

FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PARA PREDIÇÃO DE ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DE SOLOS DO PIAUÍ, BRASIL*

HERBERT MORAES MOREIRA RAMOS¹; GUSTAVO SOUZA VALLADARES²; FRANCISCO EDINALDO PINTO MOUSINHO³; ADERSON SOARES ANDRADE JUNIOR⁴ E RICARDO SILVA DE SOUSA⁵

¹Doutorando pelo Programa de Pós-graduação em Agronomia (PPGA) da Universidade Federal do Piauí, Campus Universitário Ministro Petrônio Portela, Bairro Ininga CEP: 64049-550 – Teresina, Piauí, Brasil, e-mail: moreiraramoss@hotmail.com

²Departamento de Geografia, Universidade Federal do Piauí (UFPI), Campus Universitário Ministro Petrônio Portela, Bairro Ininga CEP: 64049-550 – Teresina, Piauí, Brasil, e-mail: valladares@ufpi.edu.br

³Colégio Técnico de Teresina, Universidade Federal do Piauí, Campus Universitário Ministro Petrônio Portela, Bairro Ininga CEP: 64049-550 – Teresina, Piauí, Brasil, e-mail: fepmoussi@ufpi.edu.br

⁴Embrapa Meio-Norte, Av. Duque de Caxias, n.º 5.650, Bairro Buenos Aires, CEP: 64008-780 – Teresina, Piauí, Brasil, e-mail: aderson.andrade@embrapa.br

⁵Departamento de Engenharia Agrícola e Solos, Universidade Federal do Piauí (UFPI), Campus Universitário Ministro Petrônio Portela, Bairro Ininga CEP: 64049-550 – Teresina, Piauí, Brasil, e-mail: ricardoss@ufpi.edu.br

* Trabalho proveniente de parte da tese de doutorado do primeiro autor, apresentada ao Programa de Pós-graduação em Agronomia (PPGA), da Universidade Federal do Piauí, UFPI, Teresina, Piauí, Brasil

1 RESUMO

A determinação de atributos físico-hídricos do solo é trabalhosa e demorada, o que inviabiliza a análise de numerosos conjuntos de amostras. Este estudo foi conduzido com o objetivo de desenvolver uma função de pedotransferência (FPT) para a predição da capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e água disponível (AD) em solos do estado do Piauí. Amostras de solo foram coletadas em quarenta e dois perfis nas profundidades: 0 a 0,20 m; 0,20 a 0,40 m; e 0,40 a 0,60 m. Foram determinados os seguintes atributos: análise granulométrica, teores de carbono orgânico total, fósforo disponível, cátions trocáveis (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+), alumínio, acidez potencial, nitrogênio, soma de bases, capacidade de troca de cátions (CTC) efetiva, CTC a pH 7,0, CTC da argila, saturação por bases, CC, PMP e AD. As classes de solos selecionadas foram: Latossolo, Argissolo, Neossolo Quartzarênico e Plintossolo. Para obter as FPTs, utilizou-se análise de regressão linear múltipla. Foram gerados dois modelos de FPT um incluindo todos os dados dos atributos determinados e outro incluindo apenas a análise granulométrica e o carbono orgânico total. A CC, o PMP e a AD podem ser estimados com razoável precisão a partir das funções físico-hídricas de pedotransferência.

Palavras-chave: pedometria, regressão linear múltipla, água no solo.

RAMOS, H. M. M.; VALLADARES, G. S.; MOUSINHO, F. E. P.; ANDRADE JUNIOR, A. S. E SOUSA, R. S. DE
PEDOTRANSFERFUNCTIONS FOR PREDICTING PHYSICO-HYDRIC
ATTRIBUTES OF SOILS IN PIAUÍ, BRAZIL

2 ABSTRACT

Determining hydro-physical soil attributes is laborious and time-consuming, making the analysis of numerous samples sets unfeasible. This study aimed to develop a pedotransfer function (PTF) for predicting field capacity (FC), permanent wilting point (PWP), and available water (AW) in soils in the state of Piauí, Brazil. Soil samples were collected from forty-two profiles at depths of 0 to 0.20 m, 0.20 to 0.40 m, and 0.40 to 0.60 m. The following attributes were determined: particle size, total organic carbon content, available phosphorus, exchangeable cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+), aluminum, potential acidity, nitrogen, base sum, effective cation exchange capacity (CEC_E), cation exchange capacity at pH 7.0 (CEC_7), clay cation exchange capacity (CEC_{clay}), base saturation, FC, PWP, and AW. The selected soil classes were Oxisols, Ultisols, Quartzarenic Neosols, and Plinthosols. Multiple linear regression analysis was used to obtain the PTFs. Two PTF models were generated, one including all the attribute data determined and another including only particle size analysis and total organic carbon. The FC, PWP, and AW can be estimated with reasonable accuracy using hydro-physical pedotransfer functions.

Keywords: pedometry, multiple linear regression, soil water.

3 INTRODUÇÃO

O estudo dos atributos físico-hídricos do solo é importante e necessário, uma vez que possibilita o conhecimento das relações solo-água-planta-atmosfera. No planejamento do uso racional do solo e da água, a capacidade de campo, o ponto de murcha permanente e a água disponível são atributos físico-hídricos de grande relevância.

A água disponível refere-se à capacidade do solo em disponibilizar água às plantas. Sua determinação se dá pela diferença entre a capacidade de campo, que representa a umidade retida nos potenciais matriciais (Ψ_m) -6, -10 ou -33 kPa, e o ponto de murcha permanente, que representa a umidade retida no potencial matricial de -1.500 kPa. O ponto de murcha permanente é o teor de umidade no qual a planta não consegue mais retirar água do solo, ao passo que a capacidade de campo é a capacidade máxima do solo em reter água, acima da qual ocorrem perdas por percolação de água no perfil do solo ou por escoamento superficial (BERNARDO *et al.*, 2019).

A determinação desses atributos físico-hídricos em solos é trabalhosa e demorada, o que inviabiliza análises de numerosos conjuntos de amostras. Nesse sentido, métodos de estimativa da disponibilidade de água baseados em parâmetros de fácil determinação e/ou disponíveis em levantamentos de solos, têm despertado, recentemente, interesse da comunidade científica: (BARROS; FEARNESIDE, 2015).

Segundo Haddad *et al.* (2018), as funções de pedotransferência (FPTs) permitem que informações básicas do solo sejam transformadas em outras de obtenção mais difícil e, geralmente, de custo elevado. De forma geral, as FPTs estimam atributos do solo de difícil determinação por meio de outros determinados rotineiramente.

A abordagem por FPTs, segundo Padarian *et al.* (2018) auxilia em diversos modelos de simulação aplicados ao transporte de água, ar, energia térmica e solutos, à estabilidade da estrutura, compactação e resistência à penetração do sistema radicular, à química e ao manejo solo, e, por fim, à agricultura de precisão.

