

SEÇÃO I - FÍSICA DO SOLO

RELAÇÕES DO PARÂMETRO S PARA ALGUMAS PROPRIEDADES FÍSICAS DE SOLOS DO SUL DO BRASIL⁽¹⁾

Carlos Arnaldo Streck⁽²⁾, Dalvan José Reinert⁽³⁾, José Miguel Reichert⁽³⁾ & Rainer Horn⁽⁴⁾

RESUMO

O parâmetro S representa o valor da inclinação da curva de retenção de água no seu ponto de inflexão. Um aumento nos valores de S indica uma ampla distribuição de tamanho de poros, condizente com condições estruturais que estabelecem um adequado funcionamento físico do solo. Neste trabalho, testou-se a sensibilidade do parâmetro S, proposto na literatura, em relação a algumas propriedades físicas de solos do Sul do Brasil. O parâmetro S não se relacionou com o teor de argila total, nem com o teor de argila dispersa dos sete solos utilizados neste trabalho. Para o grupamento dos solos argilosos e muito argilosos, o parâmetro S apresentou decréscimo exponencial com o aumento da densidade do solo e um crescimento exponencial com o aumento da matéria orgânica do solo. Nesses solos, a água disponível às plantas aumentou de forma linear ($ADP = 3,19 * S$) passando pela origem e a pressão de pré-consolidação reduziu exponencialmente com o aumento do valor de S. Conclui-se que o parâmetro S apresentou sensibilidade para determinar a qualidade física dos solos de textura argilosa e muito argilosa.

Termos de indexação: estrutura do solo, qualidade do solo, conteúdo de matéria orgânica do solo, pressão de pré-consolidação do solo.

⁽¹⁾Trabalho realizado por meio de intercâmbio entre o Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal de Santa Maria - UFSM e o Institute for Plant Nutrition and Soil Science da Christian Albrechts Universität zu Kiel-CAU. Financiado com recursos CAPES PROBIAL. Trabalho apresentado no XXXI Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 2007 (Gramado, RS).

⁽²⁾Doutor em Ciência do Solo, UFSM. E-mail: strecknator@gmail.com

⁽³⁾Professor Titular do Departamento de Solos, Centro de Ciências Rurais (UFSM). Bolsista do CNPq. E-mail: reichert@smail.ufsm.br e dalvan@smail.ufsm.br

⁽⁴⁾Professor do Institute for Plant Nutrition and Soil Science, Universidade de Kiel, Alemanha. E-mail: rhorn@soil.uni-kiel.de

SUMMARY: RELATIONSHIPS OF THE S PARAMETER OF SOME PHYSICAL PROPERTIES OF SOILS OF SOUTHERN BRAZIL

*The S index corresponds to the slope of the soil water retention curve at its inflection point. A high S value indicates the presence of structural pores, which are essential for a good soil physical condition. The objective of this study was to evaluate the sensitivity of the index of soil physical quality (S), as proposed in the literature for some physical properties of soils from Southern Brazil. In the seven soils used here, no relationship was found between clay and water dispersible clay content with soil physical quality index S. However, in soils with high clay content, the S index decreases with an increase in soil bulk density and increases with an increase in soil organic matter content. For a given texture class, plant available water increased linearly ($PAW = 3.19 * S$) to the origin and the preconsolidation pressure decreased exponentially with the increasing S index. The S index is sensitive to be used as an index of soil physical quality for soils with a high clay content.*

Index terms: soil structure, soil quality, soil organic matter content, preconsolidation pressure.

INTRODUÇÃO

A qualidade física do solo é um tema que ultimamente tem recebido crescente atenção. Existem vários conceitos de qualidade do solo que foram propostos na literatura. Um dos mais consagrados é o de Karlen et al. (1997), que se refere à capacidade de o solo desempenhar ou não adequadamente suas funções. As principais funções do solo são: servir como meio para o crescimento de plantas, exercer regulagem e participação do fluxo de massa e energia no ambiente e atuar como filtro ambiental (Reichert et al., 2003).

A qualidade física do solo influencia os seus processos químicos e biológicos e, por conseqüência, desempenha papel central em estudos sobre qualidade do solo. A qualidade física do solo manifesta-se de várias maneiras: na infiltração, retenção e disponibilização de água para as plantas, na resposta ao manejo e na resistência à degradação, na ocorrência das trocas de calor e de gases com a atmosfera e com o crescimento das raízes das plantas.

Muito esforço tem sido feito para geração de parâmetros que possam avaliar a qualidade física do solo. Segundo Karlen (1997), um parâmetro, para que possa ser utilizado na avaliação de um processo ou propriedade, 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. O difícil tem sido encontrar um parâmetro que inclua as propriedades físicas do solo e que se relacione com o crescimento e desenvolvimento das plantas (Reinert et al., 2006).

Um parâmetro físico do solo introduzido recentemente na literatura por Dexter (2004 a,b,c) é

o parâmetro S, que 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 do solo, compactação e preparo) que influenciam a distribuição do tamanho de poros refletem em mudanças nos valores de S, e, portanto, na qualidade física do solo. O mesmo autor, numa tentativa de estabelecer limites para indicar condições favoráveis e restritivas para o crescimento das raízes das plantas, propõe, respectivamente, o valor $S > 0,035$ e $S < 0,035$. Valores de $S < 0,020$ representam condições físicas do solo muito pobres e com alta restrição ao crescimento das raízes das plantas. O parâmetro S apresenta sensibilidade para identificar a degradação da qualidade física do solo, considerando o pisoteio animal, os diferentes sistemas de uso do solo (solo sob mata e solo sob pomar de laranja) e caracterização da qualidade física de horizontes do solo, bem como a granulometria e conteúdo de matéria orgânica (Da Silva, 2004).

Este trabalho teve o objetivo de testar a sensibilidade do valor de S em relação a algumas características intrínsecas e dinâmicas de um Nitossolo e de seis Latossolos do Sul do Brasil.

