



Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Arroz e Feijão
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

ISSN 1678-9644

Novembro, 2006

Documentos 191

Atributos físico-hídricos do solo sob plantio direto

Luís Fernando Stone
Pedro Marques da Silveira
José Aloísio Alves Moreira

Santo Antônio de Goiás, GO
2006

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Arroz e Feijão

Rod. GO 462, Km 12
Caixa Postal 179
75375-000 Santo Antônio de Goiás, GO
Fone: (0xx62) 3533 2100
Fax: (0xx62) 3533 2123
sac@cnpaf.embrapa.br
www.cnpaf.embrapa.br

Comitê de Publicações

Presidente: *Carlos Agustín Rava*
Secretário: *Luiz Roberto Rocha da Silva*

Supervisor editorial: *Marina A. Souza de Oliveira*
Normalização bibliográfica: *Ana Lúcia D. de Faria*
Revisão de texto: *Marina A. Souza de Oliveira*
Capa: *Denise Xavier Lemes*
Editoração eletrônica: *Fabiano Severino*

1ª edição

1ª impressão (2006): 500 exemplares

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Embrapa Arroz e Feijão

Stone, Luís Fernando.

Atributos físico-hídricos do solo sob plantio direto / Luís Fernando Stone, Pedro Marques da Silveira, José Aloísio Alves Moreira. - Santo Antônio de Goiás : Embrapa Arroz e Feijão, 2006.

39 p. – (Documentos / Embrapa Arroz e Feijão, ISSN 1516-7518 ; 191)

1. Solo – Porosidade. 2. Compactação do Solo. 3. Manejo do Solo. I. Silveira, Pedro Marques da. II. Moreira, José Aloísio Alves. III. Título. IV. Embrapa Arroz e Feijão. V. Série.

CDD 631.4 (21. ed.)

© Embrapa 2006

Autores

Luis Fernando Stone

Engenheiro Agrônomo,
Doutor em Solos e Nutrição de Plantas
Embrapa Arroz e Feijão
Rod. GO 462, Km 12
75375-000 Santo Antônio de Goiás - GO
stone@cnpaf.embrapa.br

Pedro Marques da Silveira

Engenheiro Agrônomo,
Doutor em Solos e Nutrição de Plantas
Embrapa Arroz e Feijão
pmarques@cnpaf.embrapa.br

José Aloisio Alves Moreira

Engenheiro Agrônomo, Doutor em
Irrigação e Drenagem
Embrapa Arroz e Feijão
jaloisio@cnpaf.embrapa.br

Apresentação

A compactação do solo, devido ao seu manejo inadequado, é um problema mundial. Embora o seu impacto econômico seja difícil de ser medido, pelo envolvimento de um grande número de fatores, a redução de produtividade é relatada como sendo entre 10% e 50%.

O sistema plantio direto tem sido adotado pelos agricultores como forma de proteger o ambiente e dar sustentabilidade à exploração agrícola. Apesar dos seus benefícios, de sua ampla difusão na região Sul do Brasil e do seu rápido avanço para as regiões do cerrado brasileiro, há relatos que indicam um aumento do estado de compactação dos solos submetidos a esse sistema.

Como não há movimentação do solo, a compactação é um processo inerente ao sistema plantio direto e, portanto, sempre será observada com maior ou menor intensidade. Entretanto, esse sistema possui características que podem ser maximizadas com vistas a reduzir o processo de compactação e suas conseqüências. Dentre essas, destaca-se a contínua adição superficial de resíduos vegetais, que formam uma cobertura morta e enriquecem as camadas superficiais com matéria orgânica.

Neste documento são discutidos os efeitos da compactação sobre os atributos físico-hídricos do solo e a influência do sistema plantio direto nesses atributos, considerando a não-mobilização do solo e o aporte de material orgânico pelo sistema.

Beatriz da Silveira Pinheiro
Chefe-Geral da Embrapa Arroz e Feijão

Sumário

Introdução	9
Efeitos da Compactação do Solo	11
Sistema Plantio Direto e os Atributos Físico-hídricos do Solo	14
Efeitos do não-revolvimento do solo	14
O papel do material orgânico	18
Referências bibliográficas	26

Atributos Físico-hídricos do Solo sob Plantio Direto

Luís Fernando Stone

Pedro Marques da Silveira

José Aloísio Alves Moreira

Introdução

O arranjo das partículas do solo estabelece as proporções dos componentes sólidos, líquidos e gasosos, determinando a resistência à penetração das raízes e o fornecimento de água e oxigênio. A organização desses componentes determina a estrutura do solo (Kay, 1990), a qual controla a magnitude com que os seus atributos físicos interferem diretamente no crescimento das plantas. A dependência e a inter-relação entre disponibilidade de água, aeração e resistência à penetração dificultam o estabelecimento de um nível ótimo desses em relação à produtividade das culturas (Letey, 1985). A estrutura ideal do solo é aquela que possibilita uma grande área de contato raiz-solo, suficiente espaço poroso para o movimento de água e gases, além de pouca resistência do solo à penetração das raízes (Koppi & Douglas, 1991).

De maneira geral, condições físicas do solo favoráveis ao crescimento das plantas têm sido associadas com uma porosidade de aeração mínima de 10% (Dexter, 1988; Glinski & Lipiec, 1990; Bowen et al., 1996), abaixo da qual a difusão de oxigênio torna-se limitante ao funcionamento das raízes. Um valor de resistência do solo à penetração das raízes de 2,0 MPa tem sido comumente associado como impeditivo para o crescimento das raízes (Taylor et al., 1966) e da parte aérea das plantas (Tardieu, 1994; Weaich et al., 1996). No entanto, esse valor é muito sensível à condição estrutural do solo (Ehlers et al., 1983; Hamblin, 1985; Stirzaker et al., 1996). A disponibilidade de água é mais frequentemente utilizada como indicador da

qualidade física do solo, mas adiciona apenas o efeito do potencial da água no solo como limitação ao crescimento radicular. Num solo compactado, a taxa de difusão de oxigênio pode limitar o crescimento radicular em potenciais menores ou iguais à “capacidade de campo” (Eavis, 1972), enquanto a excessiva resistência à penetração pode limitar o crescimento das raízes sob condições mais secas.

O uso intensivo de terras agricultáveis para a produção vegetal e animal tem causado deformação e degradação irreversível do solo e é um problema mundial que tem aumentado devido ao crescente aumento da massa das máquinas agrícolas e frequência de tráfego. Especialmente durante condições de solo úmido, o risco de intensa compactação do solo é uma das principais preocupações, pois tem grandes conseqüências econômicas e ecológicas.

O impacto econômico da compactação do solo é difícil de ser medido, devido ao envolvimento de um grande número de fatores, porém a redução de produtividade tem sido relatada como sendo entre 10% e 50%.

Na região do cerrado, os sistemas convencionais de manejo do solo promovem a diminuição da dinâmica da matéria orgânica e da atividade biológica, destruindo a naturalmente frágil condição estrutural dos solos tropicais e afetando seu comportamento e processos aí presentes, tendo como conseqüência a pulverização excessiva da camada arável, o encrostamento superficial e a formação de camadas coesas ou compactadas denominadas pé-de-grade ou pé-de-arado (Freitas, 1994). Como forma de proteger o ambiente e dar sustentabilidade à exploração agrícola, os agricultores têm adotado o sistema plantio direto (SPD). Baseado na ausência de movimentação do solo e na manutenção de resíduos orgânicos na superfície do solo, esse sistema provoca alterações na dinâmica da matéria orgânica e da atividade biológica, modificando, principalmente, os processos intrínsecos do solo, provocando alterações na estrutura e na dinâmica físico-hídrica do solo.

Apesar dos benefícios oriundos do SPD, de sua ampla difusão na região Sul do Brasil e de seu rápido avanço para as regiões do cerrado brasileiro (Hernani & Salton, 1998), há trabalhos que indicam um aumento do estado de compactação dos solos submetidos a esse sistema (Håkansson et al., 1988; Reinert, 1990; Derpsch et al., 1991; Tormena & Roloff, 1996; Tormena et al., 1998a; Secco, 2003; Silva, 2003).

A compactação do solo é um processo inerente ao SPD e, portanto, sempre será observada com maior ou menor intensidade. Entretanto, esse sistema possui características que podem ser maximizadas com vistas a reduzir o processo de compactação e suas conseqüências. Dentre essas, destaca-se a contínua adição superficial de resíduos vegetais, que formam uma cobertura morta e enriquecem as camadas superficiais com matéria orgânica.

A matéria orgânica tem grande influência sobre o comportamento físico do solo, quando submetido a tráfego; ela diminui a densidade e o grau de compactação; por outro lado, aumenta a porosidade e, em algum grau, o espaço aéreo do solo, quando o mesmo é submetido à compactação pelo trânsito de máquinas (Arvidsson, 1998). Como conseqüência, para um mesmo nível de tráfego, a produtividade é maior nos solos com maiores teores de matéria orgânica.

Assim, com o passar dos anos, a densidade do solo sob plantio direto pode diminuir, devido, em parte, ao aumento do teor de matéria orgânica na camada superficial, melhorando a estrutura do solo (Fernandes et al., 1983; Voorhees & Lindstrom, 1984; Reeves, 1995).

