



Funções de pedotransferência para estimar a retenção e a disponibilidade de água em Planossolo Háptico sob sistemas integrados de produção agropecuária no Agreste da Paraíba

Pedotransfer functions to estimate water retention and availability in Planosol under integrated agricultural production systems in the Agreste of Paraíba

C. C. da Nóbrega^{1*}; P. L. F. da Silva²; F. P. de Oliveira¹; M. C. C. Campos¹; A. T. de Sousa Neto¹

¹Departamento de Solos e Engenharia Rural/Laboratório de Física do Solo, Universidade Federal da Paraíba, 58397-000, Areia-Paraíba, Brasil

²Departamento de Agronomia, Universidade Estadual de Maringá, 87020-900, Maringá-Paraná, Brasil

*camila_cnobrega@hotmail.com

(Recebido em 06 de março de 2022; aceito em 29 de junho de 2022)

Objetivou-se com este trabalho a geração de Funções de Pedotransferência (FPT) para predição da umidade retida a potenciais matriciais específicos em um Planossolo Háptico sob sistemas integrados de produção agropecuária no Agreste da Paraíba, após três anos de implantação dos sistemas. A pesquisa foi conduzida na EMPAER, Alagoinha, PB. O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados com cinco sistemas de integração e quatro repetições. Os sistemas foram: 1) Gliricídia + *Brachiaria decumbens*; 2) Sabiá + *Brachiaria decumbens*; 3) Ipê roxo + *Brachiaria decumbens*; 4) Milho + *Brachiaria decumbens*; 5) *Brachiaria decumbens*. Foi determinada a retenção de água no solo nos potenciais matriciais: $\Psi_m = 0, -6, -10, -33, -100, -300, -500, -1000$ e -1500 kPa. Foram geradas e validadas funções de pedotransferência (FPT) para cada ponto da curva de retenção. As FPT geradas para estimar os pontos da curva de retenção de água no solo estudado foram validadas através da relação 1:1 entre dados observados e os estimados. Também foram aplicados FPT existentes na literatura. Os resultados mostraram um aumento no conteúdo de água disponível em todos os tratamentos em profundidade, estando relacionado a granulometria do solo. Os pontos da curva de retenção de água no solo foram estimados com razoável precisão ($R^2 \approx 0,88$) a partir das FPT geradas, podendo essas funções serem utilizadas em modelos de simulação de retenção de água no solo, considerando o solo em estudo e as características da região. As FPT testadas da literatura, apresentaram baixa eficiência preditiva.

Palavras-chave: água no solo, pedofunções, solos do semiárido.

The objective of this work was to generate and obtain Pedotransfer Functions (PTFs) to predict the moisture retained at specific potentials in Planosol under integrated agricultural production systems in the Agreste of Paraíba, three years after implementing the system. The research was conducted at EMPAER, Alagoinha, PB. The experimental design used was in randomized blocks with five integration systems and four replications. The treatments were: 1) Gliricídia + *Brachiaria decumbens* (GC+BD); 2) Sabiá + *Brachiaria decumbens* (SB+BD); 3) Purple Ipê + *Brachiaria decumbens* (IP+BD); 4) Corn + *Brachiaria decumbens* (ML+BD); 5) *Brachiaria decumbens* (BD). Soil water retention was determined in the following matrix potentials: $\Psi_m = 0, -6, -10, -33, -100, -300, -500, -1000$ e -1500 kPa. Pedotransfer functions (PTFs) were also generated and validated for each point of the retention curve. The PTFs generated to estimate the points of the water retention curve in the studied soil were validated through the 1:1 ratio between data observed in the soil and those estimated. Existing FPTs in the literature were also applied. The results showed an increase in available water content in all treatments at depth, being related to soil granulometry. The points of the soil water retention curve were estimated with reasonable precision ($R^2 \approx 0.88$) from the generated FPT, and these functions can be used in soil water retention simulation models, considering the soil under study and the characteristics of the region. The tested FPT from the literature showed low predictive efficiency.

Keywords: soil water, pedofunctions, semiarid soils.

1. INTRODUÇÃO

Duas forças explicam, basicamente, a retenção da água pelos solos, as forças capilares e as forças de adsorção, às quais, juntas formam as forças mátricas, que dão origem ao potencial mátrico do solo [1].

A curva de retenção de água no solo pode ser medida convencionalmente, por meio de métodos como o da mesa de tensão e da câmara de Richards, do psicrômetro, da centrífuga, ou ainda por meio de modelos matemáticos. Esses modelos, também chamados de Funções de Pedotransferência (FPT), tem o propósito de facilitar a obtenção de dados de difícil determinação [2-4], a partir de outros atributos medidos rotineiramente com maior facilidade e baixo custo [5, 6], transformando a informação disponível em dados necessários [7].

As funções de pedotransferência são métodos alternativos propostos com o objetivo de tornar mais ágil e econômico os ensaios para determinar os pontos da curva de retenção de água no solo [8] a condutividade hidráulica, a curva de resistência à penetração, entre outros parâmetros. É importante salientar que nem todas as funções são aplicáveis para determinação da retenção de água em determinado local, pois funções derivadas de bancos de dados com condições de solo diferentes do que se pretende analisar podem ocasionar resultados não confiáveis [9].

Conhecer o comportamento da água no solo é importante para tomadas de decisões nos aspectos que envolvem o ambiente em todas as escalas, pois a utilização de modelos de pedotransferência para solos de regiões, manejo e condições distintas das condições que originaram os dados de calibração deve ser evitado, visto que aumenta o risco de realizar uma predição errada [10]. Pode-se dizer que, para estimar a retenção de água no solo, utilizando-se de Funções de Pedotransferência (FPT), atributos físicos estruturais e texturais, são bons preditores quando presentes nos modelos matemáticos.

A utilização de técnicas sustentáveis como os sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (iLRF) têm ajudado a mitigar problemas, revertendo algumas perturbações causadas pela agricultura convencional e pecuária extensiva, recuperando áreas degradadas e melhorando as propriedades dos solos, com o passar dos anos.

A manutenção da serrapilheira recobrando o solo nas áreas com sistemas integrados contribui para a manutenção da umidade, e, ao longo dos anos, para o aumento do teor de matéria orgânica no solo, conseqüentemente, para a retenção de umidade no solo [11], muito importante para a conservação dos solos da região Caatinga, que sofrem com o déficit hídrico severo.

Nesse sentido, esse trabalho teve como objetivo a geração de Funções de Pedotransferência (FPT) para predição da umidade retida a potenciais específicos em um Planossolo Háplico em sistemas integrados de produção agropecuária no Agreste da Paraíba.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Localização e caracterização da área de estudo

O experimento foi conduzido na estação experimental da Empresa Paraibana de Pesquisa, Extensão Rural e Regularização Fundiária - EMPAER (06°57'00" S e 35°32'42" W), localizado no município de Alagoinha, mesorregião Agreste do Estado da Paraíba, a 317 m de altitude.

Segundo a classificação Koppen-Geiger, o clima da região é caracterizado como As', quente e úmido, com chuvas de outono-inverno. A precipitação média anual é de 995 mm, com o período chuvoso compreendendo os meses de março a agosto. A temperatura média anual varia entre 22 e 26 °C. O solo da área experimental foi classificado como Planossolo Háplico eutrófico méxico sólido com horizonte A moderado e de textura franco arenosa de acordo com SiBCS [12].

2.2 Implantação do experimento

O experimento foi instalado em julho de 2015 e a presente avaliação realizada em março de 2018. O delineamento experimental adotado foi em blocos casualizados (DBC) com cinco tratamentos e quatro repetições (5 x 4). Os tratamentos foram constituídos pelos seguintes

sistemas integrados de produção agropecuária: 1) Gliricídia (*Gliricidia sepium* (Jacq.) Steud) + *Brachiaria decumbens* (GC+BD); 2) Sabiá (*Mimosa caesalpiniiifolia* Benth) + *Brachiaria decumbens* (SB+BD); 3) Ipê roxo (*Handroanthus impetiginosus* Mattos) + *Brachiaria decumbens* (IP+BD); 4) Milho (*Zea mays* L.) + *Brachiaria decumbens* (ML+BD); 5) *Brachiaria decumbens* (BD). As espécies florestais foram plantadas em linhas triplas, plantadas com espaçamento de 3 x 2 m nas extremidades de cada parcela, totalizando seis fileiras por parcela, enquanto o milho foi plantado em sistema de plantio direto. Realizou-se a adubação de transplântio com base na análise de solo e nas recomendações técnicas presentes no manual de adubação do solo para o estado de Pernambuco (IPA, 2008). Na Tabela 1, encontram-se descritas as espécies transplantadas na área experimental e informações acerca da necessidade de calagem e adubação do solo.

Tabela 1. Espécies arbóreas implantadas na área experimental (iLPF), correção do solo e adubação [13].

Espécie arbórea	CaCO ₃	KCl	MAP
	----- g cova ⁻¹ -----		
<i>Gliricidia sepium</i>	15	30	48
<i>Handroanthus impetiginosus</i>	35	40	96
<i>Mimosa caesalpiniiifolia</i>	25	30	48

CaCO₃ – Calcário dolomítico (PRNT = 95%); KCl – Cloreto de potássio (60% K₂O), MAP – Monoamônio fosfato (50% P₂O₅).

O componente animal foi inserido na área com sistema de integração entre os meses de janeiro e fevereiro de 2018, logo após o estabelecimento das espécies florestais. Foram utilizados 30 animais (bovinos) da raça Sindí que pastejaram na área por um período de 35 dias. As parcelas experimentais apresentavam dimensão 38 x 20 m, perfazendo uma área total de 760 m². As amostras de solo, deformadas e indeformadas foram coletadas em três camadas: 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m consistindo em quatro amostras por camada e doze amostras por parcela, totalizando 48 amostras por tratamento.

2.3 Caracterização do solo da área experimental

A caracterização física do solo foi realizada no Laboratório de Física do Solo, do Departamento de Solos e Engenharia Rural (DSER), do Centro de Ciências Agrárias (CCA), da Universidade Federal da Paraíba (UFPB). A caracterização de química e fertilidade do solo foi realizada no Laboratório de Fertilidade do Solo do DSER/CCA/UFPB.

