

SEÇÃO I - FÍSICA DO SOLO

INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO NO MONITORAMENTO DA COMPACTAÇÃO E DA QUALIDADE FÍSICA DE UM LATOSSOLO VERMELHO CULTIVADO COM SOJA⁽¹⁾

Amauri Nelson Beutler⁽²⁾, José Frederico Centurion⁽³⁾, Maria Aparecida Pessoa da Cruz Centurion⁽⁴⁾, Cristiam Luarte Leonel⁽⁵⁾, Andréia de Cássia Gomes São João⁽⁵⁾ & Onã da Silva Freddi⁽⁵⁾

RESUMO

A qualidade física do solo é essencial ao crescimento das plantas e à sustentabilidade dos sistemas agrícolas. O objetivo deste estudo foi avaliar a eficiência do intervalo hídrico ótimo (IHO) no monitoramento da compactação e qualidade física do solo para soja em cultivo de sequeiro e irrigado. O experimento foi realizado em Latossolo Vermelho eutroférico (21 ° 14 ' 53 " S; 48 ° 17 ' 20 " W; 540 m de altitude). O delineamento experimental foi inteiramente casualizado em esquema fatorial 6 x 2, com quatro repetições. Os tratamentos de compactação foram: T₁ = sem compactação; T₂ = 1 passada de trator de 4 t; T₃ = 1; T₄ = 2; T₅ = 4; e T₆ = 6 passadas de um trator de 11 t, no mesmo local. Foi semeada a soja (*Glycine max* (L.) Merrill), cultivar IAC Foscarim 31. Foram coletadas amostras indeformadas de solo nas camadas de 3-6, 8-11, 15-18 e 22-25 cm, para determinação dos atributos físicos. Na colheita, foi avaliada a produtividade de soja em microparcela de 3,37 m². No cultivo de soja sequeiro e irrigado, a produtividade diminuiu a partir da resistência à penetração (RP) de 1,30 e 1,64 MPa e da densidade do solo (Ds) de 1,26 e 1,29 kg dm⁻³, com perdas de 19,15 e 11,71 % no maior nível de compactação (RP = 2,84 MPa; Ds = 1,45 kg dm⁻³), respectivamente. O IHO foi reduzido pela RP até atingir a Dsc(IHO = 0) de 1,33 e 1,38 kg dm⁻³, no cultivo de soja sequeiro e irrigado. O IHO é adequado no monitoramento da compactação e da

⁽¹⁾ Recebido para publicação em novembro de 2006 e aprovado em setembro de 2007.

⁽²⁾ Professor do Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Santa Maria – UFSM/UNIPAMPA. Rua Euclides Araújo 1288, Centro, CEP 97650000 Itaqui (RS). E-mail: amaurib@yahoo.com.br

⁽³⁾ Professor do Departamento de Solos e Adubos da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP. Via de Acesso Prof. Paulo Donato Castellane s/n, CEP 14884-900 Jaboticabal (SP). E-mail: jfcentur@fcav.unesp.br

⁽⁴⁾ Professora do Departamento de Produção Vegetal da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, UNESP. E-mail: cidinha@fcav.unesp.br

⁽⁵⁾ Pós-graduandos do Departamento de Solos e Adubos da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, UNESP. E-mails: crleonel@yahoo.com.br; acassia.gomes@yahoo.com.br; onafreddi@fcav.unesp.br

qualidade física do solo para soja, quando sua aplicação é realizada com base no valor de resistência à penetração limitante e no valor de densidade crítica do solo (IHO = 0). A soja em cultivo irrigado tolera maior compactação.

Termos de indexação: tráfego de máquinas, qualidade do solo, conteúdo de água, *Glycine max* (L.) Merrill.

SUMMARY: LEAST LIMITING WATER RANGE TO EVALUATE SOIL COMPACTION AND PHYSICAL QUALITY OF AN OXISOL CULTIVATED WITH SOYBEAN

*Soil physical quality is essential for plant growth and sustainable agricultural systems. This study aimed to evaluate the efficiency of the least limiting water range (LLWR) to monitor soil compaction and soil physical quality for soybean, without and with irrigation. The study was carried out in an clayey Red Latosol (Oxisol) (21 ° 14 ' 53 " S; 48 ° 17 ' 20 " W; 540 m asl). The experiment was entirely randomized, in a 6 x 2 factorial scheme, with four repetitions. The compaction treatments were: T₁ = without compaction; T₂ = 1 pass of a 4 t tractor; T₃ = 1, T₄ = 2, T₅ = 4 and T₆ = 6 passes of an 11 t tractor over the same track. Soybean (*Glycine max* (L.) Merrill), cultivar IAC Foscarim 31 was planted. Undisturbed soil samples were collected in the layers 3–6, 8–11, 15–18 and 22–25 cm to determine soil physical attributes. In the harvest soybean yield was evaluated in 3.37 m² microplots. Soybean yield, cultivated without and with irrigation, dropped when penetration resistance increased from 1.30 to 1.64 MPa and bulk density from 1.26 to 1.29 kg dm⁻³, with yield losses of 19.15 and 11.71% at the highest compaction level (RP = 2.84 MPa; Ds = 1.45 kg dm⁻³), respectively. The LLWR was reduced by RP until reaching critical soil bulk density (Dsc_(IHO = 0)) of 1.33 and 1.38 kg dm⁻³, in non-irrigated and irrigated soybean. LLWR is an adequate indicator of soil compaction and physical quality for soybean when applied based on the critical bulk density value Dsc_(LLWR = 0). Irrigated soybean is more tolerant to compaction.*

Index terms: Glycine max (L.) Merrill, machinery traffic, soil quality, water content.

INTRODUÇÃO

A soja é a principal cultura de grãos do Brasil, sendo cultivada em todos Estados, de norte a sul. A sua cadeia produtiva é responsável por um terço do agronegócio do País, que é o segundo maior produtor e exportador mundial de grãos dessa oleaginosa e responde por 25 % da produção mundial, precedido apenas pelos Estados Unidos (Agrianual, 2006).

