Ajuste de equações de retenção de água em solos do Sul da Amazônia[1]

Gabriela Dias[2]; Wenceslau Geraldes Teixeira[3]; Fernando Igne Rocha[4]; Aline Pacobahyba de Oliveira[5], José Francisco Lumbreras[6], Ederson da Conceição Jesus[7]

[1] Trabalho executado com recursos do Projeto Monitoramento do distúrbio da microbiota de solos amazônicos durante a conversão da floresta a pasto e suas consequências sobre saúde animal (02.17.00.010.00.03.003). [2] Graduanda em Ciência Ambiental - UFF, Bolsista Pibic na Embrapa Solos, Rio de Janeiro - RJ. [3] Engenheiro Agrônomo, Doutor em Geoecologia, Pesquisador na Embrapa Solos - RJ. [4] Engenheiro Agrônomo, Doutor em Solos, Pós-doutorando na USDA-ARS, EUA. [5] Engenheira Agrônoma, Doutora em Solos, Pesquisadora na Embrapa Solos - RJ. [6] Engenheiro Agrônomo, Doutor em Solos, Pesquisador na Embrapa Solos - RJ. [7] Engenheiro Agrônomo, Doutor em Solos, Pesquisador na Embrapa Agrobiologia - RJ.

Resumo – A avaliação da curva característica de retenção de água de um solo fornece informações para a avaliação de sua aptidão agrícola, de risco climático e orienta o manejo mais adequado, assim como possibilita estudos de modelagem hidrológica, da produtividade de cultivos e em estudos geotécnicos e ecológicos de distribuição da vegetação. O objetivo deste estudo foi estimar os valores de água disponível e ajustar as curva de retenção de água de horizontes selecionados em áreas de pastagens e floresta sendo quatro sob Latossolos Amarelos e uma num Cambissolo Háplico localizadas no município de Manicoré e Lábrea no sul do estado do Amazonas. Os resultados mostraram que os solos apresentaram um bom ajuste para curvas unimodais para o Latossolo e Cambissolo e uma melhoria significativa no ajuste bimodal para ambos. A curva de retenção de água (CRA) dos solos estudados é melhor descrita pelo modelo bimodal, exceto os horizontes A1 (perfil P12), Ap, AB e BA (perfil P13) do Latossolo Amarelo, e o horizonte Bic2 (perfil P14) do Cambissolo Háplico. Os valores de AD variaram entre 1,0 e 0,2 mm/cm.

Palavras-Chave: Amazônia, Ajuste, Curva de retenção

Introdução

A avaliação da capacidade de retenção de água de um solo contribui com a avaliação de sua aptidão agrícola, de risco climático e orienta o manejo mais adequado; assim como possibilita estudos de modelagem hidrológica, da produtividade de cultivos e estudos geotécnicos e ecológicos de distribuição da biodiversidade da flora e fauna. Valores obtidos das umidades volumétricas de determinados solos na capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e das estimativas da água disponível (AD) são parâmetros essenciais no manejo da irrigação e no zoneamento agrícola de risco climático (ZARC) (Teixeira et al., 2021, Araújo et al., 2022). A disponibilidade de água no solo passível de ser absorvida pelas raízes plantas assim como os potenciais para estimativas da CC e PMP para diferentes espécies e solos são motivos de debate e interpretações (Bonfante; Bouma, 2015). Há muitos anos modelos matemáticos e técnicas de simulação são utilizados para descrever de forma dinâmica a natureza da água no sistema solo-planta. A capacidade de um solo em reter água e disponibilizá-la para as plantas é representada pela curva de retenção de água (CRA), a qual relaciona a fração volumétrica de água (θ) a uma dada tensão matricial (*h*) (Jorge, et al. 2010). Portanto, um aumento da tensão matricial significa uma redução da água presente no solo (Hillel, 1998).

Muitos modelos matemáticos foram elaborados para descrever a CRA. Contudo, o modelo proposto por van Genuchten (1980) continua sendo o mais utilizado, uma vez que ele consegue representar essa função para a maioria dos solos estudados. Entretanto, o modelo de van Genuchten não é capaz de se ajustar adequadamente a solos com distribuição bimodal de poros, estes solos se ajustam melhor a modelos bimodais como o proposto por Durner (1994). Apesar do conhecimento de que vários solos do Brasil apresentam destruição de poros bimodal estes modelos ainda são pouco utilizados para ajustes de solos do Brasil (Carducci et al. 2011, Teixeira et al. 2001). O objetivo deste trabalho foi ajustar e comparar os modelos unimodal (van Genuchten) e bimodal (Durner) que

descreve a retenção de água em função do potencial matricial (CRA) de cinco áreas com predomínio de Latossolo Amarelo e Cambissolo Háplico localizadas no município de Manicoré - Amazonas.