Este documento se propõe a discutir a influência do sistema plantio direto nos atributos físico-hídricos do solo, considerando a sua não-mobilização e o aporte de material orgânico pelo sistema.

Efeitos da Compactação do Solo

Com a aplicação de cargas ao solo, ocorre sua compactação, resultando em modificações na sua estrutura, com aumento da densidade e da resistência à penetração, redução da porosidade total e alteração na distribuição do tamanho de poros, com aumento dos microporos e redução dos macroporos (Tabela 1), ou porosidade de aeração (poros maiores que 50 μm), além de afetar diversos atributos do solo, como a condutividade hidráulica (Figura 1), permeabilidade do solo, infiltração de água e outras características ligadas à porosidade (Tormena & Roloff, 1996; Beutler et al., 2001; Stone et al., 2002). Essas alterações físicas, provocadas pela compactação, afetam o fluxo ou a concentração de água, oxigênio, dióxido de carbono, nutrientes e temperatura, que podem limitar o crescimento e desenvolvimento das plantas (Figura 2) e causar problemas ambientais (Guimarães et al., 2002; Stepniewski et al., 2002). A compactação

do solo, ao reduzir a infiltração de água, aumenta o risco de erosão e de déficit hídrico e nutricional das plantas, fazendo com que as raízes se desenvolvam na superfície (Rosolem et al., 1994; Moraes et al., 1995). Em função disso, a compactação do solo tem provocado perda de sua produtividade, levando-o à degradação.

Håkansson & Voorhees (1997) consideraram a intensidade do tráfego e as características da máquina (massa, carga por eixo, tipo de pneus e pressão de inflação) como as principais causas da compactação dos solos agrícolas. O processo de compactação é influenciado, ainda, pela matéria orgânica (Stone & Ekwue, 1995), pela estrutura (Horn et al., 1995), pelo teor de água (Reinert, 1990; Dias Júnior, 1994; Kondo & Dias Júnior, 1999a, 1999b) e pela densidade do solo (Reinert, 1990; Carpenedo, 1994).

Tabela 1. Porosidade e resistência do solo à penetração em relação à densidade do solo.

Densidade do solo (Mg m ⁻³)	Porosidade (m ³ m ⁻³)			Resistência do solo à penetração (MPa)
	Total	Macro	Micro	
1,0	0,625	0,288	0,337	0,1
1,2	0,550	0,220	0,330	1,0
1,4	0,476	0,131	0,345	1,7
1,6	0,401	0,036	0,365	6,1

Fonte: Stone et al. (2002).

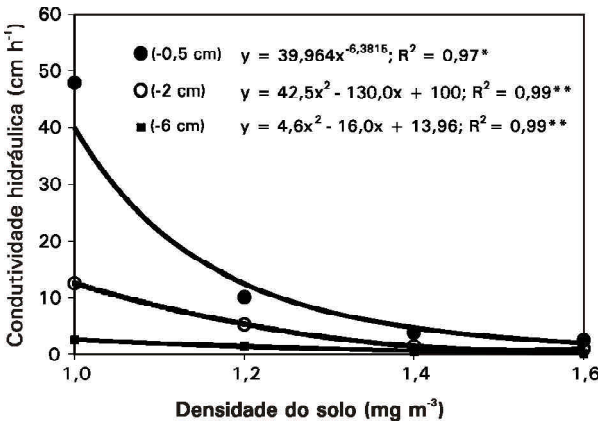


Fig. 1. Condutividade hidráulica do solo determinada sob diferentes cargas de pressão, em função da densidade do solo.

Fonte: Stone et al. (2002).

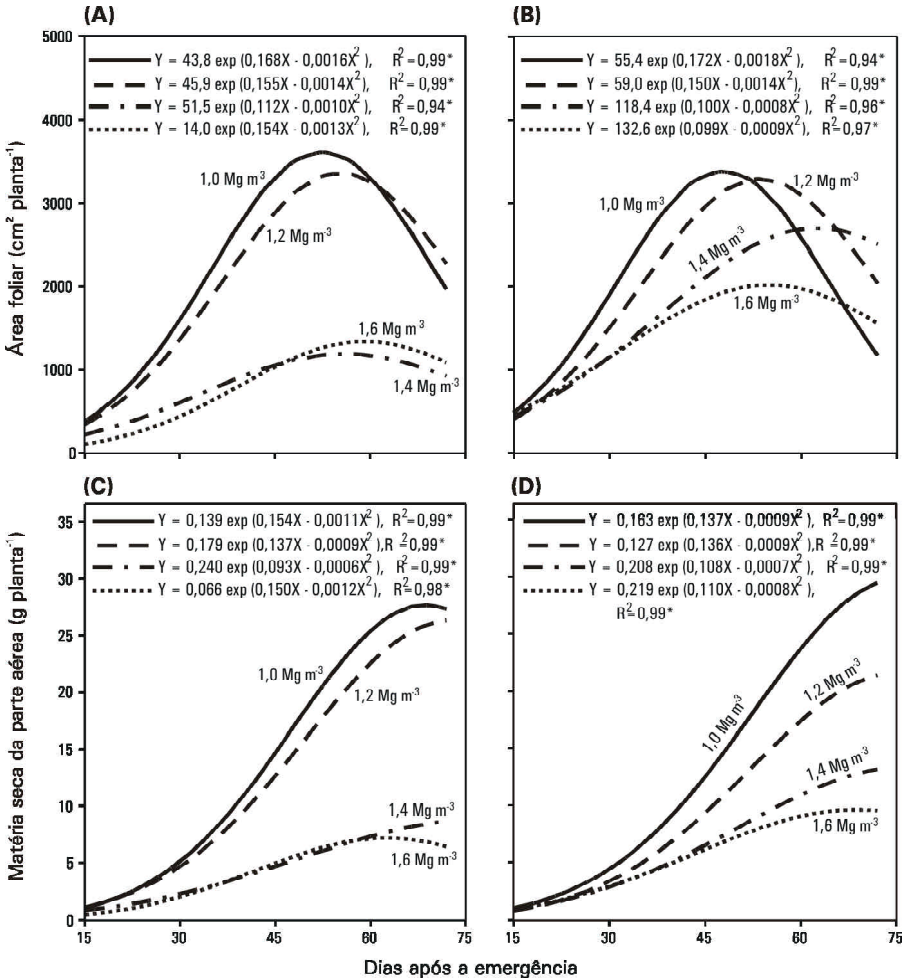


Fig. 2. Área foliar e massa da matéria seca da parte aérea das cultivares de feijão Pérola (A, C) e BAT 477 (B, D), submetidas a quatro níveis de densidade do solo, na camada superficial.

Fonte: Guimarães et al. (2002).

Em sistemas integrados de produção de grãos e carne, também há a preocupação com a compactação do solo. A carga animal em áreas sob pastejo afeta a condição física do solo, podendo aumentar a densidade do solo (Mapfumo et al., 1999; Rodd et al., 1999) e a resistência à penetração (Mapfumo et al., 1999),

mas não necessariamente (Abdel-Magid et al., 1987). A umidade do solo e a quantidade de cobertura são variáveis que definem as alterações nos atributos físicos provocadas pelo pisoteio animal (Silva et al., 2003). Um solo de textura franca, que recebeu pisoteio contínuo no inverno com carga animal variando de 1000 a 1500 kg ha⁻¹, não apresentou valores de macroporosidade e densidade do solo que indicassem restrição ao crescimento vegetal. Entretanto, quando foi utilizada alta carga animal, observou-se aumento da densidade do solo e redução da aeração e infiltração da água no solo (Silva et al., 2000).

Sistema Plantio Direto e os Atributos Físico-hídricos do Solo

O SPD fundamenta-se na ausência de revolvimento do solo, em sua cobertura permanente e na rotação de culturas. A não-mobilização do solo favorece o acúmulo de material orgânico pela sua menor taxa de decomposição e menores perdas por erosão. Esses dois fatores, não-revolvimento e acúmulo de matéria orgânica, provocam alterações nos atributos físico-hídricos do solo.

Efeitos do não-revolvimento do solo

Nas condições do cerrado, o solo sob plantio direto apresenta maior densidade, menores macroporosidade e porosidade total (Tabelas 2 e 3) (Urchei et al., 1996; Silveira et al., 1999; Stone & Silveira, 2001, 2004) e maior resistência à penetração (Stone & Silveira, 1999) que o sob preparo convencional (Figura 3). Entretanto, o fato de não haver mobilização do solo contribui para sua maior agregação (Tabela 3), expressa pela porcentagem de agregados maiores que 2 mm e pelo diâmetro médio ponderado dos agregados (Stone & Silveira, 2004).

