

Comissão 3.3 - Manejo e conservação do solo e da água

QUALIDADE FÍSICA E INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO EM LATOSSOLO E CAMBISSOLO, CULTIVADOS COM CAFEIEIRO, SOB MANEJO CONSERVACIONISTA DO SOLO⁽¹⁾

Milson Evaldo Serafim⁽²⁾, Geraldo César de Oliveira⁽³⁾, Antonio Carlos Tadeu Vitorino⁽⁴⁾, Bruno Montoani Silva⁽⁵⁾ & Carla Eloize Carducci⁽⁵⁾

RESUMO

Cafeicultores da região fisiográfica do Alto São Francisco, MG, Brasil, vêm adotando novo sistema de cultivo, considerado conservacionista do solo, cujos efeitos na qualidade física do solo precisam ser avaliados. Este trabalho foi realizado com o objetivo de estudar a qualidade física de um Latossolo e um Cambissolo, localizados em áreas contíguas, sob cultivo comercial de café. A área localizada no topo da paisagem é recoberta por Cambissolo Háptico Tb distrófico latossólico; a outra, no terço médio, é recoberta por Latossolo Vermelho distrófico. Em cada área foram amostradas as profundidades de 0-0,05 e 0,75-0,80 m, nas posições linha e entrelinha do cafeeiro, totalizando quatro situações em cada solo. Para cada situação, foram coletadas 21 amostras com estrutura preservada destinadas à determinação do intervalo hídrico ótimo (IHO), que foram distribuídas em sete potenciais matriciais, com três repetições. Em todas as situações, o sistema de manejo conservacionista assegurou boa qualidade física, principalmente na linha da cultura, para as duas classes de solos estudadas, pois o IHO teve como limite superior e inferior a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente, respectivamente. A boa qualidade física foi confirmada pelos valores de macro e microporosidade, volume total de poros, densidade do solo e resistência do solo à penetração e produtividades acima da média do Estado de Minas Gerais.

Termos de indexação: IHO, cafeicultura, sistema conservacionista, qualidade física do solo.

⁽¹⁾ Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras - UFLA. Caixa Postal 3037. CEP 37200-000 Lavras (MG). Projeto financiado pela FAPEMIG e apoio logístico da EPAMIG - Lavras e da Empresa Agropecuária Piumhi, Piumhi (MG). Recebido para publicação em 24 de janeiro de 2012 e aprovado em 6 de março de 2013.

⁽²⁾ Professor de Instituto Federal de Educação, Ciência e tecnologia de Mato Grosso, Campus Cáceres. CEP 78200-000, Cáceres (MT). E-mail: milson.serafim@cas.ifmt.edu.br

⁽³⁾ Professor Associado do DCS/UFLA. Bolsista CNPq. E-mail: geraldooliveira@dcs.ufla.br

⁽⁴⁾ Professor Associado da Universidade Federal da Grande Dourados, Faculdade de Ciências Agrárias. Rodovia Dourados-Itaum, km 12. Caixa Postal 533. Aeroporto. CEP 79804-970 Dourados (MS). Bolsista do CNPq. E-mail: antoniovitorino@ufgd.edu.br

⁽⁵⁾ Doutorando, DCS/UFLA. E-mail: brunoms3@yahoo.com.br; elocarducci@hotmail.com

SUMMARY: SOIL PHYSICAL QUALITY AND LEAST LIMITING WATER RANGE OF LATOSOL AND CAMBISOL UNDER COFFEE IN CONSERVATION MANAGEMENT

Coffee farmers from the physiographic region known as the Upper San Francisco River, MG, Brazil, have been adopting a new conservation management system with effects on the soil physical quality that require evaluation. The objective of this work was to study the physical quality of a Latosol and a Cambisol in contiguous areas under commercial coffee plantations. The soil of a transition area at the top of the landscape was classified as latossolic dystrophic Tb Haplic Cambisol (Inceptisol) and the soil in the middle third as Red Latosol (Oxisol). In each area, the layers 0-0.05 and 0.75-0.80 m were sampled in the rows and between rows of coffee plants, i.e., a total of four sampling situations per soil. For each situation, 21 undisturbed samples were collected to determine the Least Limiting Water Range (LLWR). The samples were submitted to seven matric potentials, in triplicates. In all situations, the conservation management system maintained a satisfactory physical quality, particularly in the row, in both soil classes studied, since the upper and lower limit of the LLWR were the field capacity and permanent wilting point, respectively. The good soil quality was confirmed by the values of macroporosity, microporosity, total pore volume, soil density, soil penetration resistance, and coffee beans yield above the average of the State of Minas Gerais.

Index terms: LLWR, coffee cultivation, conservation management, soil physical quality.

INTRODUÇÃO

O bom desenvolvimento das culturas agrícolas em diferentes sistemas de cultivo tem estreita relação com a qualidade física do solo. Assim, as condições físicas do solo consideradas ótimas para o crescimento radicular das plantas resultam de complexas interações entre resistência do solo à penetração, aeração e suprimento de água (Lapen et al., 2004). Para uma mesma condição, espécies exigentes estarão sujeitas a estresses de ordem física, enquanto outras mais rústicas poderão não encontrar limitações (Williams & Weil, 2004; Olibone et al., 2010).

Sistemas de cultivo conservacionistas, com mobilização mínima do solo, quando bem manejados, podem contribuir para a boa qualidade física do solo, pois nesses sistemas há tempo suficiente para o desenvolvimento da estrutura do solo e formação de bioporos, que são caminhos preferenciais para o crescimento das raízes (Jimenez et al., 2008; Severiano et al., 2010).

Na cafeicultura, o emprego de boas práticas de manejo do solo já não é preocupação apenas de pesquisadores ligados à ciência do solo, sendo, inclusive, exigência para certificação do café (BSCA, 2005; Minas Gerais, 2009). Nesse contexto, destaca-se um sistema de manejo inovador que vem sendo praticado na região fisiográfica do Alto São Francisco, que tem merecido atenção por contemplar boas práticas de conservação do solo e da água.

