

ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DO SOLO VIA FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA EM SOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS DE PERNAMBUCO

FERNANDA HELENA NASCIMENTO DE ANDRADE¹; CERES DUARTE GUEDES CABRAL DE ALMEIDA²; BRIVALDO GOMES DE ALMEIDA³; JOÃO AUDIFAX CÉZAR DE ALBUQUERQUE FILHO¹; BRUNO CAMPOS MANTOVANELLI⁴ E JOSÉ COELHO DE ARAÚJO FILHO⁵

¹ Departamento de Engenharia Agrícola, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE, Rua Dom Manuel de Medeiros, S/N, Dois Irmãos, CEP: 52171-900, Recife, PE, Brasil, fernanda_andrade89@hotmail.com, jaudifax@deagri.ufrpe.br

² Colégio Agrícola Dom Agostinho Ikas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE, Rua Dom Manuel de Medeiros, S/N, Dois Irmãos, CEP: 52171-900, Recife, PE, Brasil, ceres.codai.ufrpe@gmail.com.

³ Departamento de Agronomia, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE, Rua Dom Manuel de Medeiros, S/N, Dois Irmãos, CEP: 52171-900, Recife, PE, Brasil, brivaldoalmeida@gmail.com.

⁴ Departamento de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, Avenida Roraima, n° 1000, Camobi, CEP: 97105-900, Santa Maria, RS, Brasil, brunomantovanelli21@gmail.com.

⁵ Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, EMBRAPA Solos - UEP Recife, Rua Antônio Falcão, n° 402, Boa Viagem, CEP: 51020-240, Recife, PE, Brasil, jose.coelho@embrapa.br.

1 RESUMO

Objetivou-se gerar funções de pedotransferência (FPT) com base em dados das frações granulométricas, distribuição do tamanho de poros, densidade do solo e de partículas para estimar a umidade do solo equivalente à capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e a capacidade de armazenamento de água disponível (CAD) em Argissolos Amarelos representativos dos tabuleiros costeiros na zona da mata norte de Pernambuco. Para isso, foram coletadas amostras deformadas e indeformadas na camada 0,00 - 0,20 m de profundidade. As FPTs foram geradas a partir do método de regressão linear múltipla aplicando a técnica de *stepwise backward*. Este método eliminou alguns atributos físico-hídricos do solo baseado nos valores de R^2 e no Teste t. Os coeficientes de regressão do modelo proposto para predição de CAD, CC e o PMP apresentaram significância de 1% de probabilidade para as variáveis independentes selecionadas para cada modelo, indicando que esses parâmetros podem ser preditos, com ótima precisão, a partir do conteúdo de areia, argila, mesoporosidade, microporosidade e densidade do solo, as quais são fáceis de serem determinadas e obtidas, pré-requisito básico para construção das FPTs.

Palavras-chave: manejo de irrigação, *stepwise backward*, índices estatísticos.

ANDRADE, F. H. N.; ALMEIDA, C. D. G. C.; ALMEIDA, B. G.; ALBUQUERQUE FILHO, J. A. C.; MANTOVANELLI, B. C.; ARAÚJO FILHO, J. C.
SOIL PHYSICAL-HYDRIC PROPERTIES BY PEDOTRANSFER FUNCTION IN SOILS OF COASTAL PLAINS OF PERNAMBUCO

2 ABSTRACT

Aimed to generate pedotransfer functions (PTF) based on particle size, pore size distribution, soil and particle density to estimate the field capacity (CC), permanent wilting point (PMP) and available water capacity (CAD) in Ultisol Typic Fragiaquults in coastal plains of Pernambuco. Thus, deformed and undeformed samples were collected at 0.00 - 0.20m depth. PTFs were generated from multiple linear regression method by stepwise backward technique. This method eliminated some hydro-physical soil attributes, based on the values of R^2 and t test. CAD, CC and PMP estimated values showed a significant correlation of 1% probability for independent variables selected for each model. Thus, available water capacity, field capacity and permanent wilting point can be predicted with great precision by sand, clay content, mesoporosity, microporosity and soil density, which are easy to determine and obtain, basic prerequisite for construction of PTFs.

Keywords: irrigation management, *stepwise backward*, statistical indexes.

3 INTRODUÇÃO

No Brasil há diversas unidades geoambientais, dentre elas, os tabuleiros costeiros de formação terciária, que ocorrem ao longo do litoral brasileiro, desde o estado do Amapá até o do Rio de Janeiro, tendo maior extensão na região nordeste. Estas áreas possuem grande relevância para o nordeste do Brasil, não apenas por representar aproximadamente 50% do total de habitantes, mas também sob o ponto de vista econômico, por sua importância para o setor agropecuário, principalmente na produção de cana-de-açúcar (FONSÊCA et al., 2007).

O conhecimento sobre a dinâmica da água no sistema solo-planta-atmosfera vem aumentando significativamente ao longo das últimas décadas. A forma de quantificação das propriedades hidráulicas do solo tem sido atualizada com os avanços tecnológicos. Esta é uma das áreas cruciais da ciência do solo, pois desempenha um papel importante na produção agrícola, irrigação, infiltração, drenagem, estresse hídrico, evapotranspiração, bem como no transporte de calor, gás e solutos.

A disponibilidade de água para as plantas depende não só da quantidade de água que infiltra e é retida no solo, mas

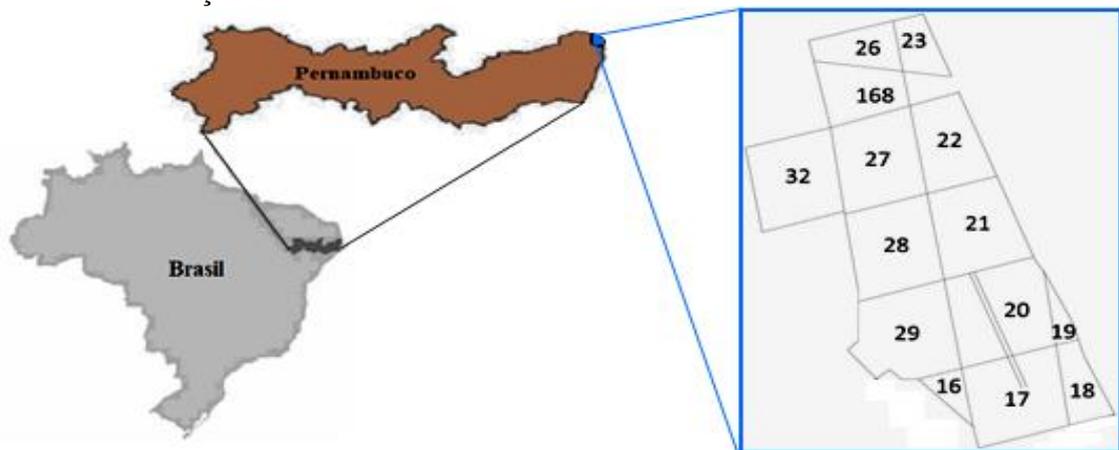
também da quantidade disponível e utilizada pela planta. A água que permanece no solo após a chuva ou irrigação é influenciada por vários atributos físicos do solo (densidade do solo, granulometria, agregação das partículas, distribuição dos poros, dentre outras), sobretudo por aquelas que descrevem a condição estrutural do solo (HILLEL, 1998). Portanto, conforme o solo é submetido ao uso agrícola, essas propriedades sofrem alterações, geralmente desfavoráveis ao desenvolvimento vegetal.