MATERIAL E MÉTODOS

Os solos avaliados foram coletados em duas condições de manejo: sob lavoura com mais de cinco anos no sistema plantio direto (sistema plantio direto

estabilizado) e sob condição natural (floresta ou campo nativo). Utilizaram-se os seguintes solos, classificados segundo Embrapa – Solos (Embrapa, 1999) como: (1) Latossolo Vermelho eutrófico, coletado no município de Missal - PR; (2) Latossolo Vermelho aluminoférrico, coletado no município de Pato Branco – PR; (3) Nitossolo Vermelho distrófico, coletado no município de Campos Novos – SC; (4) Latossolo Bruno aluminico, coletado no município de Vacaria – RS; (5) Latossolo Vermelho distrófico textura média (os demais solos apresentam textura argilosa a muito argilosa), coletado no município de Cruz Alta; (6) Latossolo Vermelho distrófico textura argilosa, também coletado no município de Cruz Alta –RS; e (7) Latossolo Vermelho distroférrico, coletado no município de Santo Ângelo – RS.

Para os primeiros quatro solos, foram coletadas amostras de estrutura preservada e deformada nas profundidades de 0-0,05; 0,15-0,20 e 0,30-0,35 m, e, para os demais solos, nas profundidades de 0-0,07; 0,07-0,15; 0,20-0,30; 0,40-0,45 m. As amostras de estrutura preservada foram saturadas e submetidas ao potencial matricial de -1kPa, -6 kPa, -33 kPa e -100 kPa com seis repetições nos primeiros quatro solos, e -1 kPa, -6 kPa, -15 kPa, -30 kPa, -50 kPa, -100 kPa e -300 kPa com três repetições para os três últimos. Para isso, foram utilizadas a mesa de tensão, mesa de areia e câmara de Richards. Para obter o conteúdo gravimétrico de água no solo em valores de potencial matricial em torno de -1500 kPa (ponto de murcha permanente, PMP), utilizou-se a equação da curva de retenção (CRA) gerada pelo potenciômetro de ponto de orvalho (dew point potentiometer), a partir das amostras de solo deformadas.

Ajustaram-se curvas de retenção de água (utilizando-se o conteúdo de água em base gravimétrica), empregando-se o modelo de van Genuchten (1980), mediante programa computacional Soil Water Retention Curve - SWRC (Dourado Neto et al., 1990).

A teoria sobre o parâmetro S está detalhadamente descrita em Dexter (2004a). O parâmetro S é fisicamente baseado na curva de retenção de água no solo (CRA). Esse parâmetro é definido como o valor da inclinação da curva de retenção de água no seu ponto de inflexão, pressupondo-se uma curva de retenção monomodal.

A determinação do valor de S pode ser feita diretamente a partir da CRA, com a plotagem da umidade do solo à base de massa (umidade gravimétrica) de acordo com o potencial matricial, desde que na CRA se tenham muitos pontos medidos com exatidão. Entretanto, é mais conveniente ajustar a curva a uma função matemática e então calcular a inclinação no ponto de inflexão em termos dos parâmetros da função. Este foi o procedimento adotado neste trabalho. Para cálculo do parâmetro S, empregou-se a equação 1, apresentada por Dexter (2004a), que é

utilizada quando o ajuste é feito pelo modelo de van Genuchten (1980).

$$S = -n(\theta_{sat} - \theta_{res}) [1+1/m]^{-(1+m)} \quad (1)$$

em que m e n são parâmetros da equação de van Genuchten (1980), θ_{sat} e θ_{res} são a umidade de saturação e a umidade residual, respectivamente.

Apesar de ser o parâmetro S sempre negativo, na discussão é mais conveniente usar o módulo de S, conforme relatou Dexter (2004a).

As determinações da granulometria, argila natural, matéria orgânica (MOS), densidade de partículas (Dp) e densidade do solo (Ds) seguiram métodos descritos em Embrapa (1997). (Quadro 1).

A água disponível às plantas (ADP, kg kg⁻¹) foi calculada por meio da equação 2, a partir das CRA, e utilizando o conteúdo gravimétrico de água na capacidade de campo ($\theta_{cc} = -10$ kPa) e o conteúdo gravimétrico de água no PMP ($\theta_{PMP} = -1500$ kPa).

$$ADP = \theta_{cc} - \theta_{PMP} \quad (2)$$

Para determinar a pressão de pré-consolidação (σ_p), utilizaram-se prensas multistep (Fazekas & Horn, 2005) com aplicação subsequente de cargas e com armazenamento automático dos dados. As amostras foram previamente equilibradas no potencial matricial de -6 kPa.

Na avaliação do parâmetro S em relação ao teor de argila, utilizaram-se todos os solos coletados. Para Ds, MOS, teor de argila dispersa, ADP e σ_p em relação ao parâmetro S, utilizaram-se os solos de textura argilosa e muito argilosa.

Na avaliação do parâmetro S em relação às diferentes propriedades físicas dos solos, optou-se por separar os solos em grupamentos texturais (conforme os critérios de Embrapa, 1999), para evitar que a textura influenciasse o parâmetro S em relação às demais propriedades. Os grupamentos texturais foram dois: (a) grupamento dos solos de textura média e (b) grupamento dos solos de textura argilosa e muito argilosa. Como o grupamento de solos de textura média foi representado somente pelo Latossolo Vermelho distrófico, apresentando poucos pontos, optou-se por não se utilizar esse solo na avaliação do S em relação à Ds, MOS, argila dispersa, ADP e σ_p . Portanto, a variação do S em função dessas propriedades engloba somente os solos com textura argilosa e muito argilosa.

