

Comissão 3.3 - Manejo e conservação do solo e da água

INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO EM SOLO CONSTRUÍDO APÓS MINERAÇÃO DE CARVÃO EM DIFERENTES LIMITES CRÍTICOS DE RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO E UMIDADE

Ezequiel Cesar Carvalho Miola^{(1)*}, Eloy Antonio Pauletto⁽²⁾, Cláudia Liane Rodrigues de Lima⁽²⁾, Luiz Fernando Spinelli Pinto⁽²⁾ e Luis Carlos Timm⁽³⁾

⁽¹⁾ Universidade Federal do Rio Grande, Instituto de Ciências Biológicas, São Lourenço do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil.

⁽²⁾ Universidade Federal de Pelotas, Departamento de Solos, Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil.

⁽³⁾ Universidade Federal de Pelotas, Departamento de Engenharia Rural, Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil.

* Autor correspondente.

E-mail: ezequielmiola@gmail.com

RESUMO

Na quantificação do intervalo hídrico ótimo (IHO), são utilizados diferentes limites críticos de resistência à penetração (RP) e umidade na capacidade de campo (θ_{CC}). Para solos agrícolas, esses valores estão sendo documentados na literatura. Entretanto, para solos construídos após mineração de carvão, constata-se grande lacuna de informações. O objetivo deste trabalho foi quantificar a faixa de variação do intervalo hídrico ótimo de um solo construído sob diferentes plantas de cobertura na área de mineração de carvão de Candiota, sul do Brasil, considerando diferentes limites críticos de umidade do solo na capacidade de campo e de resistência à penetração. Foram avaliadas no experimento, em blocos casualizados com quatro repetições, as seguintes plantas de cobertura: Hemátria (*Hemarthria altissima* (Poir.) Stapf & C. E. Hubbard), tratamento 1 (T1); Pensacola (*Paspalum notatum* Flügge), tratamento 2 (T2); Grama Tifton (*Cynodon dactylon* (L.) Pers.), tratamento 3 (T3); Controle (*Urochloa brizantha* (Hochst.) Stapf), tratamento 4 (T4); e sem plantas de cobertura, tratamento 5 (T5). Para determinar o IHO, foram utilizados diferentes valores críticos de θ_{CC} referentes às tensões de 0,006; 0,01; e 0,033 MPa e RP de 1,5; 2,0; 2,5; e 3,0 MPa, mantendo-se sempre constante a umidade do solo no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) como sendo igual ao valor retido na tensão de 1,5 MPa e a umidade do solo em que a porosidade de aeração (PA) é de 10 %. A faixa de variação do IHO foi maior no solo construído cultivado com *Urochloa brizantha*; e a menor com Pensacola, independentemente dos limites críticos de θ_{CC} e de RP. Os limites críticos de θ_{CC} e de RP utilizados na definição do IHO originaram

diferentes valores de densidade crítica (Dsc) para o solo construído sob diferentes plantas de cobertura. Os menores e maiores valores de Dsc foram obtidos quando utilizados como limites críticos na definição do IHO, o $\theta_{CC} = 0,033$ MPa e a $RP = 3$ MPa. O solo construído cultivado com *Urochloa brizantha* e *Hemátrria* apresentou valor de Ds muito próximo ao de Dsc.

Palavras-chave: densidade crítica, plantas de cobertura, qualidade do solo, solos construídos.

ABSTRACT: LEAST LIMITING WATER RANGE IN CONSTRUCTED SOIL AFTER COAL MINING IN DIFFERENT CRITICAL LIMITS OF PENETRATION RESISTANCE AND WATER CONTENT

*In quantifying the least limiting water range (LLWR), different critical limits of resistance to penetration (RP) and moisture at field capacity (θ_{FC}) are generally used. For agricultural soils, these values are documented in the literature. However, for constructed soil after coal mining, there is a large information gap. The aim of this study was to quantify the least limiting water range of a constructed soil under different cover crops in a coal mining area in Candiota, RS (Southern Brazil), considering different critical limits of θ_{FC} and RP. A randomized block experimental design with four replications was used, with the following cover crops: *Hemarthria altissima* (Poir.) Stapf & C.E. Hubbard, treatment 1 (T1); *Paspalum notatum* Flüggé, treatment 2 (T2); *Cynodon dactylon* (L.) Pers., treatment 3 (T3); control of *Urochloa brizantha* (Hochst.) Stapf, treatment 4 (T4); and no cover crop, treatment 5 (reference treatment, T5). To determine the LLWR, different critical values were used for θ_{FC} (-0.006, -0.01, and -0.033 MPa) and RP (1.5, 2.0, 2.5, and 3.0 MPa), keeping the soil moisture constant at the permanent wilting point (θ_{PWP}) as equal to the value retained at 1.5 MPa and at air-filled porosity (AP) of 10 %. The variation in the LLWR was higher in the constructed soil under the *Urochloa brizantha* (T4) cover crop, and lower in the constructed soil under the *Paspalum notatum* (T2) cover crop, regardless of the critical limits of θ_{FC} and of RP adopted. The critical limits of θ_{FC} and RP used to calculate the LLWR values gave rise to different values for the critical bulk density (CBD) of the constructed soil under different cover crops. The lowest and highest values of CBD were obtained when a θ_{FC} of 0.033 MPa and an RP of 3 MPa were used as critical limits in calculating the LLWR. The soil bulk density (BD) values of the constructed soil under *Urochloa brizantha* and *Hemarthria* cover crops were very close to the value of CBD.*

Keywords: critical density, cover crops, soil quality, constructed soil.

INTRODUÇÃO

O carvão mineral é um importante recurso para a composição da matriz energética do Brasil. As principais reservas desse mineral encontram-se no Estado do Rio Grande do Sul, mais especificamente no município de Candiota (CRM, 2013). Durante o processo de mineração, são utilizadas máquinas de grande porte para a remoção do solo e das camadas geológicas subjacentes, com posterior recomposição topográfica. Schroeder et al. (2010) e Shrestha e Lal (2011) mencionaram que o processo de mineração causa alterações no meio físico (solo), principalmente nas camadas superficiais, onde as plantas se desenvolvem e que, diante disso, torna-se necessária a restauração da paisagem proporcionando ao solo adequada condição para o desenvolvimento das plantas.