Esse estado diferenciado de compactação era de se esperar, pois, como não há o revolvimento do solo, as pressões causadas pelo tráfego de máquinas e/ou animais e acomodação natural das partículas (Carvalho Júnior et al., 1998) elevam o estado de compactação do solo. Essa compactação pode atingir níveis prejudiciais ao desenvolvimento das plantas e à produção das culturas (Peña et al., 1996; Tormena et al., 1998a). Segundo Carpenedo (1994), as pressões médias normalmente aplicadas sobre a superfície do solo pelos pneus de tratores e colhedoras estão entre 100 e 200 kPa, enquanto as carretas agrícolas exercem pressões que, dependendo da carga, podem chegar a valores próximos de

600 kPa. A pressão máxima sobre o solo é entre duas a três vezes a pressão de inflação dos pneus (Larson & Gill, 1973). Quando a pressão interna do pneu é de 108 kPa, a pressão no solo corresponderá a faixa de 216 a 324 kPa, o que é maior que a tensão de cisalhamento de muitos solos em uma tensão de água de 33 kPa. A resistência ao cisalhamento normalmente é definida como a resistência que o solo oferece para ocorrer uma nova deformação.

Tabela 2. Valores da densidade do solo, porosidade total, microporosidade e macroporosidade nas camadas de solo de 0-10 e 10-20 cm de profundidade, em três sistemas de preparo do solo.

Atributos físicos do solo	Sistemas de preparo do solo ¹		
	Arado	Grade	Plantio direto
	----- 0 – 10 cm -----		
Densidade do solo (Mg m ⁻³)	1,30b	1,24c	1,39a
Porosidade total (m ³ m ⁻³)	0,505c	0,532a	0,469d
Microporosidade (m ³ m ⁻³)	0,336c	0,364ab	0,372a
Macroporosidade (m ³ m ⁻³)	0,168a	0,168a	0,098b
	----- 10 – 20 cm -----		
Densidade do solo (Mg m ⁻³)	1,35b	1,43a	1,44a
Porosidade total (m ³ m ⁻³)	0,482a	0,448b	0,440b
Microporosidade (m ³ m ⁻³)	0,368	0,373	0,371
Macroporosidade (m ³ m ⁻³)	0,114a	0,075bc	0,069c

¹Valores seguidos pela mesma letra na linha não diferem pelo teste de Tukey a 5 %.

Fonte: Adaptada de Stone & Silveira (2001).

Tabela 3. Atributos físicos do solo afetados pelo sistema de preparo do solo.

Sistema de preparo	Atributos físicos ¹					
	Ds (Mg m ⁻³)	mp (m ³ m ⁻³)	Mp (m ³ m ⁻³)	P (m ³ m ⁻³)	Agreg > 2mm (%)	DMPA (mm)
	----- 0 – 10 cm -----					
PD anual ²	1,35b	0,307a	0,176a	0,483a	45,2b	2,621b
PD contínuo	1,47a	0,334a	0,094b	0,427b	66,2a	3,538a
	----- 10 – 20 cm -----					
PD anual	1,44b	0,327a	0,116a	0,444a	39,0b	2,371b
PD contínuo	1,55a	0,335a	0,073b	0,408b	57,3a	3,177a

¹Valores seguidos pela mesma letra nas colunas e por profundidade não diferem pelo teste de Tukey a 5 %.

Ds = densidade do solo, mp = microporosidade, Mp = macroporosidade, P = porosidade total, Agreg > 2mm = agregados maiores que 2 mm e DMPA = diâmetro médio ponderado dos agregados.

²PD anual = sucessão anual de plantio direto na estação chuvosa e aração na estação seca, PD contínuo = plantio direto contínuo por quatro anos.

Fonte: Adaptada de Stone & Silveira (2004).

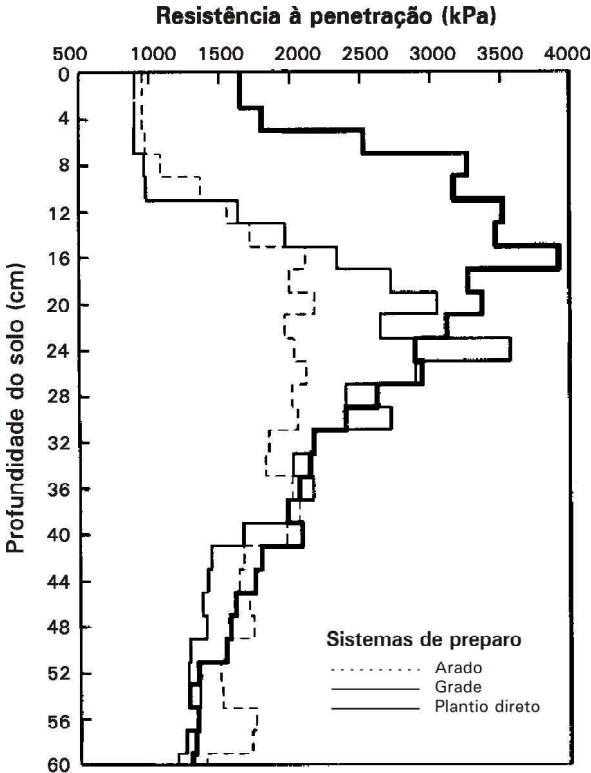


Fig. 3. Resistência do solo à penetração no perfil de 0 a 0,60 m, em três sistemas de preparo do solo, por ocasião do florescimento do feijoeiro. **Fonte:** Stone & Silveira (1999).

A compactação também pode causar modificações na retenção de água do solo, decorrentes de alterações sofridas na distribuição do diâmetro dos poros, principalmente redução da macroporosidade. O aumento da retenção de água no solo sob plantio direto tem sido observado por alguns autores (Salton & Mielniczuk, 1995; Urchei, 1996; Stone & Silveira, 1999). Todavia, a disponibilidade de água para as plantas vai depender do nível de compactação e da distribuição do diâmetro de poros resultante.

Um dos primeiros indicativos da ocorrência do processo de compactação é a redução do tamanho dos poros, haja vista que a macroporosidade se forma pela união de agregados grandes por forças eletrostáticas, pela atividade microbiana e crescimento de raízes. A estrutura do solo é modificada em função da compactação, sendo os macroagregados destruídos e, conseqüentemente, o solo apresenta uma estrutura maciça (Tavares Filho et al., 1999). Essa estrutura maciça

pode impedir o crescimento de raízes e diminuir o volume de solo explorado pelo sistema radicular. Entretanto, é possível que no SPD, devido ao sistema de poros mais estável, o limite de resistência à penetração seja superior àquele para sistemas convencionais de preparo do solo. De Maria et al. (1999) verificaram que maiores valores de resistência à penetração e densidade do solo não determinam, necessariamente, redução da densidade de raízes (cm de raiz por cm³ de solo) sob plantio direto. Tavares Filho et al. (2001) observaram que valores de resistência do solo à penetração apresentados na literatura como restritivos ao desenvolvimento radicular (1 a 3,5 MPa) não restringiram o do milho sob plantio direto ou convencional, tendo o SPD apresentado melhores condições de continuidade estrutural para o desenvolvimento radicular. Richter et al. (1990) observaram maior produção de raízes em culturas em plantio direto que no preparo convencional. No entanto, no plantio direto, a maior quantidade de raízes ficou concentrada nos primeiros 15 cm do solo. Stone & Silveira (1999) também constataram maior concentração de raízes do feijoeiro na camada até 20 cm no plantio direto em relação ao preparo do solo com arado. Silva et al. (2000) verificaram que o milho cultivado no SPD apresentou, na camada até 10 cm, maior densidade de raízes do que no sistema de preparo convencional de solo, enquanto que, na profundidade de 0 a 40 cm, o SPD apresentou menor densidade de raízes. Stone & Moreira (1998) também verificaram, sob plantio direto, considerando a profundidade de 0 a 60 cm, menor densidade radicular da cultivar Maravilha de arroz de terras altas, em relação a preparos que mobilizavam o solo.

No SPD, a combinação do efeito da palhada na superfície do solo e uma rede de macroporos contínuos em profundidade proporcionam um aumento da infiltração de água, quando comparado ao sistema convencional de preparo do solo. Mas, quando o sistema plantio direto é comparado com a condição natural, verifica-se que ainda há um decréscimo na quantidade de água infiltrada no solo (Kertzmann, 1996; Klein, 1998). Kertzmann (1996), utilizando cilindros duplos concêntricos, em Latossolo Roxo, encontrou que a taxa constante de infiltração em mata nativa foi de 1.396 mm h⁻¹ e na área com sistema plantio direto por 15 anos e cultivo intensivo com pouca cobertura morta foi de apenas 63 mm h⁻¹, demonstrando que, apesar de se utilizar o sistema plantio direto, houve uma drástica redução da infiltração, mais de 20 vezes, em função do manejo.

Outra consequência da eliminação do revolvimento é que, após alguns anos de cultivo no sistema, o solo adquire uma estrutura com resistência suficiente para suportar o tráfego sem apresentar compressibilidade significativa (Chaney et al.,

1985). A razão para isso é que essa “nova” estrutura se diferencia daquela de solos não cultivados, por apresentar agregados mais densos e resistentes e que estão mais próximos entre si. Contudo, quando a adoção do SPD ocorre depois que o solo já apresenta problemas, especialmente de degradação estrutural e redução do teor de matéria orgânica, a acomodação natural das partículas desestruturadas, associada à falta de matéria orgânica e de resíduos vegetais na superfície do solo e ao tráfego de máquinas e animais resulta, certamente, em compactação em níveis prejudiciais às plantas. Como consequência da compactação, a infiltração de água no solo pode ser reduzida e o escoamento superficial aumentado (Schäfer et al., 2001), havendo redução no desenvolvimento radicular e das plantas.

