidas de resistência foram realizadas no centro de cada amostra, a haste de aço com extremidade cônica (ângulo de 60° e diâmetro basal de 0,4 cm) foi introduzida, a uma velocidade nominal de 10 mm min<sup>-1</sup>, até 4,0 cm da superfície superior de cada amostra de solo. Foram obtidas um total de 240 medições por amostra de solo, das quais um valor médio foi utilizado.

Em seguida, as amostras de solo foram secas em estufa a 105 °C, durante 24 h, para determinação da massa de solo seco para determinação do conteúdo de água e da densidade do solo conforme Blake e Hartge (1986).

A CRA foi ajustada pelo modelo matemático proposto por van Genuchten (1980) com a restrição  $\left(m = 1 - \frac{1}{n}\right)$ , conforme a equação 1:

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[(1 + \alpha\psi)^n]^m} \quad (1)$$

Onde  $\theta$  é a umidade do solo (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>);  $\theta_r$ , a umidade residual (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>);  $\theta_s$ , a umidade de saturação (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>);  $\psi$ , o potencial mátrico (hPa);  $\alpha$ ,  $m$ ,  $n$  são os parâmetros empíricos do modelo. A partir dos parâmetros ajustados do modelo de van Genuchten (1980) foi calculado o índice-S conforme Dexter (2004a) (Equação 2):

$$\text{índice-S} = -n(\theta_s - \theta_r) \left[1 + \frac{1}{m}\right]^{-[1+m]} \quad (2)$$

Para o cálculo do índice-S as umidades devem ser expressas à base de massa.

A distribuição do diâmetro dos poros foi calculada a partir da derivação da equação 1 (Dexter 2004 a), conforme a equação 3:

$$\frac{d\theta}{d \ln(\psi)} = -mn(\theta_s - \theta_r) \alpha^n \psi^n (1 + \alpha\psi^n)^{-m} \quad (3)$$

O IHO foi determinado conforme Silva *et al.* (1994). Os valores críticos para o crescimento das plantas de acordo com o potencial mátrico, resistência do solo e porosidade de aeração foram, respectivamente: a capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ) ou conteúdo de água no potencial mátrico de -0,01 MPa (Haise *et al.* 1955), o ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ) ou conteúdo de água no potencial de -1,5 MPa (Richards e Weaver 1944), o conteúdo de água no solo em que a resistência ( $\theta_{RP}$ ) atinge 2,0 MPa (Taylor *et al.* 1966), e o conteúdo de água no solo em que a porosidade de aeração ( $\theta_{PA}$ ) é de 0,10 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> (Grable e Siemer 1968).

A relação entre  $\theta$  e  $\psi$  foi estabelecida a partir do modelo proposto por Silva *et al.* (1994), considerando sua forma linear, que considera o efeito da densidade do solo (Ds) na retenção de água, conforme a equação 4:

$$\ln \theta = a + bDs + c \ln \psi \quad (4)$$

Onde Ds é a densidade do solo (Mg m<sup>-3</sup>) e  $a$ ,  $b$  e  $c$  são os parâmetros de ajuste do modelo.

Os dados de resistência à penetração foram ajustados em relação à  $\theta$  e à Ds utilizando o modelo proposto por Busscher (1990) em sua forma linear (Equação 5):

$$\ln RP = \ln d + e \ln \theta + f \ln Ds \quad (5)$$

Onde RP é a resistência à penetração (MPa). Os coeficientes  $d$ ,  $e$  e  $f$  são os parâmetros do modelo.

Os valores de  $\theta_{RP}$  em que ocorre resistência à penetração de 2,0 MPa foram obtidos por meio do modelo matemático ajustado aos dados de resistência conforme a equação 5. O valor de  $\theta_{PA}$ , em que a porosidade de aeração é de 10%, foi calculado a partir da equação 6.

$$\theta PA_{10\%} = \left[ \left( 1 - \frac{Ds}{Dp} \right) - 0,1 \right] \quad (6)$$

onde  $\theta_{PA10\%}$  é a umidade em que a porosidade de aeração é de 10% ou  $0,1 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  e  $D_p$  é a densidade de partícula ( $\text{Mg m}^{-3}$ ).