Material e Métodos

As áreas amostradas foram nas Fazenda Santa Helena (P10 e P11), Fazenda Santa Luzia (P12 e P13) e Fazenda Laranja Doce (P14 e P15). Detalhes e caracterização dos perfis e áreas amostrais estão disponíveis em Rocha (2022), localizadas nos municípios de Manicoré e Lábrea no Sul do estado do Amazonas.Os perfis de solos descritos e amostrados para caracterização fisico - química e avaliação da retenção de água em diferentes potenciais, foram de duas classes de solo: uma área com ocorrência de Latossolo Amarelo (dystrophic Latosol) sob pastagem com predomínio da espécie capim mombaça (*Megathyrsus maximus*) - perfis P11 e P13 - e brachiaria (*Urochloa brizantha*) - perfil P15 - e uma área sob floresta primária - perfis P10 e P12. Foi também amostrada uma área de floresta primária com predomínio de Cambissolo Háplico (haplic Cambisol) - perfil P14. Foram coletadas amostras de solos indeformadas em triplicata, em quatro horizontes dos perfis P10 a P13 e três horizontes dos perfis P14 e P15. As análises de retenção de água foram realizadas no Laboratório de Física do Solo da Embrapa Amazônia Ocidental, em Manaus. As umidades volumétricas do solo foram determinadas por gravimetria após atingir o equilíbrio nas tensões matriciais de 0; 1; 3; 6; 10 kPa em mesa de tensão. Posteriormente as amostras foram submetidas às tensões de 33; 110 e 500 kPa e 1500 kPa em câmeras de Richard, segundo os procedimentos descritos em Teixeira e Bhering (2017). Os dados foram convertidos utilizando a densidade do solo para valores de umidade com base volumétrica. Calculou-se a água disponível (AD) no solo subtraindo o valor da umidade na capacidade de campo (10 kPa) da umidade no ponto de murcha permanente (1500 kPa) para cada área com diferentes solos nos diferentes horizontes. Os pares de umidade (volumétrica – $m^3\ m^{-3}$) e tensões de equilíbrio foram ajustados às equações de van Genuchten (1980) com a restrição de Mualem (1976), descrita abaixo:

$$\theta(h)=[1+(\alpha|h|)^n]^m, m=1-1/\mathrm{n}$$

Em que Θs e Θr são, respectivamente, o volume de água na saturação e residual (m^3m^{-3}); *h* é a tensão matricial da água no solo (cm de água – em módulo); α, *n* e *m* são parâmetros de empíricos do modelo. Foram também ajustados para a equação bimodal de Durner (1994) :

$$\theta(h) = \sum_{i=1}^{k} w_i\left[1+(\alpha|h|)^{ni}\right]^{-m},$$
$$m=1-1/\mathrm{n}$$

Os parâmetros da equação de Durner são como definidos previamente, sendo *k* o número de sub curvas (modas) e w_i é um fator de peso dado para cada moda, satisfazendo $0 < w_i < 1$. Para o ajuste de ambas as equações, denominadas de curva de retenção de água (CRA) foi utilizado o software HYPROP (Meter, 2015). Os dados de tensão potencial matricial são apresentados e plotados em $\log_{10}$ cmH_20, denominado de unidade pF. Foi utilizado como critério para qualidade e comparação dos ajustes das equações uni (VG) e bimodal (Durner) os menores valores da raiz do erro quadrático médio (RMSE - Root Mean Square Error em inglês).

Resultados e Discussão

Os conteúdos de água disponível (AD) foram classificados (Teixeira et al., 2002) entre valores muito altos para todos os horizontes do Latossolo Amarelo (perfis P10 e P11), valores muito baixos

nos horizontes A2, A3 e Bw1 do Latossolo Amarelo (perfil P12), valores muito altos para os horizontes superficiais do Latossolo Amarelo (perfis P13 e P15) e valor alto somente no horizonte A do Cambissolo Háplico (perfil P14). (Tabela 1).

Tabela 1. Umidade volumétrica [linhas] retidas em amostras do Latossolo Amarelo e Cambissolo Háplico após serem submetidas a diferentes tensões.