Um dos parâmetros físicos do solo recomendados na literatura para indicar condições adequadas ao estabelecimento das culturas é o intervalo hídrico ótimo (IHO). O IHO define a faixa de umidade do solo em que são mínimas as restrições físicas

ao crescimento das plantas. Representa um avanço em relação ao conceito tradicional de água disponível (Letey, 1985) por incluir limitações em função da resistência mecânica à penetração (RP) e da porosidade de aeração do solo (PA) ao desenvolvimento do sistema radicular (Silva et al., 1994). Trabalhos têm sido publicados na literatura adotando valores de 2,0 MPa para RP (Taylor et al., 1966), de 10 % para PA (Grable e Siemer, 1968), de 0,01 MPa para o conteúdo de água referente à capacidade de campo (CC) (Reichardt, 1988) e de 1,5 MPa para o conteúdo de água referente ao ponto de murcha permanente (PMP) (Savage et al., 1996). Em se tratando de solos construídos, Lima et al. (2012) também adotaram esses limites para calcular o IHO que foi utilizado como indicador na avaliação do desempenho de quatro diferentes plantas de cobertura em restaurar a condição natural da paisagem em área de mineração em Candiota, no RS, Brasil.

Para determinar o IHO de solos agrícolas, alguns valores de RP (Tormena et al., 1998; Leão et al., 2006; Lima et al., 2007) e de CC (Silva et al., 1994;

Wilson et al., 2013) têm sido utilizados como limites críticos ao desenvolvimento radicular. Entretanto, para melhorar a qualidade física de solos construídos sob efeito de diferentes plantas de cobertura, ainda há carência de informações no que diz respeito à definição de valores de capacidade de campo e de resistência à penetração na estimativa do IHO. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi quantificar a faixa de variação do intervalo hídrico ótimo de um solo construído sob diferentes plantas de cobertura na área de mineração de carvão, no sul do Brasil (Candiota, Rio Grande do Sul), considerando diferentes limites críticos de umidade do solo na capacidade de campo e de resistência à penetração.

MATERIAL E MÉTODOS

Área experimental

O estudo foi conduzido em uma área de mineração de carvão pertencente à Companhia Riograndense de Mineração (CRM), localizada no município de Candiota, Rio Grande do Sul (31° 33' 51,8" S e 53° 43' 28,1" O). O clima da região é do tipo Cfa, conforme classificação climática de Köppen, e a área específica é representativa de um ambiente marinho subtropical com verões úmidos e invernos úmidos e, ou, superúmidos (Moreno, 1961).

O solo foi construído no início de 2003, sendo constituído por uma camada de solo superficial ("topsoil") de 0,30-0,40 m, depositada sobre uma camada de "estéreis" (mistura de rochas sedimentares como siltitos, arenitos, argilitos e folhelhos). O solo superficial é procedente de uma mistura de horizontes, com o predomínio do horizonte B, de um Argissolo Vermelho eutrófico típico da área pré-minerada, como indicado pela cor avermelhada (2,5YR 3,5/6), pelos baixos teores de matéria orgânica (1,15 %) e pela classe textural argilosa (315, 209 e 476 g kg⁻¹ de areia, silte e argila, respectivamente).

Antes da instalação do experimento, pelo motivo de a área encontrar-se extremamente compactada por causa da maior circulação de máquinas durante a construção do solo (caminhões com aproximadamente 20 Mg de terra vegetal e tratores de esteira metálica do modelo D8T da Caterpillar® com peso de 38 Mg, potência de 259 kW, comprimento e largura da esteira sobre o solo de 3,20 e 0,56 m, respectivamente, e área de contato das esteiras com o solo de 3,6 m²), o solo construído foi escarificado a aproximadamente 0,15 m, seguido por calagem correspondente a 10,4 Mg ha⁻¹ de calcário com PRNT de 100 % e adubação de 900 kg ha⁻¹ da fórmula 5-20-20, com base em resultados de análise de solo.

O experimento foi instalado no período de novembro a dezembro de 2003, em delineamento experimental de blocos ao acaso com quatro repetições, formado por parcelas de 20 m² (4 × 5 m) com os seguintes tratamentos: T1: solo construído cultivado com Hemátria (*Hemarthria altissima* (Poir.) Stapf & C. E. Hubbard); T2: solo construído cultivado com Pensacola (*Paspalum notatum* Flügge); T3: solo construído cultivado com grama Tifton (*Cynodon dactylon* (L.) Pers.); e T4: controle (*Urochloa brizantha* (Hochst.) Stapf). Para comparação, foi utilizado um tratamento que representa o solo construído sem a implantação de plantas de cobertura (T5), localizado em uma área adjacente ao experimento.

Até o período de amostragem do solo, realizada em abril de 2009, a área experimental foi conduzida por meio de tratos culturais normais às coberturas instaladas (controle manual de invasoras, adubação de cobertura e controle de insetos).

Amostragens de solo

As amostras de solo, com estrutura deformada, foram coletadas na camada de 0,00-0,05 m para a caracterização granulométrica (Gee e Bauder, 1986), densidade de partículas (Dp) (Embrapa, 1997) e carbono orgânico (CO) (Tedesco et al., 1995) (Quadro 1). Para determinar IHO, nessa mesma camada, foram coletadas 280 amostras indeformadas, utilizando cilindros de inox de 0,030 m de altura por 0,0485 m de diâmetro (56 amostras por tratamento: quatro blocos × duas repetições por parcela × sete potenciais matriciais avaliados experimentalmente).

Quadro 1. Argila, areia, silte, carbono orgânico (CO) e densidade de partículas (Dp) de um solo construído sob diferentes tratamentos em área de mineração de carvão

Trat. ⁽¹⁾	Argila	Areia	Silte	CO	Dp
					kg dm ⁻³
	g kg ⁻¹				
T1	464	298	238	7,60	2,60
T2	474	292	234	7,69	2,63
T3	470	283	247	8,16	2,61
T4	453	289	258	7,78	2,60
T5	457	311	232	6,98	2,63
Média	463	295	242	7,64	2,61
CV (%)	1,92	3,61	4,43	5,59	0,58

⁽¹⁾ T1: solo construído cultivado com *Hemarthria altissima*; T2: solo construído cultivado com *Paspalum notatum*; T3: solo construído cultivado com *Cynodon dactylon*; T4: solo construído cultivado com *Urochloa brizantha*; e T5: solo construído sem a implantação de plantas de cobertura.

