



Estimativa da retenção de água em Latossolos do Cerrado mato-grossense cultivados com algodão

Estimation of water retention in Oxisols cultivated with cotton plant in the cerrado of Mato Grosso

José Holanda Campelo Junior¹; Emilio Carlos de Azevedo²; Marcelo de Carvalho Alves³; Dimas de Mello⁴; Francisco de Almeida Lobo⁵; Ricardo Santos Silva Amorim^{6*}

Resumo - No estado de Mato Grosso, a área de plantio com o algodão está concentrada principalmente nos chapadões, onde o clima Aw determina uma alternância entre um período chuvoso e outro seco, e onde os solos Latossolo Vermelho-Amarelo e Latossolo Vermelho são predominantes. Um dos fatores que determinam o sucesso no cultivo dessa espécie é justamente o conhecimento prévio das propriedades hidráulicas dos solos que, por diferentes razões não são variáveis de amplo conhecimento nas áreas de produção. Neste trabalho objetivou-se verificar a adequação de funções de pedotransferência para avaliar a capacidade de retenção de água dos solos de regiões produtoras de algodão em Mato Grosso, levando-se em consideração a densidade aparente e conteúdo de argila, silte e areia do solo. Para isso, foram coletadas amostras de solo em 21 talhões de produção de algodão do Mato Grosso, para determinação da distribuição do tamanho de partículas, da densidade aparente e da curva de retenção de água no solo. Na região de produção de algodão em Mato Grosso, as funções de pedotransferência, $0,334 - 0,0003 \cdot Ar$ e $0,247 - 0,0003 \cdot Ar$, para estimativas dos conteúdos de água nas tensões de 0,033 e 1,5 MPa, respectivamente, são adequadas para avaliar a capacidade de retenção de água dos solos dos talhões de cultivo de algodão nesse Estado.

Palavras-chave - Conteúdo de água no solo. Funções de pedotransferência. Potencial mátrico.

Abstract - In the state of Mato Grosso, the area planted with cotton is mainly concentrated in the plains, where the climate Aw determines an alternation between a rainy and a dry season, and where the soil is predominant Red-Yellow Latosol and Red Latosol (Oxisol). One of the factors that determine success in cultivation of this species is just the prior knowledge of the hydraulic properties of soils which, for various reasons, are not variables of extensive knowledge in the areas of production. This study aimed to verify the adequacy of pedotransfer functions to evaluate the soil water retention capacity in the cotton regions in Mato Grosso, taking into account the bulk density and content of clay, silt and sand soil. For this, soil samples were collected in 21 plots of commercial production of cotton in the state of Mato Grosso to determinate the particle size distribution, bulk density, and water retention curve in soil. In the region of cotton production in Mato Grosso, the pedotransfer functions, $0,334 - 0,0003 \cdot Ar$ and $0,247 - 0,0003 \cdot Ar$, for estimating the water content in the tensions of 0.033 and 1.5 MPa, respectively, are suitable to evaluate the water retention capacity of the soils of the cotton production plots in this state.

Key words - Soil water content. Pedotransfer functions. Potential matrix.

* Autor para correspondência

¹Professor Titular, Faculdade de Agronomia, Medicina Veterinária e Zootecnia, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, MT, Brasil, campelo@ufmt.br

²Professor Associado, Faculdade de Agronomia, Medicina Veterinária e Zootecnia, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, MT, Brasil, emilioaz@ufmt.br

³Professor Adjunto, Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, Brasil, marcelocarvalhoalves@gmail.com

⁴Engenheiro Agrônomo, Faculdade de Agronomia, Medicina Veterinária e Zootecnia, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, MT, Brasil, dimello1@hotmail.com

⁵Professor Associado, Faculdade de Agronomia, Medicina Veterinária e Zootecnia, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, MT, Brasil, fdealobo@gmail.com

⁶Professor Associado, Faculdade de Agronomia, Medicina Veterinária e Zootecnia, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, MT, Brasil, rsamorim@ufmt.br

Introdução

A produção esperada de algodão em Mato Grosso na safra 2011/2012 é da ordem de dois milhões de toneladas, considerando-se a estimativa dos cotonicultores de uma área de cultivo da ordem 700 mil hectares, já implantada, e um rendimento médio de 3.500 kg ha⁻¹, semelhante ao obtido na safra anterior (INSTITUTO MATO-GROSSENSE DO ALGODÃO, 2012).

Embora o estado tenha dimensões continentais, essa área utilizada na produção corresponde a menos de 1% do território e se concentra nos chapadões onde os solos Latossolo Vermelho-Amarelo e Latosso Vermelho são predominantes. Esses solos apresentam inicialmente boas condições físicas para utilização agrícola após a retirada da vegetação natural, apesar de apresentarem limitações em termos de fertilidade natural para o desenvolvimento das plantas (FRAZÃO *et al.*, 2008; RESENDE *et al.*, 2012).

O clima da região é do tipo Aw, tropical de savana, de alternância de períodos chuvosos e secos bem definidos, que favorecem a cultura do algodão pelos respectivos efeitos no crescimento da planta e na qualidade do capulho depois de aberto. Entretanto, o atraso na semeadura pode acarretar redução de produção em consequência de uma inadequada disponibilidade de água para as plantas, sobretudo em talhões de produção com menor capacidade de armazenamento de água no solo (REICHERT *et al.*, 2009).

Nesse contexto, o conhecimento dos atributos físico-hídricos dos solos, sobretudo da curvas de retenção de água no solo, devem ser obtidos antes da implantação da cultura, uma vez que esses atributos são decisivos para o planejamento da semeadura e manejo da água no solo. Entretanto, a obtenção dessas curvas se constitui uma dificuldade para os produtores, considerando-se o seu elevado custo, morosidade para aquisição dos resultados e escassez de laboratórios que prestam esse tipo de serviço, especialmente, no Estado de Mato Grosso.