Em pesquisas recentes, as FPTs foram utilizadas principalmente para estimar a disponibilidade de água e a densidade do solo por meio de modelos de regressão que correlacionam variáveis físicas e químicas do solo, especialmente, textura, densidade do solo e matéria orgânica (BORTOLINI *et al.*, 2018; BARROS; FEARNSTIDE, 2015; BEUTLER *et al.*, 2017; CAVIGLIONE, 2018; PÁDUA; GUERRA; ZINN, 2015; REICHERT *et al.*, 2020; SILVA *et al.*, 2015; SOUZA *et al.*, 2016; TAVANTI *et al.*, 2019).

Todavia, conforme relatado por Padarian *et al.* (2018), as FPTs publicadas mostram grandes diferenças de desempenho quando aplicadas em outros ambientes que não aqueles em que foram ajustadas. Assim, o mais seguro é utilizar uma função de pedotransferência desenvolvida para dados da área de aplicação ou para uma área com solos de gênese semelhante.

No estado do Piauí existe uma grande carência de informações a respeito da disponibilidade de água em solos, atributo de fundamental importância para a agricultura irrigada e determinação do zoneamento agrícola. Nesse sentido, conduziu-se esse trabalho com o objetivo de desenvolver, por meio de funções de pedotransferência, a predição da capacidade de campo, ponto de murcha permanente e a água disponível em solos do estado do Piauí.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Foram coletadas amostras de solo em 42 perfis no estado do Piauí em áreas de mata nativa. As áreas foram selecionadas em função da precipitação anual entre 1.000 e 1.600 mm segundo o mapa de isoietas de precipitações médias anuais do Brasil. A classificação climática da área de estudo, segundo Köppen, é do tipo Aw (tropical subúmido quente) (Almeida *et al.*, 2019). Para caracterização do solo, foram abertas minitrincheiras, de onde foram coletadas

amostras com estrutura deformada e indeformada nas profundidades 0 a 0,2; 0,2 a 0,4 e 0,4 a 0,6 m.

As classes de solos selecionadas para esse trabalho foram: Latossolo Amarelo (LA), Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA), Argissolo Amarelo (PA), Argissolo Acinzentado (PAC), Plintossolo Argilúvico (FT), Plintossolo Háplico (FX), Cambissolo Háplico (CX), Chernossolo Argilúvico (MT), Chernossolo Háplico (MX), Planossolos Háplico (SX), Planossolo Nátrico (SN) e Neossolo Quartzarênico (RQ). Essas classes representam os solos mais utilizados na agricultura de sequeiro no estado do Piauí (JACOMINE, 1986).

Os atributos determinados foram: análise granulométrica (teor de argila, silte, areia fina, areia grossa e totais de areias), densidade do solo (D_s), teor de carbono orgânico total (COT), potencial hidrogeniônico (pH), fósforo (P), cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), sódio (Na^+), potássio (K^+), alumínio (Al^{3+}), acidez potencial ($H^+ + Al^{3+}$), nitrogênio total (N), soma de bases (SB), capacidade de troca de cátions efetiva (CTC efetiva), capacidade de troca de cátions a pH 7,0 (CTC a pH 7,0), capacidade de troca de cátions da fração argila (CTC da argila), saturação por bases (V%), a capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e água disponível (AD), resultante da diferença da umidade volumétrica do solo entre a CC e o PMP.

As análises dos parâmetros físicos-hídricos e químicos foram realizadas de acordo com o manual de métodos de análise de solo (TEIXEIRA *et al.*, 2017). A classificação dos solos ocorreu mediante consulta ao mapa pedológico do estado do Piauí (JACOMINE, 1986). Após a consulta, checagens de campo foram realizadas e a classificação final foi definida conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS *et al.*, 2018) por meio dos

resultados obtidos para a granulometria e as análises química e física das amostras.

O método da mesa de tensão em potenciais matriciais específicos foi utilizado na determinação da CC e do PMP. O potencial matricial-6 kPa foi adotado para a CC e o potencial matricial de -1.500 kPa na câmara de pressão de Richards foi adotado para o cálculo do PMP (TEIXEIRA *et al.*, 2017).

Os dados foram submetidos à análise estatística descritiva, com observação da média, valores mínimo e máximo, desvio padrão e coeficiente de variação (SILVA; ARMINDO, 2016). Para aferir a relação entre as variáveis, foram realizadas análises de correlação de Pearson.

As funções de pedotransferência foram elaboradas conforme as seguintes etapas:

1^a) Desenvolvimento de funções de pedotransferência de caráter generalizado (Geral) considerando os dados de todas as classes de solo determinadas.

2^a) Desenvolvimento de funções de pedotransferência específicas para as classes de solos Latossolo, Argissolo, Neossolo Quartzarênico e Plintossolo. Para as demais classes (Chernossolo, Planossolo e Cambissolo), o número de dados foi muito reduzido para a elaboração das funções de pedotransferência.

Para obtenção das funções de pedotransferência, utilizou-se análise de regressão linear múltipla. Na seleção das variáveis preditoras, o procedimento “*forward stepwise*” foi utilizado, relacionando-se CC, PMP e AD aos atributos físicos e químicos do solo. Essa

opção faz a seleção das principais variáveis dentre um conjunto de variáveis independentes a um nível de significância pré-fixado (P-valor > 0,10), gerando um coeficiente para cada uma das variáveis independentes selecionadas.

Dois modelos de funções de pedotransferência para predição dos atributos físico-hídricos (CC, PMP e AD) foram desenvolvidos. No modelo I, todos os dados dos atributos do solo determinados (análise granulométrica, carbono orgânico total, pH, teores de fósforo, cálcio, magnésio, sódio, potássio, alumínio, acidez potencial e capacidade de troca de cátions a pH=7,0) foram utilizados como variáveis independentes na seleção das variáveis preditoras, enquanto no modelo II, apenas os dados teor de argila, silte, areia fina, areia grossa, total de areia e teor de carbono orgânico total foram empregados como variáveis independentes na seleção das variáveis preditoras.

A avaliação do desempenho dos modelos de regressão foi realizada por meio da comparação dos valores estimados com os valores medidos, calculando-se o coeficiente de determinação (R²), o erro médio (EM) e a raiz do quadrado do erro médio (RMSE), obtidos conforme as Equações 1, 2 e 3, respectivamente (SILVA; ARMINDO, 2016). O Índice de Confiança (IC) também foi considerado, seu cálculo foi realizado conforme a Equação 6, que é resultante da multiplicação do Índice de Willmott, Equação 4, pelo Coeficiente de correlação de Pearson, Equação 5. Os valores de IC foram classificados segundo Camargo e Sentelhas (1997) (Tabela 1).