Análises físicas do solo

As amostras indeformadas de solo foram saturadas em água por um período mínimo de 24 h e submetidas a diferentes potenciais de água (-0,001; -0,003; e -0,006 MPa, em mesa de tensão e -0,01; -0,033; -0,1; e -1,5 MPa, em câmaras de pressão de Richards) para definir o conteúdo de água no solo retido em cada potencial (Klute, 1986). Estabelecido o equilíbrio entre os diferentes potenciais de água, cada amostra foi pesada e determinada a resistência à penetração (RP), em três pontos equidistantes ao centro da amostra, com velocidade de penetração de 10 mm min⁻¹ (Bradford, 1980), utilizando um penetrômetro eletrônico, MA 933 (Marconi Ltda).

Após determinação da RP, as amostras foram secas em estufa a 105 °C, por um período mínimo de 24 h, para definir a densidade do solo (Ds) (Blake e Hartge, 1986) e a umidade gravimétrica (U_g) (Gardner, 1986), posteriormente convertida em umidade volumétrica (θ_v).

Para determinar o IHO, os dados do conteúdo volumétrico de água no solo (θ_v) foram ajustados em razão do módulo do potencial matricial (ψ_m) e da Ds, segundo procedimento proposto por Silva et al. (1994) (Equação 1). A partir dessa equação, foram estimados os valores de θ_{CC} (-0,006 MPa; -0,01 MPa; e -0,033 MPa) e de θ_{PMP} (1,5 MPa). A curva de RP foi ajustada por meio da equação proposta por Busscher (1990) (Equação 2). Os conteúdos de água no solo para os valores de RP de 1,5 MPa, 2,0 MPa, 2,5 MPa e 3,0 MPa foram estimados pela equação 3; e o conteúdo de água em que a porosidade de aeração é de 10 % foi calculado pela equação 4.

$$\theta_v = \exp^{(a+bD_s)} \times \psi_m^c \quad \text{Eq. 1}$$

$$RP = d\theta_v^e D_s^f \quad \text{Eq. 2}$$

$$\theta_{RP} = RP / (d * D_s^{\frac{1}{e}}) \quad \text{Eq. 3}$$

$$\theta_{PA} = \left(1 - \left(\frac{D_s}{D_p}\right)\right) \cdot 0.10 \quad \text{Eq. 4}$$

em que θ_v: conteúdo volumétrico de água no solo (m³ m⁻³); ψ_m: potencial matricial de água no solo (MPa); RP: resistência mecânica do solo à penetração (MPa); Ds: densidade do solo (kg dm⁻³); a, b, c, d, e, f: parâmetros de ajustes dos modelos; e D_p: densidade de partículas do solo (kg dm⁻³).

Os valores obtidos em cada tratamento a partir das equações 1, 3 e 4 foram plotados em função dos valores de Ds para definir o IHO. A densidade do solo crítica (Ds_c), que corresponde ao valor de Ds no qual o IHO é igual a zero, foi definida pela interseção das equações que determinam os limites superior e inferior do IHO.

Análise estatística

Os dados foram previamente submetidos à estatística descritiva (média, coeficiente de variação - CV, valor mínimo e máximo) no intuito de

realizar uma análise exploratória de cada conjunto. A dispersão dos dados em torno da média (CV) foi classificada de acordo com Wilding e Drees (1983): CV ≤ 15 % - baixa dispersão, 15 % < CV ≤ 35 % - moderada dispersão e CV > 35 % - alta dispersão dos dados. Para verificar se os dados observados e estimados pelos modelos (Equações 1 e 2) pertenciam à mesma população, foi aplicado o teste F a 1 % de significância. Todas as análises estatísticas foram realizadas por meio do *software* SAS (SAS, 1999).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Pela estatística descritiva das variáveis físicas do solo (Quadro 2), observou-se que os valores de Ds, θ_v e RP dos tratamentos avaliados foram classificados respectivamente como baixo (CV ≤ 15 %), moderado (15 % < CV ≤ 35 %) e alta variabilidade (CV > 35 %) (Wilding e Drees, 1983). O elevado CV da RP pode estar associado aos diferentes tratamentos e à amplitude de variação de umidade entre as amostras. Resultados similares foram obtidos por Silva et al. (1994), Imhoff et al. (2001), Leão et al. (2004), Tormena et al. (2007), Kaiser et al. (2009) e Blainski et al. (2009).

No quadro 3 são apresentadas as equações de ajuste para as variáveis θ_v e RP em razão dos diferentes tratamentos implantados na área de mineração. Pode ser observado que os coeficientes de determinação (R²) das equações ajustadas para θ_v variaram de 87 % (T2) a 91 % (T1 e T3), enquanto para as equações de ajuste de RP a variação foi de 66 % (T2) a 90 % (T3) (Quadro 3). Dessa forma, tanto a equação adaptada de Silva et al. (1994), para o ajuste das equações de retenção de água, como a proposta por Busscher (1990), para o ajuste da curva de resistência mecânica à penetração, podem ser utilizadas adequadamente para estimar os valores de θ_v e de RP, com base nos valores de R² e da estatística F, que evidenciam que as equações são significativas em todos os tratamentos, com 1 % de significância.

Em todos os tratamentos, a RP foi positivamente correlacionada com Ds e negativamente com θ_v, concordando com Silva et al. (1994), Imhoff et al. (2001), Leão et al. (2004), Tormena et al. (2007) e Blainski et al. (2009). Com o decréscimo de θ_v, o aumento nos valores de RP pode estar associado à maior coesão entre as partículas minerais, principalmente em solos de textura argilosa (Kay e Angers, 1999). Nos solos cultivados com Hemátria (T1), grama Tifton (T3) e sem a implantação de plantas de cobertura (T5), θ_v foi positivamente correlacionado com Ds e negativamente com ψ_m. Já para os solos construídos cultivados com Pensacola (T2) e controle (T4), θ_v foi negativamente correlacionado com Ds, corroborando com os resultados de Araujo et al. (2004) em solos agrícolas.