Esse sistema envolve a presença de cultura de cobertura na entrelinha (*Brachiaria* sp.), que assegura maior proteção permanente ao solo, além de fornecer elevado aporte de matéria orgânica em superfície. Também, ressalta-se o menor tráfego de máquinas,

que resulta em menor compactação do solo (Araújo-Júnior et al., 2008), pois na lavoura formada as operações de tratamentos culturais são realizadas com tração animal.

Destaca-se que no Alto São Francisco, assim como em boa parte da região do Cerrado, as precipitações são mal distribuídas no decorrer do ano, o que justifica a recomendação de irrigação na cafeicultura mais tecnificada (Fernandes et al., 2000; Karasawa et al., 2002). O agravante é que falta água para irrigação em muitas propriedades e, dessa forma, a adoção de sistemas de cultivo capazes de mitigar o déficit hídrico pela preservação ou melhorias da qualidade física do solo torna-se imperativa.

Considerando a importância dos atributos físicos na dinâmica da água no solo, este trabalho teve por objetivo estudar o intervalo hídrico ótimo em um Latossolo Vermelho distroférico e um Cambissolo Háptico Tb distrófico latossólico, cultivados com cafeeiro e sob sistema conservacionista e de manejo intensivo.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido no município de São Roque de Minas, região fisiográfica do Alto São Francisco, Estado de Minas Gerais. O clima da região é do tipo Cwa, segundo classificação de Köppen, com precipitação pluvial média anual de 1.344 mm e estação seca bem definida nos meses de maio a setembro. A temperatura média anual é de 20,7 °C; umidade relativa média de 60 %; e altitude média de 900 m (Menegasse et al., 2002).

Foram estudadas duas áreas contíguas sob cafeeiros, cultivar Catucaí Amarelo Multilínea, com idade de quatro anos, recobertas por Cambissolo Háplico Tb distrófico latossólico (CXbd) e Latossolo Vermelho distrófico (LVd) (Embrapa, 2006), localizadas no topo e no terço médio da rampa, respectivamente. Algumas características desses solos são apresentadas no quadro 1.

A implantação e o manejo da lavoura foram idênticos para as duas classes de solo. No preparo, fez-se o revolvimento do solo com grade e arado de disco e a aplicação do calcário e de gesso em área total, segundo recomendação para o Estado de Minas Gerais (Alvarez V. et al., 1999). Essa foi a única mobilização do solo.

O sistema de manejo adotado nas áreas se diferenciou do sistema convencional de produção do cafeeiro em vários aspectos, conforme representado esquematicamente na figura 1. Na esquerda da figura, está representada a lavoura instalada em uma área de Latossolo e, na direita, a lavoura em área de Cambissolo. Nessa segunda classe de solo, em razão da declividade acentuada, entre 25 e 30 % para o local, é feita a sistematização da área, formando patamares nas entrelinhas de declividade entre 1 e 2 cm m⁻¹. Essa operação, além de sua função conservacionista, é feita principalmente para facilitar os tratamentos culturais mecanizados com máquinas ou tração animal. A aplicação de gesso agrícola na dose de 7 kg m⁻¹, em superfície, na linha da cultura, é feita após o plantio do cafeeiro (Figura 1a). Na sequência é feita a amontoa de terra ao longo da linha do cafeeiro, recobrendo o gesso com uma camada de 30 cm de solo misturado com os resíduos vegetais fornecidos pela braquiária cultivada nas entrelinhas (Figura 1b). Paralelamente à linha de plantio do cafeeiro, nas entrelinhas da cultura, é semeada uma linha de *Brachiaria* sp. (Figura 1c). Para o plantio do cafeeiro, o sulco é preparado com 0,5 m de largura e 0,6 m de profundidade, onde são incorporados adubos, corretivos e resíduos vegetais da superfície (Figura 1d). A época de plantio é antecipada em relação ao sistema convencional, sendo realizado até o início do mês de novembro.

O *stand* médio adotado para a cultura do cafeeiro foi de 5.333 plantas por hectare. O manejo da

Quadro 1. Classes de solo, horizontes do solo (H), profundidade dos horizontes, granulometria e densidade de partículas (Dp)

Classe	H	Profundidade m	Areia Silte Argila			Dp kg dm ⁻³
			g kg ⁻¹			
CXbd	A	0-0,20	140	130	730	2,45
	Bw	0,50-0,85	140	160	700	2,67
LVd	A	0-0,22	170	90	740	2,56
	Bw	0,65-1,23	150	80	770	2,59