Ensaio para avaliação da dinâmica da água no solo por meio da relação entre o conteúdo de água e a sua respectiva energia de retenção nos poros dos solos, obtida pela curva característica de retenção de água no solo (CCRAS), são morosos e de alto custo. Métodos alternativos têm sido propostos no sentido de agilizar e tornar mais econômico tais ensaios, e, dentre eles, as funções de pedotransferência (PTFs) têm recebido maior destaque. Desse modo, as PTFs são funções preditivas que relacionam parâmetros hidráulicos do solo com outros atributos, de mais fácil determinação, rotineiramente mensuráveis em laboratórios, ou obtidos a partir de registros de pesquisas (BOTULA; RANST; CORNELIS, 2014; MICHELON et al., 2010).

Neste sentido, a estimativa do conteúdo de água retida no solo tem sido abordada em vários estudos, considerando diferentes potenciais, incluindo àqueles equivalentes à capacidade de campo (CC) e ao ponto de murcha permanente (PMP), assim como para a CCRAS e a capacidade de água disponível (CAD) (OLIVEIRA et al., 2002; SILVA et al., 2009; NASCIMENTO et al., 2010; MICHELON et al., 2010; SOUZA et al., 2014; SILVA et al., 2015; AULER; PIRES; PINEDA, 2017). No entanto, FTPs não devem ser extrapoladas para além da região do solo e da classe para a qual foi desenvolvida, visando reduzir os erros de predição do atributo avaliado (OLIVEIRA et al., 2002; NEMES et al., 2009; DASHTAKI; HOMAEE; KHODABERDILOO, 2010).

Diante desse contexto, objetivou-se gerar funções de pedotransferência com base em dados da granulometria, distribuição do tamanho de poros, densidade do solo e de partículas para estimar o conteúdo de água disponível, a umidade do solo equivalente à capacidade de campo e ao ponto de murcha permanente, em Argissolo Amarelo representativo da região dos tabuleiros costeiros na zona da mata norte de Pernambuco.

Figura 1. Localização geográfica da área de coleta das amostras de solo, com as respectivas identificação dos lotes.



Fonte: Usina Santa Teresa, adaptado¹.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Caracterização do meio físico

A área de estudo localizou-se na região norte da zona da mata norte de Pernambuco, no município de Goiana, PE (Figura 1). A classificação climática conforme Alvares et al. (2014), pertence ao grupo A (Clima Tropical Chuvoso) e tipo climático Am (chuvas do tipo monção), com temperaturas variando entre 24 a 26°C e precipitação entre 1600 e 1900 mm.

4.2 Métodos de campo e laboratório

As amostras de solo foram coletadas em área cultivada com cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.). Foram selecionados 14 lotes (331,51 ha) no Engenho Bujari (Figura 1) cultivados com diferentes variedades de cana-de-açúcar, onde o sistema de irrigação utilizado é o mecanizado com movimentação contínua tipo linear lateral móvel. O solo foi classificado como Argissolo Amarelo distrocoeso fragipânico (EMBRAPA, 2013) equivalente ao Typic Fragiaquults de acordo com a USDA Soil Taxonomy (SOIL SURVEY STAFF, 2014).

¹ Mapa da área agrícola fornecido pela gerência da Usina Santa Teresa (comunicação pessoal).

Foram coletadas 112 amostras de solo, na profundidade de 0,00 - 0,20 m, sendo 56 indeformadas, via anel volumétrico em aço inoxidável (5 x 5 cm) inserido ao solo com auxílio do amostrador tipo Uhland e 56 deformadas, via trado holandês. A partir do conjunto de amostras indeformadas, foram determinadas a macro, meso e microporosidade, capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e densidade do solo (Ds). Para a densidade de partículas e a análise granulométrica utilizaram-se as amostras deformadas.

Utilizando-se a classificação sugerida por Prevedello (1996), a macroporosidade foi calculada por meio da relação entre a diferença da massa da amostra saturada e a massa da amostra equilibrada no potencial de -1 kPa pelo respectivo volume de solo, em mesa de tensão (LEAMER; SHAW, 1941 apud OLIVEIRA, 1968; ALMEIDA et al., 2017a). Para a mesoporosidade, a partir do conjunto equilibrado a -1 kPa, foi aplicado o potencial de -6 kPa, calculando-a a partir da relação entre a umidade equilibrada a -1 kPa e -6 kPa, também em mesa de tensão. E a microporosidade foi determinada por meio da relação entre o conjunto equilibrado a -6 kPa e a -1500 kPa, por meio da câmara de Richards (RICHARDS, 1965; ALMEIDA et al., 2017a).

A determinação da CC foi realizada utilizando amostras indeformadas sob o potencial -10 kPa, via mesa de tensão. Para o PMP, as amostras foram submetidas ao potencial de -1500 kPa, via câmara de Richards. A densidade do solo foi realizada na sequência, onde o solo contido em anel volumétrico foi seco em estufa à 105°C, até massa constante (ALMEIDA et al., 2017b). A densidade de partículas foi determinada utilizando o método do balão volumétrico conforme recomendação de Viana et al. (2017).

A análise granulométrica foi realizada através do método do hidrômetro

de Bouyoucos, com peneiramento da fração areia em malha de 53µm, leitura da argila em 24h, e determinação do silte pela diferença entre areia e argila, segundo Almeida (2008). A fração areia foi separada em: areia muito grossa, areia grossa, areia média, areia fina e areia muito fina, utilizando peneiras com malhas de: 1; 0,5; 0,25; 0,106; 0,053 mm, respectivamente, conforme a classificação da Soil Survey Staff (2014).

A capacidade de água disponível (CAD) foi calculada em função da CC, PMP do solo, densidade do solo (Ds) e considerando a profundidade efetiva (Z) do sistema radicular (Equação 1).

$$CAD = 10 \times (U_{CC} - U_{PMP}) \times Ds \times Z \quad (01)$$

Em que, CAD = Capacidade de água disponível, mm; U_{CC} = Capacidade de campo, g g⁻¹; U_{PMP} = Ponto de murcha permanente, g g⁻¹; Ds = Densidade do solo, g cm⁻³; Z = Profundidade do solo (20 cm).

As FPTs para predição das variáveis dependentes CAD, CC e PMP foram geradas por meio de treze variáveis independentes candidatas aos modelos: densidade do solo e de partículas, volume de macroporos, mesoporos e microporos, areia total e subfrações (areia muito grossa, areia grossa, areia média, areia fina e areia muito fina), silte e argila.

