

AGRÁRIA

Revista Brasileira de Ciências Agrárias

ISSN (on line): 1981-0997; (impresso): 1981-1160

v.5, n.4, p.560-569, out.-dez., 2010

Recife, PE, UFRPE. www.agraria.ufrpe.br

DOI: 10.5239/agraria.v5i4.551

Protocolo 551 – 11/04/2009 *Aprovado em 26/08/2010

Geovane B. do Nascimento²

Lúcia H. C. dos Anjos^{3,5}

Marcos G. Pereira^{3,5}

Ademir Fontana⁴

Humberto G. dos Santos⁴

Funções de pedotransferência do conteúdo de água em Latossolos Amarelos e Argissolos Amarelos¹

RESUMO

O objetivo neste estudo foi desenvolver funções de pedotransferência (FPT) para estimar o conteúdo de água nos potenciais de -33 (capacidade de campo) e -1.500 kPa (ponto de murcha permanente), e os teores de água disponível, a partir de dados de granulometria, densidade do solo e teor de carbono orgânico de perfis de solos. A base de dados utilizada compreende 682 horizontes de perfis de Latossolos Amarelos e Argissolos Amarelos, desenvolvidos de sedimentos da Formação Barreiras e similares, em ambiente de Tabuleiro de diferentes localidades do Brasil. As FPTs foram desenvolvidas pelo método de seleção por etapas e eliminação indireta ('backward stepwise'). A avaliação da eficiência da predição de cada pedofunção obtida foi feita com base no coeficiente de determinação (R^2), no erro-padrão da estimativa (EPE) e interpretação gráfica. As equações desenvolvidas apresentaram bons coeficientes de determinação, indicando que poderão ser utilizadas para predição do conteúdo de água nos potenciais de -33 e -1.500 kPa em solos de tabuleiro das classes Latossolos Amarelos e Argissolos Amarelos. A variável água disponível apresenta alto percentual de fatores não explicados pelas variáveis da equação e a FPT subestima os valores maiores que $0,10$ kg kg⁻¹.

Palavras-chave: Disponibilidade de água, pedofunções, solos de tabuleiro.

Pedotransfer functions for predicting water content in Oxisols and Ultisols from Brazil

ABSTRACT

The objective of the study was to develop pedotransfer functions (PTF) to predict soil water content in the -33 (field capacity) and $-1,500$ kPa (permanent wilting point) potentials and available water content, from granulometric data, bulk density, and organic carbon from soil profiles. The soil database used in the study comprised 682 horizons from Yellow Oxisols and Ultisols, developed from Barreiras Formation and similar sediments, from different Brazilian localities. The PTF were developed using the backward stepwise selection method. Evaluation prediction efficiency of each pedofunction was obtained on the basis of determination coefficient (R^2), the estimate standard error (ESE) and graphic interpretation. The developed equations presented good determination coefficients, indicating that they could be used for prediction of water content at the -33 and $-1,500$ kPa potentials in Oxisols and Ultisols. Water availability variable shows high percentage of factors not explained by the equation variables. The PTF for the water availability variable underestimates the values higher than 0.10 kg kg⁻¹.

Key words: Water availability, pedofunctions, tableland soils.

¹ Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor, apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo (CPGA-CS) da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro - UFRRJ. Bolsa e projeto de pesquisa CNPq.

² Centro Federal de Educação Tecnológica de Urutai Uned Morrinhos, Federal, Ensino. BR 153, km 633, Zona Rural, CEP 75650-000, Morrinhos-GO, Brasil. Caixa-Postal: 92. Fone: (64) 3413-2112. E-mail: geovanebn@hotmail.com

³ Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Instituto de Agronomia, Departamento de Solos. BR465, km 7, Campus, CEP 23890-000, Seropédica-RJ, Brasil. Fone: (21) 3787-3772.

E-mail: lanjosh@ufrj.br; gervasio@ufrj.br

⁴ Embrapa Solos. Rua Jardim Botânico, 1024, Jardim Botânico, CEP 22460-000, Rio de Janeiro-RJ, Brasil. Fone: (21) 2179-4542. E-mail: ademir.fontana@cnpq.embrapa.br;

humberto@cnpq.embrapa.br

⁵ Bolsista de Produtividade em Pesquisa do CNPq

INTRODUÇÃO

Os limites de água disponível (AD) para as plantas têm sido identificados genericamente como a diferença entre a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP). A determinação dessas características, dentre outras, é de fundamental importância nos planejamentos de uso racional do solo e da água. As determinações da CC e do PMP no campo são laboriosas, demoradas, de custo elevado e, além disso, o conteúdo de água no solo está constantemente mudando e é dinâmico, de modo que uma determinada amostra representa apenas a condição hídrica naquele momento (Reichardt, 1988; Couto, 2002). Na maioria dos solos e na maioria das situações é inferido que o solo se encontra na CC e no PMP quando o potencial matricial está em torno de -33kPa (considera-se -10kPa para solos de textura arenosa) e -1.500kPa, respectivamente (Reichardt, 1988). Para a avaliação destas constantes de umidade, uma forma não muito precisa, mas realizada comumente, é a determinação da CC e do PMP em laboratório, através de amostras de terra deformada e/ou indeformada (Reichardt, 1988; Embrapa, 1997). Todavia, quanto a essas determinações, ainda persistem problemas como custo, morosidade e inexatidão, além da escassez de laboratórios com instrumental adequado para tais análises, conforme destacam Oliveira et al. (2002).

Dentre os fatores que afetam a retenção da água em um solo, os principais são o teor de matéria orgânica, a textura e a mineralogia da fração argila, pois estas determinam a área e a intensidade de contato entre as partículas sólidas e a solução do solo, bem como as proporções de poros de diferentes tamanhos (Kiehl, 1979; Brady, 1989). De maneira geral, em solos tropicais, a matéria orgânica pode se tornar a componente mais importante na retenção de água do solo, entretanto, nos solos de tabuleiro, seus teores são geralmente reduzidos pelo intenso uso agrícola. Ainda, a mineralogia caulínica uniforme faz com que a granulometria e a porosidade sejam determinantes nas propriedades hídricas destes solos (Nascimento, 2001).