No Brasil, o cultivo da soja é realizado principalmente por meio do sistema de semeadura direta, que cresce anualmente e que foi consolidado como um modelo de agricultura sustentável. Esse sistema caracteriza-se por revolvimento do solo apenas no sulco de semeadura, rotação de culturas e manutenção de restos culturais na superfície. Devido à ausência de preparo do solo antes da semeadura, ocorre gradual aumento da compactação com o passar dos anos, até atingir níveis prejudiciais ao crescimento das plantas, caso não seja adotado manejo adequado. Em solos tropicais, nesse sistema, têm ocorrido aumentos significativos e prejudiciais da compactação

para culturas anuais, principalmente até 0,20 m de profundidade (Cardoso et al., 2006). Para estudo, quantificação e monitoramento da compactação, visando manter a qualidade física do solo e das plantas e a sustentabilidade dos sistemas agrícolas, têm-se utilizado vários atributos físicos, entre os quais: infiltração de água, retenção de água, porosidade, densidade do solo (Ds) e resistência à penetração (RP). Muitos estudos foram realizados para estabelecer relações isoladas desses atributos com a produtividade das plantas, porém pequeno avanço tem sido obtido.

Letey (1985) sugeriu que o crescimento das plantas está diretamente relacionado a quatro fatores físicos: água, aeração, resistência do solo à penetração e temperatura. Com base nisso, Silva et al. (1994) desenvolveram o "Least Limiting Water Range", traduzido como intervalo hídrico ótimo (IHO), que integra os três primeiros atributos em função da Ds. O limite superior do IHO é o menor valor entre o conteúdo volumétrico de água na porosidade mínima de aeração de 10 % (Collis-George, 1953; Grable & Siemer, 1968) e o conteúdo de água retida na

capacidade de campo, tensão de 0,01 MPa (Reichardt, 1988); e o limite inferior é o maior valor entre o conteúdo de água no ponto de murcha permanente, 1,50 MPa (Savage et al., 1996), e o conteúdo de água em que a RP limita severamente o crescimento das raízes (2,0 MPa) (Taylor et al., 1966).

O IHO tem sido utilizado e proposto por vários pesquisadores como índice adequado para avaliação da qualidade física do solo (Leão et al., 2006). Contudo, Benjamim et al. (2003) não encontraram relações da amplitude do IHO com a produtividade de milho e de trigo. Por sua vez, todos mencionam sua importância na tomada de decisões sobre o manejo do solo. Entretanto, um indicador de qualidade física, como tem sido proposto o IHO (Silva et al., 1994; Benjamim et al., 2003; Lapen et al., 2004), deve ser acessível, aplicável no campo e permitir a obtenção de valores de referência que possam ser quantificados e adotados como aceitáveis ou limitantes às plantas (Doran & Parkin, 1994).

Nesse contexto, a outra forma de uso do IHO é a utilização da densidade do solo crítica ($D_{sc(IHO=0)}$), visto que o estimador do IHO é a D_s , como condição a partir da qual ocorrem restrições severas ao crescimento das plantas. Dessa forma, os valores de D_s podem ser determinados no campo, rotineiramente, a baixo custo e comparados com a $D_{sc(IHO=0)}$, permitindo o acesso à atual qualidade física do solo para o crescimento das plantas e a tomada de decisões sobre o manejo do solo (Reichert et al., 2003). Beutler et al. (2005) estabeleceram essa relação funcional, determinando o valor de RP a partir do qual a produtividade de soja começou a decrescer, e inseriram na modelagem do IHO. Estes autores verificaram que a $D_{sc(IHO=0)}$ foi de 1,48 kg dm⁻³, equivalente à D_s a partir da qual ocorreu decréscimo da produtividade.

O objetivo deste estudo foi avaliar a eficiência do intervalo hídrico ótimo no monitoramento da compactação e da qualidade física do solo para soja em cultivo de sequeiro e irrigado.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado no ano agrícola 2005/06, em Jaboticabal, SP (21° 14' 53" S; 48° 17' 20" W; 540 m de altitude). O clima, segundo a classificação

de Köppen, é mesotérmico de inverno seco (Cwa). Utilizou-se um Latossolo Vermelho eutroférico, típico, textura muito argilosa, horizonte A moderado. A composição granulométrica foi determinada por meio da dispersão com NaOH (0,1 mol L⁻¹), com agitação lenta durante 16 h (30 rpm), e o conteúdo de argila foi obtido pelo método da pipeta. As caracterizações granulométrica e química do solo na camada de 0–20 cm são apresentadas no quadro 1.

Esquema fatorial 6 x 2 (seis níveis de compactação e cultivo de sequeiro e irrigado), distribuído em delineamento experimental inteiramente casualizado com quatro repetições representadas por parcelas de 9,0 m², com área útil de 3,37 m².

Em novembro de 2005, o solo foi escarificado até 30 cm de profundidade e foram realizados os seguintes tratamentos de compactação: (1) sem tráfego de máquinas adicional (T₁); (2) uma passada de trator de 4 t, uma ao lado da outra, perfazendo toda a superfície do solo, no conteúdo de água de 0,17 kg kg⁻¹ (T₂); (3) uma passada (T₃); (4) duas passadas (T₄); (5) quatro passadas (T₅); e (6) seis passadas de trator de 11 t, no mesmo local, com dois eixos e quatro pneus de mesma largura e pressão interna, perfazendo toda a superfície do solo, no sentido do declive da área, no conteúdo de água de 0,22 kg kg⁻¹ (T₆).

No dia 29 de novembro de 2005, as sementes de soja (*Glycine max* (L.) Merrill) cultivar IAC Foscarim 31, de ciclo precoce (120 dias), receberam inóculos de *Bradyrhizobium japonicum* e foram semeadas na profundidade de 5 cm e no espaçamento de 45 cm entre linhas, no sentido transversal ao declive da área. Utilizou-se uma semeadora plantio direto com cinco linhas, equipada com sulcador e discos para cobrir as sementes. Após 10 dias realizou-se o desbaste, deixando 20 plantas por metro.

A adubação foi de 50 kg ha⁻¹ de sulfato de amônio, 120 kg ha⁻¹ de superfosfato triplo e 80 kg ha⁻¹ de cloreto de potássio, na semeadura, para obtenção da produtividade esperada de soja de 3,5 a 4,0 t ha⁻¹, segundo recomendação de Rajj et al. (1996).