Tabela 1. Classificação do índice de Confiança (IC)

Valores de "IC"	Desempenho
> 0,90	Ótimo
0,81 a 0,90	Muito Bom
0,71 a 0,80	Bom
0,51 a 0,70	Mediano
0,41 a 0,50	Sofrível
0,31 a 0,40	Mau
< 0,30	Péssimo

Fonte: Camargo e Sentelhas (1997)

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E}_i) (M_i - \bar{M}_i)}{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E}_i)^2 \sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M}_i)^2} \quad (1)$$

$$EM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_i - E_i) \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_i - E_i)^2} \quad (3)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{M}_i)^2}{[\sum_{i=1}^n (|E_i - \bar{E}_i|) + \sum_{i=1}^n (|M_i - \bar{M}_i|)]^2} \quad (4)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E}_i) (M_i - \bar{M}_i)}{[\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E}_i)^2 \sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M}_i)^2]^{0,5}} \quad (5)$$

$$IC = r.d \quad (6)$$

Em que:

E_i = valor estimado; M_i = valor medido; \bar{E}_i e \bar{M}_i = são as médias dos valores estimados e medidos média dos valores estimados e medidos, respectivamente; n = número total de dados e IC = Índice de Confiança que integra de forma conjunta a precisão (r) e a exatidão (d).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A estatística descritiva das variáveis utilizadas na geração das FPTs é apresentada na Tabela 2, na qual verifica-se a média, valor mínimo, valor máximo, desvio padrão e coeficiente de variação dos resultados obtidos para os atributos do solo considerando todas as classes de solo.

Tabela 2. Estatística descritiva das variáveis utilizadas para o desenvolvimento das funções de pedotransferência considerando todas as classes de solo.

Variável	Média	Mín.	Max.	DP	CV
COT (dag kg ⁻¹)	1,1	0,0	4,0	4,0	62
pH	5,3	4,0	8,4	0,9	17
Fósforo (mg kg ⁻¹)	9,3	5,9	41,4	5,2	57
Cálcio (cmol _c dm ⁻³)	1,7	0,0	17,1	3,9	233
Magnésio (cmol _c dm ⁻³)	1,5	0,0	18,3	3,2	208
Sódio (cmol _c dm ⁻³)	0,3	0,0	2,7	0,5	155
Potássio (cmol _c dm ⁻³)	0,2	0,0	0,7	0,2	84
Alumínio (cmol _c dm ⁻³)	0,6	0,0	2,0	0,5	77
Acidez potencial (cmol _c dm ⁻³)	3,3	0,0	11,7	2,2	68
Nitrogênio total (dag kg ⁻¹)	0,3	0,1	1,4	0,2	72
Soma de bases (cmol _c dm ⁻³)	3,7	0,1	35,3	7,1	192
CTC efetiva (cmol _c dm ⁻³)	4,3	0,5	35,4	6,9	162
CTC a pH 7,0 (cmol _c dm ⁻³)	7,0	1,2	35,3	7,1	102
CTC da argila (cmol _c dm ⁻³)	36,3	6,9	141,9	28,1	77
Saturação por bases (%)	35,9	1,9	100,0	27,8	77
Argila (g kg ⁻¹)	224	44	610	145	65
Silte (g kg ⁻¹)	137	8,0	433	90	65
Areia grossa (g kg ⁻¹)	240	44	715	165	69
Areia fina (g kg ⁻¹)	399	100	761	153	38
Total de areia (g kg ⁻¹)	639	200	927	184	29
Ds (Mg m ⁻³)	1,4	1,1	1,9	0,2	13
CC (cm ³ cm ⁻³)	0,34	0,18	0,58	0,08	25
PMP (cm ³ cm ⁻³)	0,15	0,06	0,42	0,07	50
AD (cm ³ cm ⁻³)	0,19	0,05	0,29	0,05	25

Fonte: Autoria própria (2022). Mín = mínimo; Max. = máximo; DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação (%); CC = capacidade de campo, PMP = ponto de murcha permanente, AD = água disponível, COT = teor de carbono orgânico total; pH = potencial hidrogeniônico; CTC= capacidade de troca de cátions

A CC variou entre 0,18 e 0,58 cm³ cm⁻³, apresentando média de 0,34 cm³ cm⁻³, coeficiente de variação de 25% e desvio padrão de 0,08. Já o PMP variou entre 0,06 e 0,42 cm³ cm⁻³, com média igual a 0,15 cm³ cm⁻³, coeficiente de variação de 50%, e desvio padrão de 0,07. Enquanto a AD variou entre 0,05 e 0,29 cm³ cm⁻³, com média de 0,19 cm³ cm⁻³, coeficiente de variação de 25%, e desvio padrão igual a 0,05 (Tabela 2).

A variação observada para a CC e o PMP ocorreu provavelmente em virtude da heterogeneidade das características estruturais e granulométricas das amostras coletadas. Em elevados potenciais matriciais, as forças capilares são mais atuantes e, nesses potenciais, a retenção de

água é influenciada pela estrutura do solo (MICHELON *et al.*, 2010). Por outro lado, para baixos potenciais matriciais no solo, a retenção depende dos fenômenos de adsorção, os quais são mais influenciados pela textura e pela superfície específica das partículas.

Os coeficientes de variação para a maioria das variáveis são altos (>30%), com exceção do pH, CC, AD, total de areia e Ds. Segundo Pádua, Guerra e Zinn (2015), tal comportamento está de acordo com a complexidade, diversidade e interatividade dos fatores, processos que controlam os atributos físico-hídricos dos solos e a causa da dificuldade e inacurácia comumente reportadas para sua modelagem.

Na Tabela 3 estão apresentados os dados da correlação de Pearson entre as variáveis (atributos do solo) e a CC, PMP e AD. As maiores correlações para a CC são observadas com o total de areia ($r = -0,73$), teor de argila ($r = 0,70$), teor de areia grossa ($r = -0,61$), a CTC a pH 7,0 ($r = -0,63$), CTC efetiva ($r = -0,53$) e a soma de bases ($r = -0,51$). Para o PMP, o total de areia ($r = -0,71$)

e teor de argila ($r = 0,66$) apresentaram as maiores correlações. Já a AD não apresentou correlação forte com nenhuma das variáveis analisadas, verificando-se correlação moderada ou fraca com a Ds ($r = -0,41$), o teor de areia grossa ($r = -0,34$), o teor de alumínio ($r = 0,28$), a CTC da argila ($r = -0,28$), o teor de sódio ($r = -0,28$) e o teor de magnésio ($r = -0,28$).