4.3 Análises estatísticas

Os dados compilados foram organizados em planilhas eletrônicas e submetidos à análise estatística descritiva, correlações e regressões, utilizando-se o pacote estatístico SAEG – Sistemas para Análises Estatísticas (RIBEIRO JÚNIOR, 2001). As FPTs foram geradas a partir do método de regressão linear múltipla aplicando a técnica de *stepwise*, para seleção das variáveis candidatas ao modelo. O modelo escolhido, *stepwise backward*,

inclui todas as variáveis independentes e em cada passo remove a variável preditora menos significativa, e assim sucessivamente até definir o modelo final. Este modelo também considera a possível redundância entre duas ou mais variáveis, eliminando aquela que apresente menor coeficiente de significância (FERREIRA, 2012)

Por este método, ocorre a remoção sequencial das variáveis por ordem decrescente de importância, resultando em modelos finais significativos para as funções. Os desempenhos das funções foram analisados graficamente pela relação 1:1, entre os dados observados e dados preditos. Ainda foram calculados índices estatísticos, conforme equações 2 a 5, utilizando-se a recomendação de Willmott et al. (1981). Além disso, determinou-se o índice de desempenho (c) proposto por Camargo; Sentelhas (1997), que é resultado do produto entre o coeficiente de correlação de Pearson (r) e o índice de exatidão de Willmott (d).

Erro médio (EM),

$$EM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i) \quad (02)$$

Em que, O_i = dado observado; P_i = dado predito; n = número de pares de dados observados e preditos.

Raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE),

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2 \right]^{0,5} \quad (03)$$

Coefficiente de massa residual (CRM),

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (04)$$

Índice de concordância de Willmott (d),

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right] \quad (05)$$

Em que, \bar{O} = média dos dados observados.

Para interpretar os índices selecionados, se faz necessário compreender a natureza específica de cada um, pois representam o grau de similaridade entre os valores estimados pelo modelo proposto e os valores reais, em termos de exatidão e precisão. Assim, o EM mensura a exatidão da FPT, podendo ser positivo ou negativo indicando, dessa forma, se ocorre superestimativa ou subestimativa, respectivamente. O RMSE está relacionado ao grau de dispersão dos valores estimados pelo modelo em comparação com valores de referência, sendo igual a zero quando o modelo proposto se ajusta perfeitamente aos dados reais (BARBOZA, 2011; PEQUENO, 2016). Outro índice utilizado neste trabalho foi o CRM, o qual pode ter valor $\leq 1,0$, sendo que, valores positivos apontam para superestimativa e negativos para subestimativa e, quando igual a zero, condição perfeita de estimativa.

O coeficiente de correlação de Pearson (r) foi utilizado para mensurar a correlação entre as variáveis candidatas ao modelo proposto, bem como com a variável dependente. Este índice varia entre - 1 e 1 sendo que, quanto maior o valor absoluto, maior a correlação entre as variáveis. O índice “d”, proposto por Willmott (1981), representa a concordância entre os valores medidos e estimados, podendo variar entre 0 (nenhuma correlação) e 1 (perfeita concordância).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Barros; Jong Van Lier (2014) destacam a importância da uniformidade do banco de dados para geração de funções de

pedotransferência (FPT), considerando que, um dos fatores limitantes para sua acurácia é a desuniformidade dos bancos de dados existentes, uma vez que os mesmos não foram construídos para essa finalidade. No entanto, neste trabalho, o banco de dados foi estabelecido especialmente para geração das FPT específicas para estimar os parâmetros físico-hídricos em um Argissolo Amarelo típico da região dos tabuleiros costeiros do estado de Pernambuco, reforçando a validade dos resultados apresentados.

Os resultados estatísticos resumidos das variáveis físicas utilizadas para gerar as

FPTs são apresentados nas Tabelas 1 e 2. A CAD variou de 3,09 a 15,58 mm, possuindo um CV = 23,32%, a CC obteve uma variação de 0,04 a 0,16 g g⁻¹ com um CV = 28,95% e o PMP variou de 0,02 a 0,12 g g⁻¹, sendo seu CV = 42,10%. Todos os CVs foram classificados como médios, conforme Warrick; Nielsen (1980). A CAD possui distribuição do tipo assimétrica negativa e platicúrtica, demonstrada nos coeficientes de assimetria e curtose. Já a CC e PMP possuem distribuição assimétrica positiva e curtose também platicúrtica.

Tabela 1. Estatística descritiva das variáveis respostas e das edáficas obtidas através das amostras estruturadas utilizadas na elaboração das funções de pedotransferência.

Variável	CAD ¹	CC ²	PMP ³	Ds ⁴	Macro ⁵	Meso ⁶	Micro ⁷
	mm	g g ⁻¹	g g ⁻¹	g cm ⁻³	----- cm ³	cm ⁻³ -----	-----
Nº de amostras	56	56	56	56	56	56	56
Média	11,48	0,09	0,06	1,61	0,04	0,12	0,11
Máximo	15,58	0,16	0,12	1,81	0,10	0,25	0,15
Mínimo	3,09	0,04	0,02	1,29	0,02	0,03	0,05
Assimetria	-0,89	0,17	0,24	-0,66	1,69	0,64	-0,61
Curtose	3,76	2,51	2,34	3,17	6,37	2,35	3,00
DP ⁸	2,68	0,03	0,02	0,11	0,01	0,06	0,02
EP ⁹	0,36	0,00	0,00	0,02	0,00	0,01	0,00
CV(%) ¹⁰	23,32	28,95	42,10	7,05	35,95	52,00	19,75

1 Capacidade de água disponível; 2 Capacidade de campo; 3 Ponto de murcha permanente; 4 Densidade do solo; 5 Macroporosidade; 6 Mesoporosidade; 7 Microporosidade; 8 Desvio padrão; 9 Erro padrão; 10 Coeficiente de variação.

Com base nos teores médios das frações de areia, silte e argila nas amostras de solo, a classe textural foi identificada como franco argilo arenosa (Tabela 2).

Godinho et al. (2009) em estudo sobre a análise granulométrica de um Argissolo Vermelho, obteve a classificação textural francoarenosa do solo.

Tabela 2. Estatística descritiva das variáveis edáficas obtidas através das amostras deformadas utilizadas na elaboração das funções de pedotransferência.