O papel do material orgânico

De maneira geral, observa-se que os maiores teores de matéria orgânica, observados em solos sob plantio direto, estão associados ao aumento na estabilidade dos agregados (Paladini & Mielniczuk, 1991; Campos et al., 1995), do armazenamento de água (Sidiras et al., 1984; Centurion & Demattê, 1985) e da capacidade de troca de cátions do solo (Bayer & Mielniczuk, 1997), com reflexos na produtividade das culturas (Arvidsson, 1998).

O acúmulo de material orgânico no SPD tem origem na inexistência de revolvimento do solo, que resulta em menores taxas de decomposição do material orgânico e em menores perdas por erosão. O material vegetal adicionado superficialmente decompõe mais lentamente quando não é incorporado ao solo, porque fica menos exposto aos microrganismos do solo. A matéria orgânica do solo também fica menos exposta ao ataque dos microrganismos, pois, sem o revolvimento, não há quebra das estruturas que a protegem fisicamente dos agentes decompositores. Assim, vários autores têm registrado aumentos nos teores de matéria orgânica da camada superficial de solos sob plantio direto (Centurion et al., 1985; Merten & Mielniczuk, 1991; Ismail et al., 1994; Bayer & Mielniczuk, 1997; Corazza et al., 1999; Amado et al., 2001).

Os materiais orgânicos podem atuar de duas formas na atenuação do processo de compactação ou seus efeitos: primeiro, quando na superfície do solo, por absorverem parte da pressão exercida pelas rodas de máquinas e/ou patas de animais; segundo, quando incorporados à matéria orgânica do solo, por aumentarem sua elasticidade e resistência à compactação, por aumentarem os limites de umidade em que o mesmo pode ser trabalhado mecanicamente e por

diminuirem a resistência à penetração das raízes quando o solo está seco (Ekwue, 1990; Soane, 1990; Zhang, 1994; Arvidsson, 1998; Mosaddeghi et al., 2000).

Segundo Soane (1990), a matéria orgânica pode interferir na resistência do solo à compactação mediante os seguintes efeitos: a) aumento da força de ligação entre partículas minerais, em função de sua natureza coloidal e comportamento molecular, com conseqüente aumento da estabilidade dos agregados, aumento da força de retenção de água, aumento da capacidade de troca catiônica, entre outros atributos; b) aumento da elasticidade do solo, uma vez que materiais orgânicos podem apresentar altos índices de relaxação quando uma carga aplicada sobre eles é retirada e, quando adicionados ao solo, transmitem a ele essa propriedade; c) diluição da densidade, já que a densidade dos materiais orgânicos é consideravelmente menor que a das partículas minerais do solo, logo a adição desses materiais ao solo resulta em uma mistura de menor densidade; d) filamentos, como hifas de fungos e raízes, entrelaçam partículas do solo, mantendo-as juntas; e) algumas substâncias orgânicas, ao recobrir partículas de argila, podem mudar sua carga elétrica e facilitar o fluxo de água entre elas; f) substâncias orgânicas, ao reter fortemente a água e, conseqüentemente, reduzir a curvatura dos meniscos formados entre as partículas e aumentar o número de pontos de contatos entre elas, podem aumentar a fricção entre as partículas minerais.

De acordo com Baumgartl & Horn (1991) e Horn et al. (1994), a resistência do solo tende a aumentar com o desenvolvimento de estrutura, uma vez que os parâmetros da resistência ao cisalhamento (coesão e ângulo de atrito interno) de agregados individuais são sempre maiores que os da massa do solo e, quanto mais agregado é o solo, mais negativa é a tensão capilar em um mesmo teor de água, e, portanto, menor é a atenuação da carga aplicada sobre o solo. Entretanto, solos recuperados por processos biológicos, em que as condições estruturais se aproximam das naturais, tendem a apresentar condições de elevada compressibilidade, uma vez que a agregação é acompanhada de um aumento da porosidade, em especial da macroporosidade (D'Agostini, 1992). Um solo com elevada macroporosidade é mais compressível, porque apresenta menor número de pontos de contato partícula-partícula para conferir resistência mecânica à tensão compressiva imposta (Macedo, 1993).

Essa aparente contradição é decorrente do fato de a matéria orgânica ter dois efeitos contrários sobre a resistência do solo: a) aumento da força de ligação entre as partículas minerais e b) mudança no arranjo das partículas (porosidade)

(Ekwue, 1990; Zhang, 1994). O balanço entre esses dois efeitos, que, por seu turno, depende da origem, estado de decomposição e status químico da matéria orgânica, irá determinar o efeito sobre a resistência do solo. De fato, a matéria orgânica pode aumentar ou reduzir a resistência do solo, dependendo do seu efeito conjunto sobre a densidade, os parâmetros de cisalhamento, a tensão capilar e o grau de saturação de água (Zhang et al., 1997). Quando predominam os efeitos de redução da densidade, por aumento da porosidade, a resistência à compressão diminui. Entretanto, a matéria orgânica produz aumento na resistência do solo à compressão, quando predomina o efeito de aumento dos parâmetros de cisalhamento, aumento da tensão capilar com aumento da coesão aparente e redução do efeito da água na redução da fricção entre partículas, redução da densidade por efeito de diluição e aumento da elasticidade.

A adoção de sistemas de rotação de culturas, em especial no SPD, tem sido preconizada para o manejo físico, químico e biológico do solo. Do ponto de vista da física do solo, tem-se estimulado a adoção da rotação para manter e/ou aumentar os níveis de matéria orgânica do solo, criar poros biológicos, melhorar a estrutura do solo e manter suficiente palha na superfície do solo. A bioporosidade criada pela atividade radicular e mesofauna do solo, e a possibilidade de as raízes de algumas culturas penetrarem camadas mais compactadas, têm sido a razão de se considerar a rotação de culturas fundamental em plantio direto. Contudo, a superposição de efeitos da rotação na produtividade das culturas (Karlen et al., 1994) gera dúvidas quanto aos reais efeitos dessa na qualidade física do solo para o crescimento radicular. Apesar dessas dúvidas, é bem estabelecido que estratégias de manejo que mantêm ou adicionam carbono ao solo têm bom potencial para a melhoria da qualidade física do solo para o crescimento das plantas.

A quantidade de material vegetal adicionado na superfície e a quantidade de matéria orgânica acumulada no solo são dependentes do sistema de culturas adotado (Bayer et al., 2000; Amado et al., 2001). Aqueles sistemas que incluem culturas com alta produção de matéria seca e culturas com baixa relação C/N, em geral, resultam em maiores acúmulos de matéria orgânica no solo.

Os resíduos de leguminosas têm grande importância como fornecedores de N, podendo contribuir para a diminuição da acidez do solo e da relação C/N da matéria orgânica do solo (Hargrove, 1986). Em contrapartida, os resíduos das gramíneas promovem a melhoria do solo, por possuírem maior conteúdo de lignina, possibilitando aumento de ácidos carboxílicos e ácidos húmicos nos

substratos (Primavesi, 1982), favorecendo a estruturação e a estabilidade dos agregados do solo (Fassbender & Bornemisza, 1994), tornando-o menos suscetível à compactação. Segundo Silva & Mielniczuk (1997), os efeitos benéficos das gramíneas perenes na formação e estabilização dos agregados do solo são devidos à alta densidade de raízes, que promove a aproximação das partículas pela constante absorção de água do perfil do solo, às periódicas renovações do sistema radicular e à uniforme distribuição dos exsudatos no solo, que estimulam a atividade microbiana, cujos subprodutos atuam na formação e estabilização dos agregados. Tisdall & Oades (1979) sugerem que o aumento da estabilidade de agregados devido à ação de gramíneas se deve à liberação de polissacarídeos por hifas de micorrizas associadas.

Corroborando essas informações, Ayarza et al. (1993) verificaram em um Latossolo Vermelho Amarelo, em Uberlândia, MG, que a porcentagem de agregados maiores que 2 mm foi maior em áreas de cerrado natural, pastagem contínua e pastagem após cultura. Nas áreas com um e quatro anos com soja, os valores foram menores, indicando degradação da estrutura do solo. Salton et al. (1999) observaram que em áreas com pastagem e naquelas em que a pastagem participou em rotação com lavoura, o tamanho dos agregados na camada de 0-10 cm de profundidade foi muito superior àquele encontrado em área que teve apenas lavoura, mesmo que no sistema plantio direto. Essa estruturação se reflete na permeabilidade do solo, ou seja, na facilidade que a água encontra para movimentar-se por seu interior. Salton et al. (1999), medindo a permeabilidade de um Latossolo Roxo argiloso com permeâmetro tipo Guelph, verificaram que os maiores valores foram observados em áreas em que a soja teve pastagens como cultura antecedente.