Perfil	Sistema	Profundidade		pF 0,0	pF 1,0	pF 1,5	pF 1,8	pF 2,0	pF 2,5	pF 3,0	p.F 3.7	pF 4,2	AD
		cm		θ [m³ m-3]									
P10	Floresta	0-8	Média	0,47	0,393	0,301	0,220	0,146	0,121	0,109	0,103	0,055	0,091
			Desvio Padrão	0,05	0,02	0,04	0,04	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	
		8-19	Média	0,382	0,349	0,332	0,253	0,162	0,138	0,133	0,130	0,078	0,084
			Desvio Padrão	0,03	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	
		19-35	Média	0,344	0,325	0,307	0,254	0,171	0,157	0,143	0,136	0,101	0,070
			Desvio Padrão	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	
		85-150*	Média	0,376	0,348	0,295	0,228	0,162	0,142	0,136	0,133	0,113	0,050
			Desvio Padrão	0,01	0,01	0,02	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	
P11	Pasto	0-6	Média	0,508	0,451	0,368	0,271	0,167	0,147	0,135	0,123	0,082	0,085
			Desvio Padrão	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	
		6-22	Média	0,433	0,380	0,359	0,308	0,207	0,187	0,182	0,176	0,127	0,080
			Desvio Padrão	0,06	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	
		22-38	Média	0,402	0,383	0,356	0,308	0,221	0,209	0,204	0,200	0,150	0,072
			Desvio Padrão	0,00	0,01	0,02	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	
		68-102	Média	0,395	0,371	0,352	0,313	0,245	0,224	0,218	0,213	0,168	0,077
			Desvio Padrão	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
P12	Floresta	5-13	Média	0,549	0,325	0,232	0,204	0,128	0,124	0,123	0,120	0,045	0,083
			Desvio Padrão	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	
		13-28	Média	0,486	0,332	0,252	0,220	0,112	0,111	0,110	0,108	0,093	0,019
			Desvio Padrão	0,01	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
		28-52	Média	0,425	0,364	0,285	0,251	0,156	0,139	0,128	0,123	0,131	0,025
			Desvio Padrão	0,05	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01	0,00	0,00	0,02	
		89-127	Média	0,349	0,328	0,288	0,245	0,134	0,131	0,126	0,121	0,120	0,014
			Desvio Padrão	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	

Continua...

Tabela 1. Continuação.

Perfil	Sistema	Profundidade		pF 0,0	pF 1,0	pF 1,5	pF 1,8	pF 2,0	pF 2,5	pF 3,0	p.F 3.7	pF 4,2	AD
		cm		θ [m³ m-3]									
P13	Pasto	0-9	Média	0,473	0,378	0,294	0,251	0,189	0,174	0,165	0,163	0,104	0,085
			Desvio Padrão	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	
		9-22	Média	0,455	0,413	0,364	0,320	0,266	0,245	0,234	0,233	0,163	0,103
			Desvio Padrão	0,03	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	
		22-47	Média	0,446	0,397	0,354	0,319	0,270	0,265	0,252	0,249	0,204	0,066
			Desvio Padrão	0,02	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	
		100-150*	Média	0,408	0,370	0,306	0,261	0,145	0,142	0,132	0,128	0,120	0,025
			Desvio Padrão	0,02	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	
P14	Floresta	0-5	Média	0,787	0,318	0,282	0,261	0,197	0,149	0,146	0,133	0,120	0,077
			Desvio Padrão	0,62	0,03	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	
		5-14	Média	0,336	0,272	0,247	0,225	0,158	0,140	0,135	0,131	0,130	0,028
			Desvio Padrão	0,03	0,03	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	
		49-68	Média	0,332	0,259	0,229	0,211	0,167	0,162	0,158	0,151	0,150	0,017
			Desvio Padrão	0,02	0,02	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
P15	Pasto	0-11	Média	0,336	0,318	0,288	0,254	0,161	0,144	0,137	0,118	0,106	0,055
			Desvio Padrão	0,03	0,03	0,04	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	
		11-22	Média	0,324	0,299	0,277	0,254	0,203	0,188	0,186	0,177	0,159	0,044
			Desvio Padrão	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	
		48-84	Média	0,326	0,288	0,241	0,206	0,150	0,146	0,145	0,139	0,125	0,025
			Desvio Padrão	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	