No sistema de cultivo irrigado, foram realizadas quatro irrigações de 20 mm, por aspersão, quando a tensão da água atingiu 0,06 a 0,3 MPa, sendo três na segunda quinzena de janeiro, quando ocorreu estiagem pronunciada (24 dias sem precipitação pluvial). Realizou-se o monitoramento diário do conteúdo de

Quadro 1. Caracterização granulométrica e química do Latossolo Vermelho eutroférico na camada de 0,0–0,20 m

Argila	Silte	Areia	pH CaCl ₂	Matéria orgânica	P _{resina}	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	V
———— g kg ⁻¹ ————				g dm ⁻³	mg dm ⁻³	—— mmolc dm ⁻³ ——			%
620	220	160	6,0	23	51	3,4	45	30	75

água por meio de coleta de amostras de solo na camada de 0–20 cm e secagem em estufa a $\pm 105\text{ }^\circ\text{C}$, nos cultivos de sequeiro e irrigado (Figura 1). Na colheita, foi avaliada a produtividade de soja em microparcela de $3,37\text{ m}^2$, e a umidade, corrigida a 12 %.

Em janeiro de 2006, foram coletados dois grupos de seis amostras, por tratamento, com cilindros de 3 cm de altura e 4,8 cm de diâmetro, nas camadas de 3–6, 8–11, 15–18 e 22–25 cm. Em seguida, uma amostra de cada grupo e camada foi saturada durante 24 h e submetida a uma das tensões de 0,006; 0,010; 0,033; 0,060; 0,100; e 0,300 MPa, em câmaras de Richards. Ao atingirem o equilíbrio, foram pesadas e foi determinada a resistência do solo à penetração (RP), com duas subdeterminações por amostra, na camada intermediária do cilindro, perfazendo 100 leituras por determinação, utilizadas para obtenção da RP média. A RP foi determinada com o penetrômetro eletrônico, com semi-ângulo do cone de 30° , velocidade de penetração de 1 cm min^{-1} e cone com área da base de $4,79\text{ mm}^2$.

Na seqüência, as amostras foram secas em estufa a $\pm 105\text{ }^\circ\text{C}$, para determinação do conteúdo de água em cada tensão e da densidade do solo (Ds). A microporosidade foi obtida no conteúdo de água retido na tensão de 6 kPa (poros $< 50\text{ }\mu\text{m}$), e a macroporosidade (poros $> 50\text{ }\mu\text{m}$), pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade.

Para determinação do intervalo hídrico ótimo (IHO), a curva de retenção de água no solo foi ajustada utilizando o modelo não-linear empregado por Silva et al. (1994), e a curva de RP foi ajustada pelo modelo proposto por Busscher (1990), na forma log-transformada, empregando o SAS (SAS Institute, 1998):

$$\ln\theta = a + bDs + c\ln\Psi \quad (1)$$

$$\ln RP = \ln d + e\ln\theta + f\ln Ds \quad (2)$$

em que θ : conteúdo volumétrico de água ($\text{m}^3\text{ m}^{-3}$); Ds, densidade do solo (t m^{-3}); Ψ : tensão de água no solo (hPa); RP: resistência do solo à penetração (MPa); a, b, c, d, e, f: parâmetros dos ajustes dos modelos.

O conteúdo de água na capacidade de campo equivalente à tensão de 100 hPa e o ponto de murcha permanente de 15.000 hPa, θ_{CC} e θ_{PMP} , foram estimados pelas equações (3) e (4), respectivamente, obtidas da equação (1):

$$\theta_{CC} = \exp(a + bDs) * 100^c \quad (3)$$

$$\theta_{PMP} = \exp(a + bDs) * 15.000^c \quad (4)$$

O conteúdo de água a partir do qual a RP é limitante foi estimado pela equação (5), obtida da equação (2):

$$\theta_{RP} = RP_{(crit.)} / (e(d) * (Ds^e))^{1/f} \quad (5)$$

em que $RP_{(crit.)}$ é o valor de RP, determinado no conteúdo de água retido na capacidade de campo, a partir do qual a produtividade de soja (sequeiro e irrigado) decresceu, no campo.

O conteúdo de água em que a porosidade de aeração é de 10 % foi calculado pela equação:

$$\theta_{PA} = (1 - (Ds/Dp)) - 0,10 \quad (6)$$

em que Dp é a densidade de partículas

$$(2,65\text{ kg dm}^{-3}).$$

Finalmente, θ_{PA} , θ_{CC} , θ_{PMP} e θ_{RP} foram plotados em função da Ds, formando o IHO, representativo das quatro camadas, visto que ele foi equivalente em todas elas.

Os resultados foram submetidos à análise de variância, utilizando o teste F ($P < 0,05$), e realizou-se regressão polinomial entre a RP e a Ds com a produtividade da soja.

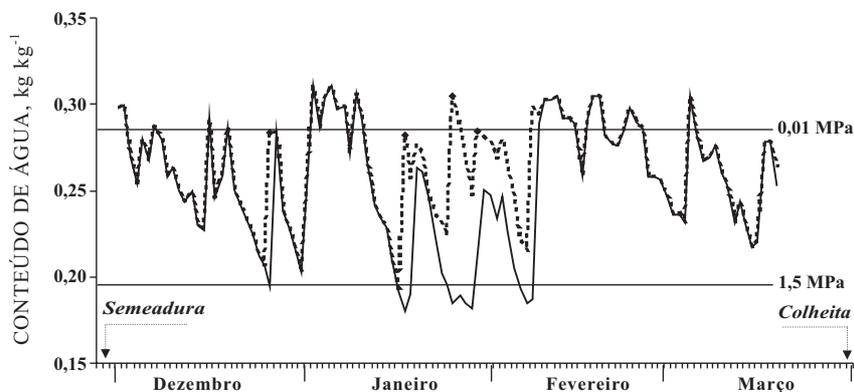


Figura 1. Conteúdo médio de água do Latossolo Vermelho eutroférico durante o cultivo da soja, sequeiro (—) e irrigado (-----), na camada de 0,0–0,20 m. As linhas horizontais representam o conteúdo de água retido nas tensões de 0,01 MPa (capacidade de campo) e 1,5 MPa (ponto de murcha permanente).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O tráfego de máquinas sobre o solo alterou as suas propriedades físicas até 25 cm de profundidade (T_1 – T_6) (Quadro 2). Essa compactação ocorreu em profundidade superior à de 7–18 cm, em que ocorre maior compactação em sistemas plantio direto, em solos tropicais cultivados com soja (Cardoso et al., 2006). Isso se deve ao fato de o solo ter sido revolvido até 30 cm de profundidade, na instalação do experimento, deixando-o solto e suscetível a uma compactação nas camadas inferiores, comparado a sistemas plantio direto durante alguns anos, em que o solo está mais estruturado e proporciona maior resistência à compactação, a qual não atinge as camadas mais inferiores.