Devido às eminentes dificuldades na determinação dos parâmetros relacionados às propriedades hídricas dos solos, tanto no campo quanto em laboratório, verifica-se um crescente interesse pelo estabelecimento de métodos indiretos de estimativas da CC, PMP, AD, carbono orgânico, densidade do solo e textura. Esses métodos indiretos são denominados como 'funções de pedotransferência' (FPT), e vêm sendo largamente como pode observado nos trabalhos de Tomasella et al. (2000), Tormena & Silva (2002), Oliveira et al. (2002), Budiman et al. (2003), De Vos et al. (2005), Benites et al. (2006), Fidalski & Tormena (2007), Marcolin (2009), Paz et al. (2009), Michelin et al. (2010).

Estas funções são preditivas de características edáficas de difícil obtenção e de maior custo a partir de outras mais facilmente obtidas e de menor custo incluindo, até mesmo, características morfológicas (Lin et al., 1999). Em geral, os trabalhos com FPT utilizam a análise de regressão múltipla, mas novos métodos de predição estão sendo apresentados com base em outras avaliações, conforme pode ser constatado no trabalho de Budiman et al. (2003). Não há grande diferença

no resultado obtido com o uso das funções de regressão que contêm grande número de variáveis em comparação com as que possuem menor número, mas cujas variáveis tem resposta significativa. Além disso, funções com menor número de variáveis são mais simples de serem aplicadas e envolvem custos menores na análise dos parâmetros selecionados (Hoel, 1977; Ribeiro Jr., 2001). Portanto, o mais importante no uso das equações de regressão múltipla é escolher algumas variáveis relevantes dentre um conjunto, e para tanto, o método "passo a passo" ('stepwise multiple regression') é o mais recomendado (Hoel, 1977; Landim, 2000).

Quanto ao uso das FPT em condições distintas de solos e ambientes, Oliveira et al. (2002) destacam que estas foram desenvolvidas, em sua maioria, com resultados de solos de clima temperado, e seu uso requer calibrações locais. Os autores ressaltam ainda que a acurácia e equivalência das FPT tendem a aumentar quanto mais homogêneos forem os solos que compõem a base de dados e quão mais próximos destes estiverem os que terão seus dados estimados. Associado a isso, as fontes de imprecisão estão também relacionadas à confiabilidade dos dados para elaboração e testes das FPT e ao uso de variáveis obtidas qualitativamente.

Apesar da facilidade computacional para a determinação de FPT, estas não devem ser desenvolvidas de forma indiscriminada, e quanto à utilização da análise de regressão, quatro cuidados básicos devem ser tomados, conforme destacam Landim (2000), Hoel (1977) e Ribeiro Jr. (2001): (a) as relações entre as variáveis devem ser lineares; (b) evitar um número insuficiente de casos em relação ao número de variáveis consideradas, sendo recomendado que tal relação seja de pelo menos dez vezes mais casos que variáveis; (c) evitar variáveis independentes redundantes, isto é, que tenham alto coeficiente de correlação entre si; (d) verificar a presença de valores anômalos através da análise dos resíduos.

O objetivo neste estudo foi desenvolver funções de pedotransferência (FPT) para estimar o conteúdo de água nos potenciais de -33 (capacidade de campo) e -1.500 kPa (ponto de murcha permanente), e os teores de água disponível, a partir de dados de granulometria, densidade do solo e teor de carbono orgânico de perfis de solos.

MATERIAL E MÉTODOS

Para o desenvolvimento das funções de pedotransferência (FPT), foram usados inicialmente 141 perfis de solos de ambiente de Tabuleiros Costeiros, sendo 37 de LA e 104 de PA, totalizando 874 horizontes. Foram selecionados de um banco de dados de solos de Tabuleiro (Nascimento, 2005) os perfis que possuem resultados das frações granulométricas (argila, silte e areia) e dos conteúdos de água no solo nos potenciais de -33 e -1.500kPa em todos os horizontes, incluindo A, AB, BA, e B; sendo que dos 874 horizontes, apenas 682 horizontes (correspondentes a 136 perfis de solos) têm valores de carbono orgânico e de densidade do solo. Em face da uniformidade mineralógica comumente observada nos perfis de LA e PA e no próprio material de origem, não foram

diferenciados os horizontes A ou B, na elaboração das FPT.

Os solos selecionados para o estudo são provenientes de uma base de dados de levantamentos de solos com mais de 1.200 perfis de LA e PA, que apresentam como principal material de origem os sedimentos da Formação Barreiras, em ambiente de Tabuleiros Costeiros e feições associadas.

Comparando-se o total de perfis no banco de dados com o número de perfis selecionados (141 perfis), ratifica-se a importância do uso das FPT para as determinações do conteúdo de água no solo a potenciais específicos. Na Tabela 1 é apresentada a fonte bibliográfica, o número de perfis e a região geográfica correspondente aos levantamentos de solos utilizados neste estudo.

Tendo em vista a similaridade de material de origem, granulometria e mineralogia dos Latossolos Amarelos e Argissolos Amarelos, não foram diferenciados os perfis de LA e PA para desenvolvimento das FPT. Na tentativa de melhorar a capacidade preditiva das funções de pedotransferência, procedeu-se à separação dos perfis em

cinco grupos de classes texturais (muito argilosa + argila + franco-argilosa; argiloarenosa; franco-argiloarenosa; franco-arenosa; areia franca + areia).

A avaliação da eficiência da predição de cada FPT obtida foi feita com base no coeficiente de determinação (R^2) e no erro-padrão da estimativa (EPE). A medida do grau de associação entre os dados observados e os valores preditivos foram feitas a partir da análise de correlação linear e interpretação gráfica.

As equações das FPT foram obtidas por meio de regressões múltiplas no programa STATISTICA (versão 5.1) (Statsoft, 1999). O procedimento de estimação consistiu da análise de regressão passo a passo com remoção das variáveis por ordem crescente de importância, ou seja, análise pelo método de seleção por etapas e eliminação indireta, procedimento conhecido como “stepwise backward”. Para o conjunto de dados neste estudo, as variáveis independentes argila e areia foram altamente correlacionadas, por esta razão foram consideradas separadamente no desenvolvimento das FPT.