Uma alternativa promissora é o emprego de funções de pedotransferência, que permitam obter estimativas dos mesmos resultados, a partir de outros atributos do solo cuja determinação seja mais comum, mais simples, mais rápida, mais barata ou que já sejam conhecidos, como a densidade do solo e os teores de areia, silte e argila (SILVA *et al.*, 2008; DEXTER, RICHARD, 2009; CARDUCCI *et al.*, 2011; MICHELON *et al.*, 2010; OLIVEIRA *et al.*, 2002; NEBEL *et al.*, 2010; KHODAVERDILOO *et al.*, 2011).

O modelo de van Genuchten (1980) tem sido o mais usado para obter a expressão analítica da curva de retenção, mas como se trata de uma expressão empírica, existem outros modelos que podem ser igualmente ou mais adequados para uma situação específica, mesmo no

caso do uso de funções de pedotransferência (DEXTER; RICHARD, 2009; VAN ENGELEN; MANTEL, 2009; CARDUCCI *et al.*, 2011). Além disso, a disponibilidade da água no solo pode ser analisada de um modo mais simplificado, considerando-se os limites de 0,01 ou de 0,033 e de 1,5 MPa, para estimar a capacidade de retenção de água do solo (DEXTER; RICHARD, 2009; VAN ENGELEN; MANTEL, 2009; CARDUCCI *et al.*, 2011).

Para os profissionais da área agrícola e para os produtores, a identificação de uma função de pedotransferência adequada para a região em que atuam representa uma ferramenta de grande utilidade, pois permitiria obter estimativas preliminares da capacidade de armazenamento de água no solo nos talhões de produção. Uma vez que as decisões sobre o manejo da cultura se mostrem mais acertadas quando se incluir uma estimativa inicial da capacidade de armazenamento de água do solo, maior interesse haverá na determinação mais acurada desse atributo do solo.

Objetivou-se neste trabalho verificar a adequação de funções de pedotransferência aplicáveis a Latossolos da região de produção de algodão em Mato Grosso para avaliar a capacidade de retenção de água dos solos.

Material e métodos

Para desenvolvimento do presente trabalho, foram selecionados 21 pontos e amostrados solos da mesma classe (Latosolos) localizados em talhões de produção comercial de algodão no Estado de Mato Grosso (Tabela 1). Esses pontos foram selecionados em função da representatividade dos solos predominantemente utilizados para produção de algodão no estado, contemplando-se os seguintes solos: LATOSSOLO VERMELHO Distrófico de textura argilosa e muito argilosa em maior proporção; e em menor proporção LATOSSOLO VERMELHO Distrófico de textura média e LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico de textura média. Esses solos são profundos, com baixo teor de silte, baixo teor de materiais facilmente intemperizáveis, perfil homogêneo, estrutura granular, não hidromórficos, distróficos, são muito intemperizados e de baixa fertilidade. Contudo, com aplicações adequadas de corretivos e fertilizantes, aliadas à época propícia de plantio de cultivares adaptadas, obtêm-se boas produções.

Em cada um desses talhões, foram coletadas amostras de solo deformadas com auxílio de trado holandês, e indeformadas, com auxílio de amostrador de Kopeck com anéis volumétricos de 100 cm³, em cinco profundidades do perfil do solo (0-20, 20-40, 40-60, 60-80, e 80-100 cm), totalizando 210 amostras, sendo 105 deformadas e 105 indeformadas.

As amostras foram devidamente acondicionadas

Tabela 1 - Pontos de amostragem e localização geográfica das amostras de solos coletadas em plantios comerciais de algodão. Mato Grosso, 2011

Table 1 - Sampling points and geographic localization of soil samples taken in commercial production plots of cotton. Mato Grosso, state, 2011

Áreas	Município	Latitude S	Longitude W
1	Campo Verde	15°28'20,40"	54°54'20,83"
2	Campo Verde	15°32'17,73"	55°21'23,19"
3	Campo Verde	15°11'01,77"	55°08'42,89"
4	Primavera do Leste	15°14'08,80"	54°26'32,65"
5	Novo São Joaquim	15°08'04,91"	53°33'53,87"
6	Novo São Joaquim	15°08'14,05"	53°33'51,16"
7	Santo Antônio do Leste	14°54'05,54"	53°53'01,22"
8	Nova Mutum	13°38'28,39"	55°57'34,76"
9	Tangará da Serra	14°05'41,94"	57°58'26,10"
10	Diamantino	13°56'43,83"	57°16'42,12"
11	Diamantino	14°01'38,15"	57°25'03,75"
12	Campos de Júlio	13°37'47,30"	59°08'17,53"
13	Sapezal	13°48'49,58"	58°51'00,03"
14	Sapezal	13°13'48,00"	58°45'49,12"
15	Sapezal	13°13'52,45"	58°46'11,76"
16	Sapezal	13°49'05,91"	58°51'02,37"
17	Nova Ubiratã	13°22'26,91"	54°42'23,55"
18	Sorriso	12°48'37,36"	55°45'34,12"
19	Pedra Preta	16°45'46,58"	54°00'25,33"
20	Rondonópolis	16°42'58,37"	54°51'01,61"
21	Itiquira	17°09'51,66"	54°27'35,67"

e transportadas ao Laboratório de Física do Solo da Faculdade de Agronomia, Medicina Veterinária e Zootecnia da Universidade Federal de Mato Grosso (FAMEVZ/UFMT) para determinação da distribuição do tamanho de partículas (conteúdos de argila, silte e areia), densidade aparente e conteúdo de água sob as tensões de 0; 0,006; 0,033; 0,102; 0,306; 0,510 e 1,530 MPa. A distribuição de partículas foi determinada mediante análise granulométrica efetuada com o uso do método do densímetro de Boyoucos. A densidade aparente foi obtida com o método do anel volumétrico. O conteúdo de água nas duas primeiras tensões foi determinado em mesa de tensão e as demais em câmaras extratoras de Richards. Todas as determinações foram realizadas conforme os procedimentos da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA,1997).