Os resultados foram submetidos à análise estatística, utilizando-se o pacote estatístico SAS (SAS, 1999). O teste de Duncan a 5 % foi utilizado para comparar médias de densidade e porosidade entre profundidades. Para o parâmetro S, ajustaram-se equações para Ds, MOS, argila dispersa, ADP e σ_p . Na apresentação das equações, a significância é indicada por asteriscos colocados junto ao coeficiente de determinação (R²).

Quadro 1. Teores de matéria orgânica (MOS) e de argila e densidade de partículas (Dp) dos solos coletados sob dois sistemas de manejo

Solo	Profundidade	Plantio	Floresta	Plantio	Floresta	Plantio	Floresta
		direto	/Campo nativo	direto	/Campo nativo	direto	/Campo nativo
	m	— % —		— g kg ⁻¹ —		— Mg m ⁻³ —	
Latossolo Vermelho eutrófico	0-0,05	4,8	—	450	560 ⁽¹⁾	2,83	2,67 ⁽¹⁾
	0,15-0,20	4,3	—	620	680 ⁽¹⁾	2,84	2,76 ⁽¹⁾
	0,30-0,35	2,2	—	760	820 ⁽¹⁾	2,82	2,74 ⁽¹⁾
Latossolo Vermelho alumino- férico	0-0,05	6,5	9,8 ⁽¹⁾	660	680 ⁽¹⁾	2,77	2,61 ⁽¹⁾
	0,15-0,20	4,9	6,1 ⁽¹⁾	710	690 ⁽¹⁾	2,79	2,71 ⁽¹⁾
	0,30-0,35	3,6	5,0 ⁽¹⁾	710	670 ⁽¹⁾	2,78	2,77 ⁽¹⁾
Nitossolo Vermelho distrófico	0-0,05	8,3	9,4 ⁽¹⁾	690	780 ⁽¹⁾	2,66	2,54 ⁽¹⁾
	0,15-0,20	6,9	9,3 ⁽¹⁾	690	770 ⁽¹⁾	2,68	2,56 ⁽¹⁾
	0,30-0,35	5,7	7,7 ⁽¹⁾	720	710 ⁽¹⁾	2,69	2,65 ⁽¹⁾
Latossolo Bruno alumínico	0-0,05	8,3	9,0 ⁽²⁾	660	490 ⁽²⁾	2,60	2,69 ⁽²⁾
	0,15-0,20	5,5	5,5 ⁽²⁾	660	540 ⁽²⁾	2,67	2,76 ⁽²⁾
	0,30-0,35	4,7	4,6 ⁽²⁾	690	610 ⁽²⁾	2,69	2,75 ⁽²⁾
Latossolo Vermelho distrófico textura média	0-0,07	2,4	2,3 ⁽²⁾	161	174 ⁽²⁾	2,57	2,54 ⁽²⁾
	0,07-0,15	1,1	1,4 ⁽²⁾	183	173 ⁽²⁾	2,63	2,59 ⁽²⁾
	0,20-0,30	1,0	1,5 ⁽²⁾	232	174 ⁽²⁾	2,59	2,64 ⁽²⁾
	0,40-0,45	0,7	0,9 ⁽²⁾	239	186 ⁽²⁾	2,64	2,62 ⁽²⁾
Latossolo Vermelho distrófico textura argilosa	0-0,07	5,4	10,1 ⁽²⁾	361	528 ⁽²⁾	2,64	2,71 ⁽²⁾
	0,07-0,15	4,3	4,5 ⁽²⁾	395	516 ⁽²⁾	2,76	2,82 ⁽²⁾
	0,20-0,30	3,3	3,7 ⁽²⁾	447	558 ⁽²⁾	2,70	2,82 ⁽²⁾
	0,40-0,45	2,2	3,8 ⁽²⁾	471	633 ⁽²⁾	2,69	2,77 ⁽²⁾
Latossolo Vermelho distroférico	0-0,07	5,6	10,1 ⁽¹⁾	645	568 ⁽¹⁾	2,87	2,62 ⁽¹⁾
	0,07-0,15	3,4	6,3 ⁽¹⁾	676	584 ⁽¹⁾	2,85	2,80 ⁽¹⁾
	0,20-0,30	2,1	4,0 ⁽¹⁾	706	619 ⁽¹⁾	2,86	2,86 ⁽¹⁾
	0,40-0,45	1,8	3,4 ⁽¹⁾	751	653 ⁽¹⁾	2,88	2,80 ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Floresta; ⁽²⁾ Campo Nativo

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Relação do manejo com o parâmetro S

Para representar a relação entre as propriedades físicas do solo impostas pelo manejo e sua influência na CRA e no parâmetro S, optou-se por tomar, como exemplo, o primeiro solo coletado: Latossolo Vermelho eutrófico. Nesse solo, quando em plantio

direto, a camada de 0,15-0,20 m de profundidade apresentou maior Ds e menor Mac e Pt (Quadro 2). Isso é reflexo da compactação do solo, que, normalmente, em plantio direto, concentra-se de 0,08 até 0,15 m de profundidade (Reichert et al., 2003), mas na área em estudo atingiu a profundidade de 0,20 m o que pode ser atribuído ao tráfego de máquinas e implementos agrícolas sobre a superfície do solo.

A compactação refletiu-se na CRA onde, para a mesma profundidade (0,15-0,20 m), observou-se menor teor de água retido até o potencial matricial de -30 kPa em relação às demais profundidades (Figura 1b). Portanto, para a camada do solo mais compactada, observou-se uma mudança na forma da CRA em relação às curvas das demais camadas do solo. Como o parâmetro S representa a inclinação da curva de retenção no ponto de inflexão, este mostrou-se sensível à mudança na forma da CRA. Isso pode ser visualizado no quadro 3, em que a camada de solo mais compactada apresentou o menor valor para o parâmetro S. Este valor, S =

0,020, representa a extremidade inferior da classe dos solos com baixa qualidade física (Dexter, 2004a). Segundo o autor, valores de $S < 0,020$ estão associados a solos com condições físicas muito pobres.