Os coeficientes das equações de van Genuchten e Durner (Tabela 2) mostram que a retenção da água em diferentes potenciais, para maioria dos horizontes estudados é melhor descrita pelo modelo bimodal, exceto os horizontes A1 (perfil P12), Ap, AB e BA (perfil P13) do Latossolo Amarelo, e o horizonte Bic2 (perfil P14) do Cambissolo Háplico, visto que não há diferença significativa entre os valores do RMSE no modelo unimodal e bimodal. As CRA de todos os solos e seus horizontes são apresentados nas Figuras 1, 2 e 3. A seleção de modelos que apresentam uma melhor descrição da relação entre a umidade e potencial próximo a saturação (potenciais menores que pF 2) é fundamental para estudos de simulação de fluxos em áreas de alta pluviosidade como na Amazônia, pois estas incertezas na descrição próxima da saturação do solo se refletem de forma exponencial na equação que descreve a condutividade hidráulica em função do potencial (Durner, 1994, van Genuchten, 1980).

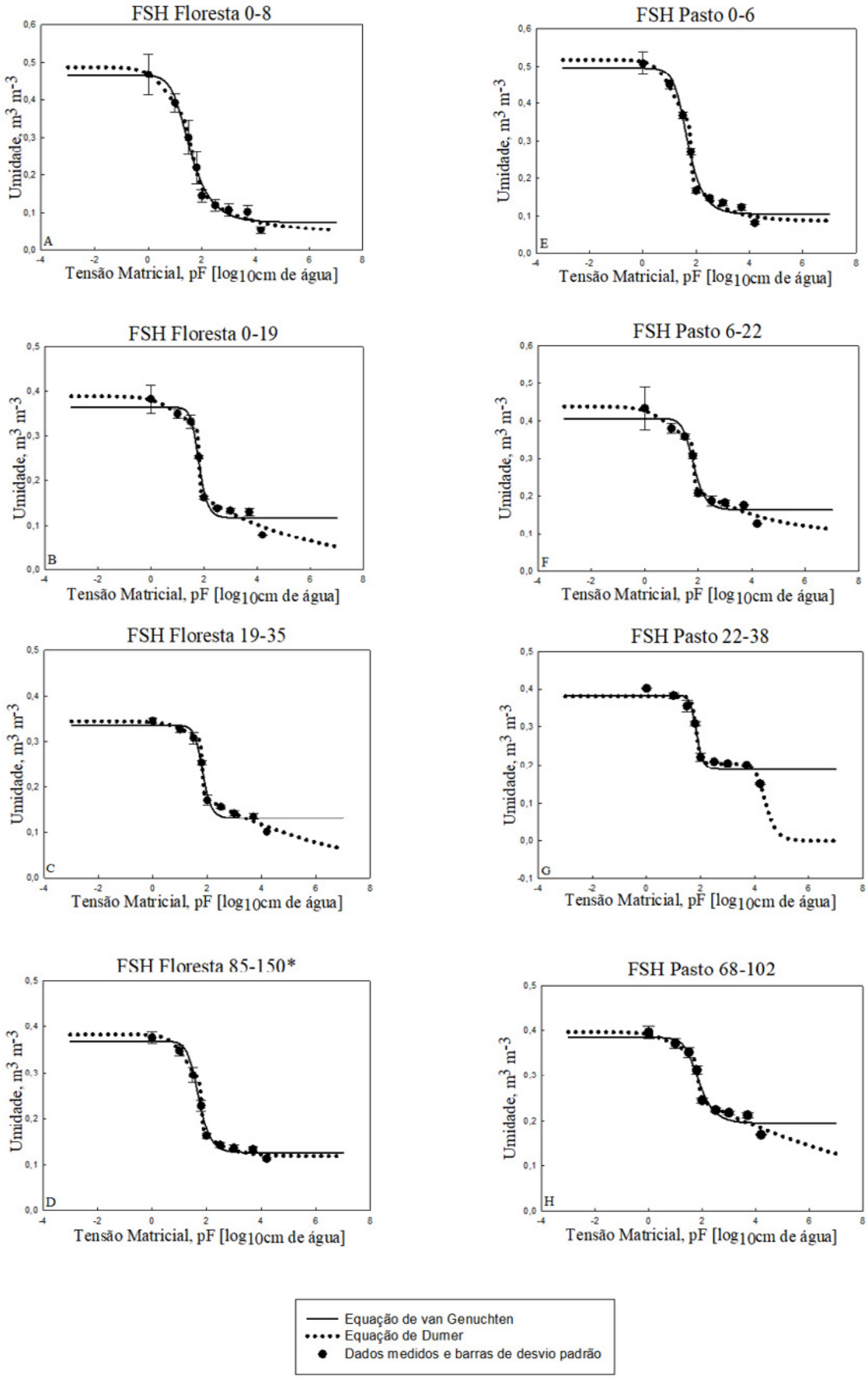

Figura 1. Funções de retenção da água ajustadas para amostras de Latossolo Amarelo (Floresta) nos horizontes A, AB, BA e Bw3 e para amostras de Latossolo Amarelo (Pasto) nos horizontes Ap, AB, BA e Bw2 para os modelos unimodal (van Genuchten, 1980) e bimodal (Durner, 1994).

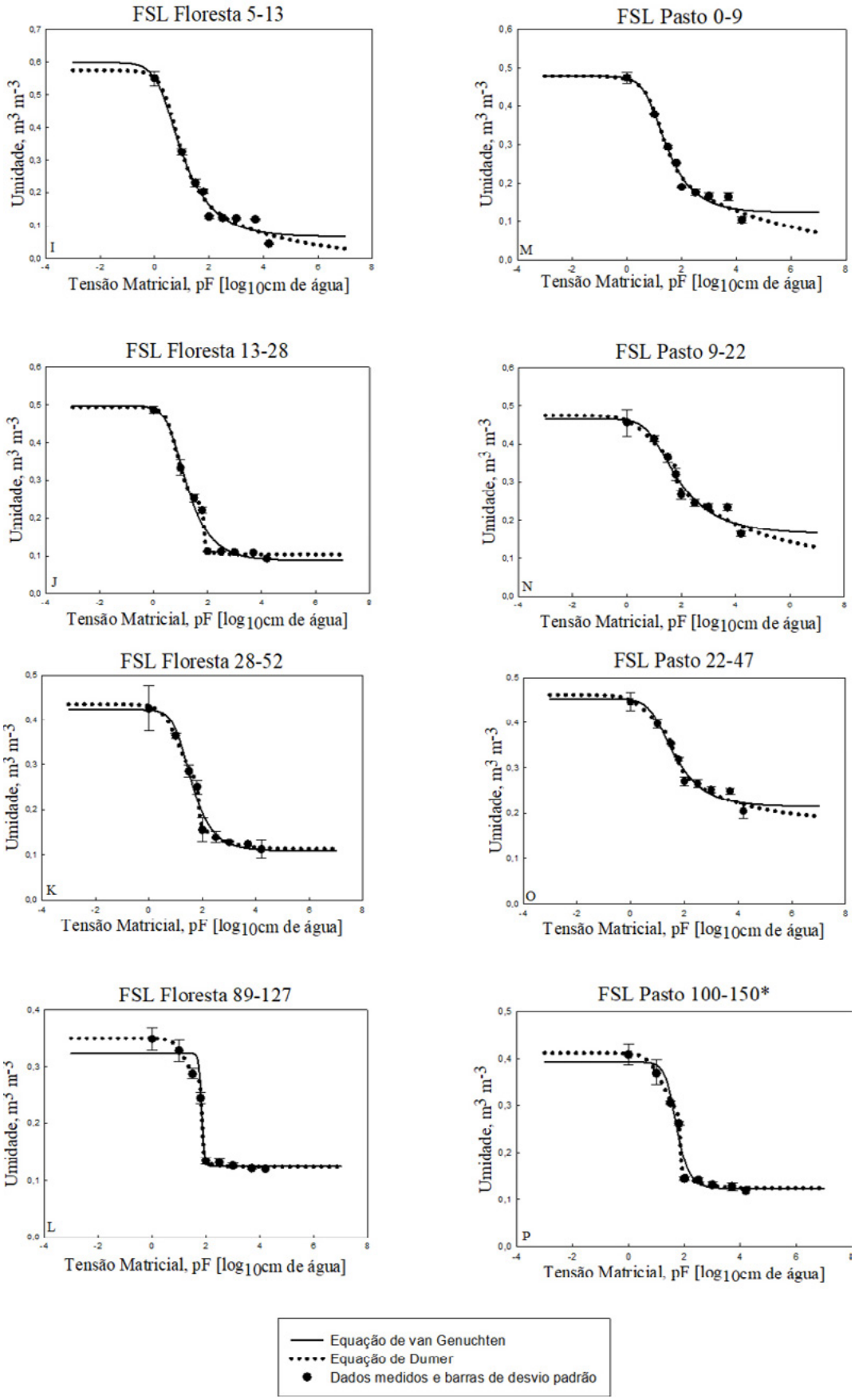

Figura 2. Funções de retenção da água ajustadas para amostras de Latossolo Amarelo (Floresta) nos horizontes A1, A2, A3 e Bw1 e para amostras de Latossolo Amarelo (Pasto) nos horizontes Ap, AB, BA e Bw3 para os modelos unimodal (van Genuchten, 1980) e bimodal (Durner, 1994).