Para representar o conteúdo de água (θ , $m^3 m^{-3}$), em função do potencial matricial (θ_m , em MPa), foram utilizadas as equações 1 e 2, de Rijtema (1969) e de van Genuchten (1980), respectivamente:

$$\theta = \theta_x \cdot |\theta_m|^{-\gamma \ln |\theta_m|} \quad (1)$$

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha \cdot \theta_m|^n]^{1/n}} \quad (2)$$

sendo:

θ_x - teor de água ($cm^3 cm^{-3}$);

θ_m - potencial matricial (MPa);

γ - índice de distribuição de tamanho de poros, adimensional;

θ_r - teor de água residual ($cm^3 cm^{-3}$);

θ_s - teor de água no momento da saturação do solo ($cm^3 cm^{-3}$); e

α , n e m - parâmetros de ajuste estatístico da curva, dependentes da natureza do solo.

Os parâmetros da curva de retenção de água no solo, para dados medidos de conteúdo de água e potencial

matricial foram ajustados para cada profundidade em cada perfil utilizando-se o software Soil Water Retention Curve (SWRC) versão 2.0 (DOURADO-NETO *et al.*, 2000). Com o software Excel e de posse desses parâmetros, procedeu-se a análise de regressão linear múltipla, para se obter a relação entre os parâmetros das equações e os resultados de densidade aparente e distribuição de partículas. Análise semelhante foi realizada para o conteúdo de água do solo sob os potenciais mátricos de 0,033 e 1,5 MPa medidos e de 0,01 MPa calculados com a equação de van Genuchten (1980). Esta última foi utilizada para contemplar uma alternativa menos frequente de estimar a capacidade de armazenamento de água disponível no solo.

A análise de regressão aqui empregada para obter as funções de pedotransferência foi realizada sem fazer distinção entre as profundidades de coleta das amostras. Essa escolha se baseou no trabalho de Marques *et al.* (2002), que não encontraram coincidência entre horizontes pedológicos e camadas hidráulicas e verificaram que nem sempre as propriedades hidráulicas sofriam variações à medida que ocorria transição nos horizontes pedológicos no perfil. Além disso, essa opção permitiu a ampliação do universo de dados incluídos na análise de cada parâmetro hidráulico.

Além da análise das duas equações de ajuste de todos os pontos da curva de retenção, verificou-se o

desempenho das mesmas funções de pedotransferência ajustadas por Lal (1979), Arruda *et al.* (1987), Dijkerman (1988), Oliveira *et al.* (2002) e Urach (2007), elencadas na Tabela 2, e de uma função de pedotransferência obtida com os dados do presente trabalho com o auxílio do software Rosetta (SCHAAP *et al.*, 2001).

Inicialmente, entre os 21 perfis (105 amostras), foram escolhidos 5 perfis (25 amostras), para se proceder à validação dos resultados. Essa escolha foi realizada aleatoriamente entre todos os perfis. Os resultados obtidos em cada profundidade nos 16 perfis restantes (80 amostras) foram utilizados para obtenção dos parâmetros das funções de pedotransferência.

Para validação, os valores calculados (θ_c) com as equações de pedotransferência e os resultados observados (θ_o), nas 5 profundidades e nos 5 perfis ($n=25$), escolhidos ao acaso exclusivamente para esse fim, foram comparados, utilizando o erro médio (e - Equação 8), a raiz do quadrado médio erro (RMSE - Equação 9), o índice de concordância (d - Equação 10), de Willmott (1981), e o coeficiente de determinação (r^2 - Equação 11), expressos como:

$$e = \frac{\sum(\theta_e - \theta_o)}{n} \quad (8)$$

$$RMSE = \left(\frac{\sum(\theta_e - \theta_o)^2}{n} \right)^{1/2} \quad (9)$$

Tabela 2 - Funções de pedotransferência utilizadas para estimar o conteúdo de água no solo sob os potenciais mátricos de 0,033 MPa e de 1,5 MPa ($\theta_{0,033}$ e $\theta_{1,5}$ em $m^3 m^{-3}$, respectivamente) em talhões de produção comercial de algodão. Mato Grosso, 2011

Table 2 - Pedotransfer functions used to estimate the soil water retention in matric potential of 0.033 MPa and 1.5 MPa on commercial production plots of cotton. Mato Grosso state, 2011

Fonte	Equação	
Lal (1979)	$\theta_{0,033}/d = 0,334 - 0,0003 \cdot Ar$	(3a)
	$\theta_{1,5}/d = 0,247 - 0,0003 \cdot Ar$	(3b)
Arruda <i>et al.</i> (1987)	$\theta_{0,033}/d = [3,074 + 0,063 \cdot (Ag + S) - 0,000003 \cdot (Ag + S)^2]/10^2$	(4a)
	$\theta_{1,5}/d = [39,9 \cdot (Ag + S)/(1308,09 + 0,1 \cdot (Ag + S)]/10^2$	(4b)
Dijkerman (1988)	$\theta_{0,033}/d = 0,3697 - 0,00035 \cdot Ar$	(5a)
	$\theta_{1,5}/d = 0,0074 - 0,00039 \cdot Ar$	(5b)
Oliveira <i>et al.</i> (2002)	$\theta_{0,033}/d = 0,000333 \cdot S + 0,000387 \cdot Ag$	(6a)
	$\theta_{1,5}/d = 0,38 \cdot Ar + 1,53 \cdot S + 3,41 \cdot Ag - 308,61 \cdot d/10^4$	(6b)
Urach (2007)	$\theta_{0,033}/d = 0,643 - 0,000238 \cdot Ar - 0,26767 \cdot d$	(7a)
	$\theta_{1,5}/d = 0,462 - 0,00022 \cdot Ar - 0,000074 \cdot S - 0,1838 \cdot d$	(7b)

d - densidade do solo ($Mg m^{-3}$); Ag - conteúdos de argila ($kg kg^{-1}$); S -, silte ($kg kg^{-1}$) e Ar - areia ($kg kg^{-1}$).