As Tabelas 2, 3 e 4 apresentam, respectivamente, a caracterização química, a caracterização física e a análise textural do solo da área experimental aos três anos após a instalação do experimento.

Tabela 2: Caracterização de química e fertilidade de um Planossolo Háplico sob sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta no Agreste da Paraíba aos 3 anos após a implantação do experimento (2018).

Trat.	pH (H ₂ O)	P	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	Na ⁺	SB	CTC	V	COT
	(1:2,5)	mg dm ⁻³	-----cmol _c dm ⁻³ -----								%	g Kg ⁻¹
0,00-0,10 m												
GC+BD	5,7	3,2	0,75	1,7	1,9	0,11	3,9	0,06	4,4	8,3	53	12,3
SB+BD	5,7	3,1	0,74	2,0	1,8	0,11	4,0	0,05	4,6	8,6	54	14,8
IP+BD	5,7	2,6	0,69	2,2	1,8	0,09	3,6	0,05	4,8	8,4	57	13,3
ML+BD	5,7	5,2	0,65	2,2	2,0	0,10	3,6	0,05	4,9	8,5	57	13,2
BD	5,9	2,7	1,06	2,4	2,0	0,10	3,9	0,06	5,5	9,4	58	12,8
0,10-0,20 m												
GC+BD	5,1	1,5	0,50	1,2	1,2	0,58	6,3	0,06	3,0	9,3	32	10,2
SB+BD	5,2	1,6	0,37	1,9	1,5	0,31	5,7	0,05	3,8	9,5	40	11,8
IP+BD	5,4	1,2	0,28	1,7	1,8	0,36	5,5	0,05	3,8	9,3	41	12,2
ML+BD	5,4	1,8	0,36	1,8	1,6	0,34	5,5	0,04	3,8	9,3	41	11,3
BD	5,4	1,4	0,57	2,1	1,4	0,24	5,8	0,05	4,1	9,9	42	11,3
0,20-0,30 m												
GC+BD	4,8	1,2	0,23	0,7	1,0	1,21	6,8	0,06	2,0	8,8	22	9,0
SB+BD	5,0	1,4	0,27	1,2	1,3	0,80	6,2	0,05	2,9	9,0	32	10,2
IP+BD	5,1	0,9	0,18	1,3	1,3	0,93	6,4	0,05	2,8	9,2	30	9,2
ML+BD	5,2	1,3	0,32	1,1	1,0	0,90	6,7	0,04	2,5	9,2	27	9,2
BD	5,2	1,1	0,33	1,4	1,3	0,61	6,6	0,05	3,1	9,8	32	10,0

SB = Soma de bases; CTC = Capacidade de troca de cátions; V = saturação por bases; COT = carbono orgânico total. Tratamentos: GC+BD = Gliricídia + Braquiária; SB+BD = Sabiá + Braquiária; IP+BD = Ipê + Braquiária; ML+BD = Milho + Braquiária; BD = Braquiária.

Tabela 3: Caracterização física em um Planossolo Háplico sob sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta no Agreste da Paraíba aos 3 anos após a implantação do experimento (2018).

Trat.	Ds	Ma	Mi	α	CC	PMP	AD	K θ
	- g dm ⁻³ -	----- m ³ m ⁻³ -----						- cm h ⁻¹ -
0,00-0,10 m								
GC+BD	1,29	0,07	0,38	0,45	0,180	0,072	0,108	8,05
SB+BD	1,25	0,09	0,35	0,44	0,182	0,081	0,101	15,65
IP+BD	1,28	0,08	0,37	0,45	0,192	0,085	0,107	14,75
ML+BD	1,34	0,08	0,37	0,45	0,179	0,077	0,102	9,35
BD	1,28	0,09	0,36	0,45	0,179	0,080	0,099	9,41
0,10-0,20 m								
GC+BD	1,43	0,06	0,34	0,40	0,228	0,090	0,138	3,75
SB+BD	1,41	0,07	0,35	0,42	0,255	0,081	0,174	6,29
IP+BD	1,44	0,05	0,35	0,40	0,246	0,100	0,146	2,27
ML+BD	1,41	0,07	0,36	0,43	0,248	0,075	0,173	4,86
BD	1,39	0,07	0,35	0,42	0,204	0,090	0,114	7,34
0,20-0,30 m								
GC+BD	1,42	0,05	0,34	0,39	0,279	0,076	0,203	2,49
SB+BD	1,42	0,07	0,36	0,43	0,280	0,085	0,195	3,35
IP+BD	1,45	0,04	0,35	0,39	0,290	0,093	0,197	1,94
ML+BD	1,40	0,06	0,37	0,43	0,220	0,075	0,145	3,67
BD	1,43	0,06	0,35	0,41	0,272	0,079	0,193	5,50

Ds = Densidade do solo; Ma = Macroporosidade; Mi = Microporosidade; α = Porosidade total; CC = Capacidade de Campo; PMP = Ponto de Murcha Permanente; AD = Água Disponível; K θ = Condutividade hidráulica. Tratamentos: GC+BD = Gliricídia + Braquiária; SB+BD = Sabiá + Braquiária; IP+BD = Ipê + Braquiária; ML+BD = Milho + Braquiária; BD = Braquiária.

Tabela 4: Análise textural em um Planossolo Háplico sob sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta no Agreste da Paraíba aos 3 anos após a implantação do experimento (2018).

Trat.	Classe Textural							ADA	GF	Classificação Textural
	Areia					Silte	Argila			
	AMG	AG	AM	AF	AMF					
g Kg ⁻¹										
0,00-0,10 m										
GC+BD	19	50	150	352	110	154	165	32	797	Franco arenoso
SB+BD	23	52	145	351	142	127	159	28	827	Franco arenoso
IP+BD	21	48	138	341	116	140	196	63	681	Franco arenoso
ML+BD	25	62	156	340	115	129	174	38	782	Franco arenoso
BD	27	66	179	312	117	129	170	19	886	Franco arenoso
0,10-0,20 m										
GC+BD	19	52	157	340	125	138	168	44	740	Franco arenoso
SB+BD	33	52	130	327	139	128	191	47	749	Franco arenoso
IP+BD	18	47	124	328	116	156	211	60	711	Franco argilo-arenoso
ML+BD	23	55	142	355	129	116	181	54	699	Franco arenoso
BD	33	60	145	326	115	142	179	38	793	Franco arenoso
0,20-0,30 m										
GC+BD	21	51	134	327	129	142	197	54	721	Franco arenoso
SB+BD	22	47	129	310	148	135	209	63	701	Franco argilo-arenoso
IP+BD	19	44	112	321	125	157	223	70	686	Franco argilo-arenoso
ML+BD	24	52	135	334	124	130	202	60	706	Franco argilo-arenoso
BD	28	54	140	328	127	134	189	38	801	Franco arenoso

AMG = areia muito grossa; AG = areia grossa; AM = areia média; AF = areia fina; AMF = areia muito fina; ADA = Argila naturalmente dispersa em água; Gf = Grau de floculação. Tratamentos: GC+BD = Gliricídia + Braquiária; SB+BD = Sabiá + Braquiária; IP+BD = Ipê + Braquiária; ML+BD = Milho + Braquiária; BD = Braquiária.

2.4 Determinação da curva de retenção de água no solo

Foram utilizadas 60 amostras de solo com estrutura indeformadas para a análise dos pontos da curva de retenção, sendo quatro amostras por tratamento e por camada de solo analisada (0,0-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m). A análise dos pontos da CRA no solo foi realizada de acordo com a metodologia descrita no manual de métodos de análises de solo da Embrapa [14]. A determinação dos pontos da CRA no solo foi realizada utilizando-se a mesa de tensão e o extrator de Richards com placas porosas contendo duas câmaras modelos 1600 (5 Bar Plate Extractor) e 1500 (15 Bar Plate Extractor) e compressor Soil moisture modelo 505 20 Bar Compressor.

Associado a determinação dos pontos da CRA, para cada condição estudada, foram determinados também os principais pontos da curva de retenção de água definidos como capacidade de campo (θ_{CC}) referente ao potencial matricial de -10 KPa e ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) referente ao potencial matricial de -1500 KPa. A água disponível (θ_{AD}) foi calculada através da relação entre o teor de água retido entre θ_{CC} e o θ_{PMP} .

A curva de retenção de água no solo (CRA) foi ajustada empregando-se a equação matemática proposta por van Genuchten (1980) [15], utilizando o *software* SWRC – *Soil Water Retention Curve* [16]. Utilizou-se a constante de restrição $m = 1-1/n$, conforme descrito por Mualem (1986) [17]. Para obtenção dos valores de umidade do solo, as amostras foram saturadas e submetida aos potenciais matriciais: $\Psi_m = -6, -10, -33, -100, -300, -500, -1000$ e -1500 kPa. O $\Psi_m = 0$ corresponde ao volume de saturação θ_s da amostra de solo; o potencial de -6 kPa foi obtido por meio da mesa de tensão e os demais -10, -33, -100, -300, -500, -1000 e -1500 kPa, na câmara de Richards com placas porosas [18]. A equação utilizada para obtenção das curvas de retenção de água no solo encontra-se descrita a seguir:

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) / [1 + (\alpha|\Psi|)^n]^m \quad (1)$$

onde: θ = Teor de água no ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) correspondente ao potencial matricial aplicado (Ψ ; -kPa); θ_r = teor de água residual ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); θ_s = teor de água no solo saturado ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); $|\Psi|$ = valor absoluto do potencial matricial (kPa); n , m e $(\alpha; \text{KPa}^{-1})$ são parâmetros empíricos da CRA, sendo n e m , adimensionais.

2.5 Geração e obtenção das funções de pedotransferência (FPT)

Os dados foram submetidos a análise estatística utilizando-se o software estatístico SigmaPlot, onde, primeiramente, foi realizada a análise de correlação simples entre todas as variáveis. Posteriormente, foi realizada a análise de regressão múltipla por meio da opção “stepwise”, para obtenção das FPT. Na definição das equações de regressão linear múltiplas, para prever os atributos do modelo, ficou estabelecido que o comportamento de uma característica na equação deve afetar o parâmetro a ser predito (variável dependente) de forma coerente com o conhecimento empírico e teórico do processo.