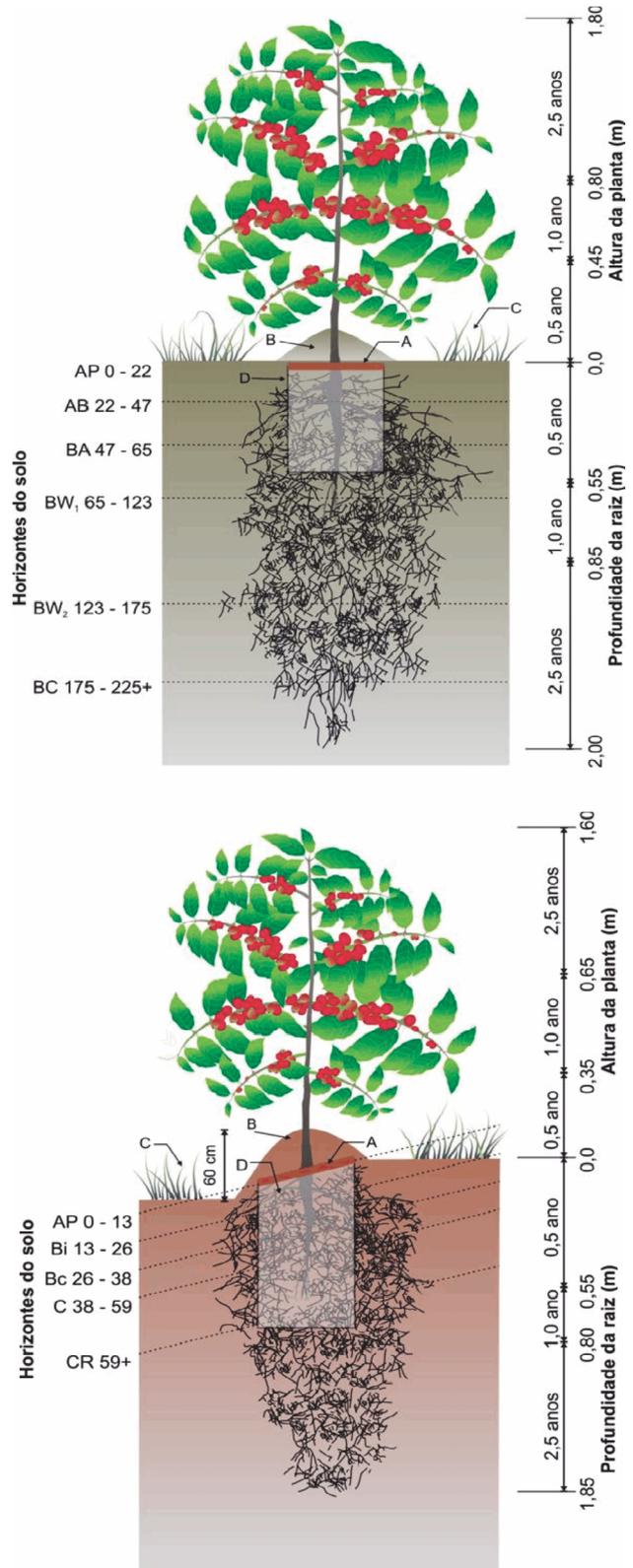


Figura 1. Representação esquemática de cafeeiro sob sistema de manejo intensivo de cultivo, em área de Latossolo (inferior) e de Cambissolo (superior), em que: (A) camada de gesso; (B) leira de terra na base das plantas; (C) braquiária na entrelinha; e (D) sulco de plantio.

braquiária, no primeiro ano, foi realizado com roçadora tratorizada. Os demais tratamentos culturais e a roçada do mato, a partir do segundo ano, foram realizados com o uso de tração animal. A avaliação do estado nutricional das plantas e o manejo das adubações de formação e a produção foram feitos com base em análise foliar periódica.

Neste estudo, nas duas áreas, foram amostrados os horizontes A e B de cada solo na posição linha e entrelinha da cultura, constituindo oito situações (Quadro 2).

Para a coleta das amostras com estrutura preservada, foram abertas três trincheiras, por área e por posição, constituindo as três repetições em cada classe de solo e posição. As amostras foram coletadas em anéis volumétricos (6,4 cm de diâmetro por 2,5 cm de altura), sendo, então saturadas por capilaridade a partir da base. Para determinar a curva de retenção, 21 amostras de cada situação de estudo foram testadas em sete potenciais matriciais, com três repetições.

Foram adotados os seguintes potenciais matriciais: -4, -6 e -10 kPa, na unidade de sucção; e -33, -100, -500 e -1.500 kPa, nos aparelhos extratores de Richards, segundo Embrapa (1997). Após atingir o equilíbrio hídrico em cada potencial, as amostras foram pesadas e nelas determinada a resistência do solo à penetração, conforme Tormena et al. (1998). Para isso, foi empregado um penetrógrafo digital de bancada da marca Marconi, modelo MA 933, dotado com ponteira de cone circular reto, de 45° e 3,84 mm de diâmetro, e velocidade constante de 100 mm min⁻¹. Após a determinação da resistência do solo à penetração, as amostras foram secas em estufa a ±105 °C, por 24 h, para definir a densidade do solo (Ds) e o conteúdo volumétrico de água do solo (θ).

Para estabelecer o intervalo hídrico ótimo (IHO), foram descritas matematicamente a curva de retenção de água (CRA) e curva de resistência do solo à penetração (CRS). A CRA foi expressa pela relação entre θ e ψ, conforme Ross et al. (1991). A densidade do solo (Ds) foi incorporada a esse modelo, seguindo o procedimento descrito por Leão et al. (2006) (Equação 1):

$$\theta = a\psi^b D_s^c \quad (1)$$

em que θ: conteúdo volumétrico de água no solo (m³ m⁻³); ψ: potencial da água no solo (MPa); D_s:

Quadro 2. Apresentação das oito situações de estudo nos dois solos com cafeeiros

Solo	Prof. m	Posição	
		Linha	Entrelinha
CXbd	0-0,05	Situação 1	Situação 2
	0,75-0,80	Situação 3	Situação 4
LVd	0-0,05	Situação 5	Situação 6
	0,75-0,80	Situação 7	Situação 8

densidade do solo (kg dm⁻³) e *a*, *b*, *c* são os coeficientes obtidos no ajuste dos dados à equação 1.

Os valores de força gerados pelo penetrógrafo foram obtidos em kgf e convertidos para resistência à penetração (RP) em MPa, considerando a área da ponteira e com o uso da equação 2, conforme procedimentos descritos a seguir:

$$P(Pa) = \frac{F(N)}{A(m^2)} \therefore RP \equiv P \quad (2)$$

em que P é pressão em Pa; F, força em N; RP, resistência à penetração às raízes (Pa); e A, área da ponteira em m², representada por um cone circular reto, com ângulo de 45° e 1,92 mm de raio.

Para obter F(N), empregou-se a equação 3:

$$F(N) = F(kgf) g \quad (3)$$

em que F(kgf) é o valor de resistência dada pelo aparelho, em kgf; e g, aceleração da gravidade.

A área do cone circular reto, de 45° (A), foi obtida pela equação 4, a seguir.

$$A(m^2) = \pi r g \quad (4)$$

sendo o valor de π igual a 3,1415926; r é o raio da ponteira, em m; e g, a geratriz calculada do cone, em m.

A geratriz (g) é dada pela relação representada na equação 5.

$$\cos(45^\circ) = r/g \quad (5)$$

em que g é a geratriz calculada do cone, em m; e r, o raio da ponteira, em m.