d - bulk density ($Mg m^{-3}$); Ar - clay content ($kg kg^{-1}$); S - silt content ($kg kg^{-1}$) and Ar - sand content ($kg kg^{-1}$).

$$d = 1 - \frac{\sum(\theta_e - \theta_o)^2}{\sum[|(\theta_e - \bar{\theta}_o)| + |(\theta_o - \bar{\theta}_o)|]^2} \quad (10)$$

$$r^2 = \frac{[n \cdot \sum \theta_o \cdot \theta_e - (\sum \theta_o) \cdot (\sum \theta_e)]^2}{[n \cdot \sum \theta_o^2 - (\sum \theta_o)^2] \cdot [n \cdot \sum \theta_e^2 - (\sum \theta_e)^2]} \quad (11)$$

sendo:

θ_e - conteúdo de água estimado;

θ_o - conteúdo de água observado; e

n - número de observações

Resultados e discussão

Na Figura 1, é possível verificar a natureza das amostras quanto às características determinadas com o objetivo de se obterem as funções de pedotransferência. O conteúdo de argila variou de 314 a 978 g kg⁻¹, o silte, de 0 a 100 g kg⁻¹, e o de areia, de 2 a 651 g kg⁻¹. A densidade aparente variou entre 0,964 e 1,509 Mg m⁻³. Considerando-

se o objetivo de obter funções de pedotransferência, é importante ressaltar que os resultados aqui obtidos não devem ser extrapolados para solos com atributos situados além desses limites. Além disso, em geral, a distribuição das amostras de acordo com a densidade aparente apresentou padrão bimodal (1,070 e 1,280 Mg m⁻³), enquanto que os valores modais dos outros atributos foram de 958 g kg⁻¹ de argila, 20 g kg⁻¹ de silte e de 22 g kg⁻¹ de areia, evidenciando que, atualmente, na região, a maioria dos solos cultivados com o algodoeiro se assemelha no que diz respeito à textura. No triângulo de classes texturais, 84 amostras foram classificadas como muito argilosas, cinco amostras como argila, 14 amostras como argila-arenosa e duas amostras como franco argilo-arenosa.

Os resultados das análises de regressão linear múltipla entre os parâmetros das equações de ajuste da curva de retenção e os resultados de densidade aparente e distribuição de partículas do solo encontram-se na Tabela 3. Esses resultados indicam que, em geral, para os solos estudados, somente um dos parâmetros em cada uma das equações teve a maior parte de sua variância causada pelas variáveis independentes testadas, com um valor de

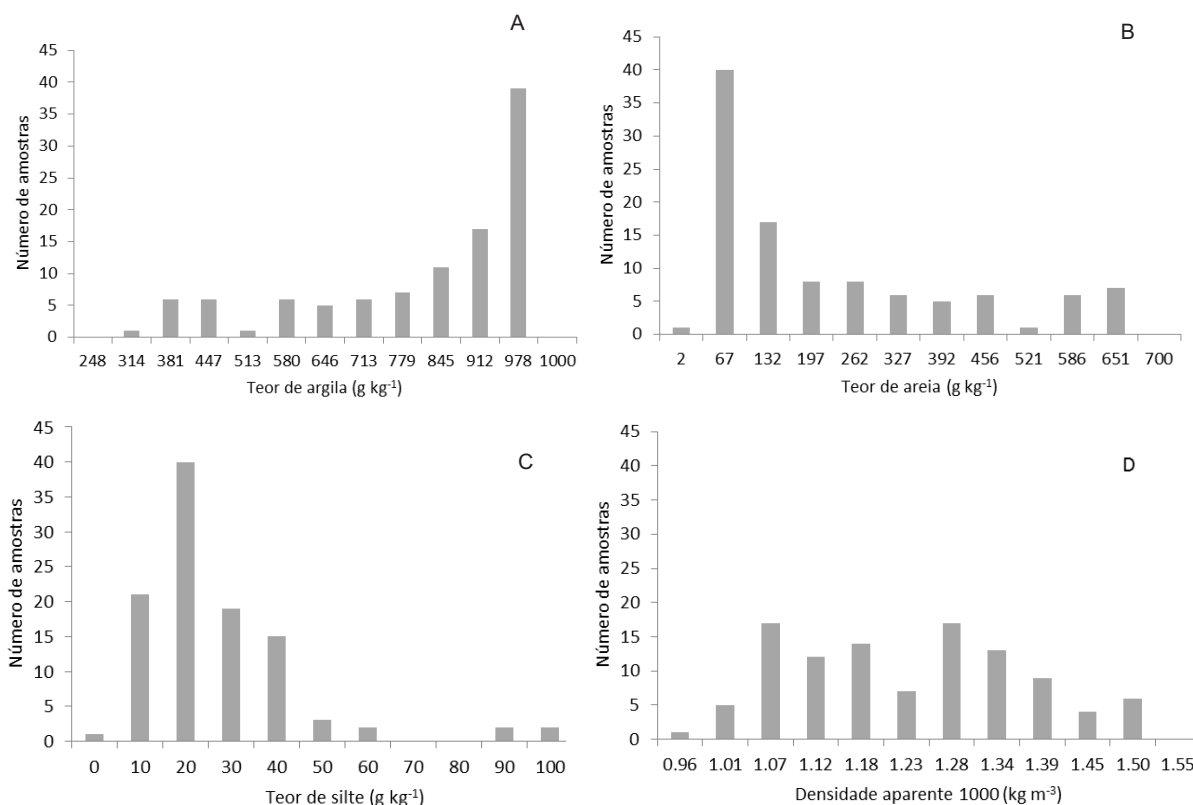


Figura 1 - Atributos de solos de talhões de produção comercial de algodão utilizados para obter funções de pedotransferência. Mato Grosso, 2011. A - argila; B - areia; C - silte; D - densidade aparente.