Tabela 1. Fonte bibliográfica, número de perfis e estados de origem dos 136 perfis usados para elaborar as funções de pedotransferência

Table 1. Bibliographical source, number of profiles and origin states of the 136 profiles used to develop the pedotransfer functions

Estado (total de perfis)	Nº de perfis/Estado	Fonte
AL (26)	3	Maia (2000)
	4	Silva (1996)
	4	Silva (1989)
	14	Usina Cachoeira (1996)
	1	Usina Coruripe (1997)
AM (2)	2	Embrapa (1979)
BA (50)	1	Carvalho (2001)
	8	CEPLAC (1983)
	3	CEPLAC (2000)
	19	Copener (2002)
	3	Copener (2000)
	6	Embrapa (1993)
	3	CEPLAC (1998)
	3	Reunião... (1996)
	2	Santana & Araújo (2000)
2	Souza (2001)	
PE (18)	6	Alves (1994)
	1	Embrapa (1998)
	2	Barros Filho et al. (1966)
	7	Jacomine & Ribeiro ¹
	2	Usina Cachoeira (1995)
RJ (18)	10	IAA/UFRRJ (1983a)
	2	IAA/UFRRJ (1983b)
	6	Nascimento (2001)
SE (22)	20	Embrapa (1999)
	2	Sudene (1982)

¹ Informação pessoal e dados publicados segundo Oliveira et al. (2002).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores de densidade do solo variaram de 1,00 a 1,98 Mg m⁻³, e dentre as variáveis analisadas foi a que apresentou o mais baixo coeficiente de variação (CV= 9,8%), com distribuição do tipo normal, como demonstrado pelos coeficientes de assimetria e curtose (Tabela 2). Os teores de carbono orgânico variaram de 0,1 a 80,9 g kg⁻¹, e dentre as variáveis foi o que apresentou o mais alto coeficiente de variação (CV = 92,5%), apresentando distribuição do tipo assimétrica positiva e platicúrtica, conforme demonstrado nos coeficientes de assimetria e curtose. O conteúdo de água retida nos potenciais de -33 e -1.500kPa e o de água disponível (AD) variou de 0,039 a 0,450, de 0,012 a 0,371, e de 0,003 a 0,250 kg kg⁻¹, respectivamente. Seus respectivos coeficientes de variação foram: 40,2%, 43,5% e 66,1%.

Como os valores de AD e de silte são determinados por diferença a partir de outras duas variáveis, é normal que os coeficientes dessas duas propriedades sejam maiores do que os de suas variáveis determinantes. Além da variável carbono, as variáveis AD e silte foram as que apresentaram coeficientes de assimetria característicos da distribuição assimétrica positiva, as demais tendem à distribuição simétrica. Todas as variáveis apresentaram-se com distribuição do tipo platicúrtica, indicando que seus dados se concentram em determinadas faixas de valores, sendo destacadas as variáveis: carbono, silte e AD.

A classe textural dos solos utilizados variou de arenosa a muito argilosa, embora predominasse a textura argilosa, seguida da franco-argiloarenosa e franco-arenosa. O arranjo das frações granulométricas em cinco grupos de classes texturais não melhorou a capacidade preditiva das FPT, sendo observada até uma redução do coeficiente de determinação e/ou o aumento do erro-padrão da estimativa. Tal efeito também foi constatado no trabalho de Oliveira et al. (2002). Uma explicação para esse padrão é que, ao agrupar os solos

Tabela 2. Estatística descritiva das propriedades edáficas utilizadas na elaboração das funções de pedotransferência**Table 2.** Descriptive statistic of soil properties used in the development of the pedotransfer functions

Propriedade	Areia	Silte	Argila	Ds ¹	Carbono	Conteúdo de água (kg kg ⁻¹)		
	—g kg ⁻¹ —			Mg m ⁻³	g kg ⁻¹	- 33 kPa	- 1.500 kPa	AD ²
Nº válidos	874	874	874	756	799	874	874	874
Média	553	95	352	1,42	6,7	0,184	0,124	0,062
Mediana	560	80	340	1,43	5,1	0,178	0,116	0,050
Mínimo	20	2	20	1,00	0,1	0,039	0,012	0,003
Máximo	950	430	960	1,98	80,9	0,450	0,371	0,250
Assimetria	-0,5	1,6	0,7	0,1	4,7	0,8	0,8	1,6
Curtose	0,7	3,9	1,2	0,5	38,6	1,0	1,5	2,8
DP ³	169	61	164	0,14	6,2	0,074	0,054	0,041
EPM ⁴	6	2	6	0,005	0,2	0,002	0,002	0,001
CV (%) ⁵	30,6	64,2	46,6	9,8	92,5	40,2	43,5	66,1

¹ Densidade do solo; ² Água disponível; ³ Desvio-padrão; ⁴ Erro-padrão-da-média; ⁵ Coeficiente de variação.

em categorias mais uniformes de textura diminui-se o coeficiente de variação para as variáveis granulométricas, que não é seguido na mesma proporção para cada uma das variáveis dependentes, ou seja, no conteúdo de água do solo nos potenciais de -33, -1.500kPa.

No desenvolvimento das FPT foi constatado que tanto a variável argila quanto a variável areia pode ser utilizada como variáveis independentes, juntamente com as variáveis silte e densidade do solo, ou isoladas, conforme é indicado pelos valores dos coeficientes de determinação (R²) obtidos (Tabela 3). Tal resultado é justificado devido à alta correlação existente entre as variáveis independentes, teor de argila e areia.

O método de seleção por etapas e eliminação indireta ('backward stepwise') de variáveis, utilizado no desenvolvimento das FPT, resultou na eliminação da variável teor de carbono orgânico nas equações preditivas do conteúdo de água no solo nos potenciais -33 e -1.500kPa, e a eliminação das variáveis teores de carbono orgânico e silte na equação preditiva da água disponível. A eliminação das variáveis carbono e silte pode ser explicada pela distribuição que seus dados apresentam, concentrando-se em determinadas classes de valores, sendo < 10 g kg⁻¹ de TFSA de carbono e < 150 g kg⁻¹ de silte. Nos solos de tabuleiro além de teores baixos de carbono orgânico é notável a frequência de baixos teores da fração silte, característica herdada do próprio material de origem, os sedimentos da Formação Barreiras, e também resultante do intenso intemperismo na gênese dos solos LA e PA (Jacomine, 1996, 2001).