Desenvolvendo-se as equações 4 e 5, para as dimensões da ponteira empregadas neste trabalho, têm-se as equações 6 e 7.

$$\cos(45^\circ) = \frac{r}{g} \rightarrow g = \frac{0,00192}{0,7071} \therefore g(m) = 0,002715 \quad (6)$$

$$A(m^2) = \pi \cdot 0,00192 \times 0,002715 \therefore A(m^2) = 0,00001637 \quad (7)$$

Assim, para converter os valores de força em kgf, para resistência à penetração em MPa, considerando a área da ponteira obtida na equação 7, têm-se as equações 8 e 9:

$$RP(Pa) = \frac{F(kgf) 9,806648}{0,00001637} \frac{1}{10^6} \quad (8)$$

$$\text{logo, } RP(MPa) = F(kgf) 0,5990226 \quad (9)$$

Os dados de resistência à penetração foram ajustados em razão do conteúdo de água e da densidade do solo, utilizando a função não linear proposta por Busscher (1990), descrita na equação 10:

$$RP = d\theta^e D_s^f \quad (10)$$

em que RP: resistência do solo à penetração (MPa); D_s: densidade do solo (kg dm⁻³); e *d*, *e*, *f*: coeficientes obtidos no ajuste dos dados à equação 2.

Para a determinação de θ para uma $RP=3$ MPa (θ_{RP}), conforme indicação de Ehlers et al. (1983), foi utilizada a equação 10, reescrita conforme a equação 11:

$$\theta_{RP} = \left[\left(\frac{RP}{d \cdot D_s^f} \right)^{\frac{1}{e}} \right] \quad (11)$$

O IHO foi definido adotando-se os procedimentos descritos por Silva et al. (1994) e Tormena et al. (1998). Para a RP, foi adotado o valor crítico de 3,0 MPa (Ehlers et al.; 1983; Zou et al., 2000; Tormena et al., 2007), por se tratar de uma espécie perene, arbustiva e solo manejado sem revolvimento. Os valores de θ_{CC} e θ_{PMP} foram obtidos nos potenciais de -6 e -1.500 kPa, respectivamente, utilizando a CRA e os valores do teor de água em que a RP (θ_{RP}) atinge o valor crítico de 3 MPa foram obtidos por meio da curva de retenção de água pelo solo (CRS). O valor de θ_{PA} foi obtido pela expressão $[(1-Ds/Dp)-0,1]$. Considerou-se o valor médio de densidade de partículas, do horizonte referente à camada de estudo, obtido conforme Embrapa (1997).

Na determinação dos limites superiores do IHO, considerou-se o θ_{CC} ou aquele em que a θ_{PA} é considerada adequada ao desenvolvimento da cultura. Os limites inferiores foram considerados o q_{PMP} ou aquele correspondente à θ_{RP} limitante ao desenvolvimento das plantas, segundo critérios propostos por Silva et al. (1994).

A análise de variância dos dados de macro e microporosidade, volume total de poros (VTP), densidade do solo (Ds) e resistência à penetração (RP) foi feita utilizando-se o modelo de delineamento inteiramente casualizado, sendo as médias comparadas pelo teste de Tukey ($p<0,05$), empregando o *software* SISVAR 2.0 (Ferreira, 2000). Para a variável Ds, foi estimado o intervalo de confiança (IC), para uma amostra aleatória de tamanho 21 em cada situação de estudo, com $t_{n-1 \text{ g.l.}; \alpha/2}$, em que n é o tamanho da amostra; alpha, o nível de significância adotado; e IC, dado pela $y \pm t \alpha \sqrt{s^2}$. Os ajustes das equações das CRA e CRS foram feitos pelo procedimento de modelos não lineares, usando o *software* R 2.10.1 (RDCT, 2009).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram observadas diferenças significativas para os resultados de macro e microporosidade, entre a camada superior (0-0,05 m) e a camada de subsuperfície (0,75-0,80 m), na linha e entrelinha dos dois solos analisados (Quadro 3).

Tomando como referência a camada subsuperficial, em razão da sua estrutura preservada, por receber pouca influência do preparo ou do tráfego do maquinário, para o LVd, a microporosidade foi maior e a microporosidade, menor, nessa camada, independentemente de a amostragem ter sido feita na linha ou entrelinha. Isso é reflexo da estrutura granular visualmente observada na descrição

morfológica dessa camada do solo, que confere elevada microporosidade (Ferreira et al., 1999). Para o CXbd, isso só foi observado na entrelinha da cultura.

Para os dois solos, na superfície, o efeito do tráfego de máquinas gerou mudança do diâmetro de poros passando de macro para micro, o que resultou na redução da microporosidade e aumento da microporosidade da entrelinha em relação à linha, corroborando com Fidalski et al. (2010). Vale ressaltar que os efeitos do preparo do sulco na camada superficial ainda estão presentes após quatro anos e meio, com alta microporosidade, o que pode ser associado ao depósito de resíduos orgânicos da cultura de cobertura nesse local. Nesse caso, não foram observados efeitos adversos das elevadas doses de adubos e corretivos aplicados na linha sobre os atributos físicos estudados.

Foi verificada diferença significativa para VTP (Quadro 3) nas posições linha e entrelinha, apenas na camada de 0-0,05 m do CXbd e na de 0,75-0,80 m do LVd. No CXbd, o maior VTP na linha reafirma a importância do sulco de plantio nessa classe de solo. O mesmo foi observado para a Ds, embora, em todas as situações do LVd, os valores foram menores que $1,0 \text{ kg dm}^{-3}$ (Quadro 4). Para a variável RP, foi verificada diferença significativa apenas na camada de 0,75-0,80 m do LVd (Quadro 4).

Os modelos adotados para o ajuste da curva de retenção de água do solo e da resistência do solo à penetração (RP) foram significativos pelo teste F ($p<0,01$), para todas as situações estudadas (Quadro 5). As equações ajustadas explicaram acima de 80 % da variabilidade do conteúdo de água e acima de 85 % da variabilidade da RP (Quadro 5), consideradas satisfatórias (Tormena et al., 2007; Blainski et al., 2009).