Figure 1 - Soil attributes of commercial production plots of cotton used for pedotransfer functions. Mato Grosso State, 2011. A - clay content; B - sand content; C - silt content, D - bulk density.

Tabela 3 - Valores médios, máximo, mínimo, coeficiente de determinação e erro padrão dos parâmetros P das equações de Rijtema (1969) e de van Genuchten (1980) e resultados da análise de regressão linear múltipla ($P = C1 + C2Ag + C3S + C4Ar + C5d$), entre P e densidade aparente (d, em $Mg\ m^{-3}$), conteúdos de argila (Ag, em $kg\ kg^{-1}$), silte (S, em $kg\ kg^{-1}$) e areia (Ar, em $kg\ kg^{-1}$), de solos de talhões de produção comercial de algodão. Mato Grosso, 2011

Table 3 - Average, maximum, minimum values, coefficient of determination (R^2) and standard error (Error) of the values of parameters P of the equations of Rijtema (1969) and van Genuchten (1980), and results of multiple linear regression analysis ($P=C1+C2Ag+C3S+C4Ar+C5d$) between P and the bulk density (d, $Mg\ m^{-3}$), clay (Ar, $kg\ kg^{-1}$), silt (S, $kg\ kg^{-1}$) and sand (Ar, $kg\ kg^{-1}$) on commercial production plots of cotton. Mato Grosso State, 2011

Parâmetros estatísticos	Parâmetros das equações					
	Rijtema (1969)			van Genuchten (1980)		
	θ_x	γ	α	N	θ_s	θ_r
Md	0,5332	0,0223	5,0844	1,2639	0,5332	0,1401
Mx	0,6270	0,7900	160,2279	1,6433	0,6270	0,3070
Mn	0,4180	0,0064	0,0011	1,0604	0,4180	0,0000
R^2	0,86(0,00)	0,04(0,51)	0,08(0,17)	0,09(0,14)	0,86(0,00)	0,24(0,00)
e	0,0191	0,0882	20,96	0,1552	0,019	0,099
C1	-21,3(0,57)*	+85,6(0,63)	+28455(0,49)	366,3(0,23)	-21,30(0,57)	-245,8(0,20)
C2	+0,02(0,60)	-0,08(0,63)	-28,39(0,49)	+0,37(0,22)	+0,02(0,55)	+0,25(0,20)
C3	+0,02(0,60)	-0,08(0,63)	-28,53(0,48)	+0,37(0,22)	+0,02(0,55)	+0,25(0,20)
C4	+0,02(0,60)	-0,08(0,63)	-28,39(0,48)	+0,37(0,22)	+0,02(0,55)	+0,25(0,20)
C5	-0,32(0,00)	+0,17(0,11)	-44,92(0,09)	-0,38(0,05)	-0,32(0,00)	-0,23(0,07)

*Os números entre parênteses representam a significância estatística (teste F para o coeficiente de determinação e teste t para os coeficientes das equações de regressão). Md: valor médio; Mx: valor máximo; Mn: valor mínimo; R^2 : coeficiente de determinação; e: erro padrão; (θ_x , γ , α , n, θ_s e θ_r) parâmetros P.

*The numbers in parentheses represent the statistical significance (F-test for the determination coefficient and t test for the regression equations coefficients). Md: average value; Mx: maximum value; Mn: minimum value; R^2 : determination coefficient; e: standart error; (θ_x , γ , α , n, θ_s e θ_r) parameters P.

0,86 para o coeficiente de determinação de θ_x de Rijtema (1969) e de θ_s de van Genuchten (1980). Menos de 25% da variância de θ_r e menos de 10% da variância de α e n da equação de van Genuchten (1980), foram devidas as variáveis consideradas. O γ de Rijtema (1969) determinou o menor coeficiente de determinação, com valor de 0,04. Além disso, o erro padrão dos coeficientes se mostrou elevado em relação aos valores médios, principalmente no caso dos parâmetros que estão no expoente da equação de Rijtema (1969) e no denominador da equação de van Genuchten (1980), onde a propagação do erro se torna ainda mais importante.

Khodaverdiloo *et al.* (2011) fizeram uma análise de regressão múltipla semelhante para os parâmetros da equação de van Genuchten (1980) e encontraram coeficientes de determinação também variáveis, de 0,06 a 0,71, e erros de 0,155 a 0,010, para cada parâmetro.

Em todos os casos, considerando-se os menores valores de nível de significância dos coeficientes nas equações, a densidade aparente foi a variável que mais

contribuiu na variância dos parâmetros, provavelmente porque os solos estudados se mostraram mais argilosos e inseridos numa faixa estreita de variação de distribuição de partículas e, dessa forma, a retenção de água no solo ficará mais dependente da quantidade e da distribuição do volume de poros, a qual é influenciada diretamente pela densidade aparente do solo.

Os resultados da análise de regressão linear múltipla entre os valores medidos e calculados de conteúdo de água ($\theta_{0,010}$, $\theta_{0,033}$ e $\theta_{1,5}$ em $m^3\ m^{-3}$), sob os potenciais mátricos de 0,010 MPa, 0,033 MPa e 1,5 MPa, respectivamente, e os valores medidos de densidade aparente e distribuição do tamanho de partículas do solo das amostras encontram-se na Tabela 4.