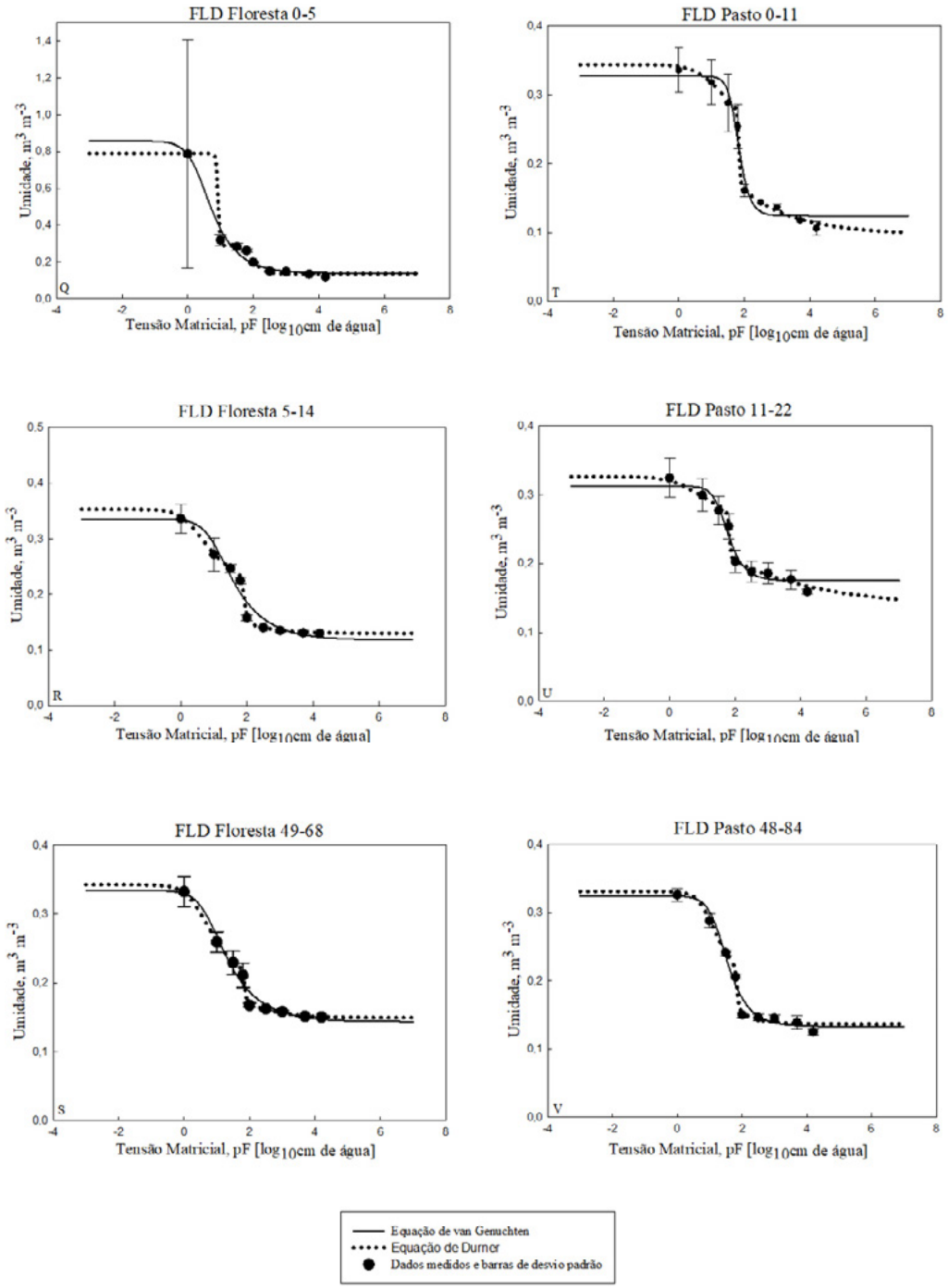

Figura 3. Funções de retenção da água ajustadas para amostras de Latossolo Amarelo (Floresta) nos horizontes A, BA1 e Bic2 e para amostras de Latossolo Amarelo (Pasto) nos horizontes Ap, BA1 e Bw1 para os modelos unimodal (van Genuchten, 1980) e bimodal (Durner, 1994).