Variável	Dp ¹ g cm ⁻³	Areia ----- g kg ⁻¹ -----	Silte ----- g kg ⁻¹ -----	Argila ----- g kg ⁻¹ -----	AMG ²	AG ³	AM ⁴	AF ⁵	AMF ⁶
Nº de amostras	56	46	46	46	56	56	56	56	56
Média	2,49	724,60	45,90	225,90	1,12	7,98	10,91	15,76	2,38
Máximo	2,65	880,80	189,20	439,40	2,70	14,40	16,80	22,70	4,90
Mínimo	2,29	497,90	6,00	60,00	0,60	3,60	6,10	6,30	1,00
Assimetria	-0,54	-0,41	2,11	0,36	1,29	0,60	-0,01	-0,27	1,01
Curtose	3,67	1,98	10,23	2,02	5,80	2,74	2,59	2,70	4,14
DP ⁷	0,07	13,52	3,03	12,06	0,39	2,65	2,37	3,64	0,76
EP ⁸	0,01	1,81	0,41	1,61	0,05	0,35	0,32	0,49	0,10
CV(%) ⁹	2,88	16,47	63,73	46,76	35,01	33,19	21,68	23,11	31,99

1 Densidade de partículas; 2 Areia muito grossa; 3 Areia grossa; 4 Areia média; 5 Areia fina; 6 Areia muito fina; 7 Desvio padrão; 8 Erro padrão; 9 Coeficiente de variação.

Os valores de densidade de partículas variaram de 2,29 a 2,65 g cm⁻³, e dentre as variáveis analisadas foi a que apresentou o coeficiente de variação mais baixo (CV = 2,88%), onde de acordo com Warrick; Nielsen (1980) representa baixa variação, pois está inferior à 12%. O valor do coeficiente de variação da fração areia e da argila é classificado como médio, conforme Warrick; Nielsen (1980). Como o silte é determinado por diferença, a partir dessas duas variáveis, é esperado que o seu coeficiente seja maior do que os de suas variáveis determinantes (NASCIMENTO et al., 2010), conforme ocorreu nesta pesquisa. Os resultados estatísticos relacionados as demais variáveis físicas (Tabelas 1 e 2) mostram distribuição do tipo platicúrtica, com destaque para as variáveis macroporosidade, silte e areia muito grossa.

O método de seleção por etapas e eliminação de variáveis *stepwise backward*, utilizado na geração da FPT, resultou na eliminação de dez variáveis baseadas nos valores de R² e na significância pelo teste “t”, restando apenas três delas para a formulação da equação preditiva da CAD: densidade do solo, microporosidade e o teor de argila.

O valor do coeficiente de determinação (R²) para a CAD foi de 0,90, indicando que a FPT pode explicar 90% dos valores obtidos da variável dependente. Para a CC e o PMP, os valores de R² foram de 0,93 e 0,90; respectivamente. Valores de R² similares foram obtidos por Oliveira et 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 R² de 0,96; 0,96; e 0,89; para as equações que estimaram o conteúdo de água nos potenciais de -33 kPa (silte e argila), -1500 kPa (areia, silte, argila e Ds) e AD (areia, silte, argila e Ds), respectivamente.

Abbaspour; Moon (1992) estudaram relações entre informações convencionais de campo (cor do solo, tipo de horizonte, dentre outras) e algumas propriedades do solo medidas em laboratório, como umidade gravimétrica na saturação (Us) e capacidade de campo (CC). Para estimar estas variáveis, os autores encontram FPTs significativas em função da textura e da densidade do solo, ajustadas via regressão múltipla, com R² de 0,55 para a Us e 0,70 para a CC.

A capacidade de água disponível apresentou correlação com três variáveis

independentes: densidade do solo, microporosidade e argila selecionadas para o modelo preditivo proposto (Tabelas 3 e 4). Observa-se que a microporosidade (Tabela 3) foi o atributo que melhor se correlacionou com a CAD, seguido pela densidade do solo e o teor de argila (Tabela 4). Desse modo, essa alta correlação entre a microporosidade e a CAD, pode ser justificada pela amplitude de retenção e disponibilidade dessa classe de poros. Em termos de energia potencial da água no solo

(Ψ), a microporosidade está inserida no conceito da CAD, incluindo a umidade equilibrada nos poros do solo entre os potenciais 10 e 1500 kPa (RICHARDS, 1965). De fato, os microporos, classificados nesta pesquisa como poros com diâmetros equivalentes entre 50 e 0,2 μm (PREVEDELLO, 1996), retêm água na faixa de energia entre 6 kPa e a 1500 kPa, abrangendo, portanto, a maior parte da água disponível considerada na CAD.

Tabela 3. Matriz de correlação entre a CAD e as variáveis edáficas obtidas através das amostras estruturadas.

Variável	CAD ¹	Ds ²	Macro ³	Meso ⁴	Micro ⁵
CAD ¹	1				
Ds ²	0,20	1			
Macro ³	-0,04	-0,55	1		
Meso ⁴	-0,47	-0,39	0,12	1	
Micro ⁵	0,83	0,06	-0,05	-0,10	1

1 Capacidade de água disponível; 2 Densidade do solo; 3 Macroporosidade; 4 Mesoporosidade; 5 Microporosidade.

Tabela 4. Matriz de correlação entre a CAD e as variáveis edáficas obtidas através das amostras deformadas.

Variável	CAD ¹	Dp ²	Areia	Silte	Argila	AMG ³	AG ⁴	AM ⁵	AF ⁶	AMF ⁷
CAD ¹	1									
Dp ²	-0,08	1								
Areia	-0,14	0,39	1							
Silte	-0,33	-0,33	-0,57	1						
Argila	0,17	-0,36	-0,98	0,38	1					
AMG ³	0,13	0,22	0,2	-0,19	-0,18	1				
AG ⁴	-0,2	0,14	0,6	-0,36	-0,59	0,39	1			
AM ⁵	-0,18	0,41	0,89	-0,59	-0,85	0,2	0,71	1		
AF ⁶	-0,01	0,34	0,75	-0,4	-0,74	-0,09	-0,05	0,45	1	
AMF ⁷	-0,03	0	0,34	0,01	-0,39	-0,25	-0,34	0,03	0,68	1

1 Capacidade de água disponível; 2 Densidade de partículas; 3 Areia muito grossa; 4 Areia grossa; 5 Areia média; 6 Areia fina; 7 Areia muito fina.

As frações areia, areia grossa, areia média, areia fina, areia muito fina e silte, (Tabela 4) apresentaram correlação negativa com a CAD, já a argila apresentou correlação positiva. Isso explica a importância da área superficial das partículas para a retenção de água no solo e,

posteriormente, para a determinação da CAD, que necessita de valores de CC e PMP. Michelin et al. (2010) também obtiveram resultados similares. Além disso, Urach (2007), Peraza (2003) e Oliveira et al. (2002) verificaram que a composição granulométrica do solo é a característica

que melhor reproduz a retenção de água no solo.

A variável resposta capacidade de campo apresentou correlação com a

densidade do solo, mesoporosidade e o teor de argila (Tabelas 5 e 6).

Tabela 5. Matriz de correlação entre a CC e as variáveis edáficas obtidas através das amostras estruturadas.

Variável	CC ¹	Ds ²	Macro ³	Meso ⁴	Micro ⁵
CC ¹	1				
Ds ²	-0,24	1			
Macro ³	0,27	-0,55	1		
Meso ⁴	-0,72	-0,39	0,12	1	
Micro ⁵	0,06	0,06	-0,05	-0,10	1

1 Capacidade de campo; 2 Densidade do solo; 3 Macroporosidade; 4 Mesoporosidade; 5 Microporosidade.

Tabela 6. Matriz de correlação entre a CC e as variáveis edáficas obtidas através das amostras deformadas.