Analisando-se a Tabela 4, verifica-se que 87% da variância do conteúdo de água nos solos sob o potencial mátrico de 1,5 MPa podem ser explicados pela variação de densidade aparente e de distribuição de partículas no solo. No caso dos conteúdos sob os potenciais de 0,01 MPa e 0,033 MPa, os atributos analisados foram responsáveis

Tabela 4 - Resultados da análise de regressão linear múltipla ($\theta = C1 + C2Ag + C3S + C4Ar + C5d$) entre os valores de conteúdo de água nos potenciais mátricos: 0,01; 0,033 e 1,5 MPa e densidade aparente, conteúdos de argila, silte e areia, de solos de talhões de produção comercial de algodão. Mato Grosso, 2011

Table 4 - Results of multiple linear regression analysis ($\theta = C1 + C2Ag + C3S + C4Ar + C5d$), between the values of water content on the matrices potenciales: 0.01, 0.033 and 1.5 MPa, and the bulk density, clay content, silt content and sand content on commercial production plots of cotton. Mato Grosso State, 2011

Parâmetros estatísticos	$\theta_{0,010}$	$\theta_{0,033}$	$\theta_{1,5}$
Média	0,3638	0,3151	0,2313
Máximo	0,4668	0,4153	0,4153
Mínimo	0,2210	0,1490	0,1490
R ²	0,25(0,00) ^{1/}	0,35(0,00)	0,87(0,00)
e	0,044	0,043	0,021
C1	-99,0(0,25)	-72,4(0,39)	-76,4(0,07)
C2	+0,100(0,25)	0,073(0,39)	0,077(0,07)
C3	+0,100(0,25)	0,073(0,38)	0,077(0,07)
C4	+0,099(0,25)	0,072(0,39)	0,076(0,07)
C5	+0,107(0,06)	0,111(0,04)	0,115(0,00)

^{1/}Números dentro do parêntese corresponde a significância estatística (teste F para o coeficiente de determinação e teste t para os coeficientes das equações de regressão. d - densidade aparente (Mg m⁻³); Ag - argila (kg kg⁻¹); S - silte (kg kg⁻¹); Ar - areia (kg kg⁻¹); θ : potencial matricial; R² - Coeficiente de determinação; e: erro padrão.

^{1/}The numbers in parentheses represent the statistical significance (F-test for the determination coefficient and t test for the regression equations coefficients). d - bulk density (Mg m⁻³); Ag - clay content (kg kg⁻¹); S - silt content (kg kg⁻¹); Ar - sand content (kg kg⁻¹); θ : matric potential; R² - determination coefficient; e: standart error.

por menos de 35% da variância. Novamente, a densidade aparente foi a variável que mais contribuiu efetivamente na variância dos parâmetros hidráulicos do solo.

Os resultados de validação encontram-se na Tabela 5, onde as seis primeiras linhas foram apresentadas para efeito de comparação dos resultados encontrados das curvas de retenção de água ajustadas às Equações 1 (Rijtema) e 2 (van Genuchten) com uso das funções de pedotransferência. Os valores extremos apresentados na primeira linha podem ser explicados pelo fato de os valores de θ_0 não serem provenientes de mensuração propriamente dita, mas apenas resultados de cálculo, como descrito na metodologia. Portanto, quanto mais os valores do erro médio (e) e RMSE se aproximarem de 0, e, quanto mais os valores de d e r² se aproximarem de 1, mais apropriada é a função de pedotransferência.

Tabela 5 - Erro médio, raiz do quadrado médio do erro, índice de concordância de Willmott (1981), e coeficiente de determinação, utilizados na validação de funções de pedotransferência analisadas em solos de talhões de produção comercial de algodão. Mato Grosso, 2011

Table 5 - Mean error (e), root mean square error (RMSE), concordance index (d) of Willmott (1981), and determination coefficient (R²) used in the validation of pedotransfer functions analyzed in soils of commercial production plots of cotton. Mato Grosso State, 2011

Equações ^{1/}	Parâmetros de validação				
	e	RMSE	d	r ²	e+RMSE+r ²
Equação 1 $\theta_{0,01}$	0,0000	0,0000	1,0000	1,0000	1,0000
Equação 1 $\theta_{0,033}$	0,0088	0,0158	0,9708	0,9882	1,0128
Equação 1 $\theta_{1,5}$	0,0097	0,0472	0,8132	0,9357	0,9926
Equação 2 $\theta_{0,01}$	0,0445	0,0995	0,3970	0,0569	0,2009
Equação 2 $\theta_{0,033}$	0,0490	0,1140	0,3794	0,1090	0,272
Equação 2 $\theta_{1,5}$	-0,0158	0,0869	0,5752	0,2506	0,3217
Equação 3a $\theta_{0,033}$	0,0119	0,0416	0,8294	0,4962	0,5497
Equação 3b $\theta_{1,5}$	-0,0032	0,0307	0,9204	0,7281	0,7556
Equação 4a $\theta_{0,033}$	0,0599	0,0807	0,4562	0,0640	0,2046
Equação 4b $\theta_{1,5}$	0,0507	0,0601	0,7446	0,6448	0,7556
Equação 5a $\theta_{0,033}$	0,0397	0,0607	0,7373	0,4958	0,5962
Equação 5b $\theta_{1,5}$	0,1423	0,1490	0,4668	0,6470	0,9383
Equação 6a $\theta_{0,033}$	0,0477	0,0704	0,6993	0,4089	0,527
Equação 6b $\theta_{1,5}$	0,0589	0,0670	0,7328	0,7042	0,8301
Equação 7a $\theta_{0,033}$	0,0006	0,0566	0,7046	0,2852	0,3424
Equação 7b $\theta_{1,5}$	0,0025	0,0308	0,9167	0,7208	0,7541
Equação 8a $\theta_{0,01}$	0,0764	0,1010	0,3847	0,0400	0,2174
Equação 8b $\theta_{0,033}$	0,0674	0,0894	0,4577	0,1169	0,2737
Equação 8c $\theta_{1,5}$	0,0210	0,0553	0,6872	0,6199	0,6962