O conteúdo de água gravimétrico entre T_1 – T_6 foi semelhante durante os dias avaliados, bem como o

valor médio durante o cultivo ($T_1 = 0,253$; $T_2 = 0,253$; $T_3 = 0,255$; $T_4 = 0,255$; $T_5 = 0,253$; e $T_6 = 0,251$ kg kg⁻¹), ocorrendo a mesma tendência no cultivo irrigado.

Com o teste F, verificou-se que a produtividade foi influenciada apenas pela compactação e pela interação compactação x irrigação ($p < 0,01$), cujos efeitos são observados nas equações de regressão da RP e Ds com a produtividade (Figura 2). O pequeno aumento da produtividade de soja em função da irrigação, que ocorreu apenas no solo compactado (T_5 – T_6), foi devido à ocorrência de apenas poucos dias seguidos com baixo conteúdo de água no solo, caracterizando três picos com tensão de água $> 1,5$ MPa entre os dias 7 de janeiro e 7 de fevereiro, na camada de 0–20 cm, na condição de sequeiro (Figura 1), o que é apenas um pequeno déficit hídrico. Além disso, nesse período, que se prolongou até o início do estágio R1 (início do florescimento) (Fehr et al., 1971), as plantas estavam

Quadro 2. Atributos físicos do Latossolo Vermelho eutroférico em diferentes camadas e números de passadas de trator

Atributo físico	Camada	Passadas de trator ⁽¹⁾					
		T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆
	m						
Macroporosidade (m ³ m ⁻³)	0,03–0,06	0,24 ± 0,00 ⁽²⁾	0,20 ± 0,01	0,14 ± 0,08	0,11 ± 0,04	0,07 ± 0,01	0,05 ± 0,00
	0,08–0,11	0,17 ± 0,05	0,19 ± 0,00	0,11 ± 0,02	0,09 ± 0,00	0,07 ± 0,00	0,05 ± 0,00
	0,15–0,18	0,19 ± 0,00	0,14 ± 0,03	0,11 ± 0,01	0,09 ± 0,02	0,08 ± 0,02	0,07 ± 0,01
	0,22–0,25	0,20 ± 0,03	0,11 ± 0,04	0,08 ± 0,03	0,05 ± 0,02	0,07 ± 0,00	0,09 ± 0,00
	Média	0,20 ± 0,01	0,16 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,09 ± 0,01	0,07 ± 0,00	0,06 ± 0,01
Microporosidade (m ³ m ⁻³)	0,03–0,06	0,36 ± 0,00	0,38 ± 0,01	0,41 ± 0,03	0,41 ± 0,02	0,43 ± 0,01	0,43 ± 0,01
	0,08–0,11	0,38 ± 0,02	0,39 ± 0,00	0,42 ± 0,00	0,43 ± 0,00	0,42 ± 0,00	0,43 ± 0,00
	0,15–0,18	0,39 ± 0,01	0,40 ± 0,00	0,42 ± 0,01	0,41 ± 0,01	0,42 ± 0,00	0,43 ± 0,01
	0,22–0,25	0,37 ± 0,02	0,43 ± 0,01	0,43 ± 0,02	0,45 ± 0,01	0,43 ± 0,00	0,42 ± 0,01
	Média	0,38 ± 0,01	0,40 ± 0,01	0,42 ± 0,01	0,43 ± 0,01	0,43 ± 0,00	0,43 ± 0,00
Resistência à penetração (MPa) ⁽³⁾	0,03–0,06	0,47 ± 0,34	0,39 ± 0,21	0,76 ± 0,43	1,11 ± 0,51	3,44 ± 0,35	3,94 ± 0,53
	0,08–0,11	0,29 ± 0,12	0,78 ± 0,32	0,81 ± 0,29	1,75 ± 0,31	2,43 ± 0,25	2,71 ± 0,47
	0,15–0,18	0,37 ± 0,09	1,10 ± 0,04	0,83 ± 0,00	2,63 ± 0,82	2,49 ± 1,46	2,06 ± 0,64
	0,22–0,25	0,37 ± 0,20	0,29 ± 0,12	2,08 ± 0,64	2,34 ± 0,43	2,45 ± 0,72	2,63 ± 0,54
	Média	0,38 ± 0,08	0,64 ± 0,14	1,12 ± 0,26	1,96 ± 0,30	2,70 ± 0,36	2,84 ± 0,33
Densidade do solo (kg dm ⁻³)	0,03–0,06	1,11 ± 0,03	1,14 ± 0,01	1,27 ± 0,02	1,33 ± 0,02	1,43 ± 0,01	1,54 ± 0,01
	0,08–0,11	1,10 ± 0,02	1,16 ± 0,03	1,34 ± 0,02	1,40 ± 0,01	1,41 ± 0,01	1,51 ± 0,01
	0,15–0,18	1,13 ± 0,01	1,22 ± 0,02	1,32 ± 0,02	1,37 ± 0,01	1,40 ± 0,02	1,41 ± 0,01
	0,22–0,25	1,12 ± 0,02	1,19 ± 0,02	1,34 ± 0,02	1,41 ± 0,01	1,40 ± 0,02	1,34 ± 0,02
	Média	1,12 ± 0,01	1,18 ± 0,01	1,32 ± 0,01	1,38 ± 0,01	1,41 ± 0,01	1,45 ± 0,01

⁽¹⁾ T₁ = 0; T₂ = uma passada de trator de 4 t no conteúdo de água no solo de 0,17 kg kg⁻¹; e T₃ = 1, T₄ = 2, T₅ = 4 e T₆ = seis passadas de um trator de 11 t no mesmo local, no conteúdo de água no solo de 0,22 kg kg⁻¹. ⁽²⁾ Erro-padrão da média. ⁽³⁾ Determinada no conteúdo de água retida na capacidade de campo (tensão de 0,01 MPa; ± 0,28 kg kg⁻¹).

na fase vegetativa, necessitando de menos água, comparado à fase reprodutiva, em que o déficit hídrico causa decréscimos acentuados de produção.