O IHO foi calculado como a diferença entre o limite superior e inferior dos conteúdos de água em que ocorrem os parâmetros físicos considerados (Wu *et al.* 2003). Se o IHO for igual a zero a densidade do solo é conhecida como densidade crítica ( $D_{sc}$ ).

## RESULTADOS

As variáveis físicas,  $D_s$ ,  $\theta$  e RP apresentaram variações em seus valores, o que foi importante para a obtenção de bons ajustes das CRA e curvas de resistência do solo (CRS). A RP destacou-se por apresentar elevada variabilidade (Tabela 2).

Os ajustes das curvas de retenção de água no solo (CRA) ao modelo de van Genuchten, para determinação do índice-S, foram realizados utilizando a totalidade dos dados obtidos para cada área e profundidade avaliada ( $N=18$ ). Considerando os limites de índice-S propostos por Dexter (2004a, b), observou-se na área sob mata (0-5 cm) valor superior a 0,035, sugerido como o limite entre solos de boa e pobre qualidade estrutural. As demais áreas estiveram abaixo deste limite, sendo que em pastagem (0-5 e 25-30 cm) os valores foram mais próximos de 0,02, valor limite para solos com elevado grau de degradação (Tabela 3). Constatou-se alterações na amplitude das curvas de distribuição do diâmetro dos poros (Figura 1A e B). Em pastagem (0-5 cm) houve predominância de poros de  $48 \mu\text{m}$ ,

enquanto em mata (0-5 cm) houve maior quantidade de poros de  $180 \mu\text{m}$  (Figura 1A). A 25-30 cm de profundidade, os poros predominantes em pastagem foram  $72 \mu\text{m}$  e em mata de  $144 \mu\text{m}$  (Figura 1B).

Na determinação do IHO, a umidade do solo apresentou correlação positiva com a  $D_s$  e negativa com o  $\psi$ , enquanto que a RP variou positivamente com a  $D_s$  e negativamente com o conteúdo de água, em todas as áreas estudadas (Tabela 4).

No solo sob mata (0-5 cm), o IHO do teve como limite superior e inferior os valores de umidade na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente, respectivamente, em toda a variação de  $D_s$ , não apresentando, portanto, restrições quanto a PA e RP (Figura 2A). Já em pastagem (0-5 cm), o limite inferior do IHO foi atribuído à  $\theta_{RP}$  em toda a variação de  $D_s$ . A  $\theta_{PA}$  substituiu a  $\theta_{CC}$  no limite superior em

**Tabela 3.** Parâmetros do ajuste da curva de retenção de água no solo à equação de van Genuchten e índice-S do solo sob mata (MT) e pastagem (PA) a 0-5 e 25-30 cm de profundidade.  $\theta_{sat}$ : umidade de saturação;  $\theta_{res}$ : umidade residual;  $\alpha$ ,  $n$ : parâmetros do modelo.

Áreas	$\theta_{sat}$ $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$	$\theta_{res}$ $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$	$\alpha$ $\text{hPa}^{-1}$	$n$	índice-S*
0-5 cm					
MT	0,387	0,108	0,012	1,446	0,048
PA	0,356	0,163	0,045	1,370	0,023
25-30 cm					
MT	0,343	0,129	0,015	1,433	0,032
PA	0,352	0,162	0,029	1,444	0,026

(\*): o índice-S foi calculado com base na  $\theta$  em  $\text{kg kg}^{-1}$

**Tabela 2.** Estatística descritiva para densidade do solo, umidade do solo e resistência do solo à penetração de raízes em solos sob mata (MT) e pastagem (PA) nas profundidades de 0-5 e 25-30 cm ( $N= 18$ ).  $D_s$ : densidade do solo;  $\theta$  umidade do solo; RP: resistência do solo à penetração; DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