^{1/}Os resultados referentes às Equações 1 e 2 são provenientes dos próprios ajustes das curvas de retenção e foram apresentados para efeito de comparação com as demais equações (funções de pedotransferência). Equações 8a, 8b e 8c foram ajustadas com os dados obtidos no presente trabalho (Tabela 4). e - Erro médio; RMSE - raiz do quadrado médio do erro, d - índice de concordância de Willmott (1981); R² - coeficiente de determinação

^{1/}The results for equations 1 and 2 are from the retention curves own adjustments and were presented for comparison with the pedotransfer functions. Equations 8a, 8b and 8c were adjusted with the data obtained in this study (Table 4). e - Mean error; RMSE - root mean square error; d - concordance index of Willmott (1981); R² - determination coefficient.

O primeiro parâmetro de validação, o e, é o indicador menos adequado para avaliar qualquer valor estimado em relação a valores medidos, uma vez que, se houver simetria das diferenças, ele é igual a zero, mesmo que essas diferenças sejam maiores do que a exatidão exigida para a estimativa. Entretanto, foi utilizando a soma de e, RMSE e r² que Cornelis *et al.* (2001) e Nebel

et al. (2010) estabeleceram a ordem de desempenho de algumas funções de pedotransferência.

De acordo com o critério adotado por Cornelis *et al.* (2001) e Nebel *et al.* (2010), as melhores equações apresentadas na Tabela 5 foram as de van Genuchten (1980), enquanto que as que apresentaram piores ajustes foram as equações obtidas no presente trabalho, equações de Rijtema (1969) e a função de pedotransferência obtida por Arruda *et al.* (1987), sendo todas para as menores tensões (0,033 e 0,01 MPa). Outro aspecto interessante a destacar é que, de um modo geral os resultados estimados ficaram mais próximos dos valores medidos para as tensões de 1,5 MPa. Em ordem decrescente de desempenho, pelo mesmo critério, as melhores funções de pedotransferência para estimativa da umidade do solo na tensão de 0,033 MPa foram as de Oliveira *et al.* (2002) e de Dijkerman (1988). Na tensão de 1,5 MPa, as melhores foram a de Dijkerman (1988) e a de Oliveira *et al.* (2002).

Segundo o critério adotado por Khodaverdiloo *et al.* (2011), as funções de pedotransferência propostas por Lal (1979), para 0,033 e 1,5 MPa, foram as que apresentaram melhor desempenho para avaliar o conteúdo de água nos solos estudados. O índice de concordância

tem sido adotado preferencialmente para este tipo de avaliação, em lugar do coeficiente de determinação, que é mais adequado para determinar o grau de associação ou correlação entre valores medidos e estimados. Além disso, os valores de erro médio (e) e de RMSE obtidos nessas duas equações foram da mesma ordem do critério de aceitação das diferenças entre repetições de laboratório. O bom desempenho desta das funções de pedotransferência, de maneira geral, foi independente do subgrupos textural dos solos utilizados no presente estudo (Figuras 2A e 2B).

De modo geral, os resultados estimados ficaram mais próximos dos valores medidos para as tensões de 1,5 MPa do que para as tensões mais baixas. Em consonância com outros trabalhos, como os de Marques *et al.* (2002), Nebel *et al.* (2010), Khodaverdiloo *et al.* (2011), provavelmente isso se deve ao fato de a retenção de água no solo a baixas tensões estar mais associada aos fenômenos condicionados pelo arrajamento das partículas do solo do que àqueles condicionados pelas forças de adsorção das partículas, especificamente a textura, a qual é empregada como variável preditora nas funções de pedotransferência utilizadas no presente estudo.

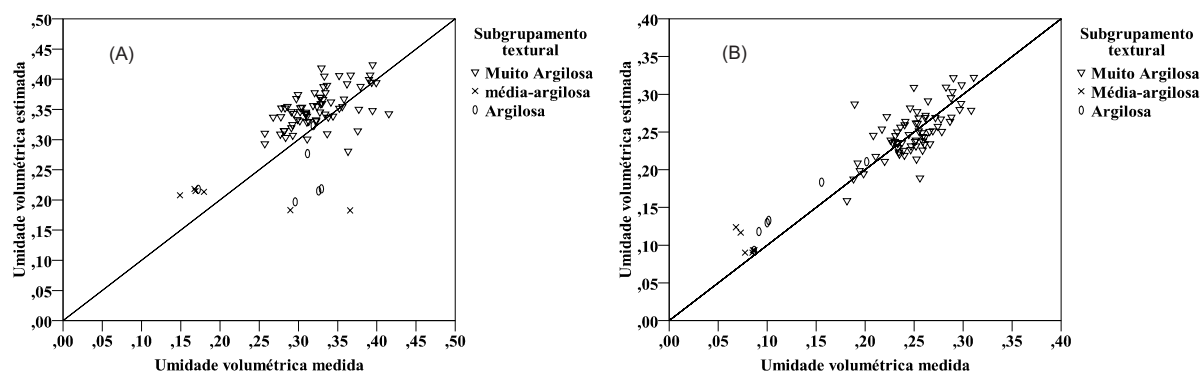


Figura 2 - Valores de conteúdo de água no solo medidos (θ medidos) e estimados (θ estimados) utilizando-se a função de pedotransferência de Lal *et al.* (1979) para os potenciais de 0,033 MPa (A) e 1,5 MPa (B). Os solos foram separados em subgrupos de classes texturais segundo metodologia de Santos *et al.* (2013).

Figure 2 - Values of the soil water content measured (θ measured) and estimated (θ estimated) using the pedotransfer function of Lal *et al.* (1979) for the potentials of 0.033 MPa (A) and 1.5 MPa (B). Soils were separated into textural class subgroups according with the methodology described by Santos *et al.* (2013).