Analisando a contribuição de cada variável independente na previsão da variável dependente (Tabela 4), foi possível constatar que as variáveis argila ou areia, tomadas isoladamente, são as que melhor explicam as variações do conteúdo de água retida pelo solo nos potenciais especificados. Esse resultado permite afirmar que, nos solos estudados, é possível desenvolver equações preditivas do conteúdo de água no solo (exceto para AD) apenas com a variável argila ou areia. Esse resultado permite afirmar que, nos solos estudados, é possível desenvolver equações

preditivas do conteúdo de água no solo (exceto para AD) apenas com a variável argila ou areia. Este resultado é explicado pela natureza dos solos de Tabuleiro, uma vez que os teores de silte são muito baixos, predominando a fração argila seguida da areia.

A estimativa da AD foi a que apresentou o maior percentual não explicado das variáveis (73,0%) e, portanto, suas equações preditivas possuem baixa confiabilidade (Tabelas 4 e 5). Esta variável é uma consequência direta dos dois outros conteúdos de água no solo e, tal como acontece em relação à fração silte, que é calculada a partir de um valor total de 100% (1.000 g kg⁻¹) menos a contribuição das frações de argila e areia; valores anômalos ou erros nas variáveis principais contribuem para obtenção de baixos índices de correlação.

Em Ferralsols/Oxisols e solos correlacionados da América do Sul, África e Sudeste da Ásia, van den Berg et al (1997) observaram que a argila e o silte foram responsáveis por 84% da variância do conteúdo de água a -10kPa e 80% para -1.500kPa. Ao incluir o teor de carbono orgânico na avaliação, verificou-se um aumento de 86% para -10kPa. O conteúdo de água armazenado entre -10 e 1.500kPa apresentou correlação significativa a 1% com o teor de argila. Correlações significativas também foram observadas para a densidade do solo e a superfície específica, no entanto com apenas 48% da variância. Nesse sentido, Tormena & Silva (2002) observaram em Latossolo Vermelho Distroférico, correlação entre densidade do solo (Ds) e potencial matricial com a quantidade de água no solo, apresentando 85% da variância.

As equações de regressão múltipla para estimar o conteúdo de água nos potenciais de -33 e -1.500kPa e a água disponível apresentaram R² significativos a 1% (Tabela 5). No potencial -33kPa observa-se valores de R² das FPT entre 0,64 (areia) e 0,69 (areia ou argila com silte). Para -1.500kPa, observa-se valores de R² entre 0,71 (areia) e 0,77 (argila ou areia com silte e Ds). Para AD valores de 0,25 para ambas as equações propostas.

Valores de R² mais elevados foram obtidos por Oliveira et

Tabela 3. Análise de correlação entre as variáveis estudadas de 682 horizontes de Latossolos e Argissolos Amarelos**Table 3.** Correlation analysis between the studied variables of 682 horizons of Yellow Oxisols and Ultisols

Variável	Areia	Silte	Argila	Ds ⁽¹⁾	Carbono	Conteúdo de água		
						- 33kPa	- 1.500kPa	AD ⁽²⁾
Areia	1							
Silte	-0,23*	1						
Argila	-0,94*	-0,12*	1					
Ds ⁽²⁾	0,19*	-0,03 ^{ns}	-0,18*	1				
Carbono	0,19*	0,10*	-0,22*	-0,18*	1			
- 33 kPa	-0,82*	0,00 ^{ns}	0,83*	-0,12*	-0,17*	1		
- 1.500 kPa	-0,85*	0,01 ^{ns}	0,87*	-0,28*	-0,14*	0,86*	1	
AD	-0,46*	-0,01 ^{ns}	0,48*	0,11*	-0,12*	0,75*	0,34*	1

*Correlações significativas a 5% de probabilidade; ns = correlações não-significativas.

¹ Ds = densidade do solo; ² AD = água disponível.

Tabela 4. Avaliação da contribuição relativa das variáveis independentes nas estimativas das variáveis dependentes de 682 horizontes de Latossolos e Argissolos Amarelos**Table 4.** Assessment of the relative contribution of the independent variables in the estimates of the dependent variables of 682 horizons of Yellow Oxisols and Ultisols

Variáveis dependentes ¹	Variáveis independentes	Contribuição relativa das variáveis (%),	
		considerando argila	considerando areia
\bar{U}_{33kPa}	Argila	69,50	-
	Areia	-	67,17
	Silte	1,12	3,45
	Ds	0,15	0,15
	Carbono	0,05	0,05
Total explicado pelas variáveis		70,82	70,82
Total não explicado pelas variáveis		29,18	29,18
$\bar{U}_{1.500kPa}$	Argila	75,50	-
	Areia	-	73,07
	Silte	1,12	3,69
	Ds	1,42	1,28
	Carbono	0,05	0,05
Total explicado pelas variáveis		78,09	78,09
Total não explicado pelas variáveis		21,91	21,91
\bar{U}_{AD}	Argila	22,58	-
	Areia	-	21,34
	Silte	0,32	1,50
	Ds	3,98	4,02
	Carbono	0,12	0,12
Total explicado pelas variáveis		27,0	26,98
Total não explicado pelas variáveis		73,0	73,02

¹ Conteúdo estimado de água retida pelo solo no potencial especificado (kg kg⁻¹). Ds = densidade do solo. Carbono = carbono orgânico. $\bar{U}_{AD} = \bar{U}_{33kPa} - \bar{U}_{1.500kPa}$

Tabela 5. Equações para predição do conteúdo de água (kg kg^{-1}) retido nos potenciais -33 e -1.500kPa de Latossolos e Argissolos Amarelos e respectivos coeficientes de determinação (R^2) e erro-padrão da estimativa (EPE)

Table 5. Equations for predicting water content (kg kg^{-1}) trapped in the potentials -33 and -1500kPa of Yellow Oxisols and Ultisols and corresponding coefficients of determination (R^2) and standard error of estimate (SEE)