Quadro 2. Análise estatística descritiva dos atributos físicos de um solo construído sob diferentes tratamentos em área de mineração de carvão

Variável	Média	Mínimo	Máximo	CV
				%
		T1 ⁽¹⁾		
D _s	1,32	1,05	1,57	8,10
θ _v	0,31	0,19	0,48	26,24
RP	1,86	0,28	7,77	91,09
		T2		
D _s	1,39	1,22	1,52	6,10
θ _v	0,32	0,20	0,47	24,21
RP	2,27	0,37	8,82	75,52
		T3		
D _s	1,39	1,16	1,54	5,94
θ _v	0,33	0,20	0,49	25,00
RP	2,25	0,27	6,91	83,86
		T4		
D _s	1,31	1,08	1,47	6,78
θ _v	0,31	0,18	0,51	28,02
RP	1,85	0,27	6,45	83,99
		T5		
D _s	1,36	1,14	1,61	10,27
θ _v	0,31	0,16	0,49	27,02
RP	2,28	0,24	9,90	104,25

N: 56; D_s: densidade do solo (kg dm⁻³); θ_v: conteúdo volumétrico de água (m³ m⁻³); RP: resistência mecânica do solo à penetração (MPa); Min.: valor mínimo da variável; Máx.: valor máximo da variável; CV: coeficiente de variação. ⁽¹⁾ T1: solo construído cultivado com *Hemarthria altissima*; T2: solo construído cultivado com *Paspalum notatum*; T3: solo construído cultivado com *Cynodon dactylon*; T4: solo construído cultivado com *Urochloa brizantha*; e T5: solo construído sem a implantação de plantas de cobertura.

O IHO dos tratamentos avaliados, definido em razão de diferentes limites críticos superiores de θ_{CC}, é apresentado na figura 1.

No solo construído cultivado com *Hemarthria* (T1) (Figura 1a), o limite superior do IHO foi determinado pelo θ_{CC} em toda a extensão de D_s, considerando a condição de θ_{CC} a 0,01 e 0,033 MPa. Na condição de θ_{CC}, a 0,006 MPa, o limite superior do IHO definiu-se somente pelo θ_{CC} em valores de D_s ≤ 1,42 kg dm⁻³, enquanto o limite inferior discriminou-se pelo θ_{PMP} e θ_{RP} em valores inferiores e superiores de D_s iguais a 1,13 kg dm⁻³, respectivamente. Segundo Leão et al. (2004), a identificação da D_s, em que o θ_{RP} substituiu o θ_{PMP} representa um valor de advertência a partir do qual devem ser tomadas precauções no manejo a fim de evitar o aumento da compactação do solo.

No solo construído cultivado com *Pensacola* (T2) (Figura 1b), o limite inferior do IHO foi determinado pelo θ_{RP} em toda a extensão de D_s. Esses resultados indicaram que o θ_{RP} pode restringir o crescimento

Quadro 3. Equações de ajuste das curvas de retenção de água no solo e de resistência mecânica do solo à penetração de um solo construído sob diferentes tratamentos em área de mineração de carvão

Trat. ⁽¹⁾	Equação	R ²	F
T1	θ _v = exp ^(-2,1267+0,3405*D_s) ψ _m ^(-0,1178) RP = 0,0021 θ ^(-3,3978) D _s ^(8,3008)	0,91 0,86	268,56* 171,71*
T2	θ _v = exp ^(-1,1321-0,3522*D_s) ψ _m ^(-0,1119) RP = 0,0071 θ ^(-3,0513) D _s ^(5,8158)	0,87 0,66	184,06* 55,58*
T3	θ _v = exp ^(-1,9419+0,2425*D_s) ψ _m ^(-0,1173) RP = 0,0046 θ ^(-3,1720) D _s ^(6,8891)	0,91 0,90	272,47* 229,31*
T4	θ _v = exp ^(-1,6153-0,1024*D_s) ψ _m ^(-0,1333) RP = 0,0130 θ ^(-2,6444) D _s ^(5,4361)	0,90 0,75	253,96* 75,88*
T5	θ _v = exp ^(-1,7363+0,0181*D_s) ψ _m ^(-0,1241) RP = 0,0041 θ ^(-2,9237) D _s ^(7,5262)	0,88 0,89	193,25* 203,32*

D_s: densidade do solo (kg dm⁻³); θ_v: conteúdo volumétrico de água (m³ m⁻³); RP: resistência mecânica do solo à penetração (MPa); ψ_m: potencial de água no solo (MPa). (1) T1: solo construído cultivado com *Hemarthria altissima*; T2: solo construído cultivado com *Paspalum notatum*; T3: solo construído cultivado com *Cynodon dactylon*; T4: solo construído cultivado com *Urochloa brizantha*; e T5: solo construído sem a implantação de plantas de cobertura. * significativo a 1 %.

radicular das plantas, mesmo quando a umidade ficar próximo daquela equivalente ao ponto de murcha permanente (Kaiser et al., 2009). Nesse solo, o limite superior do IHO é determinado, considerando a condição de θ_{CC} a 0,006 MPa, por valores de D_s ≤ 1,46 kg dm⁻³. Sendo assim, a partir desse valor, o limite superior passa a ser limitado pelo θ_{PA}. Nas condições de θ_{CC} de 0,01 e 0,033 MPa, observou-se que, mesmo com a diminuição do θ_{PA} pelo aumento de D_s, não foram encontrados valores restritivos ao IHO, ou seja, o θ_{PA} não substituiu o θ_{CC} como fator limitante no solo. Tais resultados foram similares aos obtidos por Tormena et al. (1999), Beutler et al. (2006) e Leão et al. (2004), os quais identificaram que o IHO é limitado na parte superior pelo conteúdo de água na capacidade de campo e na parte inferior, pela resistência do solo à penetração. A diminuição do θ_{CC} e a do θ_{PMP} em razão do aumento da D_s podem estar associadas à redução da distribuição do tamanho de poros desse solo.

Solos construídos cultivados com grama Tifton (T3) (Figura 1c) apresentaram aumento da retenção de água no θ_{CC} e θ_{PMP}, com o incremento de D_s. Segundo van den Berg (1997), isso ocorre por causa da maior quantidade de microporos responsáveis pela retenção de água por unidade de volume de solo. Nesse tratamento, o limite inferior do IHO foi delimitado em toda a extensão pelo θ_{RP}. O limite superior considerando a condição de θ_{CC} a 0,006 e 0,01 MPa foi substituído pelo θ_{PA} a partir de valores de D_s, respectivamente maiores ou iguais a 1,38 e a 1,43 kg dm⁻³. Quando se utiliza a condição de θ_{CC} de 0,033 MPa, o limite superior é delimitado pelo θ_{CC} em todos os valores de D_s.