O conteúdo de água e a RP foram negativamente correlacionados com o potencial matricial e positivamente, com a Ds, dado o sinal negativo dos parâmetros *b* e *e*; e positivo dos parâmetros *c* e *f*, de cada equação (Quadro 5), assim como verificado por Blainski et al. (2009).

O intervalo hídrico ótimo determinado com todos os valores de Ds, obtidos das amostras utilizadas, expõe a amplitude do IHO. Isso é de grande importância para permitir visualizar as alterações do IHO no limite superior e inferior de densidade, podendo antecipar os possíveis efeitos de aumentar ou diminuir a densidade média da área, já que os valores extremos de densidade tendem a representar pequena porção da área de estudo. Condições ótimas de IHO, no limite inferior de Ds, e de IHO nulo, no limite superior de Ds, podem corresponder a valores isolados de Ds dentro da área amostrada.

A estimativa do intervalo de confiança (IC) para Ds das amostras empregadas no IHO permite visualizar o IHO presente, sem deixar de expor os valores extremos de densidade e as consequências de atingi-los. O IC delimita a faixa de Ds, representativa do real presente no campo. O IC da Ds, para as oito situações estudadas neste trabalho, apresenta limite

Quadro 3. Comparação de médias de porosidade de um Cambissolo Háplico Tb distrófico latossólico (CXbd) e Latossolo Vermelho distrófico (LVd), cultivados com cafeeiros

Solo	Prof.	Porosidade					
		Macro		Micro		VTP	
		L ⁽¹⁾	EL	L	EL	L	EL
	m	m ³ m ⁻³					
CXbd	0-0,05	0,23 Aa	0,17 Bb	0,37 Bb	0,41 Aa	0,60 Aa	0,58 Bb
	0,75-0,80	0,20 Ba	0,22 Aa	0,41 Aa	0,40 Ba	0,61 Aa	0,62 Aa
LVd	0-0,05	0,26 Ba	0,22 Bb	0,39 Ab	0,43 Aa	0,63 Ba	0,65 Aa
	0,75-0,80	0,32 Aa	0,25 Ab	0,36 Bb	0,41 Ba	0,68 Aa	0,66 Ab

⁽¹⁾ Posição de amostragem, sendo L na linha e EL na entrelinha dos cafeeiros. Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna, para um mesmo solo, não diferem entre si, pelo teste Tukey a 5 %.

Quadro 4. Comparação de médias de densidade do solo (Ds) e resistência do solo à penetração (RP) de um Cambissolo Háplico Tb distrófico latossólico (CXbd) e Latossolo Vermelho distrófico (LVd), cultivados com cafeeiros

Prof.	Ds		RP	
	L ⁽¹⁾	EL	L	EL
m	kg dm ⁻³		MPa	
	Cambissolo Háplico Tb distrófico latossólico			
0-0,05	0,97Bb	1,02Aa	0,83Aa	0,81Ba
0,75-0,80	1,00Aa	1,04Aa	0,92Aa	1,13Aa
	Latossolo Vermelho distrófico			
0-0,05	0,89Aa	0,90Aa	0,62Aa	0,77Aa
0,75-0,80	0,82Bb	0,89Aa	0,70Ab	0,99Aa

⁽¹⁾ Posição de amostragem, sendo L na linha e EL na entrelinha dos cafeeiros. Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna, para um mesmo solo, não diferem entre si, pelo teste Tukey a 5 %.

Quadro 5. Equações da curva de retenção de água no solo e da curva de resistência do solo à penetração, em que θ é conteúdo de água no solo (m³ m⁻³); ψ , potencial matricial de água no solo (kPa); Ds, densidade do solo (Mg m⁻³); e RP, resistência do solo à penetração (MPa)

Solo	Posição	Prof.	Equação ⁽¹⁾	R ²
		m		
		Curva de retenção de água no solo		
CXbd	Linha	0,05	$\theta = 0,4096\psi^{-0,0479} Ds^{0,4453}$	0,97
		0,80	$\theta = 0,4307\psi^{-0,0429} Ds^{0,7973}$	0,80
	Entrelinha	0,05	$\theta = 0,4467\psi^{-0,0488} Ds^{0,6344}$	0,90
		0,80	$\theta = 0,4372\psi^{-0,0466} Ds^{0,2603}$	0,92
LVd	Linha	0,05	$\theta = 0,4909\psi^{-0,0796} Ds^{0,6512}$	0,93
		0,80	$\theta = 0,4595\psi^{-0,0796} Ds^{0,4806}$	0,93
	Entrelinha	0,05	$\theta = 0,5336\psi^{-0,0860} Ds^{0,6689}$	0,98
		0,80	$\theta = 0,5072\psi^{-0,0642} Ds^{0,9277}$	0,84
		Curva de resistência do solo à penetração		
CXbd	Linha	0,05	$RP = 0,0664 \theta^{-2,1648} Ds^{7,6463}$	0,99
		0,80	$RP = 0,0105 \theta^{-4,2984} Ds^{4,4351}$	0,99
	Entrelinha	0,05	$RP = 0,0049 \theta^{-4,8536} Ds^{7,6119}$	0,93
		0,80	$RP = 0,0128 \theta^{-4,3314} Ds^{2,6697}$	0,85
LVd	Linha	0,05	$RP = 0,1378 \theta^{-2,0130} Ds^{6,9251}$	0,97
		0,80	$RP = 0,0474 \theta^{-2,9180} Ds^{4,5867}$	0,97
	Entrelinha	0,05	$RP = 0,0323 \theta^{-3,2622} Ds^{3,4214}$	0,98
		0,80	$RP = 0,0080 \theta^{-5,3577} Ds^{9,3913}$	0,98

⁽¹⁾ Todos os modelos de curva de retenção de água e resistência do solo à penetração foram significativos (p<0,001) pelo teste F.

inferior e superior estreito, com amplitude muito inferior à amplitude total (Quadro 6), o que permite visualizar a Ds que determina o IHO atual de pelo menos 95 % da área estudada.