A partir dos dados existentes no banco de dados, foram geradas FPT para estimar cada um dos pontos -6, -10, -33, -100, -300, -500, -1000 e -1500 kPa da curva de retenção de água no solo, totalizando oito FPT geradas. Essas FPT foram geradas por meio de variáveis independentes incluídas no modelo, em nível de 5% de probabilidade de erro. As variáveis independentes utilizadas neste estudo foram: teores de areia e argila, grau de flocculação, densidade do solo, densidade de partículas, macroporosidade, microporosidade, porosidade total e pH em água. As variáveis dependentes foram os conteúdos de água potenciais matriciais de -6, -10, -33, -100, -300, -500, -1000 e -1500 kPa.

2.6 Avaliação da eficiência das FPT

A eficiência das funções geradas foi analisada graficamente, pela relação 1:1 dos dados estimados versus os observados e por meio dos indicadores estatísticos: R^2 - coeficiente de determinação (avalia o ajuste do modelo, onde quanto mais próximo da unidade melhor o ajuste) com significância $p < 0,05$; ME - erro médio (indica a exatidão da estimativa, revelando a tendência da FPT superestimar (se positivo) ou subestimar (se negativo) os valores determinados, sendo que, quanto mais próximo de zero for o ME, maior a acurácia da FPT) e; RMSE - raiz quadrada do erro médio (indica a dispersão dos valores medidos e estimados em torno da reta 1:1, onde quanto mais próximo de zero melhor o ajuste entre dados). A obtenção do ME e RMSE foi feita por meio das equações 2 e 3:

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (e_i - m_i) \quad (2)$$

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

onde: n = número de observações; e_i = valor estimado pela FPT da variável de interesse; m_i = valor medido da variável de interesse (observado).

2.7 Aplicação de Funções de Pedotransferência (FPT) existentes na literatura

Foi realizada a avaliação de FPT por meio da relação 1:1 entre dados observados no solo e os estimados a partir de FPT existentes na literatura (Tabela 4), elaboradas por meio de outros bancos de dados, cujas variáveis independentes utilizadas foram parâmetros físicos. Utilizou-se funções geradas por Oliveira et al. (2002) [2], Reichert et al. (2009) [19], Nascimento et al. (2010) [20] e Souza et al. (2014) [21].

As variáveis independentes utilizadas neste estudo foram: areia total e suas frações (muito grossa, grossa, média, fina e muito fina), silte, argila, argila dispersa em água, grau de flocculação, densidade do solo, densidade de partículas, índice de estabilidade de agregados, matéria orgânica, macro e microporosidade. As variáveis dependentes foram os conteúdos de água potenciais matriciais de -6, -10, -33, -100, -300, -500, -1000 e -1500 kPa. A eficiência das funções obtidas da literatura foi analisada por meio dos indicadores estatísticos: R^2 , ME e RMSE, conforme item 2.6.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Curva de Retenção de Água no solo

A curva de retenção de água no solo (CRA) para o Planossolo Háplico, sob sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta, correspondente a camada de 0,00-0,10 m, encontra-se apresentada na Figura 1. Conforme a Figura 1, a maioria dos tratamentos apresentaram umidade de saturação θ_s próximo a $0,45 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, que corresponde a porosidade total do solo (ϕ). Verifica-se que as curvas de retenção correspondentes aos tratamentos BD, GC+BD, ML+BD e SB+BD, apresentam o mesmo comportamento entre os Ψ_m -10 e -1500 kPa, com valores médios de umidade do solo variando entre $0,180$ e $0,078 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Já a curva de retenção correspondente ao tratamento IP+BD apresentou um comportamento em relação a CRA dos demais tratamentos avaliados, com maiores valores na capacidade de campo ($0,192 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e no ponto de murcha permanente ($0,085 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$).

No tratamento BD a umidade correspondente aos intervalos entre os Ψ_m -10 e -1500 kPa, ficou abaixo de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Segundo Reynolds et al. (2007) [22], um solo com água disponível abaixo de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ pode ser considerado seco ou potencialmente seco, estando a água fortemente retida nas partículas de argila do solo, não satisfazendo a necessidade do vegetal por água. Para Fidalski et al. (2013) [23], a θ_r é um parâmetro dependente da granulometria do solo, apresentando valores médios relativamente baixos em solos com predomínio de areia, principalmente de granulometria grossa e média.

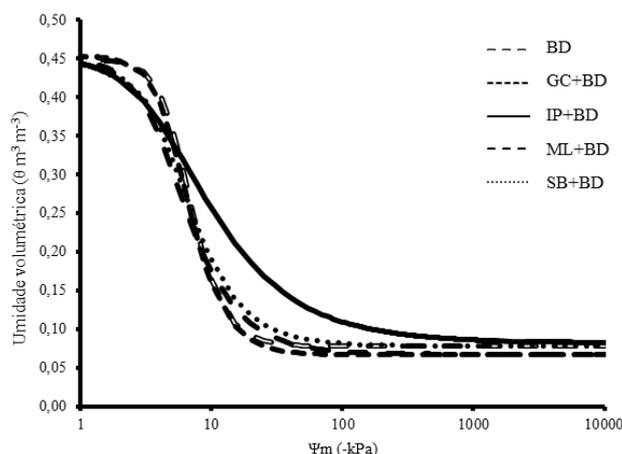


Figura 1: Curva de retenção de água no solo na camada de 0,00-0,10 m, em um Planossolo Háplico sob sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta no Agreste da Paraíba.

Os tratamentos GC+BD e IP+BD apresentaram umidade correspondente aos intervalos entre os potenciais matriciais de -10 e -1500 kPa, de $0,11 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e os tratamentos ML+BD e SB+BD apresentaram umidade de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. De acordo com Sousa et al. (2013) [24], as principais limitações ao uso agrícola dos Planossolos decorrem da pouca capacidade de reter água.

A curva de retenção de água no solo correspondente a camada de 0,10-0,20 m, encontra-se apresentada na Figura 2. Observa-se que os tratamentos apresentaram umidade de saturação θ_s variando de 0,40 e 0,42 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$. Já a umidade no θ_{PMP} ficou entre 0,08 e 0,10 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$.

Verifica-se entre as curvas de retenção, que a umidade no potencial matricial de -10 kPa, seguiu a seguinte ordem $\text{SB+BD} > \text{ML+BD} = \text{IP+BD} > \text{GC+BD} > \text{BD}$, apresentando valores de umidade que variaram de 0,26 a 0,20 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$. BD e GC+BD apresentam uma queda mais brusca da curva, enquanto IP+BD, ML+BD e SB+BD mantiveram valores mais elevados.

Os tratamentos apresentaram a umidade correspondente aos intervalos entre os potenciais matriciais de -10 e -1500 kPa, entre 0,11 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ (BD) a 0,18 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ (SB+BD). Houve um aumento no conteúdo de água disponível em todos os tratamentos em profundidade.

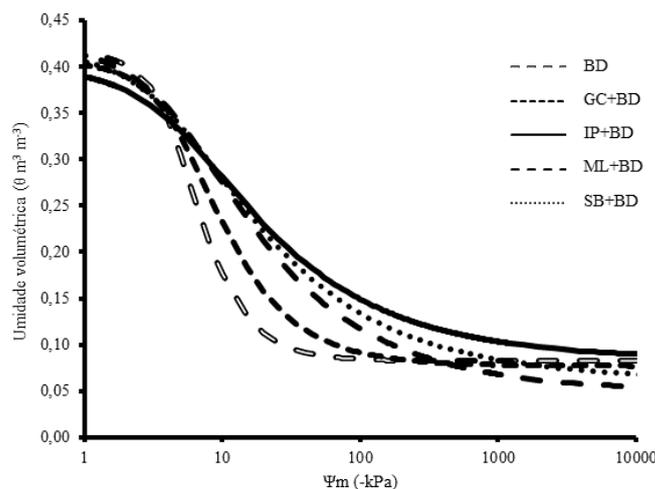


Figura 2: Curva de retenção de água no solo na camada de 0,10-0,20 m, em um Planossolo Háplico sob sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta no Agreste da Paraíba.

A CRA correspondente a camada de 0,20-0,30 m, encontra-se apresentada na Figura 3. Observa-se que os tratamentos apresentaram umidade de saturação θ_s entre 0,39 e 0,43 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$. Já os valores médios de umidade equivalente ao θ_{PMP} ficaram entre 0,08 e 0,09 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$. Verifica-se entre as curvas de retenção, que a umidade no Ψ_m -10 kPa, seguiu a seguinte ordem $\text{IP+BD} > \text{SB+BD} > \text{GC+BD} > \text{BD} > \text{ML+BD}$, apresentando valores médios que variaram de 0,29 a 0,22 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$. Os tratamentos apresentaram a umidade correspondente aos intervalos entre os potenciais matriciais de -10 e -1500 kPa, entre 0,15 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ (BD) a 0,20 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ (SB+BD).

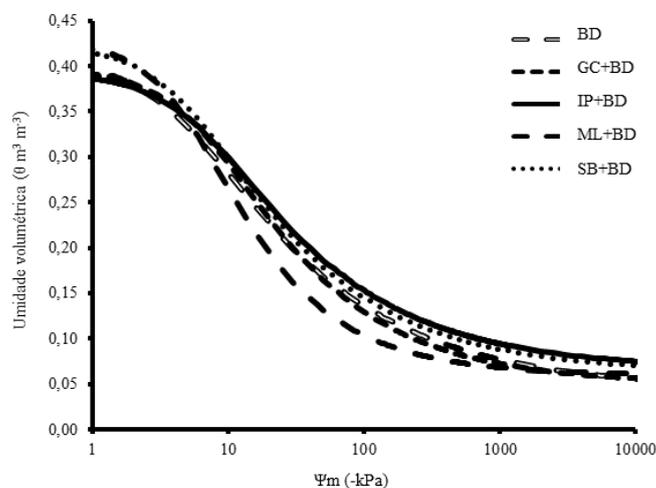


Figura 3: Curva de retenção de água no solo na camada de 0,20-0,30 m, em um Planossolo Háplico sob sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta no Agreste da Paraíba.