Tabela 3. Matriz de correlação entre os atributos do solo e a capacidade de campo, ponto de murcha permanente e a água disponível

Atributos	Coeficiente de correlação		
	CC	PMP	AD
Ds (Mg m^{-3})	-0,52*	-0,33*	-0,41*
Areia grossa (g kg^{-1})	-0,61*	-0,48*	-0,34*
Areia fina (g kg^{-1})	-0,22*	-0,33*	0,13 ^{ns}
Total de areia (g kg^{-1})	-0,73*	-0,71*	-0,20*
Argila (g kg^{-1})	0,70*	0,66*	0,28*
Silte (g kg^{-1})	0,35*	0,39*	0,02 ^{ns}
pH	0,03 ^{ns}	0,22*	-0,28*
Fósforo (mg kg^{-1})	0,26*	0,36*	-0,09 ^{ns}
Cálcio (cmolc dm^{-3})	0,45*	0,58*	-0,11 ^{ns}
Magnésio (cmolc dm^{-3})	0,53*	0,66*	-0,06 ^{ns}
Sódio (cmolc dm^{-3})	0,24*	0,46*	-0,28*
Potássio (cmolc dm^{-3})	0,26*	0,47*	-0,28*
Alumínio (cmolc dm^{-3})	0,20*	0,08 ^{ns}	0,28*
Acidez potencial (cmolc dm^{-3})	0,39*	0,32*	0,22*
Nitrogênio total (dag kg^{-1})	0,49*	0,52*	0,05 ^{ns}
Teor de carbono orgânico (dag kg^{-1})	0,41*	0,38*	-0,01 ^{ns}
Soma de bases (cmolc dm^{-3})	0,51*	0,66*	0,11 ^{ns}
CTC efetiva (cmolc dm^{-3})	0,53*	0,68*	-0,10 ^{ns}
CTC a pH 7,0 (cmolc dm^{-3})	0,63*	0,76*	-0,15 ^{ns}
CTC da argila (cmolc dm^{-3})	0,07 ^{ns}	0,27*	-0,28*
Saturação por bases (%)	0,17 ^{ns}	0,33*	-0,21*

Fonte: Autoria própria (2022). *Correlações significativas a 5% de probabilidade e ns = correlações não significativas; Ds = densidade do solo; pH = potencial hidrogeniônico; CC = capacidade de campo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); PMP = ponto de murcha permanente ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); CTC = capacidade de troca de cátions; AD = água disponível ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$).

De maneira geral, observa-se que a granulometria é a característica que melhor descreve a disponibilidade de água no solo. A argila apresenta uma correlação positiva e os totais de areias uma correlação negativa, o que é um resultado esperado devido ao efeito da área superficial específica das partículas.

Resultados semelhantes foram obtidos por Michelin *et al.* (2010) ao elaborar funções de pedotransferência para estimativa da retenção de água em alguns solos do Rio Grande do Sul. O efeito negativo do teor areia fina é explicado pelo fato de que solos com textura mais fina possuem maior microporosidade em contraste com àqueles mais ricos em areia

grossa. Segundo Andrade e Stone (2011), a microporosidade é responsável pela maior parte da água retida nos potenciais matriciais mais altos (até -100 kPa) e apresenta o maior coeficiente de correlação com a água retida.

Quanto às correlações entre os atributos químicos e os atributos físico-hídricos, uma possível explicação para essas correlações é que as concentrações de H^+ e Al^{3+} estão relacionadas à formação de agregados, onde os cátions floculantes aproximam as partículas, permitindo boa agregação e, conseqüentemente, maior porosidade total, o que implica em maior retenção de água. Resultados similares foram observados por Bortolini et al. (2018), que estimando a retenção e disponibilidade de água em solos de Santa Catarina, observaram correlação significativa da disponibilidade de água no solo com as variáveis: alumínio, saturação por alumínio, saturação por bases, atividade de argila, CTC efetiva e CTC a pH 7. Segundo os autores essas variáveis podem ter se correlacionado devido a alta relação da acidez com a presença de material orgânico no solo.

O procedimento de análise exploratória (*forward stepwise*) dos dados mostrou as variáveis preditoras que influenciaram significativamente ($p < 0,010$) a CC, o PMP e a AD, permitindo, com isso, obter-se uma função de pedotransferência

capaz de descrever satisfatoriamente esses atributos físico-hídricos do solo (Tabela 4).

Quanto ao PMP, o teor de argila influenciou em quase todos os modelos, com exceção do modelo II para os Neossolos e para os Plintossolos. Para a AD, a areia fina foi identificada em cinco modelos. Corroboram com esses resultados, as constatações de Bortolini *et al.* (2018), que ao estimar a retenção e disponibilidade de água em solos de Santa Catarina, verificaram que as frações granulométricas como variável preditora incluída na função foi a que melhor estimou a CC e o PMP.

É importante destacar que o carbono orgânico total influencia várias características do solo, principalmente as relacionadas à formação de agregados e à conferência de cargas negativas, aumentando a capacidade de troca de cátions no solo. Em relação à formação de agregados, a decomposição da matéria orgânica atua como agente cimentante, unindo e estabilizando as partículas tanto unitárias quanto secundárias do solo (BATISTA *et al.*, 2013).

As equações dos modelos I e II com os preditores e respectivos regressores para o agrupamento de todas as classes de solos (Geral) está apresentada Tabela 4 e por classe, estão apresentadas nas Tabela 5 e 6.

Tabela 4. Funções de pedotransferência e seus respectivos índices de regressão agrupado todos os dados (Geral) para modelos I (todos os atributos do solo) e II (análise granulométrica e teor de carbono orgânico total).

Modelo	Equações
	Geral
CC I	$0,607 - 0,00027*TA + 0,0096*Mg^{2+} - 0,0002*AG - 0,00037*S$
CC II	$0,645 - 0,00033*TA - 0,0002*AG - 0,0003*S$
PMP I	$0,066 + 0,008*CTC + 0,00024*AR - 0,00008*AG + 0,0662*K^+ - 0,00889*Ca^{2+} - 0,02275*Al^{3+} + 0,00394*CTC$ da AR
PMP II	$0,375 - 0,3452*TA$
AD I	$0,338 - 0,00014*AG - 0,0478*Na^+ - 0,112*K^+ + 0,003*Mg^{2+} - 0,197*pH + 0,0006*V$
AD II	$0,249 - 0,000147*AG - 0,000157*S$

Fonte: Autoria própria (2022). CC = capacidade de campo (cm³ cm⁻³); PMP = ponto de murcha permanente (cm³ cm⁻³); AD = água disponível (cm³ cm⁻³); pH = potencial hidrogeniônico; Mg²⁺ = magnésio; Al³⁺ = alumínio; Na⁺ = sódio; AR = argila; Ca²⁺ = cálcio; S = soma de bases, AG = areia grossa; TA = totais de areia; Al³⁺ = Alumínio; V = saturação por bases; CTC = capacidade de troca de cátions e CTC da argila

Tabela 5. Funções de pedotransferência e seus respectivos índices de regressão para as classes de solo Latossolos e Argissolos para modelos I (todos os atributos do solo) e II (análise granulométrica e teor de carbono orgânico total).