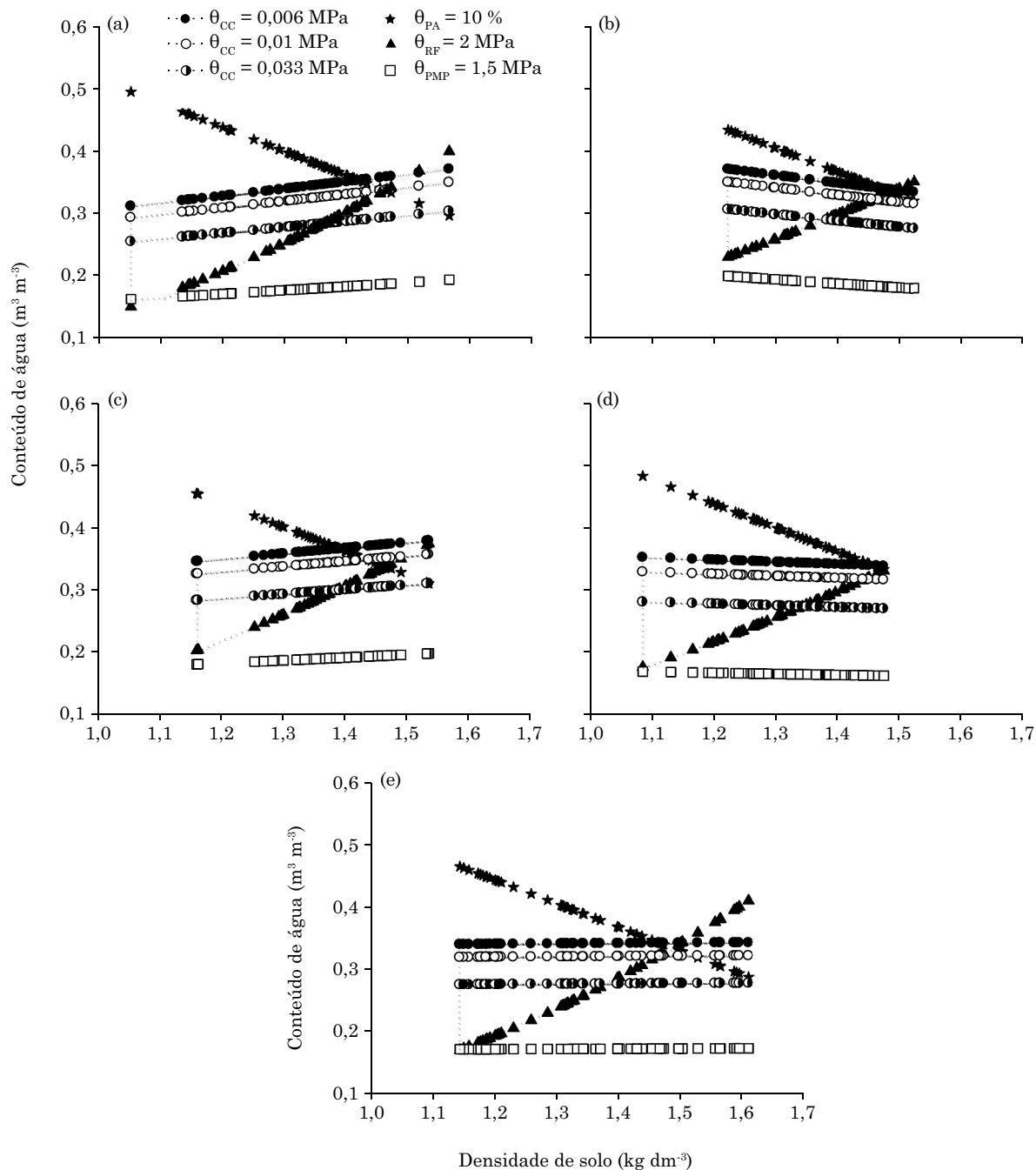


Figura 1. Intervalo hídrico ótimo (IHO) de um solo construído em área de mineração de carvão considerando como limite superior três condições de umidade de solo no potencial de água na capacidade de campo ($\theta_{CC} = 0,006; 0,01$ e $0,033$ MPa). (a) Solo construído cultivado com *Hemarthria altissima* (T1); (b) Solo construído cultivado com *Paspalum notatum* (T2); (c) Solo construído cultivado com *Cynodon dactylon* (T3); (d) Solo construído cultivado com *Urochloa brizantha* (T4); e (e) Solo construído sem a implantação de plantas de cobertura (T5).

No tratamento-controle (T4), solo cultivado com *Urochloa brizantha* (Figura 1d), observou-se que a partir de valores de $D_s \geq 1,44$ kg dm⁻³, o limite superior foi substituído pelo θ_{PA} no θ_{CC} a 0,006 MPa, ou seja, problemas de aeração podem ser limitantes

ao crescimento de plantas. Nos resultados obtidos nos potenciais de 0,033 e 0,01 MPa, o θ_{CC} foi limitante em todo o intervalo do IHO.

Segundo Crusciol et al. (2009), a *Urochloa brizantha* é amplamente utilizada na recuperação de

áreas degradadas, por ser rústica e ter crescimento vigoroso, mesmo em condições de deficiência hídrica, desenvolvendo-se em condições ambientais em que a maioria das culturas produtoras de grãos e de espécies utilizadas para cobertura do solo não apresenta desempenho satisfatório.

O limite superior do IHO no solo construído sem a implantação de plantas de cobertura (T5) foi determinado pelo θ_{CC} a 0,006 MPa para $D_s \leq 1,46 \text{ kg dm}^{-3}$; a partir desse valor o limite superior passou a ser considerado como limitante pelo θ_{PA} (Figura 1e). Ao definir o θ_{CC} a 0,01 e 0,033 MPa, como limites críticos superiores, observou-se que foi determinado em toda a extensão do IHO pelo θ_{CC} . No limite inferior, os valores de θ_{RP} substituíram os de θ_{PMP} em valores de $D_s \geq 1,23 \text{ kg dm}^{-3}$.

Quiñones et al. (2008), caracterizando um solo construído com dois e 24 anos nas Minas do Leão (RS), observaram valores médios de D_s iguais a 1,90 e 2,04 kg dm^{-3} , o que indicou a compactação pelo intenso tráfego de máquinas durante o processo de remoção, transporte e construção dos solos. Como o solo construído sem a implantação de plantas de cobertura (T8) apresentou valores de D_s intermediários aos demais tratamentos (1,36 kg dm^{-3}), pode-se dizer que a área avaliada sofreu menor tráfego de máquinas e, conseqüentemente, menor compactação durante o processo de construção. Essa condição refletiu-se em um intervalo hídrico ótimo semelhante ao solo cultivado com as espécies de cobertura.