Variável	Média	Mínimo	Máximo	DP	CV(%)
MT (0-5 cm)					
$D_s$ ( $\text{Mg m}^{-3}$ )	1,26	1,03	1,40	0,08	6,56
$\theta$ ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ )	0,23	0,11	0,40	0,09	39,46
RP (MPa)	1,54	0,78	2,44	0,55	34,82
PA(0-5 cm)					
$D_s$ ( $\text{Mg m}^{-3}$ )	1,60	1,49	1,69	0,05	3,21
$\theta$ ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ )	0,23	0,16	0,33	0,05	22,35
RP (MPa)	3,60	0,73	10,41	0,58	67,97
MT (25-30 cm)					
$D_s$ ( $\text{Mg m}^{-3}$ )	1,45	1,28	1,57	0,08	5,62
$\theta$ ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ )	0,22	0,12	0,34	0,07	32,12
RP (MPa)	2,37	0,80	5,72	1,46	61,82
PA (25-30 cm)					
$D_s$ ( $\text{Mg m}^{-3}$ )	1,59	1,43	1,70	0,08	5,40
$\theta$ ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ )	0,23	0,15	0,33	0,06	25,25
RP (MPa)	3,64	0,65	10,90	3,52	96,79

**Tabela 4.** Modelos de regressão para as curvas de retenção de água e resistência do solo, com transformações logarítmicas dos solos sob mata (MT) e pastagem (PA) a 0-5 e 25-30 cm de profundidade e respectivos coeficientes de determinação.  $\theta$ : umidade do solo ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ );  $D_s$ : densidade do solo ( $\text{Mg m}^{-3}$ );  $\psi$ : potencial mátrico (MPa); RP: resistência do solo à penetração (MPa).

Áreas	Modelos de regressão	$r^2$
Curva de Retenção de Água (CRA)		
0-5 cm		
MT	$\ln\theta = -2,05617 + 0,07845D_s - 0,1761\ln\psi$	0,88
PA	$\ln\theta = -3,48879 + 1,08317D_s - 0,10049\ln\psi$	0,91
25-30 cm		
MT	$\ln\theta = -2,78224 + 0,60178D_s - 0,13592\ln\psi$	0,82
PA	$\ln\theta = -2,13426 + 0,22574D_s - 0,10294\ln\psi$	0,83
Curva de Resistência do Solo (CRS)		
0-5 cm		
MT	$\ln RP = 0,43146 - 0,77384\ln\theta + 0,26554\ln D_s$	0,74
PA	$\ln RP = 0,00303 - 2,30273\ln\theta + 7,26962\ln D_s$	0,71
25-30 cm		
MT	$\ln RP = 0,03871 - 1,5022\ln\theta + 4,3144\ln D_s$	0,86
PA	$\ln RP = 0,00343 - 2,71689\ln\theta + 5,28205\ln D_s$	0,72

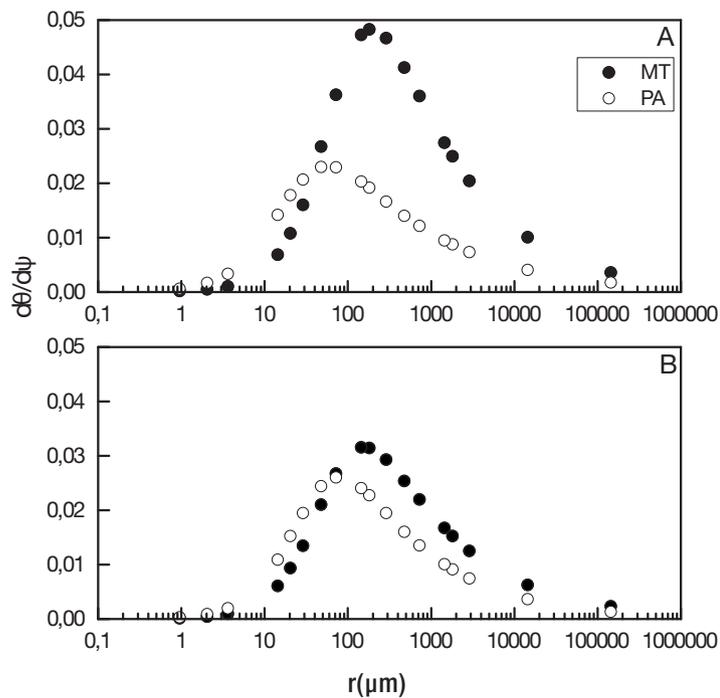


Figura 1. Distribuição do raio dos poros do solo (r) nas áreas sob mata (MT) e pastagem (PA) a 0-5 cm (A) e 25-30 cm de profundidade (B).