Para o Latossolo Vermelho eutrófico sob floresta, a menor Ds e maior Mac e Pt foram encontrados na camada de 0-0,05 m do solo (Quadro 2). A maior quantidade de material orgânico na superfície, consequência do maior crescimento de raízes e incorporação de liteira, justifica a menor Ds na camada mais superficial de solos sob floresta (Mello Ivo & Ross, 2006).

Quadro 2. Densidade (Ds) e porosidades (macro: Mac, micro: Mic, e total: Pt) do Latossolo Vermelho eutrófico, sob plantio direto e floresta

Profundidade	Ds		Mac		Mic		Pt	
	Plantio direto	Floresta	Plantio direto	Floresta	Plantio direto	Floresta	Plantio direto	Floresta
m	Mg m ⁻³		m ³ m ⁻³					
0-0,05	1,17 b*	0,85 b	0,15 a	0,29 a	0,39 a	0,34 a	0,54 a	0,63 a
0,15-0,20	1,41 a	1,09 a	0,07 b	0,21 b	0,42 a	0,36 a	0,48 b	0,57 b
0,30-0,35	1,23 b	1,07 a	0,09 b	0,19 b	0,43 a	0,37 a	0,52 a	0,56 b
CV %	7,3	4,2	36,7	6,5	9,6	7,4	3,5	3,9

* Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste Duncan a 5 %.

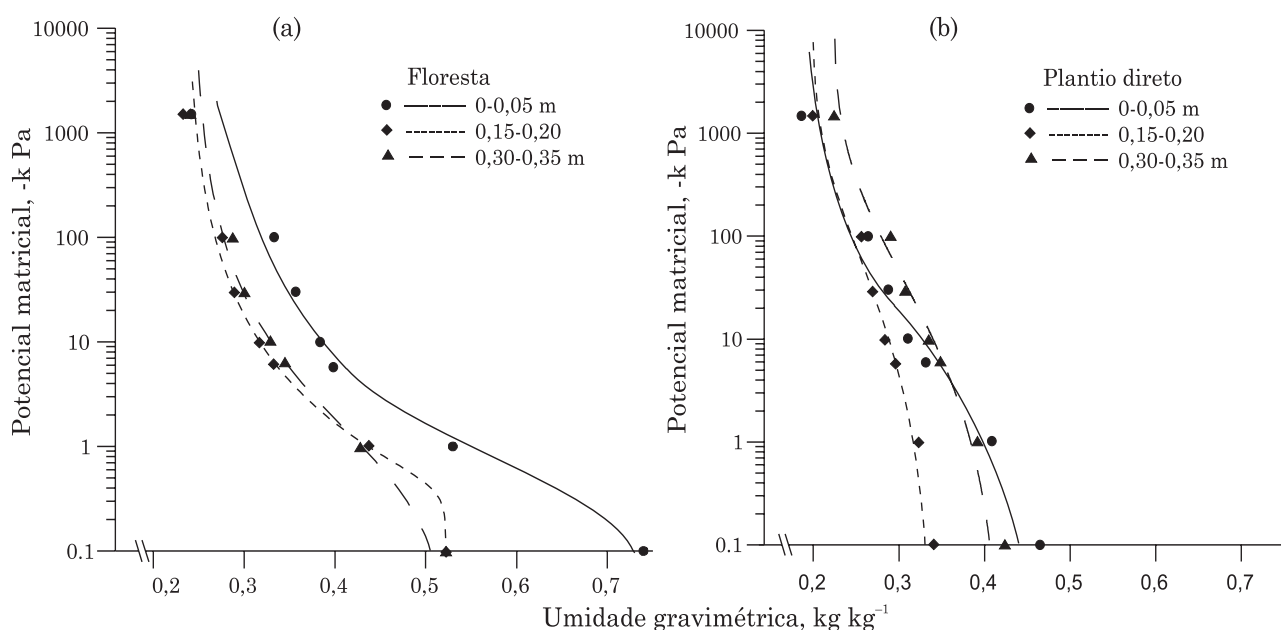


Figura 1. Retenção de água obtida (pontos) e curva de retenção de água ajustada pelo modelo Van Genuchten (linhas), para o Latossolo Vermelho eutrófico sob dois sistemas de manejo: floresta (a) e plantio direto (b), em três profundidades.

Quadro 3. Parâmetro S para o Latossolo Vermelho eutrófico sob plantio direto e floresta, calculado a partir das curvas de retenção de água

Profundidade	Parâmetro S	
	Floresta	Plantio direto
m		
0-0,05	0,107	0,037
0,15-0,20	0,082	0,020
0,30-0,35	0,049	0,027

A maior porosidade na camada superficial do solo sob floresta refletiu-se na CRA e no parâmetro S (Quadro 3).

Verificou-se que os valores do parâmetro S foram maiores no solo sob floresta, quando comparados aos solo cultivado em plantio direto (Quadro 3). O maior valor S na floresta indica a melhor configuração de poros no solo e, portanto, menor restrição física para o crescimento das raízes das plantas, seja por aeração, seja por restrição mecânica ou por características de retenção de água. Da Silva (2004), trabalhando com Latossolo Vermelho-Amarelo sob duas condições de manejo, floresta e pomar de laranja, encontrou valores de S de 0,1071, para a floresta, e de 0,0265, para o pomar. Segundo o autor, isso demonstra que o solo na floresta apresenta uma qualidade estrutural superior à do solo do pomar, o qual apresenta área trafegada pelas máquinas agrícolas com maior densidade do solo decorrente da compactação e, conseqüentemente, revela uma estrutura física degradada.

Os resultados confirmam o potencial do parâmetro S em identificar variações na qualidade física do solo, principalmente entre sistemas de manejo diferentes.