Modelo	Equações
	Latossolos
CC I	$0,122 + 0,0004*AR + 0,0138*P + 0,0049*T$
CC II	$0,224 + 0,0004*AR + 0,0303*COT$
PMP I	$0,0303 + 0,00027*AR + 0,0378*COT - 0,0632*S$
PMP II	$0,074 + 0,00033*AR + 0,0382*COT - 0,0001*AG$
AD I	$-0,27 + 0,02*P + 0,058*pH + 0,087*Al^{3+} - 0,02*CTC$ da AR + 0,002*V - 0,024*S
AD II	$0,2368 - 0,00004*TA$
Argissolos	
CC I	$0,3062 + 0,0003*AF + 0,0123*H^+ + Al^{3+} - 0,0674*COT - 0,00012*TA$
CC II	$0,1821 + 0,00034*AF + 0,00022*AR - 0,0347*COT$
PMP I	$-0,0301 + 0,0441*Al^{3+} + 0,0266*pH - 0,0082*Ca^{2+} + 0,0003*AR - 0,0002*Silte$
PMP II	$0,0858 + 0,00021*AR - 0,0002*Silte + 0,0001*AF$
AD I	$0,1963 + 0,0002*AF - 0,1486*K^+ - 0,0539*COT$
AD II	$0,1105 + 0,0002*AF$

Fonte: Autoria própria (2022). CC = capacidade de campo (cm³ cm⁻³); PMP = ponto de murcha permanente (cm³ cm⁻³); AD = água disponível (cm³ cm⁻³); pH = potencial hidrogeniônico; COT = carbono orgânico total, T = capacidade de troca de cátions a pH 7,0; AR = argila; P = fósforo; Ca²⁺ = cálcio; H⁺ + Al³⁺ = acidez potencial; S = soma de bases, AG = areia grossa; TA = totais de areia; Al³⁺ = Alumínio; V = saturação por bases; AF = areia fina e CTC da argila

Tabela 6. Funções de pedotransferência e seus respectivos índices de regressão para as classes de solo Neossolos e Plintossolos para modelos I (todos os atributos do solo) e II (análise granulométrica e teor de carbono orgânico total).

Modelo	Equações
Neossolos	
CC I	$0,254 + 0,0006 * AF + 0,0154 * T + 0,3970 * N - 0,0014 * \text{Silte} + 0,0903 * Na^+ - 0,0505 * pH + 0,1332 * Ca^{2+} - 0,0154 * CTC \text{ da AR} + 0,0511 * COT - 0,0819 * t + 0,0006 * V$
CC II	$0,0507 + 0,0004 * AF + 0,1039 * COT - 0,0007 * \text{Silte}$
PMP I	$0,127 - 0,0783 * Al^{3+} - 0,0151 * T + 0,00004 * AF$
PMP II	$0,1174 - 0,00034 * AR$
AD I	$-1,7516 + 0,0006 * AF - 0,0205 * T + 0,0026 * AR + 0,5965 * N + 0,0016 * TA + 0,2269 * Na^+ + 0,0630 * Mg^{2+}$
AD II	$-0,0303 + 0,0004 * AF + 0,1086 * COT - 0,0006 * \text{Silte}$
Plintossolos	
CC I	$0,5358 - 0,0002 * AG + 0,0140 * Ca^{2+} - 0,0379 * pH - 0,0340 * COT + 0,00005 * AF$
CC II	$0,4098 - 0,0002 * AG - 0,0001 * \text{Silte} - 0,0397 * COT$
PMP I	$0,4082 + 0,2541 * K^+ - 0,0133 * T - 0,0591 * pH + 0,0015 * V - 0,00007 * AG$
PMP II	$0,2682 - 0,0002 * TA$
AD I	$0,1604 - 0,2541 * K^+ - 0,0002 * AG - 0,0193 * T + 0,0001 * TA + 0,0427 * Mg^{2+} + 0,0221 * H + Al^{3+}$
AD II	$0,0888 + 0,0002 * AF$

Fonte: Autoria própria (2022). CC = capacidade de campo ($cm^3 cm^{-3}$); PMP = ponto de murcha permanente ($cm^3 cm^{-3}$); AD = água disponível ($cm^3 cm^{-3}$); Mg^{2+} = magnésio; Al^{3+} = alumínio; Na^+ = sódio; COT= carbono orgânico total, T = capacidade de troca de cátions a pH 7,0; AR= argila; Ca^{2+} = cálcio; $H^+ + Al^{3+}$ = acidez potencial; S = soma de bases, AG = areia grossa; TA= totais de areia; K^+ = potássio; Al^{3+} = alumínio; V= saturação por bases; pH = potencial hidrogeniônico; AF = areia fina; N = nitrogênio total e CTC da argila

Na Tabela 7 está apresentada a avaliação do desempenho do modelo (geral) e na tabela 8 para as classes solo dos Latossolos e Argissolos e na tabela 9 para as classes solo dos Neossolos e Plintossolos de regressão, os indicadores estatísticos e o índice de confiança. A maioria das variáveis

mostrou alta capacidade de predição. Quanto mais os valores do EM e RMSE se aproximarem de zero e quanto mais os valores de IC e R^2 se aproximarem de 1, mais apropriada é a FPT (CAMPELO JUNIOR *et al.*, 2014).

Tabela 7. Avaliação do desempenho do modelo de regressão (Geral), os indicadores estatísticos e o índice de confiança para modelos I (todos os atributos do solo) e II (análise granulométrica e teor de carbono orgânico total)

Modelo	R ²	EM	RMSE	d	r	IC	Desempenho
Geral							
CC I	0,73	-0,00001	0,0449	0,99	0,85	0,85	Muito Bom
CC II	0,62	-0,00002	0,0530	0,99	0,79	0,79	Muito Bom
PMP I	0,77	0,00001	0,0367	0,99	0,88	0,88	Muito Bom
PMP II	0,51	-0,00002	0,0538	0,99	0,71	0,71	Bom
AD I	0,38	0,00002	0,0396	0,99	0,62	0,61	Mediano
AD II	0,14	0,0002	0,0463	0,99	0,42	0,41	Sofrível

Fonte: Autoria própria (2022). R² = coeficiente de determinação; EM = erro médio; RMSE = raiz do quadrado do erro médio; d = índice de Willmott e IC = índice de confiança

Tabela 8. Avaliação do desempenho do modelo de regressão para as classes solo dos Latossolos e Argissolos, os indicadores estatísticos e o índice de confiança para modelos I (todos os atributos do solo) e II (análise granulométrica e teor de carbono orgânico total)

Modelo	R ²	EM	RMSE	d	r	IC	Desempenho
Latossolos							
CC I	0,80	-0,00002	0,0348	0,99	0,89	0,89	Muito Bom
CC II	0,78	-0,00005	0,0367	0,99	0,88	0,87	Muito Bom
PMP I	0,89	-0,00007	0,0221	0,99	0,94	0,94	Ótimo
PMP II	0,88	-0,00010	0,0234	0,99	0,94	0,93	Ótimo
AD I	0,43	0,00010	0,0281	0,99	0,65	0,65	Mediano
AD II	0,10	-0,00310	0,0193	0,98	0,31	0,30	Péssimo
Argissolos							
CC I	0,60	-0,00296	0,0235	0,98	0,77	0,76	Bom
CC II	0,39	-0,00178	0,0288	0,98	0,62	0,61	Bom
PMP I	0,61	0,00056	0,0225	0,98	0,78	0,76	Bom
PMP II	0,23	0,00270	0,0280	0,97	0,48	0,47	Sofrível
AD I	0,20	-0,00041	0,0317	0,98	0,46	0,45	Sofrível
AD II	0,16	-0,00304	0,0330	0,98	0,41	0,40	Sofrível