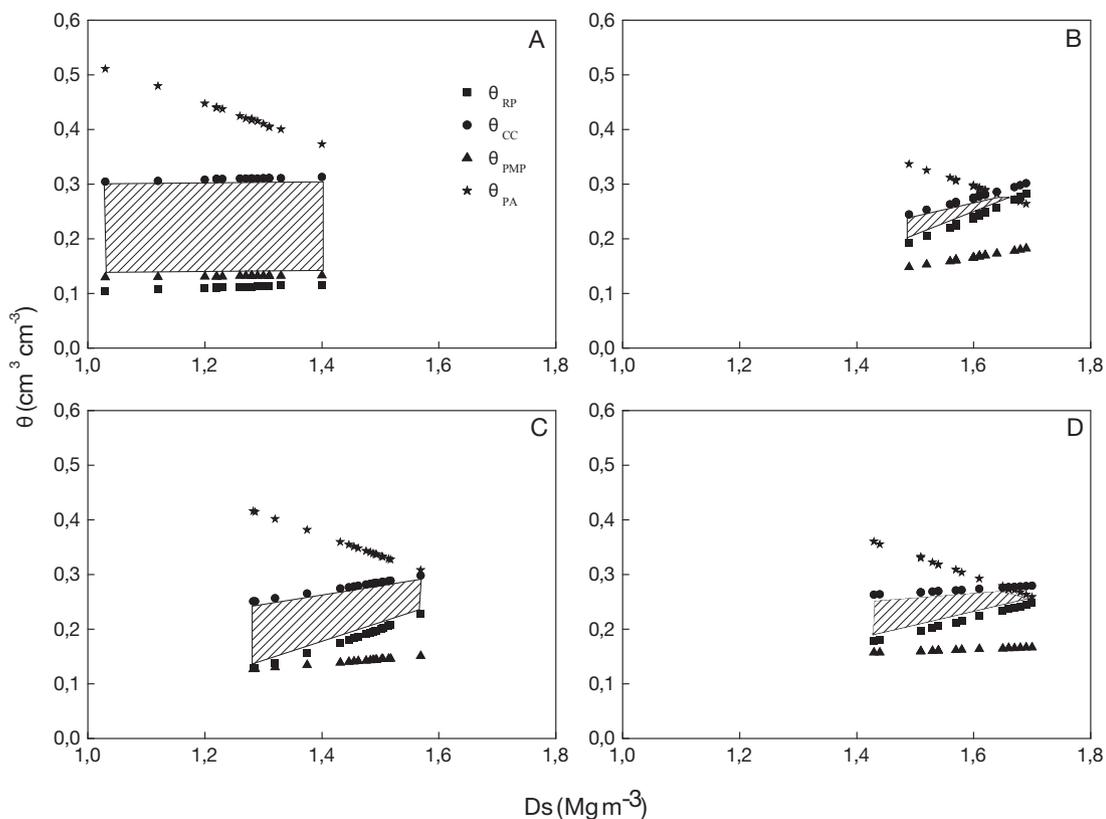


Figura 2. Variação do conteúdo de água ( $\theta$ ) em função da densidade do solo ( $D_s$ ) em área sob mata (MT) e pastagem (PA) a 0-5 cm (A e B) e 25-30 cm de profundidade (C e D), respectivamente. A área hachurada representa o Intervalo hídrico ótimo (IHO).

Ds de  $1,62 \text{ Mg m}^{-3}$  e a partir da Ds de  $1,67 \text{ Mg m}^{-3}$  o IHO foi nulo (Figura 2B).

Na profundidade de 25-30 cm, as áreas amostradas apresentaram limitações quanto à  $\theta_{RP}$  em toda a variação de Ds. A  $\theta_{PA} \leq 10\%$  não foi restritiva na área sob mata, enquanto que, sob pastagem a  $\theta_{PA}$  substituiu a  $\theta_{CC}$  como limite superior a partir da Ds de  $1,66 \text{ Mg m}^{-3}$  (Figura 2C, D).