Tabela 2. Parâmetros das funções de retenção de umidade para diferentes profundidades do Latossolo Amarelo da Fazenda Santa Helena, no município de Manicoré - AM.

Parâmetros	Fazenda Santa Helena							
	Floresta				Pasto			
	0-8	8-19	19-35	85-150*	0-6	6-22	22-38	68-102
	Função Unimodal - van Genuchten							
θs (m³ m-3)	0,466	0,364	0,334	0,368	0,495	0,407	0,384	0,384
θr (m³ m-3)	0,076	0,117	0,132	0,126	0,106	0,163	0,188	0,195
α (cm-1)	0,068	0,019	0,018	0,027	0,036	0,021	0,016	0,023
n	1,694	3,153	3,214	2,484	2,039	2,489	4,100	2,030
RMSE	0,015	0,018	0,015	0,011	0,020	0,021	0,018	0,014
	Função Bimodal - van Genuchten - Durner							
θs (m³ m-3)	0,489	0,388	0,343	0,383	0,517	0,438	0,381	0,396
θr (m³ m-3)	0,051	0,000*	0,000*	0,118	0,087	0,092	0,000*	0,000*
α1 (cm-1)	0,5*	0,494	0,149	0,016	0,146	0,015	0,015	0,467
n1	1,265	1,099	1,087	15,000	1,419	15,000	5,648	1,057
W1	0,616	0,613	0,643	0,392	0,669	0,353	0,466	0,766
α2 (cm-1)	0,025	0,016	0,015	0,100	0,016	0,5*	0,000	0,015
n2	3,241	15,000	15,000	1,550	15,000	1,155	2,663	7,472
W2	0,384	0,387	0,357	0,608	0,331	0,647	0,534	0,234
RMSE	0,010	0,009	0,007	0,006	0,010	0,010	0,009	0,007

Tabela 3. Parâmetros das funções de retenção de umidade para diferentes profundidades do Latossolo Amarelo da Fazenda Santa Luzia, no município de Manicoré - AM.

Parâmetros	Fazenda Santa Luzia							
	Floresta				Pasto			
	5-13	13-28	28-52	89-127	0-9	9-22	22-47	100-150*
	Função Unimodal - van Genuchten							
θs (m³ m-3)	0,599	0,498	0,423	0,324	0,476	0,465	0,453	0,393
θr (m³ m-3)	0,066	0,088	0,108	0,125	0,123	0,164	0,214	0,124
α (cm-1)	0,5*	0,176	0,063	0,015	0,130	0,112	0,106	0,027
n	1,435	1,602	1,704	8,795	1,516	1,341	1,462	2,457
RMSE	0,022	0,023	0,016	0,015	0,017	0,017	0,014	0,018
	Função Bimodal - van Genuchten - Durner							
θs (m³ m-3)	0,576	0,494	0,434	0,350	0,477	0,474	0,461	0,411
θr (m³ m-3)	0,000*	0,104	0,113	0,124	0,000*	0,092	0,183	0,125
α1 (cm-1)	0,5*	0,014	0,145	0,014	0,088	0,5*	0,025	0,096
n1	1,132	15,000	1,581	15,000	1,950	1,010	3,452	1,795
W1	0,408	1,000	0,738	0,616	0,443	0,852	0,239	0,574
α2 (cm-1)	0,289	0,188	0,014	0,081	0,5*	0,000	0,5*	0,014
n2	1,790	2,239	15,000	2,151	1,087	15,000	1,198	15,000
W2	0,592	0,000	0,262	0,384	0,557	0,148	0,761	0,426
RMSE	0,021	0,006	0,003	0,003	0,016	0,014	0,012	0,003

Tabela 4. Parâmetros das funções de retenção de umidade para diferentes profundidades do Latossolo Amarelo e Cambissolo Háplico da Fazenda Laranja Doce, no município de Manicoré - AM.