A pequena amplitude dos valores de Ds na camada superficial do solo, particularmente na entrelinha da cultura, reflete a importância da cobertura proporcionada pela braquiária bem manejada, reduzindo o efeito das linhas de tráfego de máquinas. Os valores de θ_{cc} e θ_{pmp} aumentaram com a Ds (Figuras 2 e 3), em todas as situações estudadas, corroborando os resultados de Leão et al. (2004), Tormena et al. (2007), Serafim et al. (2008) e Blainski et al. (2009), em solos de diferentes mineralogias e classes texturais. Nesse caso, isso deve estar relacionado ao aumento de microporos que retêm água em potenciais matriciais inferiores a -1.500 kPa, dado que se observa paralelismo entre as linhas de θ_{cc} e θ_{pmp} .

Os valores de θ_{RP} necessários para manter a RP \leq 3,0 MPa aumentam com a elevação da Ds (Figuras 2 e 3), pois o acréscimo no conteúdo de água do solo (θ) pode compensar a maior fricção ou coesão entre as partículas e, ou, agregados da matriz (Tormena et al., 2007).

A θ_{PA} decresce com o aumento da Ds (Figuras 2 e 3), em decorrência da redução da macroporosidade; contudo, foi assegurada a adequada difusão de gases em todas as situações estudadas, considerando o intervalo de confiança das amostras. Essa total qualidade da θ_{PA} não foi observada por Leão et al. (2004) e Blainski et al. (2009), em solos de mesma classe, em razão das práticas de manejo inadequadas.

Para todas as situações estudadas, o limite inferior e o superior do IHO são dados pelo θ_{cc} e θ_{pmp} , para

Quadro 6. Intervalo de confiança ($p < 0,05$) da densidade do solo nas situações estudadas

Solo	Prof. m	Intervalo de confiança	
		Linha	Entrelinha
		inferior-superior	inferior-superior
		kg dm ⁻³	
CXbd	0-0,05	0,92 - 1,02	0,99 - 1,05
	0,75-0,80	1,03 - 1,06	0,98 - 1,02
LVd	0-0,05	0,86 - 0,91	0,87 - 0,93
	0,75-0,80	0,80 - 0,84	0,87 - 0,92

a faixa de Ds correspondente ao IC ($p < 0,05$). Resultado semelhante foi observado por Araújo et al. (2004), em área de mata nativa de um LVd. Essa condição observada, em que IHO é igual à "capacidade de água disponível", é indicadora de solo com qualidade física favorável ao crescimento das plantas. Nesse caso, toda a água entre θ_{cc} e θ_{pmp} pode ser utilizada pela planta sem restrições físicas para as raízes, o que potencializa a capacidade do sistema em mitigar o déficit hídrico.

Os resultados de IHO nos solos estudados abonam a eficácia do sistema, em assegurar a boa qualidade física do solo. Na entrelinha, destacou-se a importância de ações promotoras da qualidade física, como o uso de tração animal que reduz as operações motomecanizadas e exerce menor pressão no solo, e a presença de cultura de cobertura na entrelinha, que assegura elevado aporte de matéria orgânica em superfície e no perfil.

Na linha, a manutenção da boa qualidade física do solo está relacionada à abertura do sulco de plantio associado à incorporação de adubos e resíduos orgânicos da superfície, além das elevadas doses de gesso que supostamente atuam na floculação e agregação (Favaretto et al., 2006), imprescindíveis para a manutenção da boa estrutura, refletida nos valores de macroporosidade (Quadro 3).

Considerando, ainda, que a aplicação do gesso agrícola assegura a eliminação de barreira química por Al^{3+} no subsolo (Sobral et al., 2009), salienta-se que, no momento da coleta das amostras e descrição morfológica do perfil, observou-se grande número de raízes em profundidade abaixo de 2,0 m. Com base em observações de campo de outros autores, de que em lavouras manejadas com o sistema convencional em áreas de Latossolos, em média, o sistema radicular do café está presente até 0,80 m de profundidade (Rena & Guimarães, 2000), sugere-se que é de grande relevância a observação anterior, tendo em vista que o aumento da profundidade explorada pelas raízes, passando de 0,80 para 2,0 m, indica mais água disponível para as lavouras sob o sistema conservacionista (Libardi, 2000), enfatizando o potencial do sistema em reduzir o déficit hídrico para a cultura.

A boa qualidade física do solo indicada pela análise do IHO nas áreas estudadas é refletida no bom aspecto visual do cafeeiro e nas elevadas produtividades obtidas nessas áreas (Quadro 7), bem superiores à média

Quadro 7. Produtividade de lavouras cafeeiras sob sistema conservacionista, com diferentes idades, classes de solos e local, na região do Alto São Francisco, MG

Fazenda	Classe/Idade da lavoura ⁽¹⁾	Implantação ⁽²⁾ ano	2008	2009	2010
			Sacas ha ⁻¹⁽³⁾		
Curimba	CXbd _{3,5}	2005	50	51	44
Curimba	LVd _{3,5}	2005	45	49	44

⁽¹⁾ CXbd: Cambissolo Háplico Tb distrófico; e LVd: Latossolo Vermelho distrófico. Idade da lavoura no início do estudo; ⁽²⁾ Plantio nos meses de outubro e novembro. ⁽³⁾ Sacas de 60 kg beneficiadas.