Parâmetro S em relação ao teor de argila

Observou-se não existir relação do valor de S com o teor de argila para os solos utilizados neste trabalho (Figura 2). Buscando separar o efeito do manejo do solo, que pode mascarar e influenciar o efeito da argila sobre o parâmetro S, separaram-se os solos conforme seu manejo (Figuras 3a, b).

Assim, mesmo separando os solos conforme seu manejo, o valor do parâmetro S não foi associado ao teor de argila, ou seja, não houve relação entre o teor de argila e o valor de S para os solos utilizados no presente trabalho. No entanto, para os solos sob campo nativo e floresta (Figura 3b), ocorreu uma dispersão maior dos valores de S, quando comparados aos dos solos sob plantio direto (Figura 3a). É possível que isso seja reflexo do sistema de manejo ao qual esses solos estão submetidos, corroborando as afirmações de Dexter (2004a) e Da Silva (2004) de que o parâmetro S constitui bom fator para avaliar diferentes sistemas de manejo do solo.

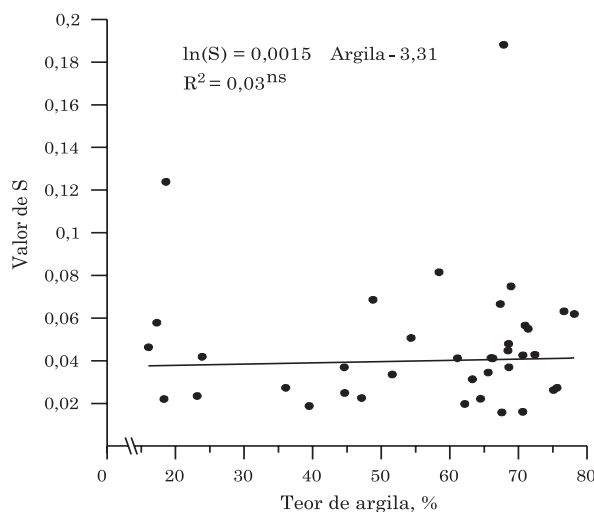


Figura 2. Comportamento do parâmetro S em função do teor de argila para diferentes solos do sul do Brasil (ns: o modelo ajustado não é significativo a $p \leq 0,05$ pelo teste F).

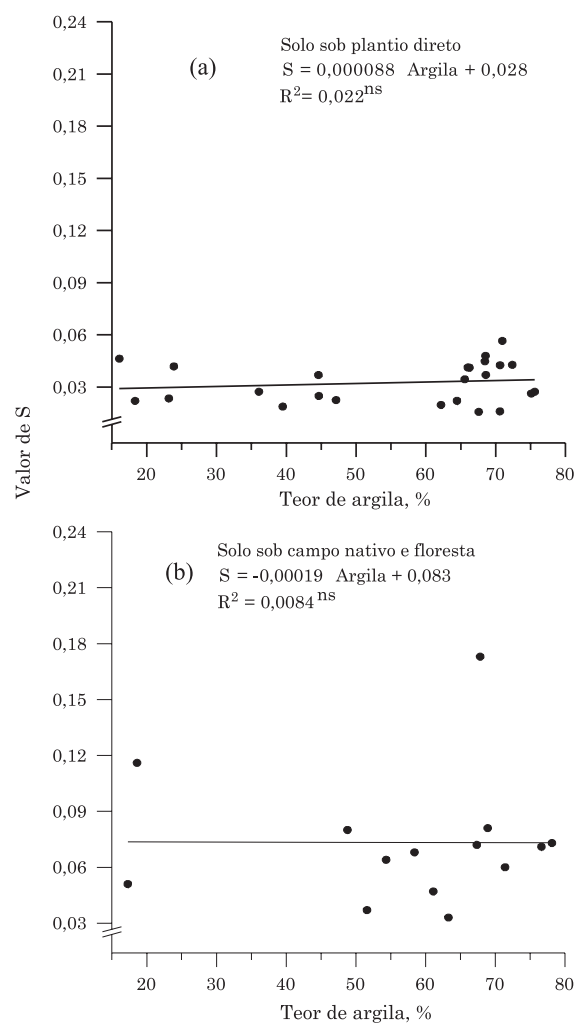


Figura 3. Comportamento do parâmetro S em função do teor de argila para solos sob diferentes sistemas de manejo (ns: o modelo ajustado não é significativo a $p \leq 0,05$ pelo teste F).

Parâmetro S em relação à densidade do solo

Com o aumento da Ds do solo, ocorreu redução do valor do parâmetro S (Figura 4). Resultados semelhantes foram encontrados por Dexter (2004a), em solos da Espanha com em torno de 27 % de argila, aproximadamente. O autor encontrou decréscimo linear do valor de S em função do aumento da Ds. No presente trabalho, encontrou-se uma variação exponencial decrescente do parâmetro S em função do aumento da Ds.

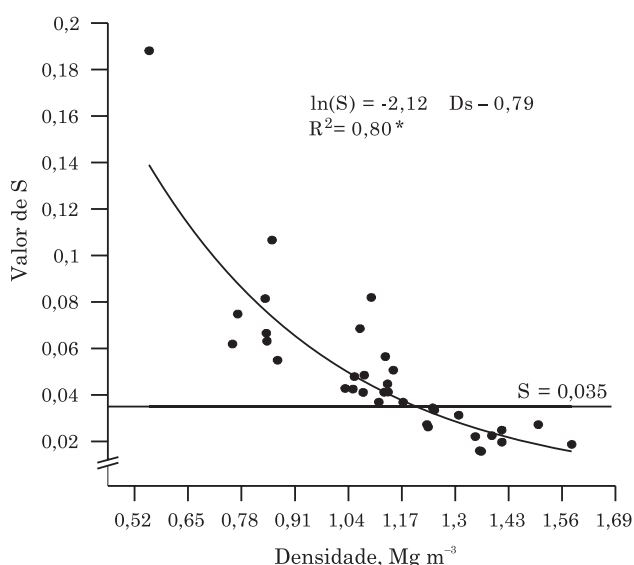


Figura 4. Comportamento do parâmetro S em função da densidade do solo. (*: o modelo ajustado é significativo a p ≤ 0,01 pelo teste F).