Água ¹	Equação ²		R^2 (3)	EPE
$\bar{U}_{-33\text{kPa}}$	$= 0,0409 + 0,000377 \text{ argila} + 0,000108 \text{ silte}$	[1]	0,69**	0,0413
	$= 0,418 - 0,000377 \text{ areia} - 0,000269 \text{ silte}$	[2]	0,69**	0,0413
	$= 0,0525 + 0,000373 \text{ argila}$	[3]	0,68**	0,0418
	$= 0,378 - 0,000351 \text{ areia}$	[4]	0,64**	0,0442
$\bar{U}_{-1.500\text{kPa}}$	$= 0,0812 + 0,000279 \text{ argila} + 0,0000713 \text{ silte} - 0,0457 \text{ Ds}$	[5]	0,77**	0,0256
	$= 0,360 - 0,000279 \text{ areia} - 0,000208 \text{ silte} - 0,0457 \text{ Ds}$	[6]	0,77**	0,0256
	$= 0,0221 + 0,000288 \text{ argila}$	[7]	0,76**	0,0266
	$= 0,272 - 0,000269 \text{ areia}$	[8]	0,71**	0,0294
\bar{U}_{AD}	$= -0,0639 + 0,000123 \text{ argila} + 0,0583 \text{ Ds}$	[9]	0,25**	0,0347
	$= 0,0550 - 0,000125 \text{ areia} + 0,0589 \text{ Ds} - 0,0000817 \text{ silte}$	[10]	0,25**	0,0346

¹ Conteúdo estimado de água retida pelo solo no potencial especificado (kg kg^{-1})

² Areia, silte e argila, g kg^{-1} e densidade do solo (Ds) em Mg m^{-3}

³ ** = Valores significativos a 1%. $\bar{U}_{AD} = \bar{U}_{-33\text{kPa}} - \bar{U}_{-1.500\text{kPa}}$

al. (2002), considerando as frações areia, silte, argila e Ds para a estimativa do conteúdo de água de solos no Estado de Pernambuco. Estes autores encontraram valores de R^2 de 0,96, 0,96, e 0,89, para as equações que estimaram o conteúdo de água nos potenciais de -33kPa (silte e argila), -1.500kPa (areia, silte, argila e Ds) e AD (areia, silte, argila e Ds), respectivamente. Apesar de estes autores considerarem as frações areia e argila conjuntamente (frações altamente correlacionadas), os valores de R^2 obtidos não implicam em equações mais precisas do que as apresentadas na Tabela 5, onde as variáveis argila e areia foram consideradas separadamente nas FPT.

Em solos do noroeste do Paraná, sob sistemas de manejo com cobertura permanente em citros, Fidalski & Tormena (2007) obtiveram FTP para a determinação das curvas de retenção de água a partir da Ds, carbono orgânico e da cobertura vegetal (gramínea, leguminosa e vegetação espontânea) com valor R^2 de 0,94. Marcolin (2009), em solos sob plantio direto do Rio Grande do Sul estabeleceu funções de estimativa da CC e do PMP, o autor verificou que para a CC a função pode ser obtida a partir dos teores de argila e valores de Ds, apresentando um valor de R^2 de 0,69. Para o PMP foram empregados para o estabelecimento da função os valores do conteúdo de matéria orgânica, teores de argila e silte e Ds, sendo obtido um valor R^2 de 0,937. Ambas as funções estabelecidas foram significativas a 0,01%.

Nas Figuras 1, 2 e 3 estão ilustrados os resultados de correlação entre os dados observados e preditos, correspondentes ao conteúdo de água nos potenciais de -33 e -1.500kPa , e a água disponível. Verifica-se que as equações preditivas do teor de água nos potenciais de -33 (Figura 1) e -1.500kPa (Figura 2) caracterizam-se como de alta capacidade preditiva, sendo o menor valor de correlação igual a 0,8024 e o maior de 0,8751. Já para a predição de AD (Figura 3) o coeficiente de correlação demonstrou que a equação proposta

apresenta baixa capacidade preditiva ($r \cong 0,50$), e a relação dos dados preditos é praticamente paralela aos dados observados, ou seja, a estimativa agrupa os valores entre 0,05 e $0,10 \text{ kg kg}^{-1}$, subestimando os valores observados.

Através da análise das Figuras 1, 2 e 3 também é possível verificar a presença de valores anômalos (pontos distantes da linha principal 1:1). Esses valores contribuíram negativamente para a eficiência das FPT, em especial para a predição da AD, em que o modelo subestima os valores determinados, para um grande número de dados observados.

As linhas tracejadas e paralelas à linha principal 1:1 das Figuras 1, 2 e 3 indicam que a maioria das estimativas subestima ou superestima até 0,05 unidades absolutas o valor do conteúdo de água, o que equivale a um erro de até 50%. Os maiores valores R^2 , e correlação (r), seguidos de menores valores de EPE (Tabela 5) (Figuras 1, 2 e 3) observados nas equações preditivas do conteúdo de água para o potencial de -1.500kPa são indicativos da relação entre a retenção de água e a textura dos solos mais forte nas tensões mais elevadas, além da presença de microagregados estáveis, conforme destacado por Oliveira et al. (2002).

Na tensão mais elevada o conteúdo de água é menor e diretamente dependente do teor de argila, contribuindo assim para maior uniformidade do conteúdo de água, ou seja, menor variação entre o valor real e o predito. Na tensão mais baixa há naturalmente maior variação do conteúdo de água, devido à existência de maior dinâmica da água no solo, influenciada pela porosidade e agregação do solo.