Foi possível notar um aumento no conteúdo de água disponível em todos os tratamentos com o aumento de profundidade da camada de solo avaliada, pode estar relacionada ao aumento na concentração de argila em relação ao de areia. O incremento no teor de argila na camada de 0,20-0,30 m foi de 15,19% em relação a camada de 0,0-0,10 m, ou seja, 30 g kg⁻¹. A mudança na textura do solo com o aumento de profundidade modifica toda a dinâmica de distribuição de poros, com resposta no comportamento da curva de retenção de água no solo. Com o aumento da quantidade de argila em profundidade, a quantidade de água retida em potenciais mais negativos passa a ser maior, pois nesses pontos, a retenção de água passa a ser mais dependente das variáveis texturais, por ocasião do aumento da capacidade de troca catiônica, que é praticamente nula nas partículas de areia [25-27].

Os parâmetros de ajuste das curvas de retenção estão apresentados na Tabela 5. Verifica-se que não houve diferença estatística ($p > 0,05$) entre os tratamentos avaliados. Os valores médios de θ_s e θ_r não diferiram entre os tratamentos avaliados, nas três camadas de solo avaliadas. Os valores médios de θ_s variaram de 0,453 a 0,444 m³ m⁻³ na camada de 0,0-0,10 m; de 0,422 a 0,400 m³ m⁻³ na camada de 0,10-0,20 m e de 0,427 a 0,392 m³ m⁻³ na camada de 0,20-0,30 m. Os valores médios de θ_r variaram de 0,082 a 0,067 m³ m⁻³ na camada de 0,0-0,10 m, 0,085 a 0,050 m³ m⁻³ na camada de 0,10-0,20 m e 0,066 a 0,044 m³ m⁻³ na camada de 0,20-0,30 m. Observa-se que todos os tratamentos apresentaram θ_r abaixo de 0,10 m³ m⁻³.

Os valores de θ_r considerados no estudo foram ajustados tendendo ao infinito, por tanto o potencial considerado, quando os dados foram modelados, são menores de -1500 kPa, pois o θ_r foi extrapolado pelo programa. De acordo com Ghiberto e Moraes (2011) [28], sob condições controladas de laboratório e com a extrapolação do valor da umidade residual, a faixa de umidade é diferente daquela das condições de campo.

Tabela 5: Parâmetros de ajustes da curva de retenção de água no solo nas três camadas avaliadas, por tratamento, em um Planossolo Háplico sob sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta no Agreste da Paraíba.

Trat.	θ_s	θ_r	α	m	n	R^2
	----- m ³ m ⁻³ -----		kPa ⁻¹	---	---	---
0,00-0,10 m						
GC+BD	0,453 a	0,067 a	0,178 a	0,650 a	3,63 a	0,962 a
SB+BD	0,444 a	0,079 a	0,204 a	0,567 a	2,76 a	0,955 a
IP+BD	0,453 a	0,082 a	0,217 a	0,458 a	1,85 a	0,942 a
ML+BD	0,449 a	0,067 a	0,225 a	0,537 a	2,80 a	0,952 a
BD	0,449 a	0,078 a	0,167 a	0,679 a	3,99 a	0,967 a
0,10-0,20 m						
GC+BD	0,405 a	0,078 a	0,181 a	0,474 a	2,27 a	0,977 a
SB+BD	0,416 a	0,062 a	0,216 a	0,339 a	1,52 a	0,988 a
IP+BD	0,400 a	0,085 a	0,196 a	0,362 a	1,46 a	0,970 a
ML+BD	0,422 a	0,050 a	0,205 a	0,356 a	1,58 a	0,980 a
BD	0,414 a	0,083 a	0,196 a	0,599 a	2,93 a	0,965 a
0,20-0,30 m						
GC+BD	0,396 a	0,050 a	0,143 a	0,349 a	1,58 a	0,986 a
SB+BD	0,423 a	0,062 a	0,184 a	0,335 a	1,51 a	0,988 a
IP+BD	0,392 a	0,066 a	0,149 a	0,326 a	1,49 a	0,993 a
ML+BD	0,427 a	0,060 a	0,192 a	0,410 a	1,75 a	0,958 a
BD	0,406 a	0,044 a	0,209 a	0,309 a	1,46 a	0,989 a

θ_s = Umidade de saturação, θ_r = Umidade residual, α , m e n = Parâmetros empíricos de ajuste da curva de retenção, R^2 = Coeficiente de determinação. Médias seguidas de letras iguais nas colunas, não diferem entre si, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Tratamentos: GC+BD = Gliricídia + Braquiária; SB+BD = Sabiá + Braquiária; IP+BD = Ipê + Braquiária; ML+BD = Milho + Braquiária; BD = Braquiária.

O coeficiente de determinação (R^2) explicou muito bem o ajuste das curvas de retenção para as três camadas e todos os tratamentos, variando de 0,97 a 0,94 na camada de 0,00-0,10 m, de

0,99 a 0,97 na camada de 0,10-0,20 m e 0,99 a 0,96 na camada de 0,20-0,30 m. Esse resultado evidencia a acurácia da utilização da equação de van Genuchten (1980) [15] para os ajustes dos dados de umidade do solo.

Na Figura 4 pode-se observar as CRA's para as camadas de 0,00-0,10 m; 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m. A acentuada inclinação das curvas com o aumento do potencial matricial aplicado demonstra haver influência de ordem estrutural sobre a retenção de água no solo. Observa-se que houve maior retenção de água nas camadas de 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m de profundidade no Ψ_m correspondente a -100 kPa, indicando maior distribuição de microporos e mesoporos, quando comparado a camada de 0,00-0,10 m. A inclinação acentuada da CRA correspondente a camada de 0,00-0,10 m indica haver maior volume de macroporos, com valor médio de $0,41 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Da camada de 0,00-0,10 para a de 0,10-0,20 m houve redução de 21,95% na macroporosidade do solo e, de 31,70% entre a camada de 0,00-0,30 m, explicando dessa forma o comportamento das CRA'S com redução do Ψ_m .

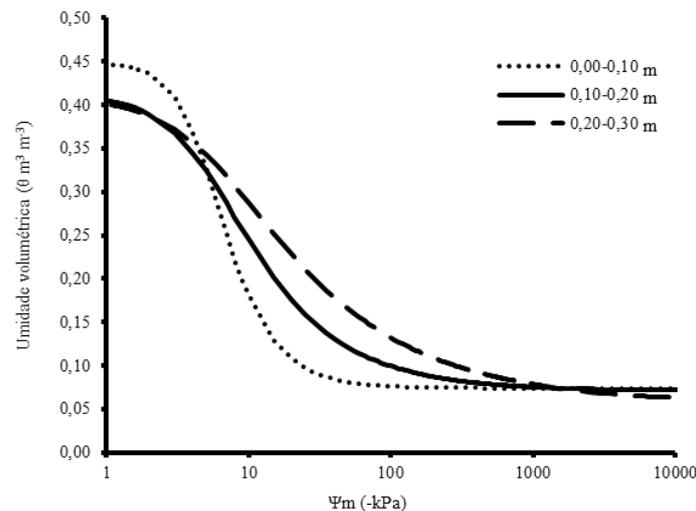


Figura 4: Curva de retenção de água no solo por camada, independente do tratamento, em um Planossolo Háplico sob sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta no Agreste da Paraíba.

Tabela 6: Parâmetros de ajustes da curva de retenção de água no solo por camada avaliada, em um Planossolo Háplico sob sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta no Agreste da Paraíba.

Camada	θ_s	θ_r	α	m	n	R ²
m	----- m ³ m ⁻³ -----		kPa ⁻¹	---	---	---
0,00 – 0,10	0,450	0,075	0,198	0,578	3,01	0,956
0,10 – 0,20	0,411	0,072	0,199	0,426	1,95	0,976
0,20 – 0,30	0,408	0,056	0,175	0,346	1,56	0,983

θ_s = Umidade de saturação, θ_r = Umidade residual, α , m e n = Parâmetros empíricos de ajuste da curva de retenção, R² = Coeficiente de determinação.

Esses dados estão de acordo com os observados por Silva et al. (2020) [29] em estudo sobre a distribuição de poros por tamanho no solo da área experimental analisada pelo presente trabalho. Segundo os autores, na camada de 0,0-0,10 m, 71,23% dos poros foram classificados como macroporos, diferentemente da camada de 0,10-0,20 m, onde 69,75% dos poros receberam essa classificação, ou seja, redução de 1,48%. Essa pequena redução deve ter conferido comportamento distinto às CRA.

De acordo com a Figura 4, é possível observar que na camada de 0,00-0,10 m de profundidade, a $\theta_s = 0,45 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ foi maior que nas demais camadas de solo avaliadas, assim como a inclinação da curva é mais acentuada, apresentando umidade disponível em torno de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Verifica-se que as CRA'S correspondentes às camadas 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m apresentam o

mesmo comportamento, com umidade de saturação θ_s em torno de $0,41 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e umidade no θ_{PMP} próxima a $0,08 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Entre os Ψ_m -10 e -1500 kPa a CRA seguiu tendência distinta, apresentando umidade média entre $0,15$ e $0,19 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para as camadas 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m de profundidade, respectivamente.

Ainda é possível notar na Figura 4 que no Ψ_m -10 kPa, o teor de água diminui com a profundidade. Então, apesar de apresentar maiores conteúdos de água no potencial de saturação, há uma queda maior da curva na camada de 0,00-0,10, seguido da camada de 0,10-0,20 e menor de 0,20-0,30 m, por isso a variação na quantidade de água disponível em profundidade. Existe uma tendência ao aumento da água disponível em profundidade, devido principalmente a textura do solo, em que há um aumento de partículas de argila, responsáveis por reter maior quantidade de água no solo. Esse é um processo natural dos Planossolos. Segundo Sousa et al. (2013) [24], os Planossolos apresentam adensamento no horizonte subsuperficial, devido as suas características pedogenéticas, apresentando horizonte B plânico.