Com o aumento da Ds, verificou-se redução do volume de poros. No entanto, segundo Horn et al. (1995), nesse processo, os poros grandes são destruídos primeiro (poros intra-agregados), para depois ocorrer a destruição dos próprios agregados e, por consequência, dos poros menores (poros interagregados). Com o aumento da Ds há redução do teor de água nos potenciais mais altos próximos à saturação (θ_{sat}) e um aumento do teor de água retido a potenciais menores próximos de -1500 kPa. Segundo Da Silva (2004), um exame das CRA na literatura mostra que a degradação física do solo leva sempre a uma mudança na forma das curvas, com uma redução da inclinação da CRA no ponto de inflexão.

O valor de Ds, em que S = 0,035, foi de 1,21 Mg m⁻³. Essa Ds pode ser considerada como crítica, pois valores maiores representam S < 0,035, indicando solos de estrutura pobre. Esse valor está próximo dos valores de Ds definidos como críticos por Reichert et al. (2003), que utilizaram o intervalo hídrico ótimo (IHO) e definiram a Ds crítica quando IHO = 0. Os autores apresentaram um triângulo textural em que definiram a faixa de densidades de 1,25 a 1,3 Mg m⁻³

como crítica para solos da classe textural muito argilosa.

O parâmetro S e o teor de matéria orgânica e teor de argila dispersa do solo

Os valores de S mostraram-se dependentes dos teores de MOS dos solos (Figura 5a). Nesse caso, o modelo exponencial crescente apresentou o melhor ajuste. Esses resultados concordam com aqueles encontrados por Dexter (2004a) em solos da Inglaterra (Highfield com 25 % de argila) e da Polônia (Grabów com 4 % de argila). O autor encontrou uma relação linear do valor de S com o aumento do teor de MOS e um efeito mais expressivo do teor de MOS sobre o valor de S no solo arenoso.

O valor de MOS no ponto onde a curva intercepta S = 0,035 foi de 4,7 % (Figura 5a) e pode ser considerado como teor de MOS crítico para que se tenha o solo com boa qualidade física. Loveland & Webb (2003) afirmam que a maioria dos cientistas de solo assume o valor de 3,4 % de MOS como crítico para solos de regiões de clima temperado. No entanto, em sua revisão de literatura, esses autores não encontraram um nível crítico de MOS abaixo do qual a estrutura do solo entra em colapso. Apesar disso, encontra-se uma vasta literatura que associa a redução da qualidade física do solo com a redução do teor de MOS.

Os valores de S não foram dependentes do teor de argila dispersa dos solos (Figura 5b). Atribui-se isso aos diferentes sistemas de manejo utilizados nos solos, no presente caso, plantio direto estabilizado, floresta e campo nativo. Esses sistemas de manejo favorecem o acúmulo de MOS, principalmente na camada superficial. O acúmulo de MOS condiciona menores teores de argila dispersa em água, maior agregação e, conseqüentemente, maior porosidade total (Campos et al., 1995; Nascimento et al., 2005). Não existe, portanto, uma relação consistente entre o teor de argila dispersa e o parâmetro S para os solos utilizados neste trabalho.

Esses resultados são contrários aos encontrados por Gate et al. (2006), que trabalharam com cinco solos da Polônia e encontraram, no primeiro ano de trabalho, acentuada redução do parâmetro S com o aumento do teor de argila dispersa do solo, até atingir determinado valor a partir do qual a redução do valor de S estabilizou-se. Esses autores repetiram o mesmo trabalho no segundo ano e não obtiveram relação entre argila dispersa e o valor de S. Atribuíram isso ao alto conteúdo de água com o qual foram coletadas as amostras no segundo ano. Isso mostra que, mesmo para solos cultivados com o preparo convencional, ainda não é clara a relação entre argila dispersa e o valor de S, podendo a relação também estar sendo influenciada por outros fatores. A quantificação da argila dispersa mostrou-se também muito diferente, quando Gate et al. (2006) utilizaram um método baseado na turbidimetria e uma quantidade muito pequena de solo (5g) agitado com 125 mL de água.