Para os solos estudados por Oliveira et al. (2002), os valores de correlação entre os dados observados e estimados foram de 0,81, 0,92 e 0,56, respectivamente para -33kPa , -1.500kPa e AD. Michelin et al (2010) obtiveram FTP em solos de áreas irrigadas por aspersão do estado do Rio Grande do Sul a 0kPa , -1kPa , -33kPa , -100kPa , -500kPa e -1.500kPa , destacando a Ds, densidade das partículas, macroporosidade,

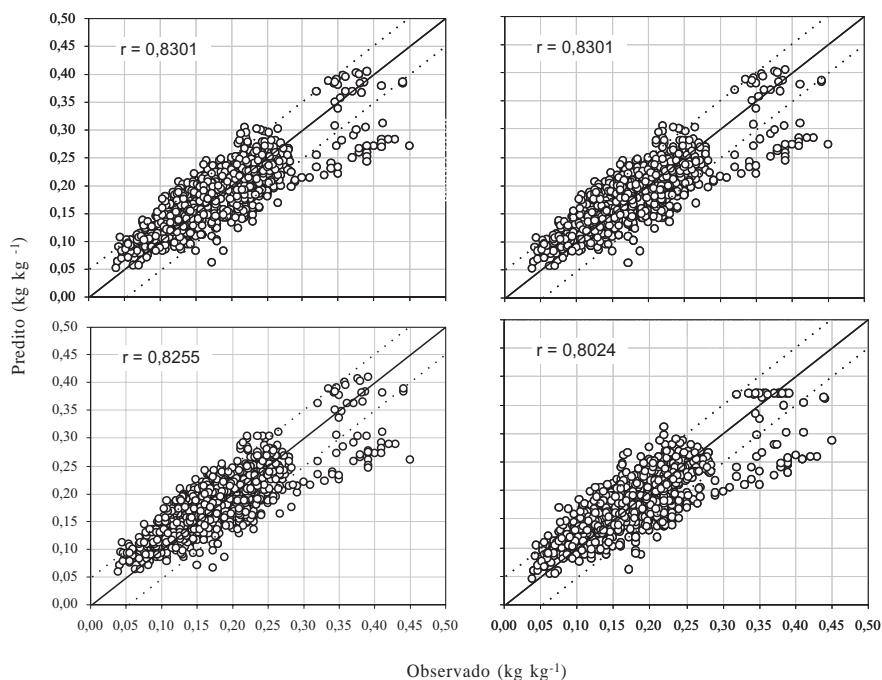


Figura 1. Correlação entre os dados observados e preditos do conteúdo de água a -33 kPa, conforme equações com componente argila (equações [1] e [3]) ou areia (equações [2] e [4]). Linhas tracejadas e paralelas à linha principal indicam que a maioria das estimativas subestima ou superestima até 0,05 unidades absolutas o valor do conteúdo de água, o que equivale a um erro de até 50%

Figure 1. Correlation between the observed and predicted water content data at -33 kPa as according to clay component equations (equations [1] and [3]) or sand (equations [2] and [4]). Dashed lines parallel to the main line indicate that most of the estimates underestimate or overestimate up to 0.05 absolute units the value of water content, which equates to an error of up to 50%

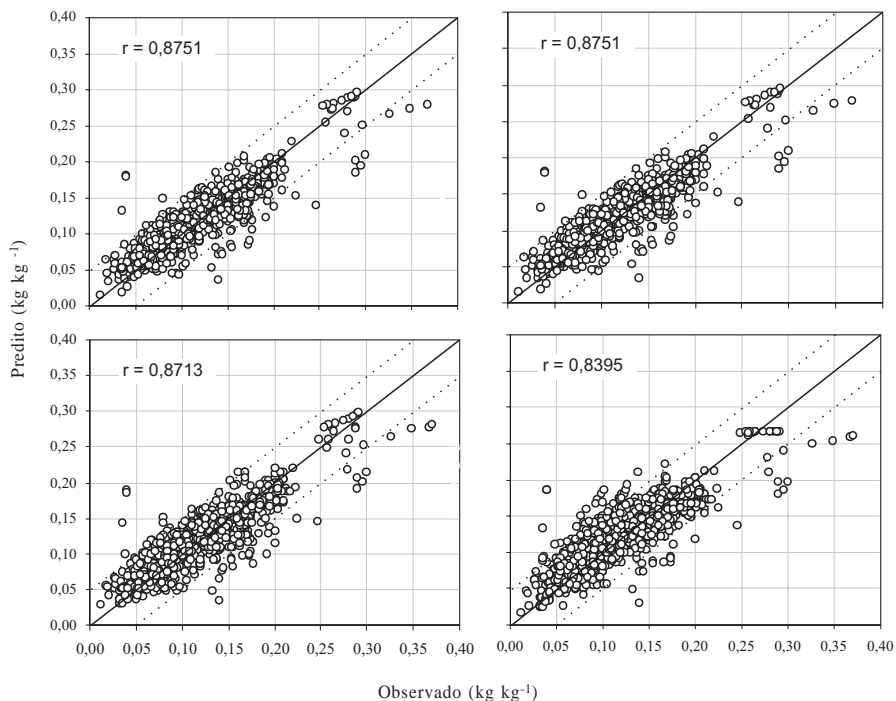


Figura 2. Correlação entre dados observados e preditos do conteúdo de água a -1.500 kPa, conforme equações com componente argila (equações [5] e [7]) ou areia (equações [6] e [8]). Linhas tracejadas e paralelas à linha principal indicam que a maioria das estimativas subestima ou superestima até 0,05 unidades absolutas o valor do conteúdo de água, o que equivale a um erro de até 50%

Figure 2. Correlation between the observed and predicted water content data at -1.500 kPa according to the equations with clay component (equations [5] and [7]) or sand (equations [6] and [8]). Dashed lines parallel to the main line indicate that most of the estimates underestimate or overestimate up to 0.05 absolute units the value of water content, which equates to an error of up to 50%

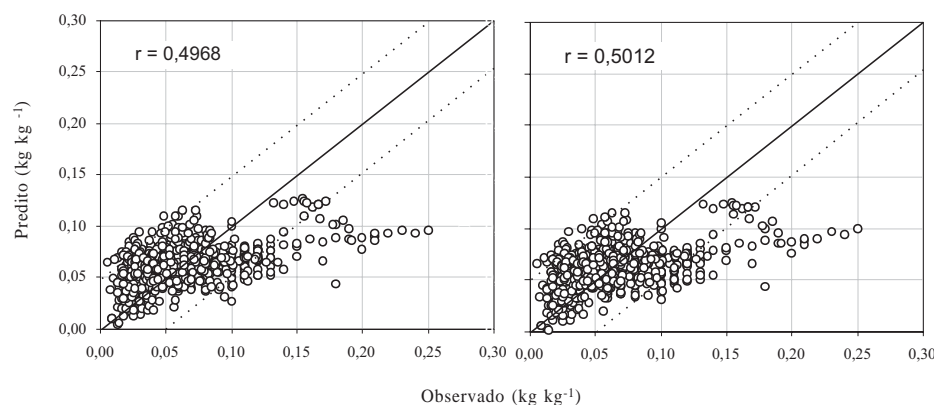


Figura 3. Correlação entre dados observados e preditos de AD, conforme equações com componente argila (equação [9]) ou areia (equação [10]). Linhas tracejadas e paralelas à linha principal indicam que a maioria das estimativas subestima ou superestima até 0,05 unidades absolutas o valor do conteúdo de água, o que equivale a um erro de até 50%