Os parâmetros de ajuste da curva de retenção de água no solo por camada, independente do tratamento, estão apresentados na Tabela 6. De acordo com os dados apresentados na Tabela 6, o coeficiente de determinação (R^2) explicou o ajuste das curvas de retenção para as três camadas, 0,00-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, de forma bastante satisfatória, apresentando coeficientes de aproximadamente 96, 98 e 98%, respectivamente. Esse resultado evidencia a acurácia da utilização da equação de van Genuchten (1980) [15] para os ajustes dos dados de umidade do solo. Em potenciais matriciais menos negativos, a curva característica depende do arranjo e dimensão dos poros, enquanto em potenciais matriciais mais negativos (maior pressão), a curva depende mais da textura e mineralogia do solo.

3.2 Análise de correlação entre as variáveis e a retenção de água nos diferentes potenciais matriciais (Ψ_m) com \bar{P} ($\leq 0,05$)

A Tabela 7 apresenta os coeficientes de correlação linear de Pearson (r) entre as variáveis do solo com a umidade retida a diferentes Ψ_m utilizadas para gerar e validar as FPT.

Tabela 7: Correlação de Pearson (r) entre as variáveis e a umidade retida a diferentes potenciais das amostras utilizadas para gerar e validar as FPT em um Planossolo Háplico sob sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta no Agreste da Paraíba.

Variáveis	Potencial Matricial (kPa)							
	-6	-10	-33	-100	-300	-500	-1000	-1500
Areia	0,183	-0,611	-0,696	-0,740	-0,714	-0,841	-0,757	-0,579
Silte	-0,014	0,177	0,185	0,526	0,373	0,543	0,496	0,553
Argila	-0,283	0,732	0,844	0,693	0,753	0,821	0,734	0,455
GF	0,120	-0,570	-0,702	-0,451	-0,499	-0,576	-0,455	-0,267
Dp	-0,078	0,417	0,557	0,089	0,161	0,243	0,228	0,123
Ds	-0,665	0,851	0,792	0,700	0,829	0,688	0,649	0,372
Ma	0,484	-0,761	-0,712	-0,723	-0,769	-0,755	-0,643	-0,386
Mi	0,964	-0,542	-0,395	-0,594	-0,628	-0,513	-0,553	-0,476
PT	0,832	-0,788	-0,677	-0,791	-0,839	-0,768	-0,716	-0,507
COT	0,480	-0,768	-0,733	-0,367	-0,523	-0,467	-0,386	-0,043
IEA	0,407	-0,812	-0,793	-0,369	-0,530	-0,446	-0,325	0,032
K0	0,464	-0,765	-0,677	-0,571	-0,660	-0,572	-0,536	-0,238
pH	0,672	-0,874	-0,847	-0,509	-0,647	-0,542	-0,458	-0,161

GF = Grau de floculação; Dp = Densidade de partículas; Ds = Densidade do solo; Ma = Macroporosidade; Mi = Microporosidade; PT = Porosidade total; COT = Carbono orgânico total; IEA = Índice de estabilidade de agregados; K θ = Condutividade hidráulica; pH = Potencial hidrogeniônico.

Observa-se que as variáveis densidade do solo e teor de argila correlacionaram positivamente com os teores de água retidos nas tensões de -10 a -1000 kPa, significando que melhorias nessas variáveis podem ocasionar um aumento também no conteúdo de água retido em determinados potenciais. Os resultados desse estudo estão em acordo com os observados por Reichert et al. (2020) [30] ao estimar a disponibilidade de água em solos cultivados do sul do Brasil utilizando pedofunções. Os autores concluíram que a granulometria afeta a disponibilidade de água no solo. Dessa forma, o efeito dos tratamentos sobre as variáveis preditivas pode direta ou indiretamente influenciar o nível de predição da FPT. Nos potenciais mais elevados (-10 a -300 kPa) a D_s apresentou correlação positiva com o teor de água no solo, indicando que o aumento de D_s em solos arenosos podem favorecer o aumento no teor de água no solo, principalmente na faixa de Ψ_m onde se encontra a θ_{CC} . Dessa forma, os tratamentos sobre iLPF onde os valores de D_s são mais elevados, a utilização dessa variável pode ser utilizada para a predição do teor de água na θ_{CC} com melhor acurácia. Reichert et al. (2020) [30] utilizaram para a elaboração das FPT, mais frequentemente as variáveis com que tiveram correlação positiva.

Por outro lado, comportamento inverso foi verificado com as variáveis pH para potenciais de -10 e -33 kPa, porosidade total para potenciais de -100 e -300 kPa, e teor de areia para os potenciais -500, -1000 e -1500 kPa, onde ocorreram os maiores valores negativos do índice de correlação de Pearson, demonstrando que quanto menor for essas variáveis, maior a retenção de água no solo em determinados potenciais matriciais.

No geral, as variáveis teor de areia, teor de argila, densidade do solo, macroporosidade e porosidade total foram as que melhores se relacionaram com os teores de umidades volumétricas retidas em todas as tensões. Segundo Williams et al. (1983) [25] e Assad et al. (2001) [26] os atributos densidade do solo, composição granulométrica, estrutura, porosidade e matéria orgânica, são importantes na retenção de umidade no solo, sendo a porosidade, estrutura e densidade do solo mais importantes para retenção de água em potenciais mais elevados. Em potenciais mais baixos, a quantidade de água retida passa a ser cada vez mais dependente de variáveis como textura, conteúdo de matéria orgânica e mineralogia da fração argila.

3.3 Funções de Pedotransferência desenvolvidas a partir do banco de dados

As funções de pedotransferência (FPT) geradas e seus respectivos coeficientes de determinação nos potenciais matriciais de $\Psi-0,006$; $\Psi-0,01$; $\Psi-0,033$; $\Psi-0,1$; $\Psi-0,3$; $\Psi-0,5$; $\Psi-1,0$ e $\Psi-1,5$ (kPa) encontram-se dispostos na Tabela 8. A composição das FPT levou em consideração, principalmente, variáveis estruturais e texturais, além do pH. Os valores de R^2 obtidos em cada modelo representam a importância da estrutura e textura do solo na retenção da água (Tabela 8).

É possível notar que no potencial matricial -6 kPa e -1000 kPa, a microporosidade é a variável que mais influenciou o modelo gerado para variação do conteúdo de água. No potencial -10 kPa, a densidade do solo foi a variável mais influente. Já nos potenciais -100, -300 e -1500 kPa, a porosidade total foi a variável com maior peso nos modelos gerados. No potencial de -500 kPa, a variável macroporosidade foi a que mais influenciou no modelo gerado para variação do conteúdo de água no solo.

Apenas no potencial matricial -33 kPa, a variável que mais influenciou no modelo gerado foi uma variável de natureza físico-química, o pH. Essa variável, apesar de ter apresentado pouca interferência nos demais modelos, ela ocorreu em seis dos oito modelos gerados, verificando-se nos modelos dos potenciais -10, -33, -100, -300, -1000 e -1500 kPa.

Tabela 8: Funções de Pedotransferências geradas e validadas para estimativa da retenção de água e seus respectivos indicadores estatísticos R^2 , ME e RSME, em um Planossolo Háplico sob sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta no Agreste da Paraíba.

FPT	R^2	ME	RMSE
$\Psi_{-6} = 0,103 + (0,854 * \text{Mic}) - (0,0379 * \text{DS})$	0,96	-0,00019	0,00074
$\Psi_{-10} = 0,256 + (0,000620 * \text{A}) + (0,149 * \text{DS}) - (0,0650 * \text{pH})$	0,86	-0,00040	0,00154
$\Psi_{-33} = 0,263 + (0,000621 * \text{A}) - (0,0372 * \text{pH})$	0,91	0,00053	0,00207
$\Psi_{-100} = 0,213 + (0,0212 * \text{pH}) - (0,000177 * \text{AT}) - (0,375 * \text{PT}) + (0,0623 * \text{DS})$	0,84	0,00019	0,00073
$\Psi_{-300} = 0,197 - (0,529 * \text{PT}) + (0,000350 * \text{A}) + (0,00989 * \text{pH}) + (0,292 * \text{Mac})$	0,89	-0,00014	0,00054
$\Psi_{-500} = 0,377 + (0,0309 * \text{DS}) + (0,503 * \text{Mac}) - (0,317 * \text{PT}) - (0,000319 * \text{AT})$	0,89	-0,00004	0,00016
$\Psi_{-1000} = 0,124 - (0,528 * \text{Mic}) + (0,0134 * \text{pH}) + (0,000427 * \text{A})$	0,85	-0,00003	0,00010
$\Psi_{-1500} = -1,047 + (0,0000522 * \text{AT}) - (0,630 * \text{PT}) - (0,0000408 * \text{GF}) + (0,367 * \text{DP}) + (0,0782 * \text{DS}) + (0,0613 * \text{pH})$	0,86	0,00060	0,00233

DP = densidade de partículas; DS = densidade do solo; Mac = macroporosidade; Mic = microporosidade; PT = porosidade total; AT = Areia total; A= Argila.

A mudança de pH interfere nas forças de atração e repulsão entre as partículas do solo e na afinidade entre a fase sólida e líquida do solo. Consequentemente, as propriedades físicas do solo, como a retenção de água e a estabilidade dos agregados, também são alteradas pela variação do pH [31]. Conforme apresentado por Reichert et al. (2020) [30] a classificação das FPT, tomando-se como parâmetro o R^2 , indica alta precisão ($> 0,85$), precisão média (de 0,40 a 0,85) e baixa precisão ($> 0,40$). Dessa forma, verifica-se que as FPT correspondentes a Ψ_m -6, -10, -33, -300, -500, -1000 e -1500 kPa foram classificadas como de alta precisão, com R^2 de 0,96; 0,86; 0,91; 0,89; 0,89; 0,89; 0,85 e 0,86, respectivamente. Para o Ψ_m de -100 a FPT foi classificada como de precisão média com R^2 de 0,84.