Parâmetros	Fazenda Laranja Doce					
	Floresta			Pasto		
	0-5	5-14	49-68	0-11	11-22	48-84
	Função Unimodal - van Genuchten					
θs (m³ m-3)	0,857	0,336	0,334	0,327	0,312	0,325
θr (m³ m-3)	0,137	0,118	0,143	0,124	0,175	0,133
α (cm-1)	0,5*	0,100	0,189	0,018	0,025	0,055
n	1,661	1,502	1,502	2,989	2,243	1,880
RMSE	0,029	0,017	0,009	0,013	0,010	0,011
	Função Bimodal - van Genuchten - Durner					
θs (m³ m-3)	0,790	0,353	0,334	0,344	0,326	0,331
θr (m³ m-3)	0,135	0,130	0,143	0,098	0,136	0,137
α1 (cm-1)	0,012	0,012	0,189	0,015	0,015	0,014
n1	3,166	9,336	1,502	15,000	15,000	15,000
W1	0,234	0,378	1,000	0,446	0,353	0,311
α2 (cm-1)	0,120	0,5*	0,326	0,154	0,5*	0,112
n2	14,998	1,510	1,018	1,275	1,152	1,845
W2	0,766	0,622	0,000	0,554	0,647	0,689
RMSE	0,008	0,002	0,009	0,004	0,004	0,004

Conclusões

Após o estudo concluímos que os valores de água disponível (AD) variaram entre 1,0 e 0,2 mm/cm..

Tanto o Latossolo quanto o Cambissolo apresentam um bom ajuste para curvas unimodais, ainda que haja uma melhoria significativa no ajuste bimodal para ambos.

Portanto, a curva de retenção de água (CRA) dos solos estudados é melhor descrita pelo modelo bimodal, exceto os horizontes A1 (perfil P12), Ap, AB e BA (perfil P13) do Latossolo Amarelo, e o horizonte Bic2 (perfil P14) do Cambissolo Háplico.

Agradecimentos

A CAPES, pela concessão da bolsa PIBIC à primeira autora. Ao orientador Wenceslau Teixeira e a todos os integrantes do Laboratório de Avaliação e Modelagem da Água no Solo (LAMAS), pelo apoio e ensinamentos durante a pesquisa.

Referências

BONFANTE, A.; BOUMA. J. The role of soil series in quantitative Land Evaluation when expressing effects of climate change and crop breeding on future land use. Geoderma. 259-260, 2015. p. 187-195.

CARDUCCI, C. E. OLIVEIRA, G. C. SEVERIANO, E. C. ZEVIANI, W. M. Modelagem da curva de retenção de água de Latossolos utilizando a equação duplo van Genuchten. R. Bras. Ci. Solo, 35:77-86, 2011.

DURNER W. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. Water Resources Research. 30: 211-223, 1994.

HILLEL, 1998.

JORGE, Ricardo Falqueto; CORÁ, José Eduardo; BARBOSA, José Carlos. Número mínimo de tensões para determinação da curva característica de retenção de água de um Latossolo Vermelho Eutrófico sob sistema de semeadura direta. Revista Brasileira de Ciência do solo, v. 34, p. 1831-1840, 2010.

METER, 2015. Operation Manual HYPROP 2, METER Group AG, Munich, Germany. http://library.metergroup.com/Manuals/18263_HYPROP_Manual_Web.pdf.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Res. Res., 12;513-522, 1976.

Rocha, F. I., Ribeiro, T. G., Fontes, M. A., Schwab, S., Coelho, M. R. R., Lumbreras, J. F., ... & Jesus, E. D. C. Land-Use System and Forest Floor Explain Prokaryotic Metacommunity Structuring and Spatial Turnover in Amazonian Forest-to-Pasture Conversion Areas. Frontiers in Microbiology, v. 12, p. 909, 2021.

TEIXEIRA, Wenceslau Geraldes et al. Predição da água disponível no solo em função da granulometria para uso nas análises de risco no zoneamento agrícola de risco climático. Rio de Janeiro: Embrapa Solos; 2021. Boletim técnico, v. 272, 2021.

TEIXEIRA, W. G.; BHERING, S. B. Retenção de água no solo pelos métodos da mesa de tensão e da câmara de Richards. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (Ed.). Manual de métodos de análise de solo. 3ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 2017, p. 34-46.

TEIXEIRA, W. G. Land use systems effects on soil physical and hydraulic properties of a clayey Ferralsol in the Central Amazon. Bayreuther Bodenkudliche Berichte. Bayreuth, v.72, 1-255 p, 2001.

VAN GENUCHTEN, M. TH. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal. 44: 892-898, 1980.