Fonte: Autoria própria (2022). R² = coeficiente de determinação; EM = erro médio; RMSE = raiz do quadrado do erro médio; d = índice de Willmott e IC = índice de confiança

Tabela 8. Avaliação do desempenho do modelo de regressão para as classes solo dos Neossolos e Plintossolos, os indicadores estatísticos e o índice de confiança para modelos I (todos os atributos do solo) e II (análise granulométrica e teor de carbono orgânico total)

Modelo	R ²	EM	RMSE	d	r	IC	Desempenho
Neossolos							
CC I	0,99	0,00020	0,0009	0,99	1,00	0,99	Ótimo
CC II	0,86	0,00000	0,0188	0,99	0,93	0,91	Ótimo
PMP I	0,51	0,00007	0,0115	0,97	0,71	0,69	Mediano
PMP II	0,33	-0,00060	0,0135	0,95	0,58	0,55	Mediano
AD I	0,98	0,00020	0,0072	0,99	0,99	0,98	Ótimo
AD II	0,80	0,00020	0,0214	0,99	0,90	0,89	Muito Bom
Plintossolos							
CC I	0,91	-0,00012500	0,0172	0,99	0,95	0,94	Ótimo
CC II	0,61	-0,00004167	0,0357	0,99	0,78	0,77	Bom
PMP I	0,90	0,00004167	0,0218	0,99	0,95	0,93	Ótimo
PMP II	0,20	0,00758333	0,0483	0,98	0,45	0,44	Sofrível
AD I	0,87	-0,00008333	0,0178	0,99	0,93	0,92	Ótimo
AD II	0,25	-0,00008333	0,0427	0,97	0,50	0,48	Sofrível

Fonte: Autoria própria (2022). R² = coeficiente de determinação; EM = erro médio; RMSE = raiz do quadrado do erro médio; d = índice de Willmott e IC = índice de confiança

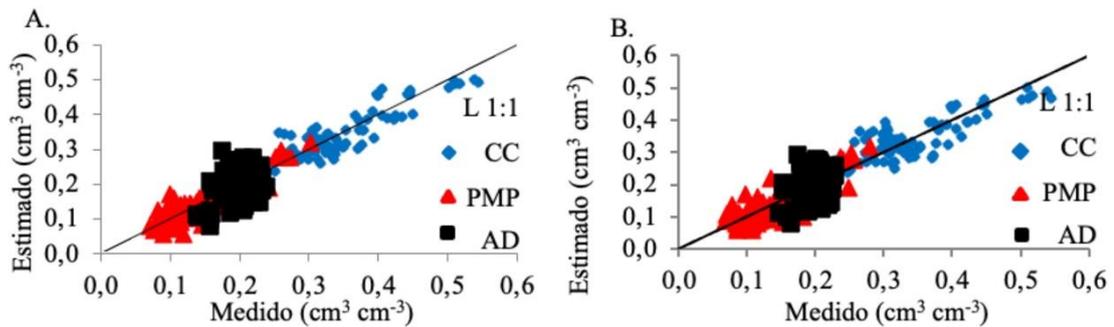
Os índices de confiança apresentaram desempenho ótimo e muito bom para CC e PMP nas classes de solos Latossolo, Argissolo, Neossolo e Plintossolo. Já a AD apresentou desempenho ótimo e muito bom apenas para a classe Neossolo, apresentando índice de confiança que indicam desempenho mediano ou sofrível para as demais classes de solo.

Os erros médios dos modelos gerados indicam que a maioria tende a subestimar, apresentando valores negativos. Resultados semelhantes foram obtidos por Oliveira et al. (2002), que ao elaborarem funções de pedotransferência para estimar o conteúdo de água no estado de Pernambuco, observaram desempenho muito bom para a CC e o PMP e sofrível para a AD, sendo verificado valores negativos para o erro da maioria das variáveis.

As raízes do quadrado do erro médio, para a maioria dos modelos, foram baixas, mostrando um bom ajustamento. As exceções foram os modelos para a água disponível, que apresentaram uma alta dispersão para a maioria dos modelos e baixa dispersão nos modelos gerados para a classe do Neossolo Quartzarênico e o modelo I do Plintossolo.

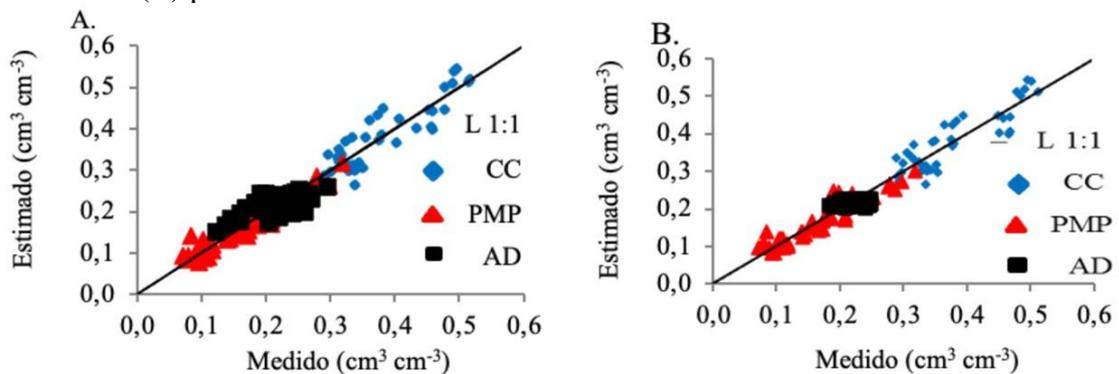
As Figuras 1, 2, 3, 4 e 5 mostram os resultados da avaliação graficamente através da relação entre valores estimados e medidos pelos modelos de FPT gerados para a CC, o PMP e a AD para modelos I (A) todos os atributos do solo e II (B) análise granulométrica e teor de carbono orgânico total, considerando-se todas as classes de solos (Geral) ou apenas uma classe de solo (Latosolo, Argissolo, Neossolo Quartzarênico e Plintossolo).

Figura 1. Relação entre os valores medidos e estimados de CC, PMP e AD pelos modelos I (A) e II (B) para todas as classes de solos (Geral).