A relação entre estrutura e textura do solo com a retenção de água, também foi observada por diversos autores [21, 32, 33] que utilizaram variáveis estruturais e texturais para geração das funções de pedotransferência, corroborando com os dados encontrados no estudo. Outros autores [6, 34] utilizaram apenas de variáveis estruturais ou texturais, não em conjunto, para estimativas dos parâmetros das equações geradas. A FPT apresentadas na Tabela 8 indicam que nos tratamentos com valores significativos de Ds, Mic, Argila, pH, PT e Mac são os mais adequados para a predição do teor de água no solo em Ψ_m distintos. Os teores de Argila e pH estão relacionados a CTC e a retenção de água em baixos Ψ_m , que influenciam, principalmente na retenção de água equivalente ao θ_{PMP} . Como observado por Reichert et al. (2020) [30] o teor de argila apresentou correlação elevada com o teor de umidade no potencial de -1500 kPa, potencial este, onde a ação da mineralogia do solo é mais expressiva que a estrutura na retenção de água no solo. Klein et al. (2010) [35] estudando a influência da textura do solo na estimativa do teor de água no ponto de murcha permanente, concluíram que 91% do teor de água no θ_{PMP} puderam ser atribuídos a variação no teor de argila.

É sabido que propriedades estruturais, tais como agregação e macroporosidade, influenciam o comportamento hidráulico do solo. Por isso a relevância de se utilizar não apenas dados granulométricos, mas estruturais também, em conjunto, para um melhor ajuste do modelo. Foi observado também que modelos de FPT utilizando apenas textura, densidade aparente e conteúdo orgânico de C falharam em prever as características hidráulicas de solos altamente estruturados, sendo necessário introduzir informações sobre a estrutura do solo no modelo [36]. Em um solo sob integração lavoura-pecuária, Tavanti et al. (2020) [37] concluíram que as variáveis macroporosidade, microporosidade e areia foram as que apresentaram melhor acurácia para predição do índice S utilizando FPT, parâmetro este estreitamente relacionado a qualidade estrutural do solo.

A capacidade preditiva das FPT apresentadas, avaliadas em conjunto de dados diferentes daqueles que lhe deram origem, em seus respectivos potenciais matriciais, expressas pela relação

1:1 dos dados observados (presentes no banco) e estimados por cada FPT, juntamente com os indicadores estatísticos R^2 , ME e RMSE, estão apresentadas na Figura 5. A análise dos indicadores estatísticos calculados para avaliar a FPT no potencial matricial Ψ -0,006 indicou ter havido uma leve subestimativa do conteúdo de água predito (ME = $-0,0002 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). Verificou-se também uma ligeira dispersão dos dados em relação a reta 1:1, indicada pelo RMSE ($0,0007 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) e um bom coeficiente de determinação $R^2 = 0,96$. Os resultados do conjunto de indicadores permitem inferir que a FPT tem uma boa acurácia na predição de água retida nesse potencial para o Planossolo Háplico estudado.

No potencial matricial Ψ -0,01, referente ao ponto de capacidade de campo do solo em estudo, os indicadores estatísticos mostraram uma leve subestimativa no conteúdo de água retida estimado pela FPT (ME = $-0,0004 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), além de uma baixa dispersão dos dados em relação a reta 1:1 (RMSE = $0,0015 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). O coeficiente de determinação (R^2) com valor 0,86 indicou um bom ajuste de dados pelo modelo, onde 86% das variações ocorridas no conteúdo de água foram explicadas por este. Para o potencial matricial Ψ -0,033, o valor de ME ($0,0005 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) indicou uma leve superestimativa dos dados calculados através da FPT. A observância da reta 1:1 com valor de RMSE ($0,0021 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) demonstrou um bom ajuste entre os dados estimados e observados, com moderada dispersão. O coeficiente de determinação (R^2) ficou em torno de 0,90. Assim, 90% da variação no conteúdo de água retido é explicada pelo modelo.

No potencial Ψ -0,1, ocorreu uma leve superestimativa dos dados em relação aos observados (ME = $0,0002 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), denotando uma boa acurácia do modelo, além de uma pequena dispersão dos dados em relação a reta 1:1 (RMSE = $0,0007 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), contribuindo para um melhor ajuste entre dados estimados e observados, apresentando aproximadamente $R^2 = 0,84$, indicando, portanto, que 84% da variação do conteúdo de água retido é explicada pelo modelo. No potencial matricial Ψ -0,3, os indicadores estatísticos mostraram uma leve subestimativa no conteúdo de água retida estimado pela FPT (ME = $-0,0001 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), além de uma baixa dispersão dos dados em relação a reta 1:1 (RMSE = $0,0005 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). O coeficiente de determinação (R^2) com valor 0,89 indicou um bom ajuste de dados pelo modelo, onde 89% das variações ocorridas no conteúdo de água podem ser explicadas pelo modelo.

No potencial Ψ -0,5, o valor de ME ($-0,00004 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) indicou uma leve subestimativa dos dados calculados através da FPT. A observância da reta 1:1 com valor de RMSE ($0,0002 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) demonstrou um bom ajuste entre os dados estimados e observados, com baixa dispersão. O coeficiente de determinação ($R^2 = 0,89$) indicou que 89% da variação do conteúdo de água retido é explicada pelo modelo.

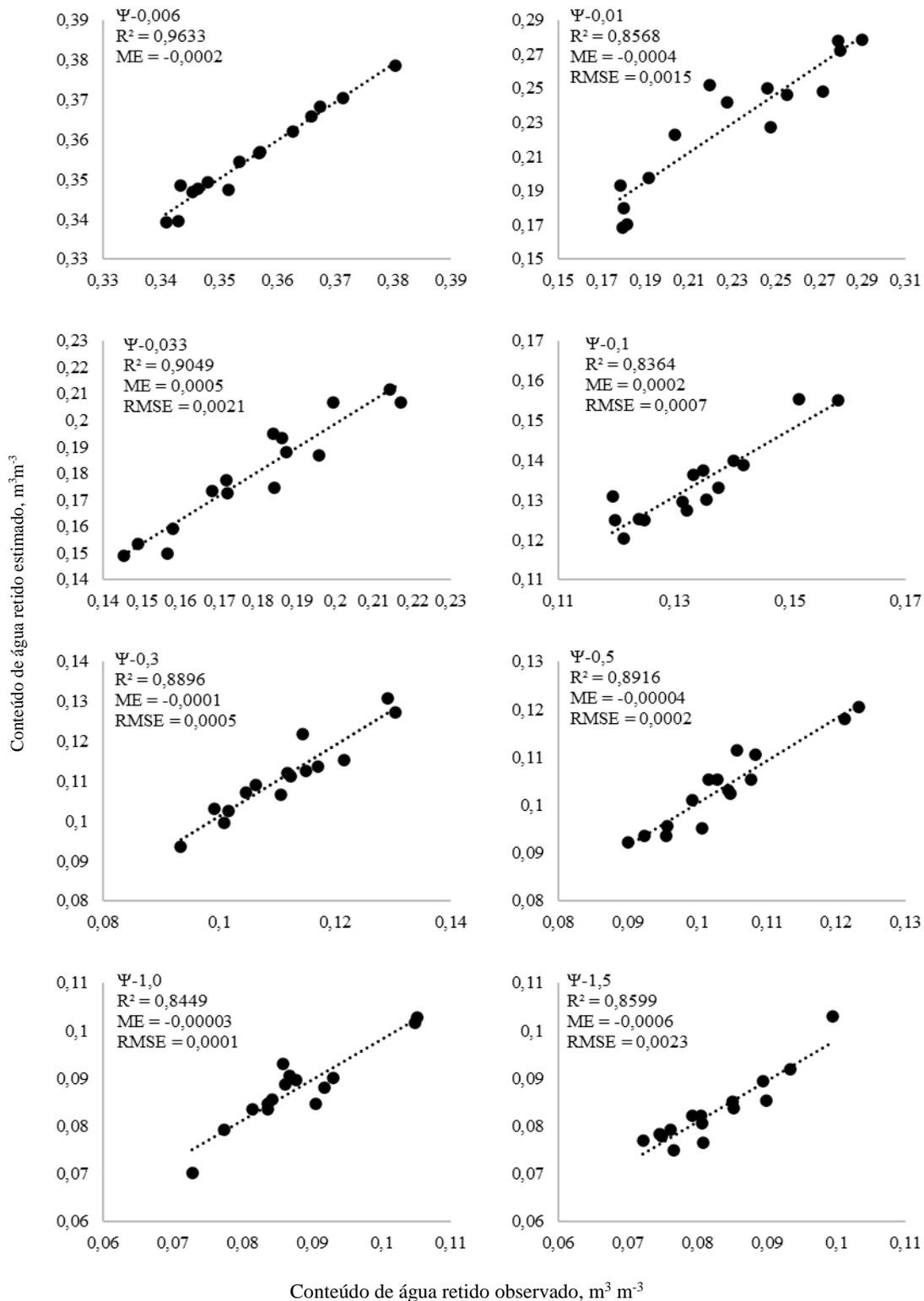


Figura 5: Comparação entre valores estimados e observados do conteúdo de água retido no potencial matricial (Ψ_m) de -6, -10, -33, -100, -300, -500, -1000 e -1500 kPa, respectivamente, em um Planossolo Háplico sob sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta no Agreste da Paraíba.

No potencial $\Psi = -1,0$, ocorreu uma subestimativa muito leve dos dados em relação aos observados ($ME = -0,00003 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), denotando uma boa acurácia do modelo, além de uma baixíssima dispersão dos dados em relação a reta 1:1 ($RMSE = 0,0001 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), contribuindo para um melhor ajuste entre dados estimados e observados, apresentando aproximadamente

$R^2 = 0,85$, indicando, portanto, que 85% da variação do conteúdo de água retido é explicada pelo modelo.

Para o potencial $\Psi-1,5$, referente ao ponto de murcha permanente do solo, os indicadores estatísticos mostraram uma leve subestimativa no conteúdo de água retida estimado pela FPT (ME = $-0,0006 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), além de uma baixa dispersão dos dados em relação a reta 1:1 (RMSE = $0,0023 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). O coeficiente de determinação (R^2) com valor 0,86 indica um bom ajuste de dados pelo modelo, onde que 86% das variações ocorridas no conteúdo de água podem ser explicadas pelo modelo.