Uma alternativa de produção de cobertura morta é o Sistema Santa Fé, desenvolvido pela Embrapa Arroz e Feijão. Este sistema consiste no cultivo consorciado de culturas anuais, graníferas ou forrageiras (milho, sorgo, soja e arroz) com espécies forrageiras, principalmente as braquiárias. As práticas que compõem o sistema minimizam a competição precoce da forrageira, evitando a redução da produtividade das culturas anuais e permitindo, após a sua colheita, uma produção forrageira abundante e de alta qualidade, no caso de integração lavoura-pecuária, ou uma excelente cobertura do solo para o cultivo irrigado no outono-inverno, sob plantio direto. A braquiária tem produzido mais de 15 t ha⁻¹ de matéria seca, quando manejada corretamente, e sua palhada tem persistido por mais de seis meses na superfície do solo. Além disso, quando dessecada para o plantio direto do feijoeiro irrigado, sua palhada reduz a intensidade de

ataque de algumas doenças causadas por fungos habitantes do solo, a exemplo do mofo-branco e podridões-radiculares causadas por *Rhizoctonia solani* e *Fusarium solani* f. sp. *phaseoli*, e contribui para menor emergência de plantas daninhas (Cobucci et al., 2001).

Balbino et al. (2003), em Latossolo Vermelho, onde foram comparadas áreas sob cultivo de milho consorciado com braquiária e milho solteiro com a mata nativa, mostraram que as áreas sob milho consorciado foram as que mais se aproximaram da área sob mata, com relação aos atributos físicos do solo (Figura 4). A porcentagem de agregados maiores que 2 mm e o diâmetro médio ponderado dos agregados na camada de 0-20 cm de profundidade foi maior no solo sob mata seguido do sob milho consorciado com braquiária. A densidade do solo foi menor e a macroporosidade foi maior no solo sob mata. Os solos sob milho consorciado apresentaram na camada superficial menores valores de densidade do solo e maiores de macroporosidade em relação ao milho solteiro.

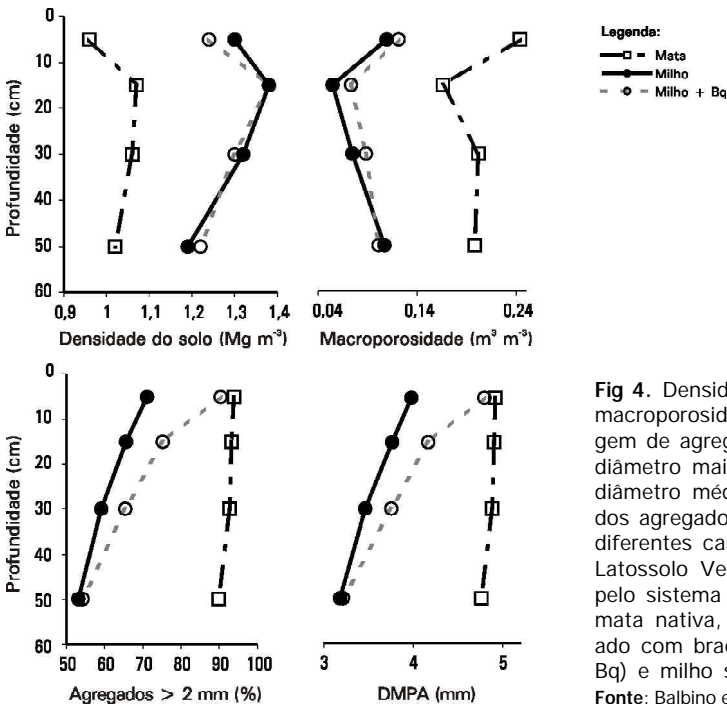


Fig 4. Densidade do solo, macroporosidade, porcentagem de agregados com diâmetro maior que 2 mm e diâmetro médio ponderado dos agregados (DMPA) nas diferentes camadas de um Latossolo Vermelho, afetados pelo sistema de cultivo: mata nativa, milho consorciado com braquiária (Milho + Bq) e milho solteiro.
Fonte: Balbino et al. (2003).

Além do enriquecimento de matéria orgânica do solo, o SPD permite o acúmulo de resíduos vegetais na superfície do solo. A baixa densidade dos resíduos orgânicos, deixados sobre a superfície do solo, também pode resultar em atenuação das cargas aplicadas sobre ele. Assim, Dao (1996) observou que a remoção dos resíduos vegetais da superfície do solo resultou em aumentos na densidade do solo, especialmente na camada entre 5 e 12,5 cm de profundidade no sistema de cultivo convencional e entre 0 e 5 cm no plantio direto. O autor conclui, ainda, que a manutenção de grandes quantidades de resíduos vegetais na superfície do solo contribuiu para uma maior macroporosidade na camada superficial em solos sob cultivos conservacionistas.

Contrariamente, Gupta et al. (1987) não observaram alterações significativas na densidade do solo sob diferentes quantidades de resíduos de milho. Entretanto, observaram que o aumento na quantidade de palha na superfície reduziu a pressão atuante no solo, medida a 20 cm de profundidade, bem como reduziu o afundamento superficial, confirmando a hipótese de que os resíduos superficiais podem diluir cargas aplicadas sobre o solo. Seguindo essa linha de raciocínio, Silva et al. (2000) sugerem que a existência de uma cobertura vegetal de cerca de 1 Mg ha⁻¹ de resíduos vegetais na superfície do solo, durante o período de pastoreio, pode ter contribuído para o pequeno efeito do pisoteio animal sobre os atributos físicos do solo, quando comparado ao solo cultivado. Para os autores, os resíduos vegetais podem ter absorvido parte da carga resultante do impacto das patas dos animais sobre o solo.

Ademais, quando na superfície do solo, os resíduos de culturas atuam significativamente nos regimes hídrico e térmico do solo. A cobertura morta atua na primeira fase do processo de evaporação da água do solo, reduzindo a taxa de evaporação, em razão da reflexão e da absorção da energia incidente, que se relaciona à cor, ao tipo, à quantidade e à distribuição da palha das culturas anteriores, resultando em economia de água (Stone & Moreira, 2000; Andrade et al., 2002; Stone et al., 2004). Stone & Silveira (1999) verificaram que a tensão matricial da água do solo sob plantio direto foi menor e menos variável ao longo do ciclo do feijoeiro, em comparação com outros preparos que mobilizaram o solo (Figura 5). A importância da cobertura morta foi comprovada por Stone & Moreira (2000), que verificaram que, sob plantio direto com cobertura morta, o uso da água pela cultura do feijoeiro foi mais eficiente em relação ao plantio direto sem cobertura morta e ao sistema de preparo do solo com grade aradora. Com a cultivar Safira, de plantas eretas, a produtividade obtida nesse último sistema, com 400 mm de água,

foi semelhante à obtida com 240 mm no plantio direto com cobertura morta, o que representa uma economia de água de 40% (Figura 6). Stone et al. (2004), estudando o efeito de diferentes culturas de cobertura do solo na economia de água, verificaram que ela depende da quantidade de palhada fornecida pela cultura e de sua taxa de decomposição. Moreira et al. (1999) observaram que a economia de água começa a ser importante a partir de 50% de cobertura do solo pela palhada, implicando um menor número de irrigações (Figura 5).

A redução na evaporação também retarda o aquecimento do solo, mantendo-o mais úmido e, dessa forma, elevando-lhe a capacidade calorífica. A elevação dos teores de matéria orgânica do solo, que possui calor específico superior ao da parte mineral e retém umidade, também interfere no regime térmico do solo. Salton & Mielniczuk (1995) verificaram que o solo sob plantio direto apresentou menores temperatura máxima e variação diária da temperatura que os sob preparos reduzido e convencional. Pereira et al. (2004) observaram que, sob plantio direto, as maiores diferenças entre o solo coberto e o descoberto ocorreram na profundidade de 10 cm, em que a cobertura do solo propiciou a obtenção de temperaturas mais elevadas às 9 horas e menores às 15 horas. Isso acontece porque à noite a cobertura morta funciona como isolante térmico, impedindo, devido ao balanço negativo da radiação, que o fluxo de calor no solo em direção à superfície seja intensificado (Pezzopane et al., 1996).

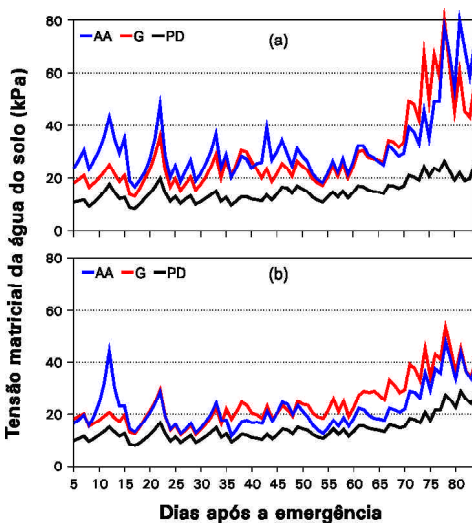


Fig. 5. Tensão matricial da água do solo a 15 cm (a) e a 30 cm (b) de profundidade, ao longo do ciclo do feijoeiro, em três sistemas de preparo do solo: AA – arado de aivecas, G – grade aradora e PD – plantio direto.