As faixas de variação do intervalo hídrico ótimo (ΔIHO) nas diferentes condições de θ_{CC} e o seu percentual de aumento (+) ou diminuição (-) em relação ao tratamento referência (T5) são apresentadas no quadro 4.

Considerando o tempo de avaliação do experimento, notou-se que nas parcelas cultivadas com *Urochloa brizantha* (T4) houve incremento médio de 2,9 % na faixa de variação do IHO ($\Delta\text{IHO T4} > \Delta\text{IHO T5}$). Esse comportamento pode estar associado ao hábito de crescimento do sistema radicular da *Urochloa brizantha*, que pode ter proporcionado maior capacidade de descompactação do solo (Crusciol et al., 2009; Calonego et al., 2011). Entretanto, nas parcelas cultivadas com Pensacola (T2), houve redução média de 20,6 % da faixa de variação do IHO.

Na avaliação do IHO, em solos agrícolas, tem sido adotado a umidade retida na tensão de 0,01 MPa como sendo a capacidade de campo, θ_{CC} (Guedes Filho et al., 2014; Moreira et al., 2014; Romero et al., 2014). No entanto, observou-se neste estudo que a umidade retida na tensão de 0,006 MPa seria o valor mais indicado a ser adotado para se obter menor redução da faixa do IHO em relação ao T5, favorecendo a qualidade físico-hídrica de solos construídos.

Os valores de densidade do solo crítica (D_{sc}) nas diferentes condições de θ_{CC} e o seu percentual de aumento (+) ou diminuição (-) em relação ao

Quadro 4. Faixa de variação do intervalo hídrico ótimo (ΔIHO) e densidade do solo crítica ao desenvolvimento de plantas (D_{sc}) considerando três condições de potencial de água na capacidade de campo (θ_{CC}) em um solo construído sob diferentes tratamentos em área de mineração de carvão

Tratamento ⁽¹⁾	θ_{CC}		
	0,006 MPa	0,01 MPa	0,033 MPa
	$\Delta\text{IHO} (\text{m}^3 \text{m}^{-3})$		
T1	0,1489	0,1307	0,0923
$\Delta\text{ref.} (\%)$	-11,5	-11,4	-10,9
T2	0,1406	0,1199	0,0761
$\Delta\text{ref.} (\%)$	-16,4	-18,7	-26,5
T3	0,1428	0,1227	0,0801
$\Delta\text{ref.} (\%)$	-15,2	-16,8	-22,7
T4	0,1759	0,1528	0,1044
$\Delta\text{ref.} (\%)$	+4,3	+3,5	+0,8
T5	0,1683	0,1475	0,1036
	$D_{sc} (\text{kg dm}^{-3})$		
T1	1,46 (0,0)*	1,46	1,36(-6,8)
$\Delta\text{ref.} (\%)$	-2,7	0,0	-1,5
T2	1,49 (+2,1)	1,46	1,38 (-5,5)
$\Delta\text{ref.} (\%)$	-0,7	0,0	0,0
T3	1,47 (+0,7)	1,46	1,38 (-5,5)
$\Delta\text{ref.} (\%)$	-2,0	0,0	0,0
T4	1,49 (+3,5)	1,44	1,34 (-6,9)
$\Delta\text{ref.} (\%)$	-0,7	-1,4	-2,9
T5	1,50 (+2,7)	1,46	1,38 (-6,8)

⁽¹⁾ T1: solo construído cultivado com *Hemarthria altissima*; T2: solo construído cultivado com *Paspalum notatum*; T3: solo construído cultivado com *Cynodon dactylon*; T4: solo construído cultivado com *Urochloa brizantha*; e T5: solo construído sem a implantação de plantas de cobertura. $\Delta\text{ref.} (\%)$: aumento (+) ou redução (-) como uma porcentagem do T5. *Valores entre parênteses representam a porcentagem de aumento (+) ou redução (-) do valor da D_{sc} considerando a condição "tradicional" de θ_{CC} a 0,01 MPa.

tratamento referência (T5) e à condição tradicional de θ_{CC} a 0,01 MPa são apresentados no quadro 4.

Ao considerar a condição de θ_{CC} a 0,006 e 0,01 MPa, notaram-se, em todos os tratamentos, valores de $D_s < D_{sc}$. Segundo Leão et al. (2004), valores de $D_s < D_{sc}$ indicam a possível não restrição física do solo ao crescimento de raízes. Quando se utiliza a condição de θ_{CC} a 0,033 MPa, encontram-se baixos valores de D_{sc} , em média 6,3 % menores do que considerando condição tradicional de θ_{CC} a 0,01 MPa. Tal comportamento corresponde em alguns tratamentos (T2 e T3) a valores de $D_s > D_{sc}$. A ocorrência de $D_s > D_{sc}$ sinalizou degradação estrutural do solo, o que pode restringir o crescimento das plantas (Tormena et al., 2007).

A D_{sc} é variável em razão do nível de compactação e da textura (Wu et al., 2003). Solos com alta

densidade, como aqueles cultivados com Pensacola (T2) e grama Tifton (T3), atingem altos níveis de resistência à penetração com menor variação de umidade, o que possivelmente pode reduzir o crescimento radicular dessas espécies.

A D_{s_c} varia também por causa da RP para determinar o IHO. Nesse sentido, o IHO foi

recalculado para valores de RP iguais a 1,5; 2,0; 2,5; e 3,0 MPa (Figura 2), que têm sido mencionados na literatura como valores críticos de RP (Kaiser et al., 2009). Sendo assim, a partir da figura 2, observaram-se valores de D_{s_c} variando de 1,40 a 1,51 kg dm^{-3} (T1); 1,40 a 1,54 kg dm^{-3} (T2); 1,42 a 1,51 kg dm^{-3} (T3); 1,37 a 1,55 kg dm^{-3} (T4); e 1,41 a 1,56 kg dm^{-3}