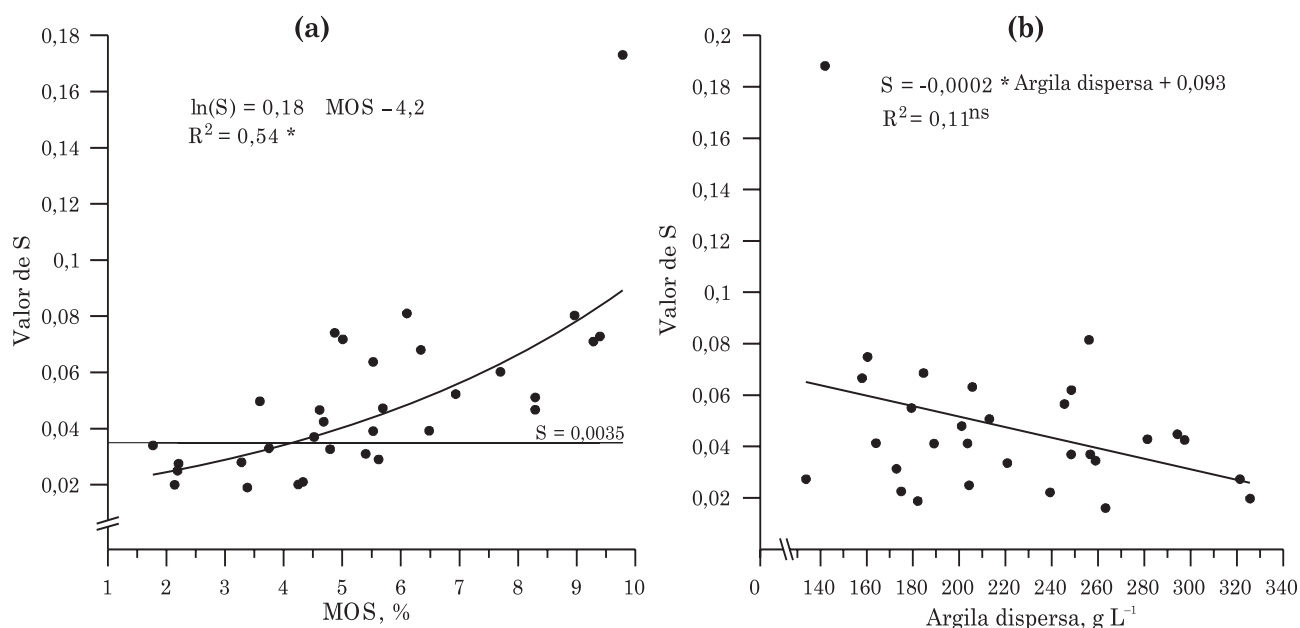


Figura 5. Comportamento do parâmetro S em função do teor de matéria orgânica (MOS, %) (a), e em função da argila dispersa ($g L^{-1}$) dos solos (b). (* e ns: representam, respectivamente, que o modelo ajustado é significativo a $p < 0,01$ pelo teste F e que o modelo ajustado não é significativo a $p \leq 0,05$ pelo teste F).

Água disponível para as plantas e pressão de pré-consolidação e o parâmetro S

A estrutura do solo determina a permeabilidade e o teor de água disponível para as plantas (ADP). A estrutura do solo é fator importante na determinação do conteúdo de água na capacidade de campo, por controlar a distribuição do tamanho de poros e a retenção de água contra a força da gravidade em valores altos de potencial matricial. Li et al. (2007) encontraram, na camada de 0-0,5 m de um Vertissolo sob tráfego controlado, um incremento de 11,5 % na ADP e um aumento de 9,4 % na produtividade das culturas de inverno e verão, quando comparado às parcelas que receberam tráfego em toda área. Os autores atribuíram o aumento na produtividade das culturas à maior ADP nas parcelas com tráfego controlado, visto que, nessas parcelas, a estrutura do solo não foi degradada pelo tráfego de máquinas.

Analicamente, combinando as equações 1 e 2 com a equação de van Genuchten (1980), demonstra-se que:

$$ADP = S \left(\frac{\left[1 + \frac{1}{m} \right]^{m-1}}{n} \right) \left(\left[1 + (\alpha h_{pmp})^n \right]^{-m} - \left[1 + (\alpha h_{cc})^n \right]^{-m} \right) = S \text{ função}(\alpha, m, n, h_{pmp}, h_{cc}) \quad (3)$$

em que: h_{pmp} e h_{cc} são o potencial matricial no ponto de murcha permanente e na capacidade de campo, respectivamente, e α , m e n são parâmetros da equação de van Genuchten (1980).

Como α , m , n , h_{pmp} e h_{cc} são constantes para um solo, ADP vai ser uma função linear pela origem de S ($ADP = a * S$) (Figura 6a). O ajuste linear ($ADP = 3,19 * S$) apresentou um coeficiente de determinação de 0,79 para os solos e manejos, utilizados neste trabalho. Gate et al. (2006) trabalharam com os solos da Polônia e encontraram um aumento linear da ADP com o aumento do parâmetro S.

A pressão de pré-consolidação (σ_p) em função do parâmetro S é apresentada na figura 6b. A σ_p decresceu exponencialmente com o aumento do parâmetro S, o que é atribuído a D_s que diminui para valores crescentes de S. Como já foi visto anteriormente, solos bem estruturados com parâmetro S elevado apresentam D_s baixa. A σ_p é influenciada pela D_s (Imhoff et al., 2004). Alexandrou & Earl (1998) encontraram uma relação linear e positiva entre σ_p e D_s , ou seja, valores menores de D_s estiveram associados à menor capacidade de suporte do solo (menor σ_p). Kondo & Dias Junior (1999) encontraram maior σ_p em solo cultivado com culturas anuais do que em solo sob pastagem e mata natural tal fato atribuíram à degradação da estrutura do solo pelo cultivo intensivo. Geralmente, valores altos de σ_p estão associados a altos valores de D_s e, portanto, o valor de S será baixo, indicando a degradação da estrutura do solo.