Variável	CC ¹	Dp ²	Areia	Silte	Argila	AMG ³	AG ⁴	AM ⁵	AF ⁶	AMF ⁷
CC ¹	1									
Dp ²	-0,39	1								
Areia	-0,90	0,39	1							
Silte	0,49	-0,33	-0,57	1						
Argila	0,89	-0,36	-0,98	0,38	1					
AMG ³	-0,06	0,22	0,20	-0,19	-0,18	1				
AG ⁴	-0,51	0,14	0,60	-0,36	-0,59	0,39	1			
AM ⁵	-0,80	0,41	0,89	-0,59	-0,85	0,20	0,71	1		
AF ⁶	-0,71	0,34	0,75	-0,40	-0,74	-0,09	-0,05	0,45	1	
AMF ⁷	-0,33	0	0,34	0,01	-0,39	-0,25	-0,34	0,03	0,68	1

1 Capacidade de campo; 2 Densidade de partículas; 3 Areia muito grossa; 4 Areia grossa; 5 Areia média; 6 Areia fina; 7 Areia muito fina.

O teor de argila foi o atributo que melhor se correlacionou com a CC (Tabela 6), seguido pela mesoporosidade e densidade do solo (Tabela 5). Assim, essas foram as variáveis eleitas para compor o modelo proposto para estimar a umidade equivalente à capacidade de campo. A importância da influência da granulometria na retenção de água é ressaltada por Klein; Klein (2015), por ser a propriedade que não se modifica com o tempo, exceto se considerar milênios de anos e a ação do

intemperismo, além de diferenças na cobertura, espécies vegetais utilizadas, entrada de água no solo via precipitação e/ou irrigação.

Os valores de umidade do solo equivalente ao ponto de murcha permanente, assim como para a CAD e CC, apresentaram correlação com as variáveis independentes: teor de areia, mesoporosidade e densidade do solo, selecionadas para o modelo preditivo proposto (Tabelas 7 e 8).

Tabela 7. Matriz de correlação entre o PMP e as variáveis edáficas obtidas através das amostras estruturadas.

Variável	PMP ¹	Ds ²	Macro ³	Meso ⁴	Micro ⁵
MP ¹	1				
Ds ²	-0,23	1			
Macro ³	0,25	-0,55	1		
Meso ⁴	-0,67	-0,39	0,12	1	
Micro ⁵	-0,21	0,06	-0,05	-0,10	1

1 Ponto de murcha permanente; 2 Densidade do solo; 3 Macroporosidade; 4 Mesoporosidade; 5 Microporosidade.

Tabela 8. Matriz de correlação entre o PMP e as variáveis edáficas obtidas através das amostras deformadas.

Variável	PMP ¹	Dp ²	Areia	Silte	Argila	AMG ³	AG ⁴	AM ⁵	AF ⁶	AMF ⁷
PMP ¹	1									
Dp ²	-0,40	1								
Areia	-0,92	0,39	1							
Silte	0,50	-0,33	-0,57	1						
Argila	0,90	-0,36	-0,98	0,38	1					
AMG ³	-0,07	0,22	0,20	-0,19	-0,18	1				
AG ⁴	-0,48	0,14	0,60	-0,36	-0,59	0,39	1			
AM ⁵	-0,81	0,41	0,89	-0,59	-0,85	0,20	0,71	1		
AF ⁶	-0,75	0,34	0,75	-0,40	-0,74	-0,09	-0,05	0,45	1	
AMF ⁷	-0,36	0	0,34	0,01	-0,39	-0,25	-0,34	0,03	0,68	1

1 Ponto de Murcha Permanente; 2 Densidade de partículas; 3 Areia muito grossa; 4 Areia grossa; 5 Areia média; 6 Areia fina; 7 Areia muito fina.

O teor de areia teve melhor correlação com o PMP (Tabela 8), seguido pela mesoporosidade e densidade do solo (Tabela 7), sendo, portanto, essas variáveis escolhidas para compor o modelo proposto de estimativa da umidade equivalente no ponto de murcha permanente. Outros autores também comprovaram a importância das frações granulométricas na retenção da água no solo, como Reichardt; Timm (2004), onde comentam que os teores de areia, silte e argila explicam mais de 80 % do comportamento da curva característica de retenção da água no solo (CCRAS). Para estes autores, a parte da CCRAS com maiores conteúdos de água nos poros do solo está sob ação dos fenômenos de capilaridade, os quais são fundamentais para o cálculo do valor da

energia de retenção (potencial mátrico). Nestas condições, a umidade do solo é mais dependente do arranjo e das dimensões dos poros; sendo estes influenciados pela densidade do solo (Ds) e sua porosidade (P). De fato, conforme observado em Pequeno (2016), Ds e P governam a dinâmica de gases e água nos poros do solo, afetando diretamente os atributos que dependem da sua estrutura, como a CCRAS.

Além de se considerar o Teste t e R², foi observado também o quão laborioso era o ensaio para aquelas propriedades do solo eleitas pelo programa estatístico. Assim, as FPTs obtidas para estimar a capacidade de água disponível, capacidade de campo e ponto de murcha permanente para o Argissolo Amarelo na camada de 0,00 - 0,20m estão na Tabela 9.

Tabela 9. Equações propostas para estimar a CAD, CC e PMP.

Equações
CAD = $-9,16407 + 4,82097^{**} \times Ds + 106,623^{**} \times \text{Micro} + 0,0686292^{**} \times \text{Argila}$
CC = $0,256931 - 0,261746^{**} \times \text{Meso} + 0,000104958^{**} \times \text{Argila} - 0,0942794^{**} \times Ds$
PMP = $0,241249 - 0,000117723^{**} \times \text{Areia} - 0,152483^{**} \times \text{Meso} - 0,0464851^{**} \times Ds$
Ds = g cm ⁻³ , Mesoporosidade = cm ³ .cm ⁻³ , Microporosidade = cm ³ cm ⁻³ e Areia = g kg ⁻¹ , Argila = g kg ⁻¹

Duas equações foram geradas para a estimativa da disponibilidade total de água por Saxton et al. (1986), e ajustadas de forma independente sendo uma para capacidade de campo e outra, relativa ao ponto de murcha permanente, ambas com coeficiente de determinação, em torno de 0,94, próximo aos obtidos no presente estudo. Observa-se, portanto que, os atributos físicos estruturais presentes na composição das funções de pedotransferência foram os que apresentaram melhores correlações (Tabelas 3, 5 e 7) com as variáveis dependentes: CAD, CC e PMP, respectivamente. Nesse sentido, Hillel (1998), Klein; Libardi (2000) e Assad et al. (2001) corroboram a informação de que a estrutura do solo exerce maior influência na retenção de água. As FPTs proposta neste trabalho apresentaram atributos estruturais e texturais (Tabela 9), em sua composição, destacando-se os efeitos do fenômeno de adsorção, influenciado pela textura do solo e sua superfície específica.