De modo geral, a RP apresentou influência marcante nas restrições ao crescimento de plantas. Exceto em mata (0-5 cm), o limite inferior de água disponível referente ao ponto de murcha permanente apresentou pouca influência na determinação da disponibilidade de água no solo, pois, foi substituído pelo conteúdo de água em que a RP restringe o crescimento de plantas, mesmo em baixos valores de Ds (Figura 2B, C, D). Em mata (0-5 e 25-30 cm) não foram observados valores de Dsc, valor atingido quando o IHO for zero (Figura 2 A, C). No entanto, em pastagem (0-5 e 25-30 cm) alguns valores de Ds ultrapassaram a Dsc (Figura 2 B, D).

## DISCUSSÃO

As variações nos valores de Ds estão associadas, provavelmente, à heterogeneidade entre os pontos de amostragem distribuídos em campo, enquanto que, para os valores de RP as variações se devem ao gradiente de umidade imposto e as variações nos valores de densidade do solo. Blainsky *et al.* (2012) obtiveram elevados CV ao estudar essa relação, enfatizando a importância da padronização do conteúdo de água na determinação e interpretação da RP.

O alto valor de índice-S no solo sob mata na profundidade de 0-5 cm (Tabela 3) indicou uma grande quantidade de poros que drenam a água no ponto de inflexão, ou seja, aqueles que estão no pico da curva de distribuição do diâmetro dos poros (Dexter, 2004a).

No solo sob pastagem observou-se o menor valor de índice-S, estando associado à maior quantidade de poros de menor diâmetro, que reduz a inclinação da CRA (Dexter 2004a). Tais resultados podem indicar a influência do pisoteio de animais e do tráfego de máquinas, em condições de umidade inadequada, na porosidade responsável pelo movimento rápido da água no solo, com consequente aumento da retenção de água no solo sob pastagem.

Considerando a profundidade de 25-30 cm, no solo sob mata o valor de índice-S, mesmo abaixo do limite de 0,035, foi superior aquele observado no solo sob pastagem. Os valores de índice-S abaixo do limite de 0,035, mesmo no solo sob mata, indicam uma característica natural da área de estudo, que pode ter sido acentuada pelo uso do solo.

Pereira *et al.* (2012), ao estudarem solos da região nordeste, obtiveram valores de índice-S de 0,048 e 0,037 para solos sob condições naturais e 0,021 e 0,016 em pastagem na camada

5-10 cm e 20-25 cm, respectivamente, e ressaltam as alterações nas características físico-hidrológicas do solo causada pelo intenso tráfego de máquinas e animais.

As diferenças observadas entre os valores de índice-S podem ter influência também do carbono orgânico do solo ( $C_{org}$ ), já que em mata os teores de  $C_{org}$  foram superiores aos teores em pastagem, o que pode ter contribuído para um melhor arranjo do espaço poroso e, conseqüentemente, melhores condições físicas para o crescimento de plantas. Dexter (2004a) e Streck *et al.* (2008) observaram forte relação entre os valores de índice-S e matéria orgânica do solo.

As alterações observadas na amplitude das curvas de distribuição do diâmetro dos poros (Figura 1A, B) confirmaram as modificações no raio dos poros predominantes, com aumento de poros de menor tamanho em função dos efeitos de uso e manejo do solo, sendo estas alterações, mais evidentes na camada superficial. A partir distribuição do tamanho de poros proposta por Koorevaar *et al.* (1983), que estabelece como macroporos ( $>50 \text{ mm}$ ), mesoporos ( $15 \leq r \leq 50 \text{ mm}$ ) e microporos ( $<15 \text{ mm}$ ), observou-se que no solo sob pastagem (0-5 cm) houve predominância de poros da classe dos mesoporos, enquanto que sob mata (0-5 e 25-30 cm) e pastagem (25-30 cm) observou-se maiores quantidades de poros incluídos na classe dos macroporos.