O desdobramento da interação compactação x irrigação permitiu verificar que houve maior produtividade de soja no cultivo irrigado no T_5 - T_6 , comparado ao cultivo de sequeiro (Figura 2). Nos cultivos de sequeiro e irrigado, a produtividade de soja diminuiu a partir da RP de 1,30 e 1,64 MPa e da Ds de 1,26 e 1,29 kg dm^{-3} , respectivamente. Isso refletiu em perdas de 19,15 % de produtividade de grãos no cultivo de sequeiro, comparado a 11,71 % no cultivo irrigado, no maior nível de compactação (T_6 ; RP = 2,84 MPa; Ds = 1,45 kg dm^{-3}).

Em relação à aeração, são necessários valores de macroporosidade (poros > 50 μm) > 0,10 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ para que não ocorra restrição à respiração das raízes das plantas (Greenland, 1981). De fato, a partir do T_4 ocorreu macroporosidade < 0,10 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ e decréscimo de produtividade, no cultivo de sequeiro (Quadro 2, Figura 2). Por sua vez, no cultivo irrigado, a produtividade foi semelhante, com valores de macroporosidade variando de 0,11 a 0,07 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ (T_3 - T_5), corroborando os resultados de Micucci & Taboada (2006). Estes autores verificaram que as raízes de soja cresceram em valores de macroporosidade consideravelmente menores que 0,10 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, em razão da capacidade das raízes de aumentarem o diâmetro de poros durante o seu crescimento, ou quebrarem agregados do solo, quando neste prevalece condição adequada de umidade. Nesse contexto, McQueen & Shepherd (2002) sugerem valor mínimo de macroporosidade de 0,05 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ em solos pouco drenados.

Estudos sobre difusão de oxigênio no solo indicam que a sua aeração é restritiva quando a porosidade de aeração do solo atinge valores < 0,10 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, pois diminui a difusão de oxigênio e as trocas gasosas no solo em níveis insuficientes para suprir a demanda radicular, causando prejuízos ao seu funcionamento e crescimento das plantas (Grable & Siemer, 1968). Todavia, Feng et al. (2002) verificaram que esse valor deve ser maior em solos mais argilosos, para que ocorra adequado suprimento de oxigênio às plantas. Silva et al. (2004) constataram que o crescimento de plantas de milho começou a decrescer a partir da porosidade de aeração de 0,25 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, porém de forma mais acentuada a partir de 0,10 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$.

Entretanto, de forma geral, são aceitos e adotados valores de porosidade de aeração < 0,10 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ como restritivos ao desenvolvimento radicular para a maioria das culturas (Benjamim et al., 2003; Lapen et al., 2004). Verificou-se que o T_5 e o T_6 permaneceram inúmeros dias com a porosidade de aeração abaixo de 0,10 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, resultando num valor médio de 0,13 e 0,11, e de 0,12 e 0,10 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ no T_5 e T_6 , nos cultivos de sequeiro e irrigado, respectivamente (Figura 3). No entanto, convém destacar que, no cultivo irrigado, o decréscimo de produtividade de soja até o T_5 foi pequeno e do T_5 ao T_6 ocorreu severo decréscimo. Isso possivelmente ocorreu devido à maior deficiência de aeração no T_6 em relação ao T_5 , na segunda quinzena de janeiro e no início de fevereiro, em que ocorreram as três irrigações (Figura 1), período responsável pelas diferenças entre o sistema de cultivo de sequeiro e o irrigado, em conformidade com Lapen et al. (2004). Esses autores verificaram que a baixa porosidade de

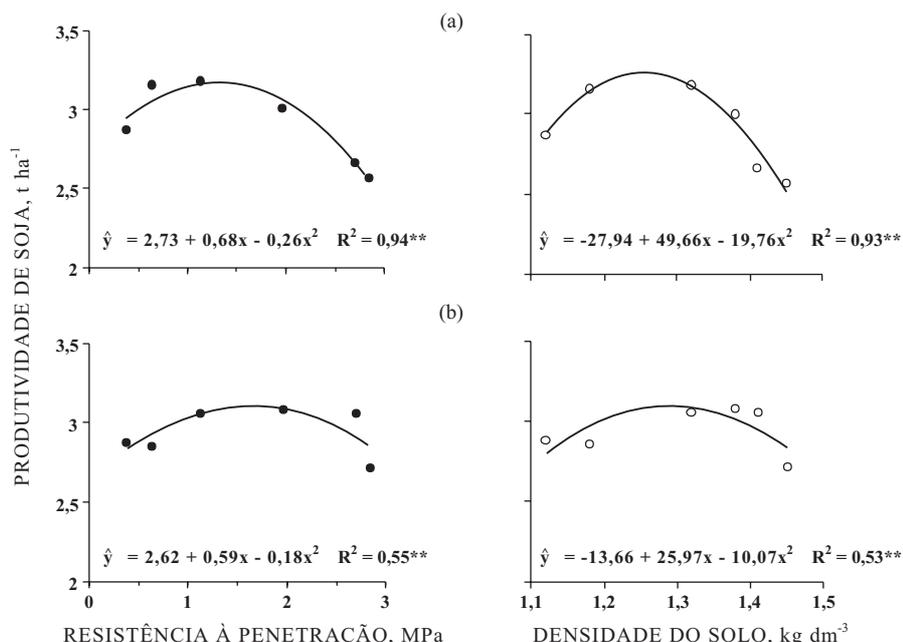


Figura 2. Equações de regressão da produtividade de soja em função da resistência à penetração e a densidade do solo, em cultivos de sequeiro (a) e irrigado (b), em Latossolo Vermelho eutroférico. ****** F significativo a 1 %.

aeração por determinados períodos de tempo foi o fator determinante da menor produtividade de milho, sendo mais expressiva que a RP. Esses autores comprovaram ainda que a variabilidade da produtividade de milho esteve associada à quantidade de dias em que as plantas ficaram abaixo da porosidade de aeração mínima.

Em condições de deficiência de aeração, o menor desenvolvimento vegetativo é atribuído a algumas alterações nas plantas. Segundo Drew (1983), na deficiência de aeração às raízes ocorre redução do crescimento da parte aérea, devido à redução de auxinas, giberelinas e citoquininas, e acumulação de etileno e ácido abscísico. Ainda, há inibição na absorção e transporte de nutrientes em razão do menor crescimento radicular e da ineficiência da respiração anaeróbica em fornecer energia para absorção ativa de íons e em aumentar a permeabilidade da membrana das células das raízes.