Todas as funções apresentaram valores elevados de R^2 e baixos de ME e RMSE, denotando a boa acurácia dessas FPT na predição de valores de retenção de água no solo em todos os potenciais matriciais testados no estudo, referente a um Planossolo Háplico.

3.4 Aplicação e eficiência das FPT obtidas na literatura

A funções de pedotransferência selecionadas da literatura e utilizadas para estimar a retenção de água através do banco de dados do estudo, estão dispostas na Tabela 9, assim como seus respectivos indicadores estatísticos R^2 , ME e RMSE.

Os resultados obtidos dos coeficientes estatísticos de determinação R^2 , ME e RMSE reportaram a baixa eficiência preditiva de quase todos os modelos utilizados. Constatou-se, que todos os modelos propostos pela literatura superestimaram ou subestimaram os valores do conteúdo de água retido.

Os modelos propostos por Oliveira et al. (2002) [2], para solos de Referência do Estado de Pernambuco, apresentaram baixo coeficiente de determinação (R^2) e subestimação dos conteúdos de água retidos em todos nos potenciais avaliados (-33 e -1500 kPa). A dispersão em torno da reta 1:1 também foi um pouco elevada, demonstrada através dos valores elevados de RMSE, apresentando assim baixa capacidade dos modelos para predição do conteúdo de água retido nos potenciais matriciais de -33 e -1500 kPa.

Tabela 9: Avaliação das funções de pedotransferência apresentadas na literatura baseada nos indicadores estatísticos R^2 , ME e RMSE para um Planossolo Háplico sob sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta no Agreste da Paraíba.

Autor / Classe de solo	FPT	R^2	ME	RMSE
[2] Várias classes	$\Psi_{-33} = 0,000333Si + 0,000387Arg$	0,51	-0,0611	0,2365
	$\Psi_{-1500} = 0,000038AT + 0,000153Si + 0,000341Arg - 0,030861Ds$	0,23	-0,0144	0,0559
[19] Várias classes	$\Psi_{-6} = 0,415 + 0,26 (Sil+Arg) + 0,61MO - 0,207Ds$	0,47	0,1291	0,5000
	$\Psi_{-10} = 0,268 + 0,05Sil + 0,24 (Sil+Arg) + 0,85MO - 0,127Ds$	0,35	0,0342	0,1326
	$\Psi_{-33} = 0,106 + 0,29 (Sil+Arg) + 0,96MO - 0,048Ds$	0,01	0,0264	0,1024
	$\Psi_{-100} = 0,102 + 0,23 (Sil+Arg) - 0,08 (AT+Sil) + 1,08MO$	0,46	0,0010	0,0038
	$\Psi_{-500} = 0,268 - 0,11Sil - 0,31AT + 1,28MO + 0,031Ds$	0,72	-0,0077	0,0297
	$\Psi_{-1500} = -0,04 + 0,15Arg + 0,17 (Sil+Arg) + 0,91MO + 0,026Ds$	0,40	-0,0143	0,0555
[20] Latosolos Amarelos e Argissolos Amarelos	$\Psi_{-33} = 0,0409 + 0,000377Arg + 0,000108Sil$	0,65	-0,0529	0,2048
	$\Psi_{-33} = 0,418 - 0,000377AT - 0,000269Sil$	0,65	-0,0528	0,2045
	$\Psi_{-33} = 0,0525 + 0,000373Arg$	0,71	-0,0569	0,2202
	$\Psi_{-33} = 0,378 - 0,000351AT$	0,48	-0,0383	0,1485
	$\Psi_{-1500} = 0,0812 + 0,000279Arg + 0,0000713Si - 0,0457Ds$	0,15	-0,0021	0,0083
	$\Psi_{-1500} = 0,360 - 0,000279AT - 0,000208Sil - 0,0457Ds$	0,14	-0,0024	0,0093
	$\Psi_{-1500} = 0,0221 + 0,000288Arg$	0,21	-0,0065	0,0250
	$\Psi_{-1500} = 0,272 - 0,000269AT$	0,34	0,0078	0,0301
[21] (1) Argissolo Amarelo	$\Psi_{-10} = 0,19092 + 0,00029Arg - 0,00242Mi$	0,54	0,0156	0,0603
	$\Psi_{-33} = 0,15839 + 0,00031Arg - 0,00240Mi$	0,71	0,0364	0,1408
	$\Psi_{-100} = 0,14919 + 0,00029Arg - 0,00241Mi$	0,48	0,0689	0,2670
	$\Psi_{-500} = 0,14023 + 0,00028Arg - 0,00244Mi$	0,68	0,0883	0,3419
	$\Psi_{-1500} = 0,13636 + 0,00028Arg - 0,00244Mi$	0,71	0,1054	0,4083
[21] (2) Argissolo Amarelo	$\Psi_{-10} = 0,10117 + 0,00706Ma$	0,58	-0,1273	0,4929
	$\Psi_{-33} = 0,08595 + 0,006102Ma$	0,51	-0,0930	0,3600
	$\Psi_{-100} = 0,07585 + 0,00646Ma$	0,52	-0,0575	0,2227
	$\Psi_{-500} = 0,06452 + 0,00643Ma$	0,57	-0,0387	0,1497
	$\Psi_{-1500} = 0,0591 + 0,00646Ma$	0,15	-0,0231	0,0893

Onde: R^2 - coeficiente de determinação; ME - erro médio; RMSE - raiz quadrada do erro médio quadrado; ADA - argila dispersa em água; AT - areia total; AMG - areia muito grossa; AG - areia grossa; AME - areia média; AF - areia fina; AMF - areia muito fina; Arg - argila; Dp - densidade de partícula; Ds - densidade do solo; IEA - índice de estabilidade de agregados; Gf - grau de floculação; Ma - macroporosidade; Mi - microporosidade; MO - matéria orgânica; Sil - silte.

As estimativas dos conteúdos de água a partir dos modelos propostos por Reichert et al. (2009) [19], para solos do Rio Grande do Sul, superestimaram ou subestimaram os dados de retenção de água, observados pelos valores de ME, superestimaram nos potenciais -6, -10, -33 e -100 kPa e subestimou nos potenciais -500 e -1500 kPa. O RMSE mostrou que a dispersão ocorrida em torno da reta 1:1 foi alta, principalmente nos potenciais matriciais -6, -10 e -33 kPa, originando R^2 muito baixos, onde as variações nos conteúdos de água retidos foram explicadas apenas em 47, 35 e 1%, respectivamente. Nos potenciais -100 e -500 kPa, os dados pouco foram subestimados ou

superestimados, a variação em torno da reta 1:1 também foi mais baixa que nos demais potenciais, apresentando R^2 em 46 e 72%, respectivamente.

As funções propostas por Nascimento et al. (2010) [20], provenientes de Tabuleiros costeiros, classificados como Latossolos Amarelos e Argissolos Amarelos, subestimaram os dados de retenção de água em todos os modelos testados, nos potenciais -33 e -1500 kPa, exceto em um modelo do potencial -1500 kPa, onde o modelo superestimou, observados pelos valores de ME. O RMSE variou de 0,0083 a 0,2202 o que representa a dispersão ocorrida em torno da reta 1:1, originando R^2 muito baixos, principalmente nos modelos referentes ao potencial -1500 kPa. As funções testadas para o potencial -33 kPa, apresentaram melhores resultados para o R^2 , sendo os modelos explicados entre 42 e 71%. Porém, nota-se que houve maior subestimação dos dados e maior variação em torno da reta 1:1.

Em relação aos modelos propostos por Souza et al. (2014) [21], para Argissolos Amarelos, de Tabuleiros Costeiros no Norte do Espírito Santo, os dados superestimaram ou subestimaram, a depender do modelo utilizado. Os modelos gerados (1) utilizaram dados texturais e estruturais, os modelos (2) utilizaram apenas dados estruturais. É possível notar que os modelos gerados com variáveis texturais e estruturais tenderam a superestimar os dados e os modelos gerados com variáveis apenas estruturais tenderam a subestimar os dados. A dispersão em torno da reta 1:1 também foi alta em ambos os modelos, demonstrada através dos valores elevados de RMSE, apresentando assim baixa capacidade dos modelos para predição do conteúdo de água retido nos potenciais matriciais estudados. O R^2 das funções geradas com variáveis estruturais e granulométricas apresentou variação de 48 a 71%, explicando melhor os modelos quando comparadas as funções geradas apenas com dados estruturais, onde os modelos foram explicados entre 15 a 58%. Ainda assim, esses modelos apresentam baixa capacidade preditiva para estimar conteúdo de água no solo.

De acordo com Silva e Armindo (2016) [10], FPT podem apresentar bom ajuste da curva de retenção de água, porém podem ocasionar baixa precisão e/ou exatidão em estimativas da umidade, quando aplicadas em regiões para as quais não foram desenvolvidas. Ademais, a confiabilidade de se utilizar FPT de diferentes regiões geográficas é muitas vezes limitada devido a fatores geológicos, hidrológicos, climáticos e de uso da terra [36].

4. CONCLUSÃO

A disponibilidade de água no Planossolo sob integração não apresentou variação significativa, após um período de quatro anos, entre tratamentos e profundidades.

A curva de retenção de água no solo pode ser estimada com razoável precisão, a partir das funções de pedotransferência geradas, utilizando como variáveis predictoras os teores de areia e argila, densidade do solo e de partículas, macroporosidade, microporosidade e porosidade total, grau de floculação e pH.

As funções de pedotransferência geradas e validadas podem ser aplicadas em simulações para a obtenção de pontos da curva de retenção, considerando os ajustes obtidos, para o Planossolo Háptico estudado, considerando a região geográfica, o clima, a hidrologia. A densidade do solo pode ser utilizada como variável preditiva na estimativa da retenção de água equivalente a capacidade de campo em solo de classificação franco-arenosa sob iLPF.