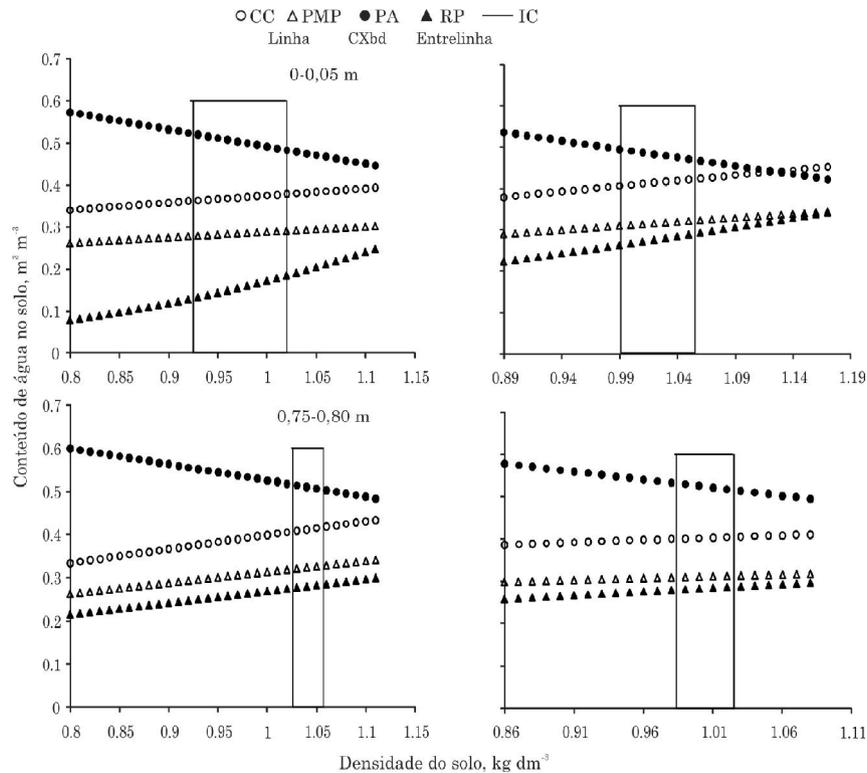


Figura 2. Variação do conteúdo de água (θ) com a densidade do solo para as situações de estudo do CXbd, nos níveis críticos de capacidade de campo (θ_{CC}), ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), porosidade de aeração de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (θ_{PA}) e resistência do solo à penetração de $3,0 \text{ MPa}$ (θ_{RP}). Área interna da coluna corresponde ao intervalo hídrico ótimo (IHO) presente nesses locais.

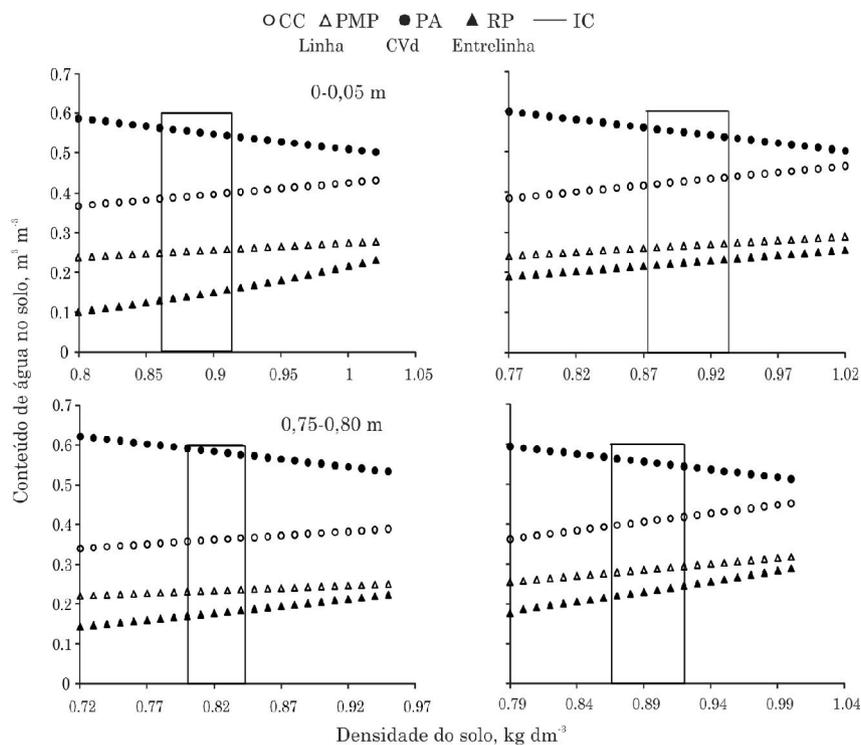


Figura 3. Variação do conteúdo de água (θ) com a densidade do solo para as situações de estudo do LVd, nos níveis críticos de capacidade de campo (θ_{CC}), ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), porosidade de aeração de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (θ_{PA}) e resistência do solo à penetração de $3,0 \text{ MPa}$ (θ_{RP}). Área interna da coluna corresponde ao intervalo hídrico ótimo (IHO) presente nesses locais.

observada no Estado de Minas Gerais, que é de 28,6 sacas ha⁻¹ (CONAB, 2009).

CONCLUSÕES

1. Os dois solos, sob o sistema conservacionista e de manejo intensivo, apresentaram boa qualidade física, indicada pelo intervalo hídrico ótimo.

2. O intervalo hídrico ótimo distinguiu o Cambissolo Háplico latossólico como o mais susceptível à redução da qualidade física, em relação ao Latossolo Vermelho distrófico.

3. O sistema apresenta potencial para reduzir o déficit hídrico da cultura e para aumentar a produtividade para a cafeicultura da região do Alto São Francisco.