Figure 3. Correlation between the observed and predicted AD data according to the equations with clay component (equation [9]) or sand (equation [10]). Dashed lines parallel to the main line indicate that most of the estimates underestimate or overestimate up to 0.05 absolute units the value of water content, which equates to an error of up to 50%

microporosidade, areia fina, silte e argila, e com valores R^2 entre 0,77 (0kPa) e 0,93 (-33kPa). Para correlação entre dados observados e estimados observaram correlações entre 0,71 (-500kPa) e 0,93 (-33kPa).

CONCLUSÕES

O conteúdo de água retida nos potenciais de -33 e -1.500kPa nos solos de Tabuleiro, Latossolos Amarelos e Argissolos Amarelos, pode ser estimado, com boa precisão, a partir de dados de argila ou areia, ou de argila ou areia mais silte e densidade do solo.

A variável água disponível, apesar de poder ser estimada por funções de pedotransferência, subestimou os valores observados maiores que 0,10 kg kg⁻¹.

LITERATURA CITADA

- Alves, J. de O. Caracterização e potencialidade dos solos da estação experimental de cana-de-açúcar de Carpina. Recife: Universidade Federal Rural de Pernambuco, 1994. 154p. Dissertação Mestrado.
- Barros Filho, A.; Albuquerque, I. de A.; Torres, O. de A.; Oliveira, L.B. de. Levantamentos pedológico e conservacionista da Estação Experimental do Cedro - Vitória de Santo Antão - Pernambuco. Recife: IPA, 1966. 43p. (Boletim Técnico, 15).
- Jacomin, P.K.T. Distribuição geográfica, características e classificação dos solos coesos dos tabuleiros costeiros. In: Nogueira, L.R.Q., Nogueira, L.C. (Eds.). Reunião Técnica Sobre Solos Coesos dos Tabuleiros Costeiros. Anais... Cruz das Almas: EAUFBFA/GVFBA, Embrapa/CNPMPF, 1996. p.13-26.
- Benites, V. de M.; Machado, P.O de A.; Fidalgo, E.C.C.; Coelho, M.R.; Madari, B.E.; Lima, C.X. Funções de pedotransferência para estimativa da densidade dos solos brasileiros. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 30p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 104).
- Brady, N.C. Natureza e propriedades dos solos. 7.ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1989. 898p.
- Budiman, M.; McBratney, A.B.; Santos, M. de L.M.; Santos, H.G. dos. Revisão de pedotransferência (PTFs) e novos métodos de predição de classes e atributos do solo. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2003. 50p. (Documentos, 45).
- Carvalho, C.C.N. de. Gênese e transformação de solos em um tabuleiro do recôncavo baiano. Salvador: Universidade Federal da Bahia, 2001. 114p. Dissertação Mestrado.
- Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira - CEPLAC. Guia da excursão técnica: Solos Coesos de Tabuleiros Costeiros - Ilhéus, Centro de Pesquisas do Cacau. Campinas: Fundação Cargill, 1998. 84p.
- Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira - CEPLAC. Guia de Excursão Técnica. In: Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água, 13., 2000, Porto Seguro. Anais. Ilhéus: CEPLAC, 2000. n.p.
- Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira - CEPLAC. Levantamento de solos na estação de zootecnia do extremo sul da Bahia. Ilhéus: CEPLAC, 1983. 31p. (Boletim Técnico, 114).
- Copener Florestal Ltda - Copener. Levantamento semidetalhado de solos e avaliação da potencialidade das terras para reflorestamento com eucalyptus dos projetos Valentim, Rio Branco e Quatis. Entre Rios: J.P. Empreendimentos Florestais Ltda, 2000. 52p.
- Copener Florestal Ltda - Copener. Levantamento semidetalhado de solos e avaliação da potencialidade das terras para reflorestamento com eucalyptus dos projetos Massaranduba, Jandaíra III, Rio Branco II, III e IV,