Na determinação do Intervalo Hídrico Ótimo, os modelos matemáticos ajustados em suas formas linearizadas explicaram acima de 80% e 70%, respectivamente, a variação do conteúdo de água (CRA) e a curva de resistência do solo (CRS) nas áreas e profundidades avaliadas. A correlação positiva de  $\theta$  com a Ds e negativa com o  $\psi$  (Tabela 4), pode ser explicada pelo aumento da Ds, que altera a distribuição do diâmetro dos poros, ocasionando aumento no volume de poros com menor diâmetro e conseqüentemente aumento da retenção de água, estando em concordância com os resultados de Araújo *et al.* (2004), Leão *et al.* (2004) e Leão *et al.* (2006). O aumento da RP, devido ao aumento da Ds e decréscimo da  $\theta$  (Tabela 4), está relacionado com a redução do efeito lubrificante da água e, conseqüentemente, acréscimo das forças de coesão entre as partículas do solo (Petean *et al.* 2010). Esses resultados estão de acordo com Calonego *et al.* (2011) e Medeiros *et al.* (2011).

O IHO do solo sob mata (0-5 cm) sendo limitado pela  $\theta_{CC}$  e  $\theta_{PMP}$  em toda a faixa de Ds (Figura 2A) indicou que a aeração manteve-se em níveis satisfatórios quando o solo atingiu a CC, considerando o valor mínimo de 10% de aeração, e que a RP não alcançou valores impeditivos ao crescimento das plantas. Em pastagem (0-5 cm) a forte restrição causada pela  $\theta_{RP}$  e  $\theta_{PA}$  ao IHO, que chegou a atingir valor zero, indicou sérias limitações ao crescimento radicular, principalmente, em baixos conteúdos de água (Figura 2B). Tais resultados indicam o efeito da compactação do solo em pastagem, já que, com o aumento da Ds, a porosidade de aeração se torna

restrita e a resistência do solo aumenta. No solo sob mata (25-30 cm) a restrição causada pela  $\theta_{RP}$ , associada às limitações observadas a partir do índice-S podem indicar que esta seja uma característica natural da camada subsuperficial (25-30 cm) desta área de estudo, que foi intensificada pelo sistema de uso e manejo, conforme observado no solo sob pastagem (25-30 cm), onde o IHO foi restringido tanto pela  $\theta_{RP}$  quanto pela  $\theta_{PA}$ , e o valor de índice-S foi de 0,026, indicando baixa qualidade estrutural.

A forte influência da RP como fator limitante ao crescimento de plantas tem sido encontrada em muitos estudos com IHO em solos cultivados com diferentes texturas e condições de manejo, em que os valores de  $\theta$  tem que ser mantidos em níveis altos para que a RP não atinja valores limitantes, dentre os quais destacam-se, Cavalieri *et al.* (2011) e Lima *et al.* (2012). Pereira *et al.* (2012) ressaltam que a grande influência de fatores como a resistência do solo e a porosidade de aeração na disponibilidade de água confirmam que o conceito de água disponível não é suficiente para estimar os adequados conteúdos de água no solo para o melhor desenvolvimento das plantas. A tendência de redução do IHO com o aumento da Ds mais evidente no solo cultivado, onde o IHO atingiu valor zero, indicou o efeito prejudicial, causado por ações de manejo, na qualidade física do solo. Em pastagem (0-5 cm e 25-30 cm) a ocorrência de valores de  $D_s > D_{sc}$  (Figura 3A, B), confirmam a pobre qualidade física do solo nesta condição. Solos sob cultivo de pastagens normalmente apresentam valores de  $D_s > D_{sc}$ , conforme constatado por Leão *et al.* (2006) e Pereira *et al.* (2012).

## CONCLUSÕES

Os indicadores de qualidade física do solo, IHO e índice-S, apresentam conformidade quanto à avaliação da qualidade física dos solos estudados e indicam as alterações físicas promovidas no solo sob sistema de pastagem.

## AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-graduação em Agronomia da Universidade Federal Rural da Amazônia -UFRA e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pela concessão da bolsa de estudo. Ao Departamento de Ciência do Solo da “Escola de Agricultura Luiz de Queiroz” - ESALQ/USP, pelo apoio na realização deste trabalho.