Fonte: Stone & Silveira (1999).

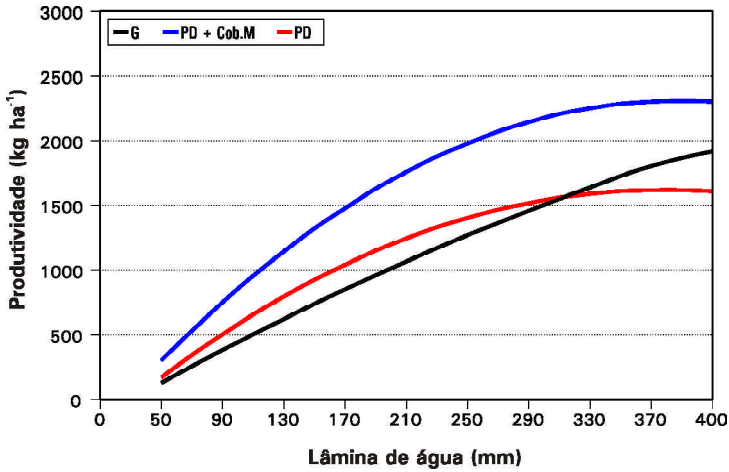


Fig. 6 Produtividade da cultivar de feijão Safira em função da lâmina total de água aplicada, em três sistemas de preparo do solo: G – Grade, PD + Cob.M – Plantio Direto + cobertura morta e PD – Plantio Direto.

Fonte: Adaptada de Stone & Moreira (2000).

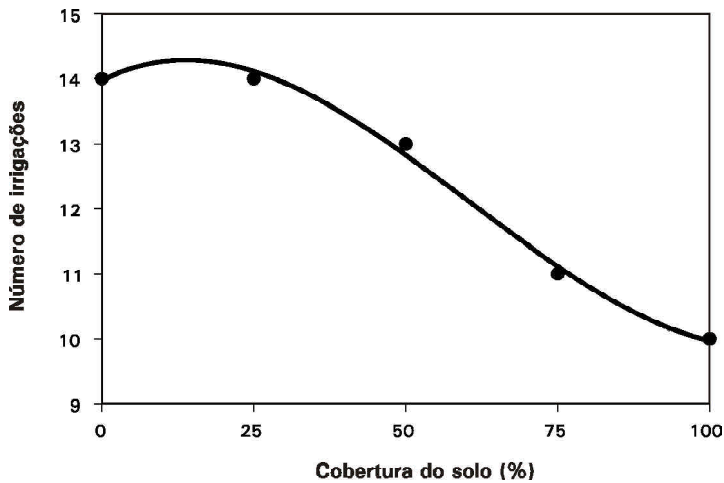


Fig. 7. Número de irrigações efetuadas durante o ciclo do feijoeiro, em função da porcentagem de cobertura do solo pela palhada.

Fonte: Moreira et al. (1999).

O intervalo hídrico ótimo (IHO), definido como a faixa de conteúdos de água no solo em que são mínimas as limitações ao crescimento das plantas devido à disponibilidade de água, aeração e resistência do solo à penetração das raízes (Silva et al., 1994; Topp et al., 1994; Tormena et al., 1998b, 1999), é um dos mais atuais parâmetros da qualidade física do solo por integrar os efeitos de fatores limitantes às plantas. Nesse sentido, o IHO é uma faixa de umidade do solo em que são mínimas as limitações ao crescimento das plantas por fatores físicos.

Os resultados obtidos por Silva & Kay (1997) e Kay et al. (1997) demonstram que o IHO é positivamente correlacionado com o conteúdo de matéria orgânica e negativamente com a densidade dos solos. Nesse sentido, o SPD pode propiciar uma maior ampliação nos limites do IHO. Isto se justifica pelo fato de que nesse sistema as plantas são mais freqüentemente expostas a condições físicas adequadas, uma vez que a cobertura do solo pela palha favorece a maior freqüência de ocorrência de umidade dentro dos limites do IHO.

Referências Bibliográficas

ABDEL-MAGID, A. H.; SCHUMAN, G. E.; HART, R. H. Soil bulk density and water infiltration as affected by grazing systems. **Journal of Range Management**, Denver, v. 40, n. 4, p. 307-309, July 1987.

AMADO, T. J. C.; BAYER, C.; ELTZ, F. L. F.; BRUM, A. C. R. Potencial de culturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 25, n. 1, p. 189-197, jan./mar. 2001.

ANDRADE, R. da S.; MOREIRA, J. A. A.; STONE, L. F.; CARVALHO, J. de A. Consumo relativo de água do feijoeiro no plantio direto em função da porcentagem de cobertura morta do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 1, p. 35-38, jan./abr. 2002.

ARVIDSSON, J. Influence of soil texture and organic matter content on bulk density, air content, compression index and crop yield in field and laboratory experiments. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 49, n. 1/2, p. 159-170, Nov. 1998.

AYARZA, M.; VILELA, L.; RAUSCHER, F. Rotação de culturas e pastagens em um solo de Cerrado: estudo de caso. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 24., 1993, Goiânia. **Resumos...** Goiânia: SBCS, 1993. v. 3, p. 121-122.

BALBINO, L. C.; STONE, L. F.; COBUCCI, T.; CUNHA, E. Q. Sistema Santa Fé: uso da associação cultura de grãos-pastagem em plantio direto na recuperação das propriedades físicas do solo. In: CONGRESSO MUNDIAL SOBRE AGRICULTURA CONSERVACIONISTA, 2., 2003, Foz do Iguaçu. **Produzindo em harmonia com a natureza: resumos expandidos.** Ponta Grossa: Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha, 2003. v. 2, p. 183-185.

BAUMGARTL, T.; HORN, R. Effect of aggregate stability on soil compaction. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 19, n. 2/3, p. 203-213, Feb. 1991.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Nitrogênio total de um solo submetido a diferentes métodos de preparo e sistemas de cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 21, n. 2, p. 235-239, abr./jun. 1997.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; MARTIN-NETO, L. Efeito de sistemas de preparo e de cultura na dinâmica da matéria orgânica e na mitigação das emissões de CO₂. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 24, n. 3, p. 599-607, jul./set. 2000.

BEUTLER, A. N.; SILVA, M. L. N.; CURTI, N.; FERREIRA, M. M.; CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO, I. A. Resistência à penetração e permeabilidade de Latossolo Vermelho distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 25, n. 1, p. 167-177, jan./mar. 2001.

BOWEN, H. D.; GARNER, T. H.; VAUGHN, D. H. Advances in soil-plant dynamics. In: UPADHYAYA, S. K.; CHANCELLOR, W. J.; PERUMPRAL, J. V.; SCHAFER, R. L.; GILL, W. R.; VANDENBERG, G. E. (Ed.). **Advances in soil dynamics.** St. Paul: ASAE, 1996. p. 256-274. (ASAE. Monograph, 12).

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

CARPENEDO, V. **Compressibilidade de solos em sistemas de manejo**. 1994. 106 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

CARVALHO JÚNIOR, I. A.; FONTES, L. E. F.; COSTA, L. M. Modificações causadas pelo uso e formação de camadas compactadas e, ou, adensadas em um Latossolo Vermelho-Escuro textura média, na região do Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 22, n. 3, p. 505-514, jul./set. 1998.

CENTURION, J. F.; DEMATTÊ, J. L. I. Efeitos de sistemas de preparo do solo nas propriedades físicas de um solo sob cerrado cultivado com soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 9, n. 3, p. 263-266, set./dez. 1985.

CENTURION, J. F.; DEMATTÊ, J. L. I.; FERNANDES, F. M. Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades químicas de um solo sob cerrado cultivado com soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 9, n. 3, p. 267-270, set./dez. 1985.

CHANEY, K.; HOGDSON, D. R.; BRAIM, M. A. The effects of direct drilling, shallow cultivation and ploughing on some soil physical properties in a long-term experiment on spring barley. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 104, pt. 1, p. 125-133, Feb. 1985.

COBUCCI, T.; KLUTHCOUSKI, J.; AIDAR, H. Sistema Santa Fé: produção de forragem na entressafra. In: WORKSHOP INTERNACIONAL PROGRAMA DE INTEGRAÇÃO AGRICULTURA E PECUÁRIA PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DAS SAVANAS TROPICAIS SULAMERICANAS, 1., 2001, Santo Antônio de Goiás, GO. **Anais...** Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2001. p. 125-135. (Embrapa Arroz e Feijão. Documentos, 123).

CORAZZA, E. J.; SILVA, J. E.; RESCK, D. V. S.; GOMES, A. C. Comportamento de diferentes sistemas de manejo como fonte ou depósito de carbono em relação à vegetação de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 23, n. 2, p. 425-432, abr./jun. 1999.

D'AGOSTINI, L. R. **Variações temporais da coesividade entre agregados de solo**. 1992. 82 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

DAO, T. H. Tillage system and crop residue effects on surface compaction of a paleustoll. **Agronomy Journal**, Madison, v. 88, n. 2, p. 141-148, Mar./Apr. 1996.