Conclusão

Na região de produção de algodão em Mato Grosso, as funções de pedotransferência, $0,334-0,0003 \cdot Ar$ e $0,247-0,0003 \cdot Ar$, para estimativas dos conteúdos de água no solo nas tensões de 0,033 e 1,5 MPa, respectivamente, são adequadas para avaliar a capacidade de retenção de água dos solos dos talhões de cultivo.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Mato-grossense do Algodão (IMA-MT) pelo apoio financeiro e logístico concedido para realização do presente trabalho.

Literatura científica citada

- ARRUDA, F. B.; ZULLO JÚNIOR, J.; OLIVEIRA, J. B. Parâmetros de solo para o cálculo da água disponível com base na textura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.11, p.11-15, 1987.
- CARDUCCI, C. E.; OLIVEIRA, G. C.; SEVERIANO, E. C.; ZEVIANI, W. M. Modelagem da curva de retenção de água de Latossolos utilizando a equação dupla van Genuchten. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.77-86, 2011.
- CORNELIS, W.M.; RONSYN, J.; VAN MEIRVENNE, M.; HARTMANN, R. Evaluation of pedotransfer functions for predicting the soil moisture retention curve. **Soil Science Society of America Journal**, v.65, p.638-648, 2001.
- DEXTER, A. R.; RICHARD, G. Tillage of soils in relation to their bi-modal pore size distributions. **Soil & Tillage Research**, v.103, n. 1, p.113-118, 2009.
- DIJKERMAN, J. C. An ustult-aquult-tropept catena in Sierra Leone, West Africa, II. land qualities and land. **Geoderma**, v.42, n. 1, p.29-49, 1988.
- DOURADO-NETO, D.; NIELSEN, D. R.; HOPMANS, J. W.; REICHARDT, K.; BACHI, O. O. S. Software to model soil water retention curves (SWRC, version 2.00). **Scientia Agricola**, v.57, n.1, p.191-192, 2000.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. CENTRO Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solos. 2 ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1997. 212 p.
- FRAZÃO, L. A.; PÍCCOLO, M. C.; FEIGL, B. J.; CERRI, C. C.; CERRI, C. E. P. Propriedades químicas de um Neossolo Quartzarênico sob diferentes sistemas de manejo no Cerrado Mato-Grossense. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.43, n.5, p.641-648, 2008.
- HUMBERTO, G. S., JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A. de V.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B.. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 3 ed. rev. ampl. Brasília, DF: EMBRAPA, 2013. 353p.
- Instituto Mato-grossense do Algodão - IMA-MT. O IMA. Disponível em <http://www.imamt.gov.br>, acesso em: 15 fev 2012.
- KHODAVERDILOO, H.; HOMAEI, M.; VAN GENUCHTEN, M. T.; DASHTAKI, S. G. Deriving and validating pedotransfer functions for some calcareous soils. **Journal of Hydrology**, v.399, n. 1- 2, p.93-99, 2011.
- LAL, R. Physical properties and moisture retention characteristics of some nigerian soils. **Geoderma**, v.21, n. 3, p.209-223, 1979.
- MARQUES, J. D.; LIBARDI, P. L.; JONG VAN LIER, Q. Relação entre horizontes pedológicos e propriedades hidráulicas em dois Latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.567-577, 2002.
- MICHELON, C. J.; CARLESSO, R.; OLIVEIRA, Z. B.; KNIES, A. E.; PETRY, M. T.; MARTINS, J. D. Funções de pedotransferência para estimativa da retenção de água em alguns solos do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v.40, n. 4, p.848-853, 2010.
- NEBEL, A. L. C.; TIMM, L. C.; CORNELIS, W.; GABRIELS, D.; REICHARDT, K.; AQUINO, L. S.; PAULETTO, E. A.; REINERT, D. J. Pedotransfer functions related to spatial variability of water retention attributes for lowland soils. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.669-680, 2010.
- OLIVEIRA, L. B.; RIBEIRO, M. R.; JACOMINE, P. K. T.; RODRIGUES, J. V. V.; MARQUES, F. A. Funções de pedotransferência para predição da umidade retida e potenciais específicos em solos do Estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.315-323, 2002.
- REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J.; HORN, R.; HÅKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**, v.102, n. 2, p.242-254, 2009.
- RESENDE, T. M.; MORAES, E. R.; FRANCO, F. O.; ARRUDA, E. M.; ARAÚJO, J. R.; SANTOS, D. S.; BORGES, E. N.; RIBEIRO, B. T. Avaliação física do solo em áreas sob diferentes usos com adição de dejetos animais no Bioma Cerrado. **Bioscience Journal**, v.28, n. 1, p.179-184, 2012.
- RIJTEMA, P. E. Soil moisture forecasting. Technical Report 513. Wageningen: Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, , 1969, 18 p.
- SCHAAP, M. G.; LEIJ, F. J.; VAN GENUTCHEN, M. T. Rosetta: a computer program for the estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer function. **Hydrology**, v.251, p.151-162, 2001.
- SILVA, G. J.; VALADÃO JÚNIOR, D. D.; BIANCHINI, A.; AZEVEDO, E. C.; MAIA, J. C. S. Variação de atributos físico-hídricos em Latossolo Vermelho-Amarelo do Cerrado Mato-grossense sob diferentes formas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.2135-2143, 2008.
- URACH, F. L. Estimativa da retenção de água em solos para fins de irrigação. 2007. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.
- VAN ENGELEN, V. W. P.; MANTEL, S. The impact of land degradation on land productivity: case studies of Uruguay, Argentina and Kenya. v. 1. Wageningen: ISRIC, 2009. 52 p.
- VAN GENUTCHEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, p.892-898, 1980.
- WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, v.2, p.184 -194, 1981.