A RP (na capacidade de campo), atributo em geral inversamente relacionado ao crescimento das plantas, foi limitante à produtividade de soja a partir de 1,30 e 1,64 MPa para a condição de cultivo de sequeiro e irrigado, respectivamente (Figura 2). Isso ocorreu pelo fato de que no cultivo de sequeiro o solo permaneceu vários dias com baixo conteúdo de água e alguns

abaixo do PMP, na camada de 0–20 cm, condição em que a RP das raízes é maior, visto que esta tem relação inversa com o conteúdo de água no solo (Benjamin et al., 2003). Esses valores são inferiores ao valor de 2,0 MPa encontrado na literatura como severamente restritivo ao crescimento radicular e à produtividade de culturas anuais (Taylor et al., 1966; Benjamin et al., 2003). Contudo, na hipótese de considerar o valor de 2,0 MPa, adotado na literatura como crítico, a produtividade de soja seria 3,92 e 0,75 % menor para condição de sequeiro e irrigado, respectivamente. O maior decréscimo de produtividade da soja em sequeiro, comparado ao cultivo irrigado, está relacionado à elevada RP (Figura 4). Em solos com elevada RP, segundo Beutler et al. (2004) e Cardoso et al. (2006), há redução da profundidade do sistema radicular da soja, o qual se concentra na camada de 0–5 cm, na qual ocorrem menores conteúdos de água e, conseqüentemente, menor absorção de água e nutrientes, refletindo em decréscimo de produtividade. Resultados similares, em estudo de mesma natureza, foram encontrados por Beutler et al. (2005), que obtiveram valor limitante de RP de 0,85 MPa para produtividade de soja de sequeiro, em Latossolo Vermelho de textura média, e decréscimo de 5,18 % de produtividade até a RP de 2,0 MPa.

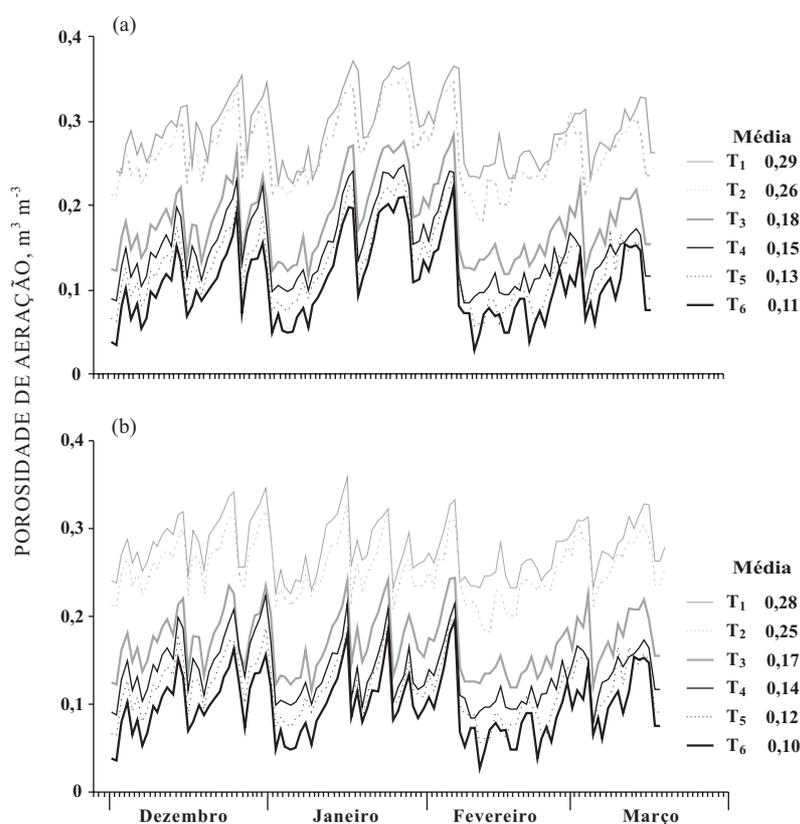


Figura 3. Porosidade de aeração do solo durante o cultivo da soja em 2005/06, sequeiro (a) e irrigado (b), na camada de 0–20 cm, em Latossolo Vermelho eutroférico. Porosidade de aeração limitante de 0,10 m³ m⁻³.