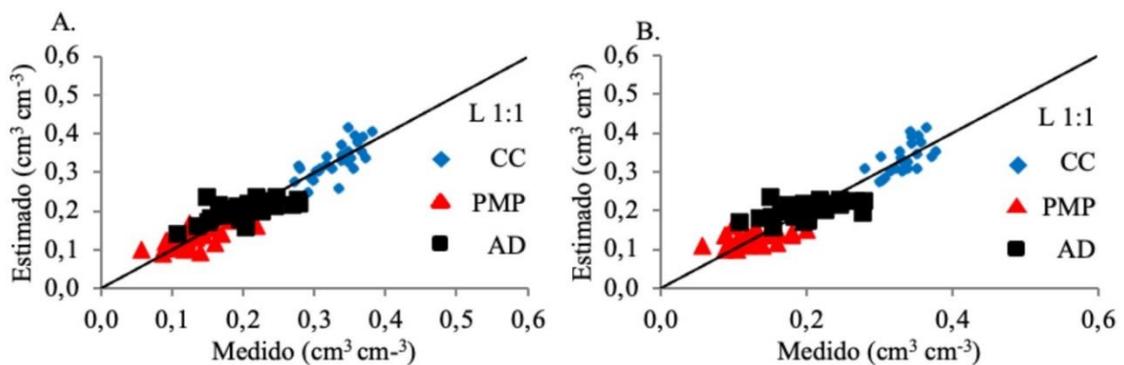
Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 2. Relação entre os valores medidos e estimados de CC, PMP e AD pelos modelos I (A) e II (B) para as classes dos Latossolos.



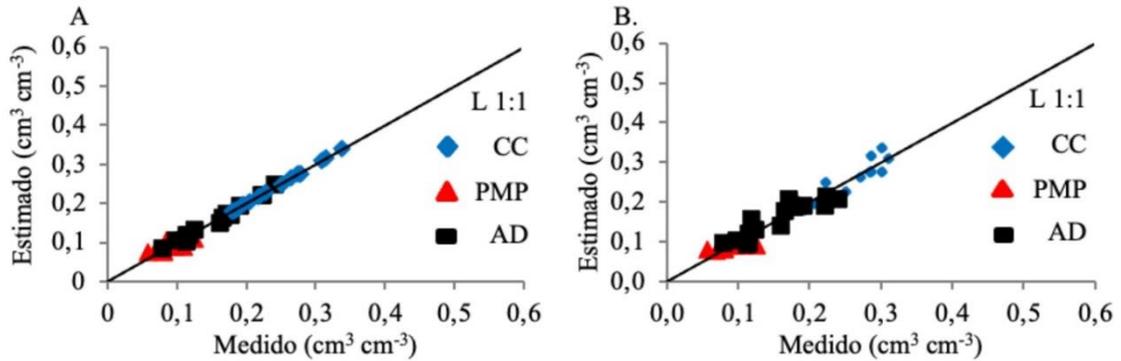
Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 3. Relação entre os valores medidos e estimados de CC, PMP e AD pelos modelos I (A) e II (B) para as classes dos Argissolos.



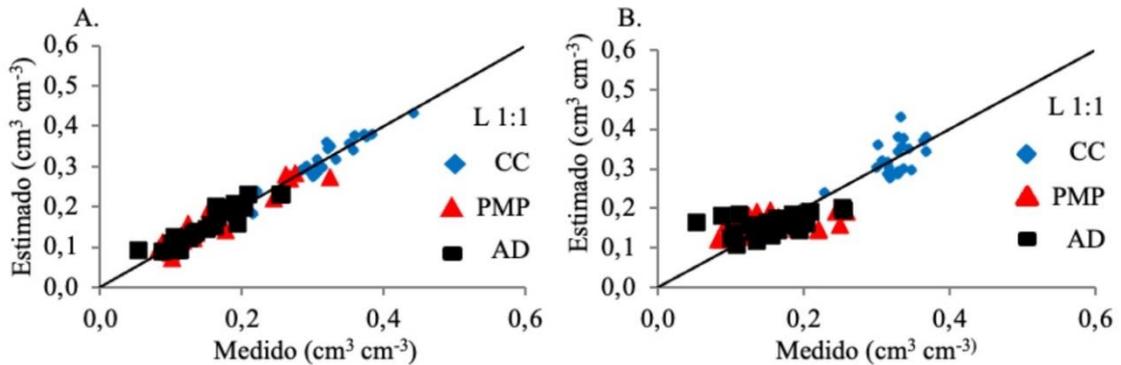
Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 4. Relação entre os valores medidos e estimados de CC, PMP e AD pelos modelos I (A) e II (B) para as classes dos Neossolos Quartzarênico.



Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 5. Relação entre os valores medidos e estimados de CC, PMP e AD pelos modelos I (A) e II (B) para as classes dos Plintossolos.



Fonte: Autoria própria (2022)

Observa-se que para a CC e o PMP, as distribuições dos pontos se deram, basicamente, em torno da linha, mostrando uma boa concordância das predições. Enquanto para a AD, nota-se uma maior dispersão dos pontos em virtude da presença de valores anômalos (pontos distantes da linha principal 1:1).

Resultados similares foram obtidos por Bortolini et al. (2018), que também obtiveram equações para o conteúdo de água no solo bastante precisas para os potenciais matriciais de -6, -10 e -1500 kPa ao estimarem a retenção e disponibilidade de água em solos de Santa Catarina.

6 CONCLUSÕES

A capacidade de campo, o ponto de murcha permanente e a água disponível podem ser estimadas com razoável precisão a partir das funções de pedotransferência elaboradas para todas as classes de solos, utilizando-se como variáveis preditoras o teor de argila, a acidez potencial, o teor de sódio, o teor de magnésio, a areia grossa, o teor de fósforo, a CTC da argila, o teor de areia fina e o carbono orgânico total de solos do estado do Piauí.

O modelo desenvolvido para os Latossolos que incluiu o teor de argila o teor de magnésio, a CTC da argila, a saturação por bases, o total de areia e o teor de sódio como variáveis preditoras, mostrou melhor desempenho na predição dos atributos físico-hídricos.

As funções de pedotransferência elaboradas podem subsidiar o planejamento agrícola e o manejo de irrigação, podendo ser utilizadas em laboratórios de física do solo para a obtenção, com maior rapidez e facilidade, da capacidade de campo, do ponto de murcha permanente e da água disponível em solos do estado do Piauí.