A respeito da influência dos atributos estruturais e texturais na dinâmica da água no solo, estudos têm utilizado FPTs, construídas a partir da relação destes atributos, para estimar o conteúdo de água retida no solo, sobretudo na faixa de potenciais para disponibilidade de água à planta. Nesses estudos, vários modelos matemáticos, por meio de FPTs, têm sido gerados na perspectiva de reduzir o erro relativo do modelo proposto, elevando assim, o desempenho das funções que

estimam as propriedades hídricas do solo (FABIAN; OTTONI FILHO, 2000; PERAZA, 2003; BRUAND; PEREZ-FERNANDEZ; DUVAL, 2003; URACH, 2007; MAJOU et al., 2008). Assim, considerando-se os potenciais avaliados neste estudo, Pequeno et al. (2018) afirmam que a influência estrutural do solo na retenção de água sob forças capilares é maior, sendo a contribuição das variáveis granulométricas reduzida em comparação com a densidade do solo, por exemplo, em função de sua relação direta com a porosidade do solo. Pode-se portanto, pressupor que uma componente estrutural, como a microporosidade, aumenta a exatidão da FPT, uma vez que, segundo Klein; Libardi (2000) a dinâmica da retenção de água no solo depende da estrutura do solo, onde os microporos têm papel fundamental, correlacionado ao estado de agregação.

A correlação entre os dados observados (via análises em laboratório) e os dados preditos (obtidos via FPT) para a CAD, CC e PMP estão apresentados nas Figuras 2, 3 e 4, respectivamente. Nestes gráficos é possível visualizar que, a relação entre os dados observados e preditos para a CC (Figura 3) é mais precisa do que para CAD (Figura 2), uma vez os valores preditos para a CC estão mais próximos da reta 1:1, ilustrando que os erros são menores quando comparados aos erros da CAD predita. Consequentemente, pode-se inferir que a CC possui menor variabilidade, resultando num melhor ajuste matemático.

Figura 2. Comparação entre a CAD observada e CAD predita (mm) para Argissolo Amarelo com base no modelo proposto.

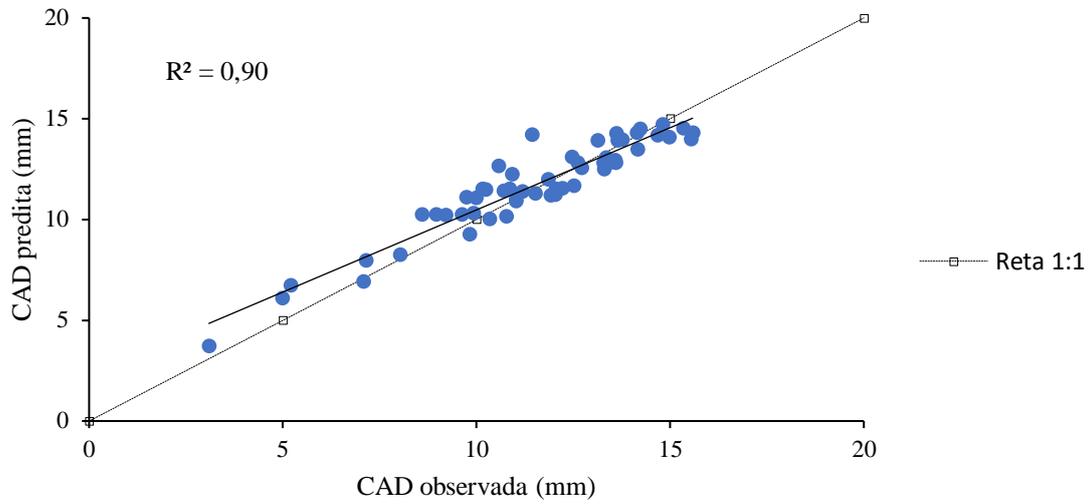


Figura 3. Comparação entre a CC observada e CC predita (g.g^{-1}) para Argissolo Amarelo com base no modelo proposto.

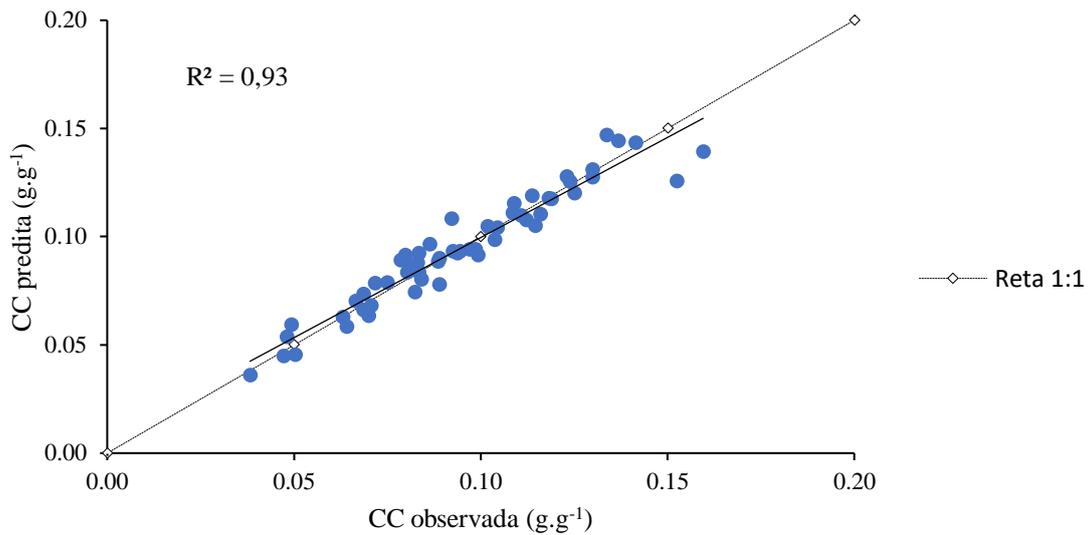
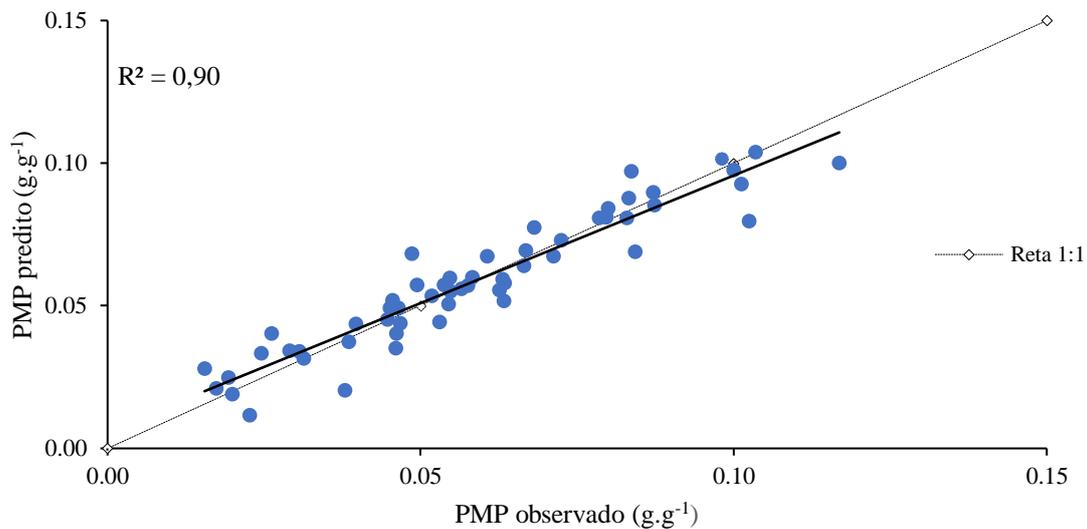


Figura 4. Comparação entre o PMP observado e o PMP predito (g.g^{-1}) para Argissolo Amarelo com base no modelo proposto.