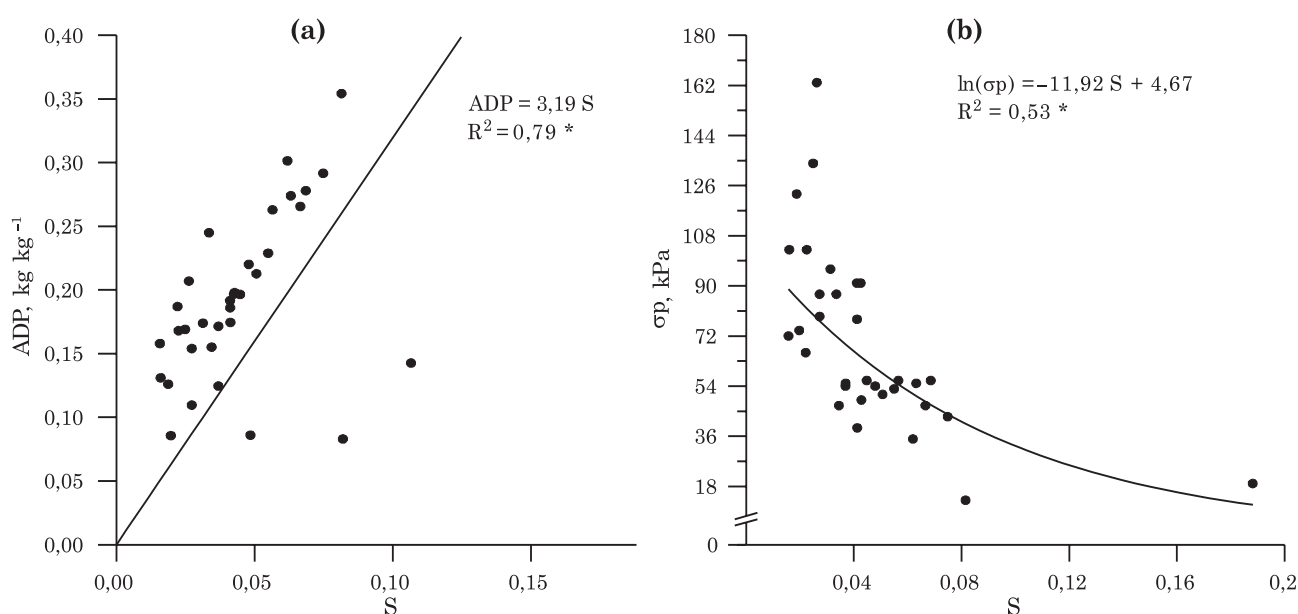


Figura 6. Comportamento da água disponível às plantas (kg kg^{-1}) em função do parâmetro S (a) e comportamento da pressão de pré-consolidação (kPa) em função do parâmetro S (b). (* o modelo ajustado é significativo a $p \leq 0,01$ pelo teste F).

CONCLUSÕES

1. O parâmetro S mostrou variações na qualidade física do solo impostas pelo manejo.
2. O parâmetro S não sofreu influência do teor de argila total tampouco do teor de argila dispersa dos solos.
3. O parâmetro S decresceu exponencialmente com o aumento da Ds e aumentou exponencialmente com o aumento do teor de MOS.
4. O ajuste que melhor expressou a ADP em função do parâmetro S foi o ajuste linear ($\text{ADP} = 3,19 \cdot \text{S}$) passando pela origem de S.
5. A pressão de pré-consolidação decresceu exponencialmente com o aumento do valor do parâmetro S.

AGRADECIMENTOS

Ao pesquisador Milton da Veiga, da Epagri-SC, pelo auxílio na coleta das amostras. Ao CNPq e CAPES - projeto Probral, pelo apoio financeiro e estadia na Alemanha. Ao revisor anônimo, pela proposição da equação 3.

LITERATURA CITADA

ALEXANDROU, A. & EARL, R. The relationship among the pre-compaction stress, volumetric water content and initial dry bulk density of soil. *J. Agric. Eng. Res.*, 71:75-80, 1998.

CAMPOS, B.C.; REINERT, D.J. & NICOLodi, R. Estabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico após sete anos de rotação de culturas e sistemas de manejo de solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 19:121-125, 1995.

DA SILVA, A.P. Interação manejo versus física. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 15., Santa Maria, 2004. Palestra. Santa Maria, 2004. CD-ROM.

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

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

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

DOURADO NETO, D.; van LIER, Q.J.; BOTREL, T.A. & LIBARDI, P.L. Programa para confecção da curva de retenção de água no solo utilizando o modelo de Genuchten. *Eng. Rural*, 1:92-102, 1990.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. Manual de métodos de análise de solos. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA-EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro, 1999. 412p.

FAZEKAS, O. & HORN, R. Interaction between mechanically and hydraulically affected soil strength depending on time of loading. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 168:60-67, 2005.

- GATE, O.P.; CZYZ, E.A. & DEXTER, A.R. Soil physical quality S as a basis for relationships between some key physical properties of arable soils. In: HORN, R.; FLEIGE, H.; PETH, S. & PENG, X. Soil management for sustainability. Reiskirchen, Catena Verlag, 2006. p.102-109.
- HORN, R.; DOMZAL, H.; SLOWINSKA-JURKIEWICZ, A. & van OUWERKERK, C. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. *Soil Till. Res.*, 35:23-26, 1995.
- IMHOFF, S., DA SILVA, A.P. & FALLOW, D. Susceptibility to compaction, load support capacity and soil compressibility of Hapludox. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 68:17-24, 2004.
- 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 Sci. Soc. Am. J.*, 61:4-10, 1997.
- KONDO, M.K. & DIAS JUNIOR, M.S. Compressibilidade de três Latossolos em função da umidade e uso. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:211-218, 1999.
- LI, Y.X.; TULLBERG, J.N. & FREEBAIRN, D.M. Wheel traffic and tillage effects on runoff and crop yield. *Soil Till. Res.*, 97: 282-292, 2007.
- LOVELAND, P. & WEBB, J. Is there a critical level of organic matter in the agricultural soils of temperate regions: a review, *Soil Till. Res.*, 70:1-18, 2003.
- MELLO IVO, W.M.P. & ROSS, S. Efeito da colheita seletiva de madeira sobre algumas características físicas de um Latossolo Amarelo sob floresta na Amazônia Central. *R. Bras. Ci. Solo*, 30:769-776, 2006.
- NASCIMENTO, J. T.; SILVA, I.F.; SANTIAGO, R.D. & SILVA NETO, L.F. Efeito de leguminosas nos atributos físicos e carbono orgânico de um Luvissole. *R. Bras. Ci. Solo*, 29:825-831, 2005.
- REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; & BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. *Ci. Amb.*, 27:29-48, 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 e Palestras. Aracaju, 2006. CD-ROM.
- SAS Institute. Statistical Analysis System Institute. Procedure guide for personal computers. 5.ed. Cary, 1999. 334p.
- van GENUCHTEN, M. TH. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:892-898, 1980.