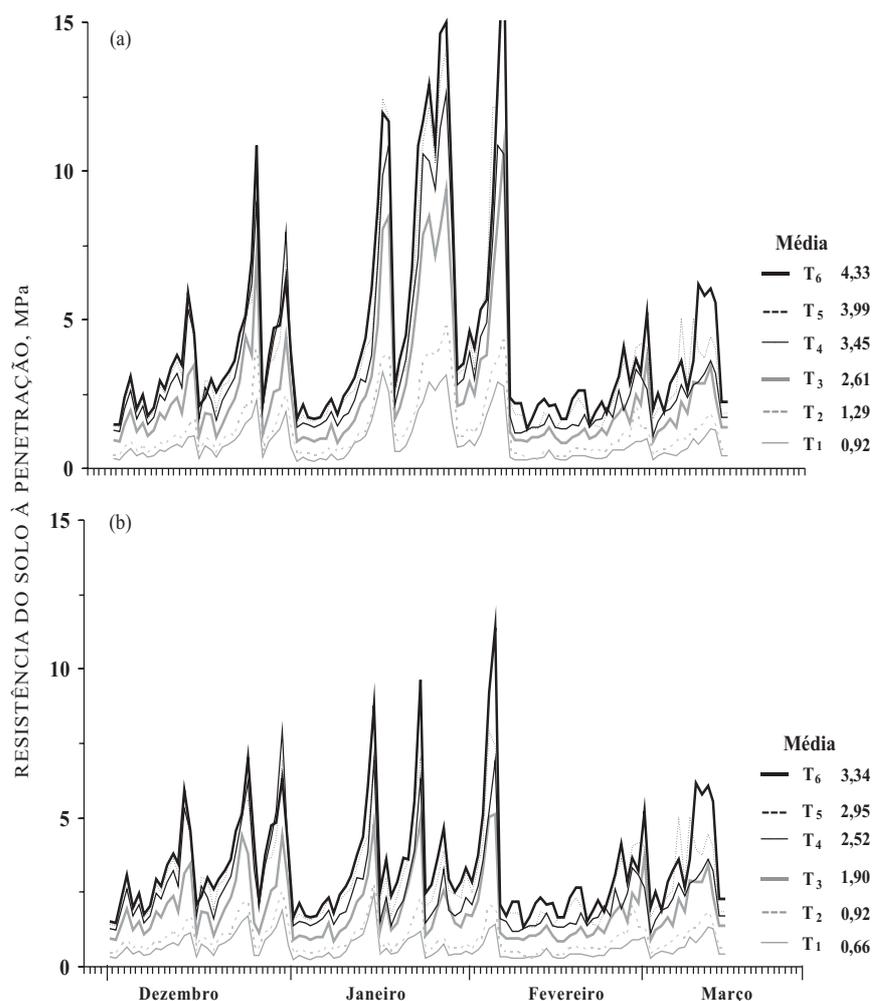


Figura 4. Resistência do solo à penetração durante o cultivo da soja em 2005/06, sequeiro (a) e irrigado (b), na camada de 0-20 cm, em Latossolo Vermelho eutroférico.

O decréscimo de produtividade em função da excessiva RP é desencadeado por diversas razões, entre as quais: redução do comprimento e da distribuição do sistema radicular; redução da absorção de água e nutrientes pelas raízes (Lipiec & Stepniewski, 1995); aumento da produção e concentração de ácido abscísico nas raízes e envio à parte aérea, induzindo a planta a diminuir seu crescimento (Mulholland et al., 1996); e maior demanda de carboidratos pelas raízes, resultando em menor alocação para a parte aérea (Tubieleh et al., 2003).

A Ds limitou a produtividade a partir de 1,26 e 1,29 kg dm⁻³ para soja cultivada em sequeiro e irrigado, respectivamente. Cardoso et al. (2006), também em Latossolo Vermelho muito argiloso, com macro e microporosidade semelhantes e em sistema plantio direto, observaram que a Ds de 1,32 kg dm⁻³ (camada de 0-25 m) não causou decréscimos significativos na produtividade de duas cultivares de soja. Segundo os autores, tal fato ocorreu devido à adequada disponibilidade de água, uma vez que verificaram maior concentração de raízes na camada

de 0-5 cm, menos compactada, em função da presença de uma camada mais compactada de 8-16 cm, que poderia causar decréscimos de produtividade em anos mais secos.

Por sua vez, do T₁ ao T₄, em que a compactação avaliada pela RP e a Ds foram menores, não houve diferença de produtividade entre soja cultivada em sequeiro e irrigada. Esse fato permite inferir que o déficit hídrico isolado não causou decréscimo de produtividade quando o solo estava pouco compactado, condição em que, segundo Cardoso et al. (2006), ocorre melhor distribuição do sistema radicular de soja.

O IHO, que integra a porosidade de aeração, RP e conteúdo de água, teve como limite inferior a θ_{RP} , que foi responsável pelo decréscimo do IHO com o aumento da Ds (Figura 5), corroborando estudos em solos de climas tropicais (Beutler et al., 2005; Leão et al., 2006) e temperados (Silva et al., 1994; Benjamim et al., 2003). Contudo, nos estudos em que são adotados valores de RP crítica de 2,0 MPa, o θ_{PMP} é limitante inicialmente, e depois a θ_{RP} torna-se redutor do IHO em sua maior extensão, até a $Ds_{c(IHO=0)}$.

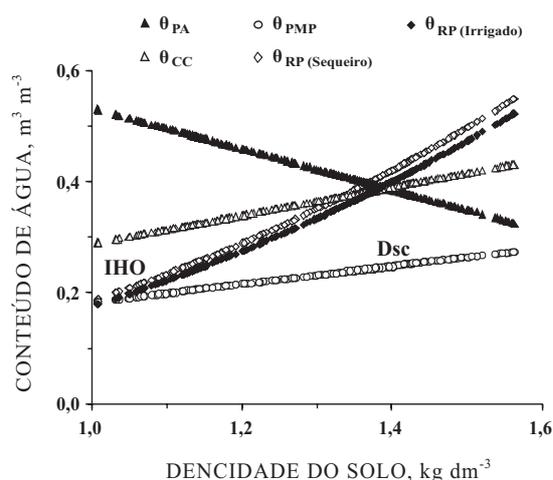


Figura 5. Limites críticos da porosidade de aeração (θ_{PA}), capacidade de campo (θ_{CC}), ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) e resistência à penetração (θ_{RP}) em função da Ds. IHO: intervalo hídrico ótimo. Dsc ($IHO = 0$): densidade do solo crítica.

O limite superior do IHO até a $Dsc_{(IHO = 0)}$ foi a θ_{CC} , conforme resultados de estudos em solos de clima tropical (Beutler et al., 2005; Leão et al., 2006). Por outro lado, a partir de pequena compactação, em solos de clima temperado a θ_{PA} é o limite superior, reduzindo o IHO juntamente com a θ_{RP} , devido ao aumento da compactação (Benjamin et al., 2003).

Em solos tropicais, conteúdos de água acima da capacidade de campo podem não limitar o crescimento das plantas, exceto quando não existe aeração mínima para crescimento delas. Por outro lado, o limite inferior de água às plantas pode representar fator significativo para o crescimento delas e causar decréscimos de produtividade de soja quando atingir valores inferiores a θ_{RP} , conforme também verificado por Beutler et al. (2005).

Na avaliação do IHO no monitoramento da qualidade física para soja nos cultivos de sequeiro e irrigado, foram inseridos os valores de RP de 1,30 e 1,64 MPa, obtidos no campo, como limitantes para produtividade de soja. Em ambos os casos, a θ_{RP} diminuiu o IHO até atingir a $Dsc_{(IHO = 0)}$ o valor zero, quando o risco é de 100 % de as plantas serem expostas a condições adversas ao crescimento. A $Dsc_{(IHO = 0)}$ foi de 1,33 e 1,38 $kg\ dm^{-3}$ para a soja cultivada em sequeiro e irrigada, respectivamente, representando 3,23 e 2,68 % de perda de produtividade de soja se fosse utilizado o valor de $Dsc_{(IHO = 0)}$ como valor crítico da produtividade. Em estudo de mesma natureza, Beutler et al. (2005), em Latossolo Vermelho de textura média, verificaram que a $Dsc_{(IHO = 0)}$ de 1,48 $kg\ dm^{-3}$ foi o mesmo valor de Ds a partir da qual a produtividade de soja começou a decrescer no campo.