Os resultados dos indicadores estatísticos (R^2 , r , d , c , ME, RMSE e CRM) e a dispersão homogênea dos pontos observados e preditos em relação à reta 1:1 indicam que, a FPT apresenta boa precisão na estimativa da CAD. O modelo proposto

para a determinação da CC obteve valor de $R^2 = 0,93$ (Figura 3) o que indica que 93% das variações ocorridas são explicadas pelo modelo e os outros 7% dependem de outras variáveis que não as utilizadas no modelo.

Tabela 10. Valores do erro médio (EM), raiz quadrada do erro médio quadrático normalizado (RMSE), coeficiente de massa residual (CRM), coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d) e índice de desempenho (c) obtidos para a CAD, CC e PMP preditos e observados.

Variável resposta	Índices estatísticos						Classificação
	EM	RMSE	CRM	r	d	c	
CAD	0,10	1,19	-0,01	0,89	0,94	0,84	Ótimo
CC	0,00	0,01	0,00	0,96	0,98	0,94	Ótimo
PMP	0,00	0,01	0,00	0,95	0,99	0,94	Ótimo

O valor obtido do EM corresponde a uma lâmina superestimada em 0,10 mm na camada estudada (Tabela 10). Esse valor é considerado muito baixo ao se comparar com o valor médio da CAD predita que foi de 10,57 mm. Da mesma forma, o valor de CRM calculado foi de - 0,01, considerado desprezível, considerando que seu valor ótimo é 0. O RMSE apresentou valor de 1,19, indicando uma baixa dispersão (em

torno de 10%) entre os dados observados e preditos para a CAD.

O coeficiente de correlação (r) resultante do ajuste entre valores observados e preditos foi de 0,89, o qual indica a força e a direção do relacionamento linear entre duas variáveis (MILONE; ANGELINI, 1995). Sabe-se que valor de $r = 1$ indica uma relação linear perfeita e o valor - 1 também indica uma relação linear

perfeita, mas inversa. O valor do índice de concordância de Willmott (d) foi 0,94, e o índice de desempenho (c) foi 0,84, ambos classificam a qualidade do ajuste como ótima, conforme Camargo; Sentelhas (1997).

Para a CC e PMP, os valores de r foram 0,96 e 0,95, respectivamente (Tabela 9). O d é uma medida padronizada do grau de erro de predição do modelo e foram encontrados 0,98 e 0,99 para CC e PMP, respectivamente. O valor $d = 1$ indica uma perfeita concordância entre os valores medidos e preditos. Os valores estimados ficaram próximos aos valores reais, mostrando menor dispersão dos pontos em torno da reta 1:1 (Figuras 3 e 4). Os valores referentes ao EM e CRM foram iguais à 0 e o da RMSE 0,01, também para CC e PMP. Medeiros (2012), avaliando FPTs na profundidade de 0-10 cm da região sudeste do estado do Pará, obteve RMSE = 0,04 para a capacidade de campo e 0,06 para o ponto de murcha permanente, superiores ao encontrado.

Segundo Michelin et al. (2010), valores de erros nessa faixa de grandeza podem ser desconsiderados, quando a FPT for aplicada para o manejo da irrigação. Desse modo, a performance das FPTs geradas neste estudo ratifica seu uso na estimativa, com precisão, da umidade do solo equivalente à CC, PMP e CAD.

6 CONCLUSÕES

O modelo proposto para estimativa da CAD pode ser aplicado com ótima precisão ($r = 0,89$) a partir do conteúdo de argila, microporosidade e densidade do solo para a classe dos Argissolos Amarelos da região dos tabuleiros costeiros do estado de Pernambuco.

Para estimativa da capacidade de campo, no solo estudado, este trabalho definiu um modelo composto pelo conteúdo de argila, mesoporosidade e densidade do solo, o qual apresentou erros considerados baixíssimos (<1%).

O atributo ponto de murcha permanente para o Argissolo Amarelo pode ser predito com elevada exatidão ($d = 0,99\%$) com base no modelo apresentado em função do conteúdo de areia, da mesoporosidade e densidade do solo.

7 AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) pela concessão de bolsa à primeira autora.

8 REFERÊNCIAS

ABBASPOUR, K. C.; MOON, D. E. Relationships between conventional field information and some soil properties measured in the laboratory. **Geoderma**, Amsterdam, v. 55, n. 1-2, p. 119-140, 1992.

ALMEIDA, B. G. **Métodos alternativos de determinação de parâmetros físicos do solo e uso de condicionadores químicos no estudo da qualidade do solo**. 2008. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

ALMEIDA, B. G.; FREITAS, P. L.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. H. M.; DONAGEMMA, G. K. Porosidade. *In*: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.;

TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. ampl. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica. 2017a. p. 82-94.

ALMEIDA, B. G.; VIANA, J. H. M.; TEIXEIRA, W. G.; DONAGEMMA, G. K. Densidade do solo. *In*: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. ampl. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2017b. p. 65-75.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Berlin, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>

ASSAD, M. L. L.; SANS, L. M. A.; ASSAD, E. D.; ZULLO, J. Relação entre água retida e conteúdo de areia total em solos brasileiros. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Piracicaba, v. 9, n. 3, p. 588-596, 2001. Disponível em: <http://www.cnpt.embrapa.br/pesquisa/agromet/pdf/revista/cap25.pdf>. Acesso em: 04 abr 2018.

AULER, A. C.; PIRES, L. F.; PINEDA, M. C. Influence of physical attributes and pedotransfer function for predicting water retention in management systems. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 21, n.11, p. 746-751, 2017.

BARBOZA, F. S. **Funções de pedotransferência para solos do sul do Uruguai**. 2011. Dissertação (Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2011.

BARROS, A. H. C.; JONG VAN LIER, Q. Pedotransfer for Brazilian soils. *In*: TEIXEIRA, W. G.; CEDDIA, M.B.; OTTONI, M.V.; DONNAGEMMA, G. K. **Application of soil physics in environmental Analysis: measuring, modelling and data integration**. Basiléia: Springer International Publishing. 2014. p. 131-162.