DE MARIA, I. C.; CASTRO, O. M.; DIAS, H. S. Atributos físicos do solo e crescimento radicular da soja em Latossolo Roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 23, n. 3, p. 703-709, jul./set. 1999.

DERPSCH, R.; ROTH, C. H.; SIDIRAS, N.; KOPKE, U. **Controle de erosão no Paraná, Brasil: sistemas de cobertura do solo, plantio direto e preparo conservacionista do solo**. Londrina: GTZ: IAPAR, 1991. 271 p.

DEXTER, A. R. Advances in characterization of soil structure. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 11, n. 3/4, p. 199-238, June 1988.

DIAS JÚNIOR, M. S. **Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic**. 1994. 114 p. Thesis (PhD) – Michigan State University, East Lansing.

EAVIS, B. W. Soil physical condition affecting seedling root growth. I. Mechanical impedance, aeration and moisture availability and moisture levels in a sandy loam soil. **Plant and Soil**, The Hague, v. 36, n. 3, p. 613-622, 1972.

EHLERS, W. W.; KOPKE, F.; HESSE, F.; BOHM, W. Penetration resistance and growth root of oats in tilled and untilled loess soil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 3, n. 3, p. 261-275, 1983.

EKWUE, E. I. Organic matter effects on soil strength properties. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 16, n. 3, p. 289-297, May 1990.

FASSBENDER, H. W.; BORNEMISZA, E. **Química de suelos com ênfasis en suelos de América Latina**. 2 ed. San José: IICA, 1994. 420 p.

FERNANDES, B.; GALLOWAY, H. M.; BRONSON, R. D.; MANNERING, J. V. Efeito de três sistemas de preparo do solo na densidade aparente, na porosidade total e na distribuição dos poros, em dois solos (Typic Argiaquoll e Typic Hapludalf). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 7, n. 3, p. 329-333, set./dez. 1983.

FREITAS, P. L. de. Aspectos físicos e biológicos do solo. In: LANDERS, J. N. (Ed.). **Fascículos sobre experiências em plantio direto nos cerrados**. Goiânia: APDC, 1994. p. 199-213.

GLINSKI, J.; LIPIEC, J. **Soil physical conditions and plant roots**. Boca Raton: CRC Press, 1990. 250 p.

GUIMARÃES, C. M.; STONE, L. F.; MOREIRA, J. A. A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro. II: efeito sobre o desenvolvimento radicular e da parte aérea. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 2, p. 213-218, maio/ago. 2002.

GUPTA, S. C.; SCHNEIDER, E. C.; LARSON, W. E.; HADAS, A. Influence of corn residue on compression and compaction behavior of soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 51, n. 1, p. 207-212, Jan./Feb. 1987.

HÅKANSSON, I.; VOORHEES, W. B. Soil compaction. In: LAL, R.; BLUM, W. H.; VALENTIN, C.; STEWART, B. A. (Ed.). **Methods for assessment of soil degradation**. Boca Raton: Lewis, 1997. p. 167-179.

HÅKANSSON, I.; VOORHEES, W. B.; RILEY, H. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop responses in different traffic regimes. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 11, n. 3/4, p. 239-282, June 1988.

HAMBLIN, A. P. The influence of soil structure on water movement, crop root growth and water uptake. **Advances in Agronomy**, New York, v. 38, p. 95-158, 1985.

HARGROVE, W. L. Winter legumes as a nitrogen source for no-till grain sorghum. **Agronomy Journal**, Madison, v. 78, n. 1, p. 70-74, Jan./Feb. 1986.

HERNANI, L. C.; SALTON, J. C. O CPAO e o sistema plantio direto. **Revista do Plantio Direto**, Passo Fundo, v. 45, p. 27-33, maio/jun. 1998.

HORN, R.; DOMZAL, H.; SLOWINSKA-JURKIEWIEZ, A.; VAN OUWERKERK, C. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and environment. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 35, n. 1/2, p. 23-36, Aug. 1995.

HORN, R.; TAUBNER, H.; WUTTKE, M.; BAUMGARTL, T. Soil physical properties related to soil structure. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 30, n. 2/4, p. 187-216, June 1994.

ISMAIL, I.; BLEVINS, R. L.; FRYE, W. W. Long-term no-tillage effects on soil properties and continuous corn yields. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 1, p. 193-198, Jan./Feb. 1994.

KARLEN, D. L.; VARVEL, G. E.; BULLOCK, D. G.; CRUSE, R. M. Crop rotations for the 21st century. **Advances in Agronomy**, New York, v. 53, p. 1-45, 1994.

KAY, B. D. Rates of changes of soil structure under different cropping systems. **Advances in Soil Science**, New York, v. 12, p. 1-51, 1990.

KAY, B. D.; SILVA, A. P.; BALDOCK, J. A. Sensitivity of soil structure to changes in organic carbon content: Predictions using pedotransfer functions. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 77, n. 4, p. 655-667, Nov. 1997.

KERTZMANN, F. F. **Modificações na estrutura e no comportamento de um Latossolo Roxo provocados pela compactação**. 1996. 153 f. Tese (Doutorado em Geografia Física) Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo.

KLEIN, V. A. **Propriedades físico-hídrico-mecânicas de um Latossolo Roxo, sob diferentes sistemas de uso e manejo**. 1998. 130 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

KONDO, M. K.; DIAS JÚNIOR, M. S. Compressibilidade de três Latossolos em função da umidade e uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 23, n. 2, p. 211-218, abr./jun. 1999a.

KONDO, M. K.; DIAS JÚNIOR, M. S. Efeito do manejo e da umidade no comportamento compressivo de três latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 23, n. 3, p. 497-506, jul./set. 1999b.

KOPPI, A. J.; DOUGLAS, J. T. A rapid, inexpensive and quantitative procedure for assessing soil structure with respect to cropping. **Soil Use and Management**, Oxford, v. 7, n. 1, p. 52-56, Mar. 1991.

LARSON, W. E.; GILL, W. R. Soil physical parameters for designing new tillage systems. 1. Management principles. In: NATIONAL CONFERENCE TILLAGE CONSERVATION, 1973, Des Moines. **Conservation tillage: proceedings**. Ankeny: SCSA, 1973. p. 13-22.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Advances in Soil Science**, New York, v. 1, p. 277-294, 1985.

MACEDO, V. R. M. **Compressibilidade de um Podzólico Vermelho-Escuro fisicamente degradado e recuperado**. 1993. 88 p. Tese (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MAPFUMO, E.; CHANASYK, D. S.; NAETH, M. A.; BARON, V. S. Soil compaction under grazing of annual and perennial forages. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 79, n. 1, p. 191-199, Feb. 1999.

MERTEN, G. H.; MIELNICZUK, J. Distribuição do sistema radicular e dos nutrientes em Latossolo Roxo sob dois sistemas de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 15, n. 3, p. 369-374, set./dez. 1991.

MORAES, M. H.; BENEZ, S. H.; LIBARDI, P. L. Efeitos da compactação em algumas propriedades físicas do solo e seu reflexo no desenvolvimento das raízes de plantas de soja. **Bragantia**, Campinas, v. 54, n. 2, p. 393-403, 1995.

MOREIRA, J. A. A.; STONE, L. F.; PEREIRA, A. L. **Manejo da irrigação do feijoeiro em plantio direto: cobertura do solo**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 1999. 2 p. (Embrapa Arroz e Feijão. Pesquisa em Foco, 26).

MOSADDEGHI, M. R.; HAJABBASI, M. A.; HEMMAT, A.; AFYUNI, M. Soil compactability as affected by soil moisture content and farmyard manure in central Iran. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 55, n. 1/2, p. 87-97, May 2000.

PALADINI, F. L. S.; MIELNICZUK, J. Distribuição de tamanho de agregados de um Podzólico Vermelho-Escuro afetado por sistema de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 15, n. 2, p. 135-140, maio/ago. 1991.

PEÑA, Y. A.; GOMES, A. da S.; SOUSA, R. O. Influência de diferentes sistemas de cultivo nas propriedades físicas de um solo de várzea cultivado com arroz irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, n. 3, p. 517-523, set./dez. 1996.

PEREIRA, A. L.; MOREIRA, J. A. A.; KLAR, A. E.; STONE, L. F.; CHIEPPE JUNIOR, J. B. Efeitos de níveis de cobertura sobre a temperatura do solo sob feijoeiro irrigado, no sistema plantio direto. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 14.; ENCONTRO LATINOAMERICANO DE IRRIGAÇÃO, DRENAGEM E CONTROLE DE ENCHENTES, 1., 2004, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: ABID, 2004. 1 CD-ROM.

PEZZOPANE, J. E. M.; CUNHA JÚNIOR, G. de M.; ARNSHOLZ, E.; COSTALONGA JÚNIOR, M. Temperatura do solo em função da cobertura morta por palha de café. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, RS, v. 4, n. 2, p. 7-10, jul./dez. 1996.

PRIMAVESI, A. **O manejo ecológico do solo**. 4. ed. São Paulo: Nobel, 1982. 541 p.