LITERATURA CITADA

- ALVAREZ V., V.H.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F.; CANTARUTTI, R.B. & LOPES, A.S. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G. & ALVAREZ V., V.H., eds. Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais. 5. Aproximação. Viçosa, MG, Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. p.25-32.
- ARAÚJO, M.A.; TORMENA, C.A. & SILVA, A.P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. R. Bras. Ci. Solo, 28:337-345, 2004.
- ARAÚJO-JÚNIOR, C.F.; DIAS JÚNIOR, M.S.; GUIMARAES, P.T.G. & PIRES, B.S. Resistência à compactação de um Latossolo cultivado com cafeeiro, sob diferentes sistemas de manejo de plantas invasoras. R. Bras. Ci. Solo, 32:23-32, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CAFÉS ESPECIAIS - BSCA. Lista de verificação sistemas de gestão sócio-ambiental. Anexo RA 0552.04, ver. 01. 2005.
- BLAINSKI, E.; GONÇALVES, A.C.A.; TORMENA, C.A.; FOLEGATTI, M.S.V. & GUIMARÃES, R.M.L. Intervalo hídrico ótimo em um Nitossolo vermelho distroférrico irrigado. R. Bras. Ci. Solo, 33:273-281, 2009.
- BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. Am. Soc. Agric. Biol. Eng., 33:519-524, 1990.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conabweb/>>. Acesso em 30 out. 2009.
- EHLERS, W.; KÖPKE, U.; HESSE, F. & BÖHM, W. Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil. Soil Till. Res, 3:261-275, 1983.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. Manual de métodos de análises de solo. 2.ed. Brasília, Produção de Informação, 1997. 212p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Brasília, Produção de Informação, 2006. 306p.
- FAVARETTO, N.; NORTON, L.D.; JOERN, B.C. & BROUDER, S.M. Gypsum amendment and exchangeable calcium and magnesium affecting phosphorus and nitrogen in runoff. Soil Sci. Soc. Am. J., 70:1788-1796, 2006.
- FERNANDES, A.L.T.; SANTINATO, R.; LESSI, R.; YAMADA, A. & SILVA, V.A. Deficiência hídrica e uso de granulados em lavoura cafeeira irrigada por gotejamento. R. Bras. Eng. Agric. Amb., 4:376-381, 2000.
- FERREIRA, D.F. Análise estatística por meio do SISVAR (Sistema para Análise de Variância) para Windows versão 4.0. In: REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE INTERNACIONAL DE BIOMETRIA, 45., São Carlos, 2000. Anais... São Carlos, UFSCar, 2000. p.255-258.
- FERREIRA, M.M.; FERNANDES, B. & CURTI, N. Mineralogia da fração argila e estrutura de Latossolos da região sudeste do Brasil. R. Bras. Ci. Solo, 23:507-514, 1999.
- FIDALSKI, J.; TORMENA, C.A. & SILVA, Á.P. Least limiting water range and physical quality of soil under groundcover management systems in citrus. Sci. Agric., 67:448-453, 2010.
- JIMENEZ, R.L.; GONÇALVES, W.G.; ARAÚJO FILHO, J.V.; ASSIS, R.L.; PIRES, F.R. & SILVA, G.P. Crescimento de plantas de cobertura sob diferentes níveis de compactação em um Latossolo Vermelho. R. Bras. Eng. Agric. Amb., 12:116-121, 2008.
- KARASAWA, S.; FARIA, M.A. & GUIMARÃES, R.J. Resposta do cafeeiro cv. Topázio MG-1190 submetido a diferentes épocas de irrigação. R. Bras. Eng. Agric. Amb., 6:28-34, 2002.
- LAPEN, D.R.; TOPP, G.C.; GREGORICH, E.G. & CURNOE, W.E. Least limiting water range indicators 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.
- LEÃO, T.P.; SILVA, A.P.; MACEDO, M.C.M.; IMHOFF, S. & EUCLIDES, V.P.B. Intervalo hídrico ótimo na avaliação de sistemas de pastejo contínuo e rotacionado. R. Bras. Ci. Solo, 28:415-423, 2004.
- LIBARDI, P.L. Dinâmica da água no solo. Piracicaba, O Autor, 2000. 509p.

- MINAS GERAIS. Certifica Minas café - regulamento geral. 8ª revisão, Belo Horizonte, 11/12/2009. Disponível em: http://intranet.ima.mg.gov.br/nova/gec/outros_documentos/Cafe/Regulamento%20certificaminascafe-versao8.pdf>. Acesso em 21 fev. 2011.
- MENEGASSE, L.N.; GONÇALVES, J.M. & FANTINEL, L.M. Disponibilidades hídricas na Província Cárstica de Arcos-Pains-Doresópolis, Alto São Francisco, Minas Gerais, Brasil. R. Águas Subter., 16:1-19, 2002.
- OLIBONE, D.; ENCIDE-OLIBONE, A.P. & ROSOLEM, C.A. Least limiting water range and crop yields as affected by crop rotations and tillage. Soil Use Manage., 26:485-493, 2010.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM - RDCT. R: A language and environment statistical computing. Vienna, R Foundation for Statistical Computing, 2009.
- RENA, A.B. & GUIMARÃES, P.T.G. Sistema radicular do cafeeiro: estrutura, distribuição, atividade e fatores que o influenciam. Belo Horizonte: Epamig, 2000. 80p
- ROSS, P.J.; WILLIAMS, J. & BRISTOW, K.L. Equations for extending water-retention curves to drynees. Soil Sci. Soc. Am. J., 55:923-927, 1991.
- SERAFIM, M.E.; VITORINO, A.C.T.; PEIXOTO, P.P.P.; SOUZA, C.M.A. & CARVALHO, D.F. Intervalo hídrico ótimo em um Latossolo Vermelho distroférico sob diferentes sistemas de produção. Eng. Agríc., 28:654-665, 2008.
- SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G.C.; DIAS JUNIOR, M.S.; COSTA, K.A.P.; CASTRO, M.B. & MAGALHÃES, E.N. Potencial de descompactação de um Argissolo promovido pelo capim-tifton 85. R. Bras. Eng. Agric. Amb., 14:39-45, 2010.
- SILVA, A.P.; KAY, B.D. & PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. Soil Sci. Soc. Am. J., 58:1775-1781, 1994.
- SOBRAL, L.F.; CINTRA, F.L.D. & SMYTH, J.T. Lime and gypsum to improve root depth of orange crop in an Ultisol of the Coastal Tablelands. R. Bras. Eng. Agric. Amb., 13:836-839, 2009.
- TORMENA, C.A.; ARAÚJO, M.A.; FIDALSKI, J. & COSTA, J.M. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférico sob sistemas de plantio direto. R. Bras. Ci. Solo, 31:211-219, 2007.
- TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. & LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. R. Bras. Ci. Solo, 22:573-581, 1998.
- WILLIAMS, S.M. & WEIL, R.R. Crop cover root channels may alleviate soil compaction effects on soybean crop. Soil Sci. Soc. Am. J., 68:1403-1409, 2004.
- ZOU, C.; SANDS, R.; BUCHAN, G. & HUDSON, I. Least limiting water range: A potential indicator of physical quality of forest soils. Aust. J. Soil Res., 38:947-958, 2000.