- Redenção, Lagoa do Bu I, II e III. Entre Rios: J.P. Empreendimentos Florestais Ltda, 2002. 214p.
- Couto, L. Características físico-hídricas e disponibilidade de água no solo. Sete Lagoas: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento/Embrapa Milho e Sorgo. 2002. p. 65. (Circular Técnica, 21).
- De Vos, B.; Van Meirvenne, M.; Quataert, P.; Deckers, J.; Muys, B. Predictive quality of pedotransfer functions for estimating bulk density of forest soils. *Soil Science Society of America Journal*, v.69, n.2, p.500-510, 2005.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. Guia de excursão do XVI Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. Rio de Janeiro: Embrapa/SNLCS/SBCS, 1979. 72p.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. Levantamento de reconhecimento de média intensidade dos solos da região dos tabuleiros costeiros e da baixada litorânea do Estado de Sergipe. Rio de Janeiro: Embrapa Solos/Embrapa Tabuleiros Costeiros, 1999. 388p. (Boletim de Pesquisa, 4).
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. Levantamento detalhado dos solos do Centro Nacional de Pesquisa de Mandioca e Fruticultura Tropical. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical, 1993. 126p. (Boletim de Pesquisa, 7).
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. Manual de métodos de análise de solo. 2.ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212p.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. Reunião de classificação, correlação e aplicação de levantamentos de solo: guia de excursão de estudos de solos nos Estados de Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte, Ceará e Bahia. Recife: Embrapa Solos, 1998. 124p.
- Fidalsk, J.; Tormena, C.A. Funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração em sistemas de manejo com plantas de cobertura permanente em citros. *Ciência Rural*, v.37, n.5, p.1316-1322, 2007.
- Hoel, P.G. Estatística elementar. São Paulo: Atlas, 1977. 430p.
- Instituto do Açúcar e do Alcool - IAA. Universidade Federal Rural do Rio Janeiro _ UFRJ. Projeto de irrigação e drenagem da cana-de-açúcar na região Norte-Fluminense: estudos e levantamentos pedológicos. Relatório técnico setorial. Anexo A. Rio de Janeiro: Ministério da Indústria e Comércio. Instituto do Açúcar e do Alcool/UFRJ, 1983a.
- Instituto do Açúcar e do Alcool - IAA. Universidade Federal Rural do Rio Janeiro _ UFRJ. Projeto de irrigação e drenagem da cana-de-açúcar na região Norte-Fluminense: estudos e levantamentos pedológicos. Relatório técnico setorial. Rio de Janeiro: Ministério da Indústria e Comércio. Instituto do Açúcar e do Alcool. UFRJ, 1983b. v.1, tomo II.
- Jacomine, P.K.T. Evolução do conhecimento sobre solos coesos no Brasil. In: Cintra, L.F.D.; Anjos, J.L. dos, Ivo, W.M.P. de M. (Eds.). Workshop Coesão em Solos dos Tabuleiros Costeiros. Aracaju; Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2001. p.19-46.
- Kiehl, E.J. Manual de edafologia: Relações solo-planta. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 1979. 262p.
- Landim, P.M.B. Análise estatística de dados geológicos multivariados. Rio Claro: Laboratório de Geomatemática/DGA/IGCE/UNESP, 2000. 128p. (Texto Didático, 3).
- Lin, H.S.; McInnes, K.J.; Wilding, L.P.; Hallmark, C.T. Effects of soil morphology on hydraulic properties: II. Hydraulic pedotransfer functions. *Soil Science Society of America Journal*, v.63, n.4, p.955-961, 1999.
- Maia, J.L.T. Efeito do cultivo contínuo da cana-de-açúcar sobre propriedades de um Argissolo Amarelo fragipânico do Estado de Alagoas. Recife: Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2000. 105p. Dissertação Mestrado.
- Marcolin, C.D. Uso de funções de pedotransferência entre atributos físicos de solos sob plantio direto. Paso Fundo: Universidade de Passo Fundo, 2009. 187p. Tese Doutorado.
- Michelson, C.J.; Carlesso, R.; Oliveira, Z.B de; 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.
- Nascimento, G.B. do. Atributos diferenciais de Latossolos e Argissolos Amarelos: uma contribuição para o SiBCS. Seropédica: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2005. 143p. Tese Doutorado.
- Nascimento, G.B. do. Caracterização dos solos e avaliação de propriedades edáficas em ambientes de tabuleiros costeiros da Região Norte Fluminense (RJ). Seropédica: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2001. 162p. Dissertação Mestrado.
- Oliveira, L.B.; Ribeiro, M.R.; Jacomine, P.K.T.; Rodrigues, J.J.V.; Marques, F.A. Funções de pedotransferência para predição da umidade retida a potenciais específicos em solos do Estado de Pernambuco. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.26, n.2, p.315-323, 2002.
- Paz, A.M.; Cipriano, D.; Gonçalves, M.C.; Pereira, L.S. Funções de pedo-transferência para a curva de retenção da água no solo. *Revista de Ciências Agrárias*, v.32, n1, p.337-343, 2009.
- Reichardt, K. Capacidade de campo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.12, n.3, p.211-216, 1988.
- Reunião Técnica Sobre Solos Coesos dos Tabuleiros Costeiros - Pesquisa e desenvolvimento para os tabuleiros costeiros. Cruz das Almas; Aracaju: UFBA/EMBRAPA, CNPMF, CPATC, 1996. 37p.
- Ribeiro Júnior, J.I. Análises estatísticas no SAEG. Universidade Federal de Viçosa. 2001. 301p.
- Santana, S.O. de; Araújo, Q.R. de. Levantamento e caracterização dos solos das regiões produtoras de cacau da Bahia. Relatório. Ilhéus: CEPLAC, 2000. n.p.
- Silva, A.J.N. Caracterização de Latossolos Amarelos sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar no estado de Alagoas. Recife: Universidade Federal Rural de Pernambuco, 1996. 133p. Dissertação Mestrado.
- Silva, M.S.L. da. Efeito do cultivo contínuo da cana-de-açúcar em propriedades de solos de tabuleiro do Estado de Alagoas. Recife: Universidade Federal Rural de Pernambuco, 1989. 106p. Dissertação Mestrado.
- Souza, E. dos. O efeito do manejo nas propriedades físicas e químicas de um Latossolo Amarelo em tabuleiro do recôncavo baiano cultivado com cana-de-açúcar. Salvador: Universidade Federal da Bahia, 2001. 103p. Dissertação Mestrado.

- Statsoft, INC. Statistica for Windows – computer program manual. Tulsa (OK): StatSoft, 1999.
- Superintendência para o Desenvolvimento do Nordeste - SUDENE. Levantamento semidetalhado de solos da área central do tabuleiro sul do Estado de Sergipe. Aracajú: Sudene, 1982. 182p.
- Tomasella, J.; Hodnett, M.G.; Rossato, L. Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in Brazilian soils. *Soil Science Society of America Journal*, v.64, n.1, p.327-338, 2000.
- Tormena, C.A.; Silva, A.P. Incorporação da densidade no ajuste de dois modelos à curva de retenção de água no solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.26, n.2, p.305-314, 2002.
- Usina Cachoeira. Levantamento detalhado de solos. Anexos. Grupo Carlos Lyra. Maceió: CAN - Consultores Associados do Nordeste Ltda 1996. n.p.
- Usina Coruripe. Levantamento detalhado de solos. Fazenda Capiatã A. Maceió: CAN - Consultores Associados do Nordeste Ltda, 1997. n.p.
- Van den Berg, M.; Klamt, E.; van Reeuwijk, L.P.; Sombroek, W. G. Pedotransfer functions for the estimation of moisture retention characteristics of Ferralsols and related soils. *Geoderma*, v.78, n. 3-4, p.161-180, 1997.