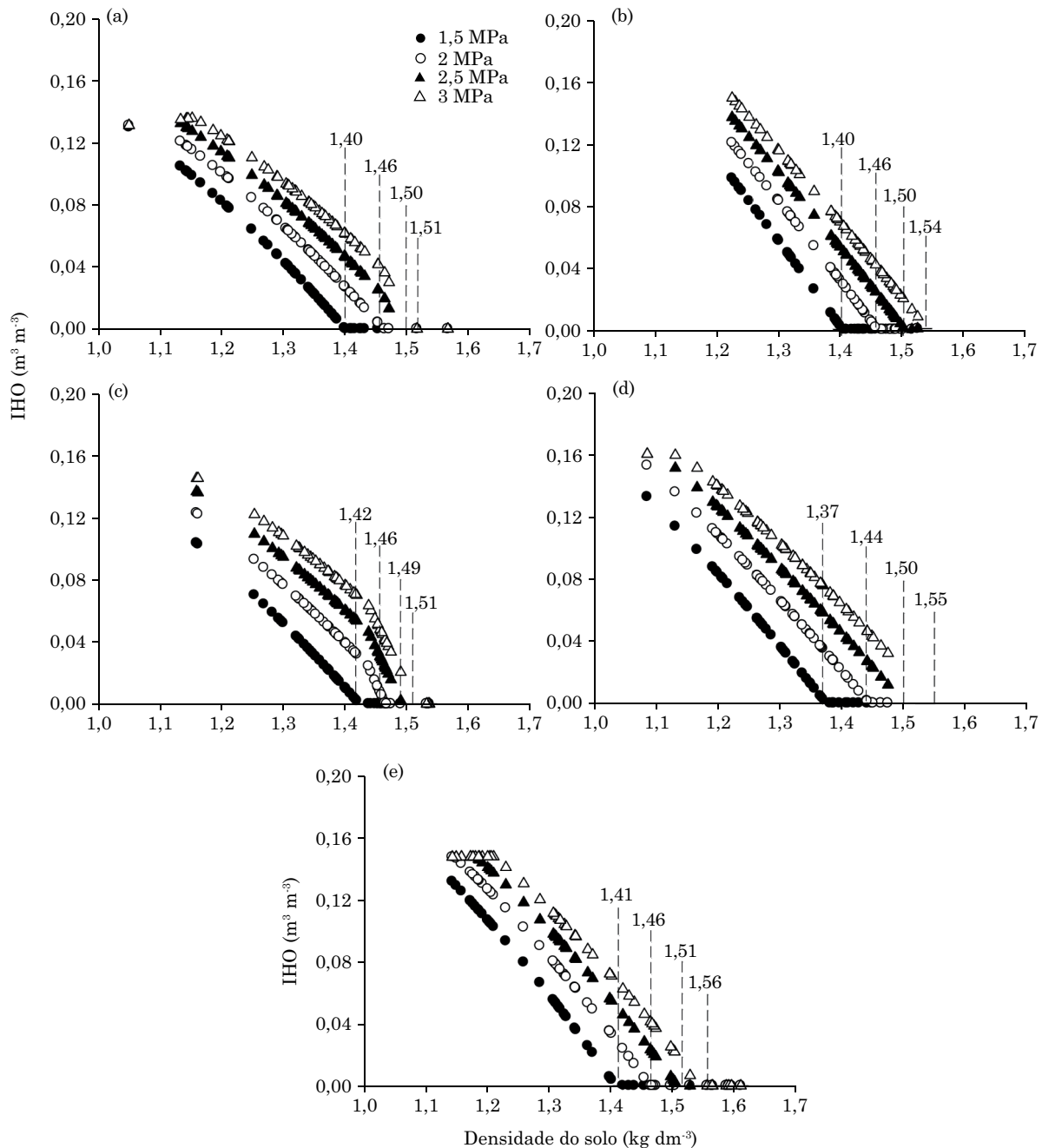


Figura 2. Intervalo hídrico ótimo sob diferentes níveis críticos de resistência mecânica do solo à penetração. (a) Solo construído cultivado com *Hemarthria altissima* (T1); (b) Solo construído cultivado com *Paspalum notatum* (T2); (c) Solo construído cultivado com *Cynodon dactylon* (T3); (d) Solo construído cultivado com *Urochloa brizantha* (T4) e (e) Solo construído sem a implantação de plantas de cobertura (T5). $\theta_{CC} = 0,001$ MPa; $\theta_{PMP} = 1,5$ MPa e $\theta_{PA} = 10$ %. As linhas verticais pontilhadas indicam, da esquerda para a direita, os valores críticos de D_{s_c} considerando as condições de RP igual a 1,5; 2,0; 2,5; e 3,0 MPa.

kg dm⁻³ (T5). Tais valores estão próximos daqueles definidos para solos agrícolas por Kaiser et al. (2009) e Leão et al. (2004).

Destaca-se ainda um valor máximo de IHO de 0,1601 m³ m⁻³, em solo cultivado com *Urochloa brizantha* (T4), quando a RP crítica foi de 3 MPa.

Pesquisas nessa área ainda são incipientes e necessárias, principalmente em locais de recuperação de solos construídos após mineração. Para futuras pesquisas, sugere-se avaliar o IHO em camadas de solo subsuperficiais, as quais podem indicar diferentes comportamentos em razão da espécie vegetal implantada em cada área.

CONCLUSÕES

A faixa de variação do intervalo hídrico ótimo foi maior no solo construído cultivado com *Urochloa brizantha* e menor no cultivado com Pensacola, independentemente dos limites críticos de θ_{CC} e de RP.

Os limites críticos de θ_{CC} e RP utilizados na definição do IHO originaram diferenciados valores de Ds_c para o solo construído sob diferentes plantas de cobertura.

Os menores e maiores valores de densidade do solo crítica foram obtidos quando utilizados como limites críticos na definição do IHO, $\theta_{CC} = 0,033$ MPa e RP = 3 MPa.

O solo construído cultivado com *Urochloa brizantha* e Hemátria apresentou valor de densidade muito próximo ao de Ds_c .

AGRADECIMENTOS

Ao apoio financeiro concedido pela Companhia Riograndense de Mineração (CRM) e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