## BIBLIOGRAFIA CITADA

Andrade, R. S.; Stone, L. F. 2009. Índice S como indicador da qualidade física de solos do cerrado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 13:382-388.

Araújo, M. A.; Tormena, C. A.; Silva, A. P. 2004. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho Distrófico cultivado e sob mata nativa. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 28:337-345.

Blainski, E.; Tormena, C. T.; Guimarães, R. M. L.; Nanni, M. R. 2012. Qualidade Física de um Latossolo Sob Plantio Direto Influenciada pela Cobertura do Solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 36:79-87.

Blake, G. R.; Hartge, K. H. 1986. Bulk density. In: Klute, A. (Ed.). *Methods of soil analysis*. Part 1: Physical and mineralogical methods. 2 ed. American Society of Agronomy – Madison, Wisconsin p.363-375

Busscher, W.J. 1990. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. *American Society of Agricultural Engineers*, 33:519-524.

Calonego, J.C.; Borghi, E.; Crusciol, C. A. C. 2011. Intervalo hídrico ótimo e compactação do solo com cultivo consorciado de milho e braquiária. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35:2183-2190.

Cavalieri, K. M. V.; Carvalho, L. A.; Silva, A. P. S.; Libardi, P. L.; Tormena, C. A. 2011. Qualidade física de três solos sob colheita mecanizada de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35:1541-1549.

Costa, M. A. T.; Tormena, C. A.; Lugão, S. M. B.; Fidalski, J.; Nascimento, W. G.; Medeiros, F. M. 2012. Resistência do solo à penetração e produção de raízes e de forragem em diferentes níveis de intensificação do pastejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 36:993-1004.

Dexter, A.R. 2004a. Soil physical quality Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, 120:201-214.

Dexter, A.R. 2004b. Soil physical quality: Part III. Unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S-theory. *Geoderma*, 120:227-239.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 1997. *Manual de métodos e análise de solo*. 2. ed. Rio de Janeiro, 1997, 212p.

Figueiredo, G. C.; Silva, A.P.; Tormena, C. A.; Giarola, N. F. B.; Moraes, S. O.; Almeida, B. G. 2011. Desenvolvimento de um consolidômetro pneumático: modelagem da compactação, penetrometria e resistência tênsl de agregados de solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35:389-402.

Gee, G.W.; Bauder, J.W. 1986. Particle-size analysis. In: KLUTE, A. (Ed.). *Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods*. 2 da ed. Madison, American Society of Agronomy, Part 1. p.383-411.

Grable, A.R.; Siemer, E.G. 1968. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots. *Soil Science Society of America Proceedings*, 32:180-186.

Greenwood, K. L.; Mckenzie, B. M. 2001. Grazing effects on soil physical properties and the consequences for pastures: a review. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 41:1231- 1250.

Haise, H.R.; Haas, H.J.; Jensen, L.R. 1955. Soil moisture studies of some Great Plain soils: II. Field capacity as related to 1/3-atmosphere percentage and “minimum point” as related