REEVES, D. W. Soil management under no-tillage: soil physical aspects. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DO SISTEMA PLANTIO DIRETO, 1., Passo Fundo, 1995. **Resumos...** Passo Fundo: EMBRAPA-CNPT, 1995. p. 127-130.

REINERT, D. J. **Soil structural form and stability induced by tillage in a typic hapludalf**. 1990. 128 p. Thesis (PhD) - Michigan State University, East Lansing.

RICHTER, D. D.; BABBAR, L. I.; HUSTON, M. A.; JAEGER, M. Effects of annual tillage on organic carbon in a fine-textured udalf: the importance of root dynamics to soil carbon storage. **Soil Science**, Baltimore, v. 149, n. 2, p. 78-83, Feb. 1990.

RODD, A. V.; PAPADOPOULOS, Y. A.; LAFLAMNE, L. F.; MCRAE, K. B.; FILLMORE, S. A. E.; WILSON, R. W. Effect of rotational grazing on selected physical properties of a gleyed Brunisolic Gray Luvisol loam in Nova Scotia. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 79, n. 1, p. 117-125, Feb. 1999.

ROSOLEM, C. A.; ALMEIDA, A. C. da S.; SACRAMENTO, L. V. S. do. Sistema radicular e nutrição da soja em função da compactação do solo. **Bragantia**, Campinas, v. 53, n. 2, p. 259-266, 1994.

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J. Relações entre sistemas de preparo, temperatura e umidade de um Podzólico Vermelho-Escuro de Eldorado do Sul (RS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 19, n. 2, p. 313-319, maio/ago. 1995.

SALTON, J. C.; HERNANI, L. C.; BROCH, D. L.; FABRÍCIO, A. C. **Alterações em atributos físicos do solo decorrentes da rotação soja – pastagem, no Sistema Plantio Direto**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 1999. 5 p. (Embrapa Agropecuária Oeste. Comunicado Técnico, 10).

SCHÄFER, M. J., REICHERT, J. M; REINERT, D. J., CASSOL, E. A. Erosão em entressulcos em diferentes preparos e estados de consolidação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 25, n. 2, p. 431-441, abr./jun. 2001.

SECCO, D. **Estados de compactação e suas implicações no comportamento mecânico e na produtividade de culturas em dois latossolos sob plantio direto**. 2003. 171 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

SIDIRAS, N.; VIEIRA, S. R.; ROTH, C. H. Determinação de algumas características físicas de um Latossolo Roxo distrófico sob plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 8, n. 3, p. 265-268, set./dez. 1984.

SILVA, A. P. da; KAY, B. D. Effect of soil water content variation on the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, n. 3, p. 884-888, May/June 1997.

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

SILVA, A. P. da; IMHOFF, S.; CORSI, M. Evaluation of soil compaction in an irrigated short-duration grazing system. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 70, n. 1, p. 83-90, Mar. 2003.

SILVA, I. de F. da; MIELNICZUK, J. Ação do sistema radicular de plantas na formação e estabilização de agregados do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 21, n. 1, p. 113-117, jan./mar. 1997.

SILVA, V. R. **Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação**. 2003. 171 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

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

SILVEIRA, P. M. da; SILVA, J. G. da; STONE, L. F.; ZIMMERMANN, F. J. P. Alterações na densidade e na macroporosidade de um Latossolo Vermelho-Escuro causadas pelo sistema de preparo do solo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 29, n. 2, p. 145-149, jul./dez. 1999.

SOANE, B. D. The role of organic matter in soil compactability: a review of some practical aspects. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 16, n. 1/2, p. 179-201, Apr. 1990.

STEPNIEWSKI, W.; HORN, R.; MARTYNIUK, S. Managing soil biophysical properties for environmental protection. **Agricultural Ecosystems & Environment**, v. 88, n. 2, p. 175-181, Feb. 2002.

STIRZAKER, R. J.; PASSIOURA, J. B.; WILMS, Y. Soil structure and plant growth: impact of bulk density and biopores. **Plant and Soil**, The Hague, v. 185, n. 1, p. 151-162, 1996.

STONE, L. F.; MOREIRA, J. A. A. Desenvolvimento radicular de cultivares de arroz em diferentes sistemas de preparo do solo, sob irrigação suplementar por aspersão. In: REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE ARROZ, 6., 1998, Goiânia. **Perspectivas para a cultura do arroz nos ecossistemas de várzeas e terras altas: resumos...** Goiânia: EMBRAPA-CNPAP, 1998. p. 103-106. (EMBRAPA-CNPAP. Documentos, 85).

STONE, L. F.; MOREIRA, J. A. A. Efeitos de sistemas de preparo do solo no uso da água e na produtividade do feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 35, n. 4, p. 835-841, abr. 2000.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. da. Atributos físico-hídricos de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes preparos e rotações de culturas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 33., 2004, São Pedro. **A inserção da engenharia agrícola em projetos nacionais: caderno de resumos...** Campinas: Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2004. p. 50-51.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. da. Efeitos do sistema de preparo na compactação do solo, disponibilidade hídrica e comportamento do feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 34, n. 1, p. 83-91, jan. 1999.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. Efeitos do sistema de preparo do solo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 25, n. 2, p. 395-401, abr./jun. 2001.

STONE, L. F.; GUIMARÃES, C. M.; MOREIRA, J. A. A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro. I: efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 2, p. 207-212, maio/ago. 2002.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. da; MOREIRA, J. A. A. Evapotranspiração do feijoeiro irrigado cultivado sob plantio direto após diferentes culturas de cobertura. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 14.; ENCONTRO LATINOAMERICANO DE IRRIGAÇÃO, DRENAGEM E CONTROLE DE ENCHENTES, 1., 2004, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: ABID, 2004. 1 CD-ROM.

STONE, R. J.; EKWUE, E. I. Compressibility of some Trinidadian soils as affected by the incorporation of peat. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v. 60, n. 1, p. 15-24, Jan. 1995.

TARDIEU, F. Growth and functioning of roots and of root systems subjected to soil compaction. Towards a system with multiple signaling. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 30, n. 2/4, p. 217-243, June 1994.

TAVARES FILHO, J.; RALISCH, R.; GUIMARÃES, M. F.; MEDINA, C. C.; BALBINO, L. C.; NEVES, C. S. V. J. Método do perfil cultural para avaliação do estado físico de solos em condições tropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 23, n. 2, p. 393-399, abr./jun. 1999.

TAVARES FILHO, J.; BARBOSA, G. M. C.; GUIMARÃES, M. F.; FONSECA, I. C. B. Resistência do solo à penetração e desenvolvimento radicular do milho (*Zea mays*) sob diferentes sistemas de manejo em um Latossolo Roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 25, n. 3, p. 725-730, jul./set. 2001.

TAYLOR, H. M.; ROBERSON, G. M.; PARKER, J. J. Soil strength-root penetration relations to medium-to coarse-textured soil materials. **Soil Science**, Baltimore, v. 102, n. 1, p. 18-22, 1966.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Stabilization of soil aggregates by the root systems of ryegrass. **Australian Journal of Soil Research**, Victoria, v. 17, n. 3, p. 429-441, 1979.

TOPP, G. C.; GALGANOV, Y. T.; WIRES, K. C.; CULLEY, J. L. B. **Non limiting water range (NLWR):** an approach for assessing soil structure. Ottawa: Soil Quality Evaluation Program, 1994. 36 p. (Technical Report, 2).

TORMENA, C. A.; ROLOFF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, n. 2, p. 333-339, maio/ago. 1996.

TORMENA, C. A.; ROLOFF, G.; SÁ, J. C. M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 22, n. 2, p. 301-309, abr./jun. 1998a.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um latossolo roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 22, n. 4, p. 573-581, out./dez. 1998b.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. da; LIBARDI, P. L. Soil physical quality of a Brazilian oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 52, n. 3/4, p. 223-232, Oct. 1999.

URCHEI, M. A. **Efeitos do plantio direto e do preparo convencional sobre alguns atributos físicos de um latossolo vermelho-escuro argiloso e no crescimento e produtividade do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) sob irrigação.** 1996. 131 f. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

URCHEI, M. A.; RODRIGUES, J. D.; STONE, L. F.; CHIEPPE JÚNIOR, J. B. Efeitos do plantio direto e do preparo convencional sobre alguns atributos físicos de um latossolo vermelho-escuro argiloso, sob pivô central. **Irriga**, Botucatu, v. 1, n. 3, p. 8-15, 1996.

VOORHEES, W. B.; LINDSTROM, M. J. Long-term effects of tillage method on soil tilth independent of wheel traffic compaction. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 48, n. 1, p. 152-156, 1984.

WEAICH, K.; CASS, A.; BRISTOW, K. L. Pre-emergent shoot growth of maize (*Zea mays*, L.) as a function of soil strength. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 40, n. 1/2, p. 3-23, Dec. 1996.

ZHANG, H. Q. Organic matter incorporation affects mechanical properties of soil aggregates. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 31, n. 2/3, p. 263-275, Aug. 1994.

ZHANG, H. Q.; HARTGE, K. H.; RINGE, H. Effectiveness of organic matter incorporation in reducing soil compactability. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, n. 1, p. 239-245, Jan./Feb. 1997.