REFERÊNCIAS

- Araujo MA, Tormena CA, Silva AP. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. R Bras Ci Solo. 2004;28:337-45.
- Beutler AN, Centurion JF, Silva AP, Barbosa JC. Intervalo hídrico ótimo e produtividade de culturas de soja. R Bras Eng Agríc Amb. 2006;10:639-45.
- Blainski E, Gonçalves ACA, Tormena CA, Folegatti MV, Guimarães RML. Intervalo hídrico ótimo num Latossolo Vermelho distroférico irrigado. R Bras Ci Solo. 2009;33:273-81.
- Blake GR, Hartge KH. Bulk density. In: Klute A, editor. Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods. 2ª ed. Madison: American Society of Agronomy; 1986. p.363-75.
- Bradford M. The penetration resistance of a soil with well defined structural units. Soil Sci Soc Am J. 1980;44:601-6.
- Busscher WJ. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. Trans Am Soc Agric Eng. 1990;3:519-24.
- Calonego JC, Gomes TC, Santos CH, Tiritan CS. Desenvolvimento de plantas de cobertura em solo compactado. Biosci J. 2011;27:289-96.
- Companhia Riograndense de Mineração - CRM. Carvão [internet]. Porto Alegre; 2013 [acesso em 15 nov 2013]. Disponível em: <http://www.crm.rs.gov.br/conteudo/858/?Mina-de-Candiota#.UeQ2PG2NzN4>.
- Crusciol CAC, Soratto RP, Borghi E, Mateus GP. Integração lavoura-pecuária: benefícios das gramíneas perenes nos sistemas de produção. Inf Agron. 2009;125:2-15.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. Manual de métodos de análise de solos. 2ª ed. Rio de Janeiro; 1997.
- Gardner WH. Water content. In: Klute A, editor. Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods. 2ª ed. Madison: American Society of Agronomy; 1986. p.493-544.
- Gee GW, Bauder JW. Particle-size analysis. In: Klute A, editor. Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods. 2ª ed. Madison: American Society of Agronomy; 1986. p.383-411.
- Guedes-Filho O, Silva AP, Giarola NF, Tormena CA. Least limiting water range of the soil seedbed submitted to mechanical and biological chiseling under no-till. Soil Res. 2014;52:521-32.
- Grable AR, Siemer EG. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots. Soil Sci Soc Am Proc. 1968;32:180-6.
- Imhoff S, Silva AP, Dias Junior MS, Tormena CA. Quantificação de pressões críticas para o crescimento das plantas. R Bras Ci Solo. 2001;25:11-8.
- Kaiser DR, Reinert DJ, Reichert JM, Collares GL, Kunz M. Intervalo hídrico ótimo no perfil explorado pelas raízes de feijoeiro em um solo sob diferentes níveis de compactação. R Bras Ci Solo. 2009;33:845-55.
- Kay BD, Angers DA. Soil structure. In: Sumner ME, editor. Handbook of soil science. Boca Raton: Chemical Rubber Company Press; 1999. p.229-76.
- Klute A. Water retention: Laboratory methods. In: Black CA, editor. Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods. 2ª ed. Madison: American Society of Agronomy; 1986. p.635-62.
- Leão TP, Silva AP, Macedo MCM, Imhoff S, Euclides VPB. Intervalo hídrico ótimo na avaliação de sistemas de pastejo contínuo e rotacionado. R Bras Ci Solo. 2004;28:415-23.
- Leão TP, Silva AP, Macedo MCM, Imhoff S, Euclides VPB. 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. 2006;88:279-85.
- Letej J. Relationship between soil physical properties and crop production. Adv Soil Sci. 1985;1:277-94.
- Lima CLR, Miola ECC, Timm LC, Pauletto EA, Silva AP. Soil compressibility and least limiting water range of a constructed soil under cover crops after coal mining in Southern Brazil. Soil Till Res. 2012;124:190-5.

- Lima CLR, Reichert JM, Reinert DJ, Suzuki LEAS, Dalbianco L. Densidade crítica ao crescimento de plantas considerando água disponível e resistência à penetração de um Argissolo Vermelho distrófico arênico. *Ci Rural*. 2007;37:1166-9.
- Moreira FR, Dechen SCF, Silva AP, Figueiredo GC, De Maria IC, Pessoni PT. Intervalo hídrico ótimo em um Latossolo Vermelho cultivado em sistema semeadura direta por 25 anos. *R Bras Ci Solo*. 2014;38:118-27.
- Moreno JA. Clima do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura; 1961.
- Quiñones ORG, Inda Junior AV, Giasson E, Bissani CA, Dick DP. Características de solos construídos após mineração de carvão relacionadas ao processo de construção e à composição do material utilizado. *Ci Rural*. 2008;38:1564-71.
- Reichardt K. Capacidade de campo. *R Bras Ci Solo*. 1988;12:211-6.
- Romero EM, Ruiz HA, Fernandes RBA, Costa LM. Condutividade hidráulica, porosidade, resistência mecânica e intervalo hídrico ótimo em Latossolos artificialmente compactados. *R Bras Eng Agríc Amb*. 2014;18:1003-9.
- Savage MJ, Ritchie JT, Bland WL, Dugas WA. Lower limit of soil water availability. *Agron J*. 1996;88:844-51.
- Schroeder PD, Daniels WL, Alley MM. Chemical and physical properties of reconstructed mineral sand mine soils in Southeastern Virginia. *Soil Sci*. 2010;175:2-9.
- Shrestha RK, Lal R. Changes in physical and chemical properties of soil after surface mining and reclamation. *Geoderma*. 2011;161:168-76.
- Silva AP, Kay BD, Perfect E. Characterization of the least limiting water range. *Soil Sci Soc Am J*. 1994;58:1775-81.
- Statistical Analysis System Institute - SAS/STAT. Procedure guide for personal computers; version 9. Cary; 1999.
- Taylor HM, Roberson GM, Parker Junior JJ. Soil strength-root penetration relations to medium to coarse-textured soil materials. *Soil Sci*. 1966;102:18-22.
- Tedesco MJ, Giancello C, Bissani CA, Bohnen H, Volkweiss, S.J. Análises de solos, plantas e outros materiais. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 1995.
- Tormena CA, Silva AP, Libardi P. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. *R Bras Ci Solo*. 1998;22:573-81.
- Tormena CA, Silva AP, Libardi PL. Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach. *Soil Till Res*. 1999;52:223-32.
- Tormena CA, Araújo MA, Fidalski J, Costa JM. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distrófico sob sistemas de plantio direto. *R Bras Ci Solo*. 2007;31:211-9.
- van den Berg BP. Soil bulk density as influenced by grazing intensity and soil type on a shortgrass prairie site. *J Range Manage*. 1997;35:586-8.
- Wilding LP, Drees LR. Spatial variability and pedology. In: Wilding LP, Smeck NE, Hall GF, editors. *Pedogenesis and soil taxonomy: 1. Concepts and interactions*. Amsterdam: Elsevier; 1983. p.83-116.
- Wilson MG, Sasal MG, Caviglia OP. Critical bulk density for a Mollisol and a Vertisol using least limiting water range: Effect on early wheat growth. *Geoderma*. 2013;192:354-61.
- Wu L, Feng G, Letey J, Ferguson L, Mitchell J, McCullough-Sanden B, Markegard G. Soil management effects on the non limiting water range. *Geoderma*. 2003;114:401-14.