- to 15- and 26-atmosphere percentages. *Soil Science Society of America Proceedings*, 34:20-25.
- Klute, A. 1986. Water retention: laboratory methods. In: KLUTE, A. (Ed.). *Methods of soil analysis*. Part 1: Physical and mineralogical methods. 2 da ed. Madison, American Society of Agronomy, p.635-660.
- Koorevaar, P.; Menelik, G.; Dirksen, C. 1983. Elements of soil physics. *Developments in Soil Science*, 1983, vol. 13. Elsevier, Amsterdam.
- Leão, T.P.; Silva, A.P.; MACEDO, M.C.M.; IMHOFF, S.; EUCLIDES, V.P.B. 2004. Intervalo hídrico ótimo na avaliação de sistemas de pastejo contínuo e rotacionado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 28: 415-423.
- Leão, T.P.; Silva, A.P.; Macedo, M.C.M.; Imhoff, S.; Euclides, V.P.B. 2006. Least limiting water range: A potential indicator of changes in near-surface soil physical quality after the conversion of Brazilian Savanna into pasture. *Soil & Tillage Research*, 88:279-285.
- Letey, J. 1985. Relationship between soil physical properties and crop production. *Advances in Soil Science*, 1: 277-294.
- Lima, V. M. P.; Oliveira, G. C.; Serafim, M. E.; Curi, N.; Evangelista, A. R. 2012. Intervalo Hídrico Ótimo como Indicador de melhoria da Qualidade Estrutural de Latossolo Degradado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 36:71-78.
- Medeiros, J. C.; Silva, A. P. S.; Cerri C. E. P.; Giarola, N. F. B.; Figueiredo G. C.; Fracetto, F. J. C. 2011. Linking physical quality and CO<sub>2</sub> emissions under long-term no-till and conventional-till in a subtropical soil in Brazil. *Plant Soil*, 338:5-15.
- Olibone, D.; Encide-Olibone, A. P.; Rosolem C. A. 2010. Least limiting water range and crop yields as affected by crop rotations and tillage. *Soil Use and Management*, 26:485-493.
- Pereira, F. S.; Andrioli, I.; Pereira, F. de S.; Oliveira, P. R.; Centurion, J. F.; Falqueto, R. J.; Martins, A.L. da S. 2011. Qualidade física de um latossolo vermelho submetido a sistemas de manejo avaliado pelo índice-S. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35:87-95.
- Pereira, V. P.; Ortiz-Escobar, M. E.; Rocha, G. C.; Assis Júnior, R. N.; Oliveira, T. S. 2012. Evaluation of soil physical quality of irrigated agroecosystems in a semi-arid region of North-eastern Brazil. *Soil Research*, 50: 455-464.
- Petean, L. P.; Tormena, C.A.; Alves, S. J. 2010. Intervalo hídrico ótimo de um latossolo vermelho distroférico sob plantio direto em sistema de integração lavoura-pecuária. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 34:1515-1526.
- Richards, L.A.; Weaver, L.R. 1944. Fifteen atmosphere percentage as related to the permanent wilting point. *Soil Science*, 56:331-339.
- Rodrigues, T.E.; Valente, M.A.; Gama, J.R.N.F.; Oliveira Júnior, R.C.; Santos, P.L.; Silva, J.L. 2002. Zoneamento Agroecológico do município de Paragominas, Estado do Pará. *Boletim-Técnico Belém: Embrapa Amazônia Oriental*, p.64.
- Silva, A.P.; Kay, B.D.; Perfect, E. 1994. Characterization of the least limiting water range. *Soil Science Society of America Journal*, 58:1775-1781.
- Silva, G.L.; Lima, H.V.; Campanha, M.M.; Gilkes, R.J.; Oliveira, T.S. 2011. Soil physical quality of Luvisols under agroforestry, natural vegetation and conventional crop management systems in the Brazilian semi-arid region. *Geoderma* 167:61-70.
- Streck, C.A.; Reinert, D.J.; Reichert, J.M.; Horn, R. 2008. Relações do parâmetro S para algumas propriedades físicas de solos do Sul do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32: 2603-2612.
- Taylor, H.M.; Robertson, G.M.; Parker, J.J. 1966. Soil strength root penetration relations for medium to coarse textured soil materials. *Soil Science*, 102:18-22.
- Tormena, C.A.; Silva, A.P.; Imhoff, S.D.C.; Dexter, A.R. 2008. Quantification of the soil physical quality of a tropical Oxisol using the S index. *Scientia Agricola*, 65:56-60.
- van Genuchten, M.T.H. 1980. A Closed-Form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44:892-897.
- Wu, L.; Feng, G.; Letey, J.; Ferguson, L.; Mitchell, J.; McCullough-Sanden, B.; Markegard, G. 2003. Soil management effects on the non limiting water range. *Geoderma*, 114:401-414.
- Zhou, Z. C.; Gan, Z. T.; Shangguan, Z. P.; Dong, Z. B. 2010. Effects of grazing on soil physical properties and soil erodibility in semiarid grassland of the Northern Loess Plateau (China). *Catena*, 82:87-91.

Recebido em 01/10/2013  
Aceito em 01/04/2014