CONCLUSÕES

1. O intervalo hídrico ótimo é eficiente no monitoramento da compactação e da qualidade física do solo para soja em cultivos de sequeiro e irrigado.

2. A compactação excessiva do solo provoca decréscimo de produtividade de soja a partir da resistência à penetração de 1,30 e 1,64 MPa e da densidade do solo de 1,26 e 1,29 $kg\ dm^{-3}$, em Latossolo Vermelho eutroférico muito argiloso.

3. A soja em cultivo irrigado tolera maiores níveis de compactação.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, pela concessão de bolsa de Pós-Doutorado ao primeiro e último autor e ao CNPq pela concessão de bolsa ao segundo autor.

LITERATURA CITADA

- AGRIANUAL 2006: anuário da agricultura brasileira. São Paulo, FNP Consultoria e Comércio, 2006. p.433-468.
- BENJAMIN, J.G.; NIELSEN, D.C. & VIGIL, M.F. Quantifying effects of soil conditions on plant growth and crop production. *Geoderma*, 116:137-148, 2003.
- BEUTLER, A.N. & CENTURION, J.F. Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja. *Pesq. Agropec. Bras.*, 39:581-588, 2004.
- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F. & SILVA, A.P. Soil resistance to penetration and least limiting water range for soybean yield in a haplustox from Brazil. *Braz. Arch. Biol. Technol.*, 48:863-871, 2005.
- BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 33:519-524, 1990.
- CARDOSO, E.G.; ZOTARELLI, L.; PICCININ, J.L.; TORRES, E.; SARAIVA, O.F. & GUIMARÃES, M.F. Sistema radicular da soja em função da compactação do solo no sistema plantio direto. *Pesq. Agropec. Bras.*, 41:493-501, 2006.
- COLLIS-GEORGE, N. Relationship between air and water permeabilities in porous media. *Soil Sci.*, 76:239-250, 1953.
- DORAN, J.W. & PARKIN, R.B. Defining soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F. & STEWART, B.A. (eds.) *Defining soil quality for a sustainable environment*. Madison, W: ASA/CCSA/SSSA, 1994. p.3-21. (SSSA Special, 35)

- DREW, M.C. Plant injury and adaptation to oxygen deficiency in the root environment. *Plant Soil*, 75:179-199, 1983.
- FEHR, W.R.; GAVINESS, C.E.; BURMOOD, D.T. & PENNINGTON, J.S. Stage of development description for soybeans (*Glycine max* (L.) Merrill). *Crop Sci.*, 11:929-931, 1971.
- FENG, G.; WU, L. & LETEY, J. Evaluating aeration criteria by simultaneous measurement of oxygen diffusion rate and soil-water regime. *Soil Sci.*, 197:495-503, 2002.
- GRABLE, A.R. & SIEMER, E.G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 32:180-186, 1968.
- GREENLAND, D.J. Soil management and soil degradation. *J. Soil Sci.*, 32:301-322, 1981.
- LAPEN, D.R.; TOPP, G.C.; GREGORICH, E.G. & CURNOE, W.E. Least limiting water range indicator of soil quality and corn production, eastern Ontario, Canada. *Soil Till. Res.*, 78:151-170, 2004.
- LEÃO, T.P.; SILVA, A.P.; MACEDO, M.C.M.; IMHOFF, S. & EUCLIDES, V.P.B. Least limiting water range: A potential indicator of changes in near-surface soil physical quality after the conversion of Brazilian Savanna into pasture. *Soil Till. Res.*, 88:279-285, 2006.
- LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. *Adv. Soil Sci.*, 1: 277-294, 1985.
- LIPIEC, J. & STEPNIIEWSKI, W. Effects of soil compaction and tillage systems on uptake and losses of nutrients. *Soil Till. Res.*, 35:37-52-1995.
- MCQUEEN, D.J. & SHEPHERD, T.J. Physical changes and compaction sensitivity of a fine-textured, poorly drained soil (Typic Endoaquept) under varying durations of cropping Manawatu Region, New Zealand. *Soil Till. Res.*, 63:93-107, 2002.
- MICUCCI, G.F. & TABOADA, M.A. Soil physical properties and soybean (*Glycine max*, Merrill) root abundance in conventionally and zero-tilled soils in the humid Pampas of Argentina. *Soil Till. Res.*, 86:152-162, 2006.
- MULHOLLAND, B.J.; BLACK, C.R.; TAYLOR, I.B; ROBERTS, J.A. & LENTON, J.R. Effect of soil compaction on barley (*Hordeum vulgare* L.) growth. I. Possible role for ABA as a root-sourced chemical signal. *J. Exper. Bot.*, 47:539-549, 1996.
- RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.H. & FURLANI, A.M.C. Recomendação de adubação e calagem para o estado de São Paulo. 2.ed. Campinas, Instituto Agrônomo & Fundação IAC, 1996. 285 p. (Boletim Técnico, 100).
- REICHARDT, K. Capacidade de campo. *R. Bras. Ci. Solo*, 12:211-216, 1988.
- REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. & BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. *Ci. Ambiente*, 27:29-48, 2003.
- SAS/SAS/STAT: Procedure guide for personal computers. Version 5. Cary, 1998. 1042p.
- SAVAGE, M.J.; RITCHIE, J.T.; LAND, W.L. & DUGAS, W.A. Lower limit of soil water available. *Agron. J.*, 88:651-844, 1996.
- SILVA, A.P.; IMHOFF, S. & KAY, B. Plant response to mechanical resistance and air-filled porosity of soils under conventional and no-tillage system. *Sci. Agric.*, 61:451-456, 2004.
- SILVA, A.P.; KAY, B.D. & PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58:1775-1781, 1994.
- TAYLOR, H.M.; ROBERSON, G.M. & PARKER Jr., J.J. Soil strength-root penetration relations to medium to coarse-textured soil materials. *Soil Sci.*, 102:18-22, 1966.
- TUBEILEH, A.; GROLEAU-RENAUD, V.; PLANTUREUX, S. & GUCKERT, A. Effect of soil compaction on photosynthesis and carbon partitioning within a maize-soil system. *Soil Till. Res.*, 71:151-161, 2003.