7 REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, K. N. S.; SILVA, J. B. L.; NÓBREGA, J. C. A.; RATKE, R. F.; SOUZA, K. B. Aptidão agrícola dos solos do estado do Piauí. **Nativa**, Sinop, v. 7, n. 3, p. 233-238, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.31413/nativa.v7i3.7119>. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/nativa/article/view/7119>. Acesso em: 14 jan. 2023.
- ANDRADE, R. D. S.; STONE, L. F. Estimativa da umidade na capacidade de campo em solos sob Cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 2, p. 111-116, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000200001>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/3m63gPBHPhGb9HFxG6C7rYz/?lang=pt>. Acesso em: 11 jan. 2023.
- BARROS, H. S.; FEARNSTIDE, P. M. Pedo-transfer functions for estimating soil bulk density in central Amazonia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 2, p. 397-407, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/01000683rbc20140358>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/7Czc4Ty4RP8mzGddcPgTr6x/?lang=en>. Acesso em: 20 mar. 2023.
- BATISTA, I.; CORREIA, M. E. F.; PEREIRA, M. G.; BIELUCZYK, W.; SCHIAVO, J. A.; MELLO, N. A. Caracterização dos agregados em solos sob cultivo no Cerrado, MS. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 34, n. 4, p. 1535-1548, 2013. DOI: <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2013v34n4p1535>. Disponível em: <https://ojs.uel.br/revistas/uel/index.php/semagrarias/article/view/10613>. Acesso em: 20 mar. 2023.
- BERNARDO, S.; MANTOVANI E, C.; SILVA D. D.; SOARES, A. A. **Manual de irrigação**. 9. ed. Viçosa: UFV, 2019. 545 p.
- BEUTLER, S. J.; PEREIRA, M. G.; TASSINARI, W. D. S.; MENEZES, M. D. D; VALLADARES, G. S.; ANJOS, L. H. C. D. Bulk density prediction for Histosols and soil horizons with high organic matter content. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 41, p. 1-13, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20160158>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/r5SD47sjjwnpYWHTmpr7nP/?lang=en>. Acesso em: 11 jan. 2023.
- BORTOLINI, D.; ALBUQUERQUE, J. A. Estimation of the Retention and Availability of Water in Soils of the State of Santa Catarina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 42, p. 1-13, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20170250>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/WXnDnNCvnQYrzcJkdCsjWyp/?lang=en>. Acesso em: 11 jan. 2023.
- CAMARGO, A. D.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997. Disponível em:

<http://www.sbagro.org/files/biblioteca/124.pdf>. Acesso em: 11 jan. 2023.

CAMPELO JUNIOR, J. H.; DE AZEVEDO, E. C.; DE CARVALHO ALVES, M.; DE MELLO, D.; DE ALMEIDA LOBO, F.; AMORIM, R. S. S. Estimativa da retenção de água em Latossolos do Cerrado mato-grossense cultivados com algodão. **Revista Agro@ambiente On-line**, Boa Vista, v. 8, n. 3, p. 318-326, 2014. DOI: <https://doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v8i3.1902>. Disponível em: <https://revista.ufr.br/agroambiente/article/view/1902>. Acesso em: 12 dez. 2022.

CAVIGLIONE, J. H. Pedotransfer functions of soil water properties to estimate the S-index. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 22, n.7, p. 465-470, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n7p465-470>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/fs8jZwMTYmQwYywRP8PqQDs/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 12 dez. 2022.

HADDAD, D. B.; ASSIS, L. S.; TARRATACA, L.; GOMES, A. D. S.; CEDDIA, M. B.; OLIVEIRA, R. F.; BRANDAO, D. N. Brazilian soil bulk density prediction based on a committee of neural regressors. *In: INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE ON NEURAL NETWORKS*, 2018, Rio de Janeiro. **Proceeding** [...]. Rio de Janeiro: IEEE, 2018. p. 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2018.8489177>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8489177>. Acesso em: 12 dez. 2022.

JACOMINE, P. K. T. **Levantamento exploratório-reconhecimento de solos do Estado do Piauí**. Rio de Janeiro: EMBRAPA: SNLCS-SUDENE-DRN,

1986. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/336097>. Acesso em: 12 dez. 2022.

MICHELON, C. J.; CARLESSO, R.; OLIVEIRA, Z. B. D.; 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. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782010005000055>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ct/a/B3bjVtTGFFM4VfYCS7cRQYL/?lang=pt>. Acesso em: 10 dez. 2022.

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. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-6832002000200004>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/KfQ7HJzG4RyKkJTW7RGrbry/?lang=pt>. Acesso em: 10 dez. 2022.

PADARIAN, J.; MORRIS, J.; MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B. Pedotransfer functions and soil inference systems. *In: MCBRATNEY, A.; MINASNY, B.; STOCKMANN, U. (ed.). Pedometrics*. Cham: Springer, 2018. p. 195-220. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-63439-5_7. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/324743230_Pedotransfer_Functions_and_Soil_Inference_Systems. Acesso em: 2 dez. 2022.

PÁDUA, E. J. D.; GUERRA, A. R.; ZINN, Y. L. Modelagem da densidade do solo em profundidade sob vegetação nativa em

- Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 3, p. 725-736, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/01000683rbcs20140028>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/qGdNQ56LPxprHN5CwrX4gHQ/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 10 mar. 2023.
- REICHERT, J. M.; ALBUQUERQUE, J. A.; PERAZA, J. E. S.; COSTA, A. Estimating water retention and availability in cultivated soils of southern Brazil. **Geoderma Regional**, Amsterdam v. 21, p. e00277, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00277>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/qGdNQ56LPxprHN5CwrX4gHQ/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 10 mar. 2023.
- SANTOS, H. D.; JACOMINE, P.; ANJOS, L.; OLIVEIRA, V.; LUMBRERAS, J.; COELHO, M.; OLIVEIRA, J. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa, 2018. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1094003>. Acesso em: 10 mar. 2023.
- SILVA, A. C.; ARMINDO, R. A. Importância das funções de pedotransferência no estudo das propriedades e funções hidráulicas dos solos do Brasil. **Multi-Science Journal**, Urutaí, v. 1, n. 5, p. 31-37, 2016. DOI: <https://doi.org/10.33837/msj.v1i5.200>. Disponível em: <https://periodicos.ifgoiano.edu.br/multiscience/article/view/200>. Acesso em: 10 mar. 2023.
- SILVA, E. D.; CURI, N.; FERREIRA, M. M.; VOLPATO, M. M. L.; SANTOS, W. J. R. D.; SILVA, S. H. G. Pedotransfer functions for water retention in the main soils from the Brazilian coastal plains. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 39, n. 4, p. 331-338, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542015000400003>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cagro/a/YjsNJJ6MLdgHLjLN6bTBg3J/abstract/?lang=en>. Acesso em: 10 mar. 2023.
- SOUZA, E. D.; FERNANDES FILHO, E. I.; SCHAEFER, C. E. G. R.; BATJES, N. H.; SANTOS, G. R. D.; PONTES, L. M. Pedotransfer functions to estimate bulk density from soil properties and environmental covariates: Rio Doce basin. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 73, n. 6, p. 525-534, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-9016-2015-0485>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/sa/a/vgjCtFKcypd6GHNZZttq9zQ/?lang=en>. Acesso em: 10 mar. 2023.
- TAVANTI, R. F.; FREDDI, O. D. S.; TAVANTI, T. R.; RIGOTTI, A.; MAGALHÃES, W. D. A. Pedofunctions applied to the least limiting water range to estimate soil water content at specific potentials. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 39, n. 4, p. 444-456, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v39n4p444-456/2019>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/eagri/a/mYjVqfd6mcpQ6bTsp9MkrXG/?lang=en>. Acesso em: 10 mar. 2023.
- TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1085209>. Acesso em: 10 mar. 2023.