BOTULA, Y. D.; VAN RANST, E.; CORNELIS, W. M. Pedotransfer functions to predict water retention for soils of the humid tropics: A review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 3, p. 679-698, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000300001>. Acesso em: 15 jan 2018.

BRUAND, A.; PEREZ-FERNANDEZ, P.; DUVAL, O. Use of class pedotransfer functions based on texture and bulk density of clods to generate water retention curves. **Soil Use and Management**, Wiley, New York, v. 19, n. 3, p. 232-242, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2003.tb00309.x>. Acesso em: 07 mar 2018.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Sete Lagoas, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

DASHTAKI, S. G.; HOMAEE, M.; KHODABERDILOO, H. Derivation and validation of pedotransfer functions for estimating soil water retention curve using a variety of soil data.

Soil Use and Management, Wiley, v. 26, n. 1, p. 68-74, 2010. Acesso em: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1475-2743.2009.00254.x>. Acesso em: 09 mar 2018.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa Solos, 2013.

FABIAN, A. J.; OTTONI FILHO, T. B. Determinação de capacidade de campo in situ ou através de equações de regressão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 35, n. 5, p. 1029-1036, 2000.

FERREIRA, A. **Disciplina de Modelos Lineares 2012-2**. Rio de Janeiro: Universidade do Estado do Rio de Janeiro/Departamento de Modelagem Computacional, 2012.

FONSÊCA, M. H. P.; GUERRA, H. O. C.; LACERDA, R. D.; BARRETO, A. N. Uso de propriedades físico-hídricas do solo na identificação de camadas adensadas nos Tabuleiros Costeiros, Sergipe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 4, 368-373, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662007000400004>. Acesso em: 08 jan 2018.

GODINHO, T. O.; GRUGIKI, M.; VIEIRA, M. V. M.; SANTOS, C. L.; PASSOS, R. R.; RANGEL, O. J. P. Análise granulométrica de um argissolo vermelho sob três diferentes coberturas vegetais. *In*: ENCONTRO LATINO AMERICANO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 13.; ENCONTRO LATINO AMERICANO DE PÓS-GRADUAÇÃO, 9., 2009, São José dos Campos. **Anais [...]**. São José dos Campos: Universidade do Vale do Paraíba, 2009. p. 1-5.

HILLEL, D. **Environmental soil physics**. New York: Academic Press, 1998.

KLEIN, C.; KLEIN, V. A. Estratégias para potencializar a retenção e a disponibilidade de água no solo. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, Santa Maria, v. 19, n. 1, p. 21-29, 2015.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Faixa de umidade menos limitante ao crescimento vegetal e sua relação com a densidade do solo ao longo do perfil de um latossolo roxo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 30, n. 6, p. 959-964, 2000.

MAJOU, H. A.; BRUAND, A.; DUVAL, O.; LE BAS, C.; VAUTIER, A. Prediction of soil water retention properties after stratification by combining texture, bulk density and the type of horizon. **Soil Use and Management**, Wiley, v. 24, n. 4, p. 383-391, 2008.

MEDEIROS, J. C. **Funções de pedotransferência em estudos do funcionamento hídrico do solo da região sudeste do estado do Pará**. 2012. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

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**, Santa Maria, v. 40, n. 4, p. 848-853, 2010.

MILONE, G.; ANGELINI, F. **Estatística Aplicada: Números-índices, Regressão e Correlação, Séries Temporais**. São Paulo: Atlas, 1995.

NASCIMENTO, G. B.; ANJOS, L. H. C.; PEREIRA, M. G.; FONTANA, A.; SANTOS, H. G. Funções de pedotransferência do conteúdo de água em Latossolos Amarelos e Argissolos Amarelos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 5, n. 4, p. 560-569, 2010.

NEMES, A.; TIMLIN, D. J.; PACHEPSKY, Y. A.; RAWLS, W. J. Evaluation of the pedotransfer functions for their applicability at the U.S. National Scale. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 73, n. 5, p. 1638-1645, 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2008.0298>.

OLIVEIRA, L. B. Determinação da macro e microporosidade pela mesa de tensão em amostras de solo com estrutura indeformada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 3, n. 1, p. 197-200, 1968.

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**, Viçosa, v. 26, n. 2, p. 315-323, 2002.

PEQUENO, P. L. L. **Funções de pedotransferência para estimativa da retenção de água em solos da mesorregião do Agreste Paraibano**. 2016. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2016.

PEQUENO, P. L. L.; FAGUNDES, F. P.; SANTOS, R. C.; SANTINI, C. L. A.; RAMBO, M. A.; SCHLINDWEIN, J. A. Uso de funções de pedotransferência para estimativa da retenção de água em um Latosso no estado de Rondônia. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v.14, n. 2, p. 229-239, 2018.

PERAZA, J. E. S. **Retenção de água e pedofunções para solos do Rio Grande do Sul**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

PREVEDELLO, C. L. **Física do solo com problemas resolvidos**. Curitiba: Sociedade Autônoma de Estudos Avançados em Física do Solo, 1996.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri: Manole, 2004.

RIBEIRO JÚNIOR, J. I. **Análises estatísticas no SAEG**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2001.

RICHARDS, L. A. Physical condition of water in soil. *In*: BLACK, C. A. **Methods of Soil Analysis: Part 1. - Physical and Mineralogical Properties, Including Statistics of Measurement and Sampling**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. p. 128-152.

SAXTON, K. E.; RAWLS, W. J.; ROMBERGER, J. S.; PAPENDICK, R. I. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 50, n. 4, p. 1031-1036, 1986.

SILVA, L. F. S.; SOUZA, A. L.; WEILL, M. A. M.; MATSURA, E. E. Desempenho de funções de pedotransferência no ajuste de curvas de retenção de água e estimativa da distribuição de poros no solo. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, Tupã, v. 3, n. 1, p. 67-76, 2009.

SILVA, E.; CURI, N.; FERREIRA, M. M.; VOLPATO, M. M. L.; SANTOS, W. J. R.; SILVA, S. H. G. Pedotransfer functions for water retention in the main soils from the Brazilian coastal plains. **Ciência Agrotécnica**, Lavras, v. 39, n. 4, p. 331-338, 2015.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to soil taxonomy**. 12. ed. Washington: Government Printing Office, 2014.

SOUZA, J. M.; BONOMO, R.; PIRES, F. R.; BONOMO, D. Z. Funções de pedotransferência para retenção de água e condutividade hidráulica em solo submetido a subsolagem. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 9, n. 4, p. 606-613, 2014.

URACH, F. **Estimativa da retenção de água para fins de irrigação**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

VIANA, J. H. M.; TEIXEIRA, W. G.; DONAGEMMA, G. K. Densidade de partículas. *In*: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. ampl. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2017. p. 76-81.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of physical properties in the field. *In*: HILLEL, D. **Applications of soil physics**. New York: Academic Press, 1980. p. 319-344.

WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, Stockholm, v. 2, n. 2, p. 184-194, 1981.