As funções de pedotransferência testadas da literatura apresentaram baixa eficiência preditiva e, por terem fatores diferentes da condição local, não se recomenda a sua utilização para obtenção da curva de retenção de água no solo no Planossolo Háptico em estudo.

5. AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de doutorado.

À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) e Empresa Paraibana de Pesquisa, Extensão Rural e Regularização Fundiária (EMPAER), pela disponibilidade de área para estudo e desenvolvimento da Tese.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Libardi PL. Dinâmica da água no solo. São Paulo (SP): EDUSP; 2005.
2. Oliveira LB, Ribeiro MR, Jacomine PKT, Rodrigues JJV, Marques FA. Funções de pedotransferência para predição da umidade retida a potenciais específicos em solos do Estado de Pernambuco. *Rev Bras Ciênc Solo*. 2002;26(2):315-23. doi: 10.1590/S0100-06832002000200004
3. Michelin CJ, Carlesso R, Oliveira ZB, Knies, Alberto E, Petry MT, et al. Funções de pedotransferência para estimativa da retenção de água em alguns solos do Rio Grande do Sul. *Rev Ciênc Rural*. 2010 Abr;40(4):848-53. doi: 10.1590/S0103-84782010005000055
4. Costa A, Albuquerque JA, Almeida JA, Costa A, Luciano RV. Pedotransfer functions to estimate retention and availability of water in soil soft estate of Santa Catarina, Brazil. *Rev Bras Ciênc Solo*. 2013 Jul/Aug;37(4):889-910. doi: 10.1590/S0100-06832013000400007
5. Santra P, Das BS. Pedotransfer functions for soil hydraulic properties developed from a hilly watershed of Eastern India. *Geoderma*. 2008 Ago;146(3-4):439-48. doi: 10.1016/j.geoderma.2008.06.019
6. Silva AP, Tormena CA, Fildalski J, Imhoff S. Funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração. *Rev Bras Ciênc Solo*. 2008;32(1):1-10. doi: 10.1590/S0100-06832008000100001
7. Bouma J. Using soil survey data for quantitative land evaluation. In: Stewart BA, editor. *Advances in soil science*. 9th ed. New York (US): Springer; 1989. p. 177-213.
8. Andrade FHN, Almeida CDGC, Almeida BG, Albuquerque Filho JAC, Mantovanelli BC, Araújo Filho JC. Atributos físico-hídricos do solo via Funções de Pedotransferência em solos dos Tabuleiros Costeiros de Pernambuco. *Rev Irriga*. 2020 Jan/Mar;25(1):69-86. doi: <https://doi.org/10.15809/irriga.2020v25n1p69-86>
9. Yao RJ, Yang JS, Wu DH, Li FR, Gao P, Wang XP. Evaluation of pedotransfer functions for estimating saturated hydraulic conductivity in coastal salt-affected mud farmland. *J Soils Sediments*. 2015 Apr;15:902-16. doi: 10.1007/s11368-014-1055-5
10. Silva AC, Armino RA. Importância das funções de pedotransferência no estudo das propriedades e funções hidráulicas dos solos do Brasil. *Multi-Science J*. 2016;1(5):31-7. doi: 10.33837/msj.v1i5.200
11. Gonçalo Filho F, Ferreira Neto M, Fernandes CS, Dias NS, Cunha RR, Mesquita FO. Efeitos do manejo sustentável da Caatinga sob os atributos físicos do solo. *Pesq Flor Bras*. 2018;38:1-5. doi: 10.4336/2018.pfb.38e201801581
12. Santos HG, Jacomine PKT, Anjos LHC, Oliveira VÁ, Lumbreiras JF, Coelho MR, et al. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 5ª ed. Brasília (DF): Embrapa; 2018.
13. Silva, PLF, Oliveira, FP, Amaral AJ, Martins AF, Pereira WE, Tavares DD, Nóbrega CC. Sistemas integrados de produção agropecuária: efeitos sobre a qualidade física de um Planossolo no semiárido brasileiro. *Ciencia del Suelo (Online)*, 2021;39(2):106-121.
14. Teixeira PC, Donagemma GK, Fontana A, Teixeira WG, editores. *Manual de Métodos de Análise de Solo*. 3ª ed rev. amp. Brasília (DF): Embrapa, 2017.
15. van Genuchten MTh. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci Soc Am J*. 1980 Sep/Oct;44(5):892-8. doi: 10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x
16. Dourado-Neto D, Nielsen DR, Hopmans JW, Reichardt K, Bacchi OOS. Software to model soil water retention curves (SWRC, version 2.00). *Sci Agric*. 2000 Jan/Mar;57(1). doi: 10.1590/S0103-90162000000100031
17. Mualem Y. Hydraulic conductivity of unsaturated soils: Prediction and formulas. In: Klute A, editor. *Methods of soil analysis: Part I. Physical and mineralogical methods*. Madison (US): American Society of Agronomy - Soil Science American Journal; 1986. Chapter 31, p. 799-823.
18. Klute A. Water retention: Laboratory methods. In: Klute A, editor. *Methods of soil analysis*. Madison (US): American Society of Agronomy; 1986. p. 635-62.
19. Reichert JM, Albuquerque JÁ, Kaiser DR, Reinert DJ, Urach FL, Carlesso R. Estimation of water retention and availability in soils of Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 2009 Nov/Dec;33(6):1547-60. doi: 10.1590/S0100-06832009000600004
20. Nascimento GB, Anjos LHC, Pereira MG, Fontana A, Santos HG. Funções de pedotransferência do conteúdo de água em Latossolos Amarelos e Argissolos Amarelos. *Rev Bras Ciênc Agr*. 2010;5(4):560-9. doi: 10.5039/agraria.v5i4a551
21. Souza JM, Bonomo R, Pires FR, Bonomo DZ. Funções de pedotransferência para retenção de água e condutividade hidráulica em solo submetido a subsolagem. *Rev Bras Ciênc Agr*. 2014;9(4):606-13. doi: 10.5039/agraria.v9i4a3732
22. Reynolds WD, Drury CF, Yang XM, Fox CA, Tan CS, Zhang TQ. Land management effects on the near-surface physical quality of a clay loam. *Soil Tillage Res*. 2007 Oct;96(1-2):316-30. doi: 10.1016/j.still.2007.07.003

23. Fidalski J, Tormena CA, Alves SJ, Auler PAM. Influência das frações de areia na retenção e disponibilidade de água em solos das Formações Caiuá e Paranavaí. *Rev Bras Ciênc Solo*. 2013;37(3):613-21. doi: 10.1590/S0100-06832013000300007
24. Sousa AR, Albuquerque SF, Lopes GMB, Silva AB, Nunes Filho J. Caracterização e interpretação de um Planossolo Háptico eutrófico do Agreste Pernambucano, Brasil. *An Acad Pernambucana Ciênc Agron*. 2013;10:271-9.
25. Williams J, Prebble RE, Williams WT, Hignett CT. The influence of texture, structure and clay mineralogy on the soil moisture characteristic. *Aust J Soil Res*. 1983;21:15-32. doi: 10.1071/SR9830015
26. Assad MLL, Sans LMA, Assad ED, Zullo Jr J. Relação entre água retida e conteúdo de areia total em solos brasileiros. *Rev Bras Agrometeorol*. 2001;9(3):588-96.
27. Libardi PL. Dinâmica da água no solo. São Paulo (SP): EDUSP; 2005.
28. Ghiberto PJ, Moraes SO. Comparação de métodos de determinação da condutividade hidráulica em um Latossolo Vermelho-Amarelo. *Rev Bras Ciênc Solo*. 2011 Jul/Aug;35(4):1177-88. doi: 10.1590/S0100-06832011000400011
29. Silva PLF, Oliveira FP, Amaral AJ, Pereira WE, Martins AF, Tavares DD. Distribuição de poros por tamanho e sua relação com os parâmetros de ajustes da curva de retenção de água no solo. *Rev Agro-Environm Sci*. 2020 out;6(1):e02011. doi: 10.36725/agries.v6i0.3588
30. Reichert JM, Albuquerque JA, Peraza JES, Costa A. Estimating water retention in availability in cultivated soils of southern Brazil. *Geoderma Reg*. 2020 jun;21(1):e00277. doi: 10.1016/j.geodrs.2020.e00277
31. Bortoluzzi EC, Garbozza L, Guareschi C, Rheinheimer DS. Efeito da calagem na relação entre solo e água. *Rev Bras Ciênc Solo*. 2008;32(esp):2621-8.
32. Souza PGC, Borges Júnior JCF, Viana JHM. Curva de retenção e disponibilidade total de água em Latossolos empregando funções de pedotransferência. *Rev Eng Agric*. 2017;25(5):417-27. doi: 10.13083/reveng.v25i5.813
33. Bruning J, Robaina AD, Peiter MX, Boscaini R, Conceição CG, Gollo EA. Estimativa da curva de retenção de água no solo por função de pedotransferência. *Rev Ciênc Agron*. 2019;28(1):97-110. doi: 10.32929/2446-8355.2019v28n1p97-110
34. Auler AC, Pires LF, Pineda MC. Influence of physical attributes and pedotransfer function for predicting water retention in management systems. *Rev bras eng agríc ambient*. 2017;21(11):746-51. doi: 10.1590/1807-1929/agriambi.v21n11p746-751
35. Klein VA, Baseggio M, Madaloso T, Marcolin CD. Textura do solo e a estimativa do teor de água no ponto de murcha permanente com psicrômetro. *Ciênc Rural*. 2010 jul;40(1):1550-6. doi: 10.1590/S0103-84782010005000110
36. Weynants M, Vereecken H, Javaux M. Revisiting Vereecken pedotransfer functions: Introducing a closed-form hydraulic model. *Vadose Zone J*. 2009 Feb;8(1):86-95. doi: 10.2136/vzj2008.0062
37. Tavanti RFR, Montanari R, Panosso AR, Freddi OS, Paz-González A. Pedotransfer function to stimate the soil structural “S” index ans spatial variability in an Oxisol within livestock farming system. *Eng Agríc*. 2020 Jan-Feb;40(1)34-44. doi: 10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v40n1p34-44/2020