



Estimativa da umidade do solo no ponto de murcha permanente para solos do sul do Mato Grosso do Sul

Letícia Guimarães Pimentel^{1(*)}, Wenceslau Geraldes Teixeira², Silvio Barge Bhering² e Luís Carlos Hernani²

¹Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rua São Francisco Xavier, 524, CEP 20550-900 Rio de Janeiro, RJ.
E-mail: leticia.ambient@gmail.com

²Embrapa Solos. Rua Jardim Botânico, 1024, CEP 22460-000 Rio de Janeiro, RJ.

E-mails: wenceslau.teixeira@embrapa.br, silvio.bhering@embrapa.br e luis.hernani@embrapa.br

(*) Autor para correspondência.

INFORMAÇÕES

História do artigo:

Recebido em 17 de abril de 2024

Aceito em 9 de setembro de 2024

Termos para indexação:

ponto de murcha permanente

função de pedotransferência

hierarquia

grupamento textural

classe de solo

RESUMO

O estudo visa avaliar a confiabilidade de funções de pedotransferência (PTFs) para estimar a umidade do solo no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) em solos do sul do Mato Grosso do Sul, num sistema hierárquico, utilizando valores de θ_{PMP} em função do grupamento textural e da classe de solo. Coletou-se dados de θ_{PMP} , granulometria, densidade do solo e teor de matéria orgânica de 30 amostras de solos. Fez-se uma análise gráfica em box-plot da relação entre θ_{PMP} e os grupamentos texturais e obteve-se as médias, medianas e intervalos de confiança para valores de θ_{PMP} estimados para as classes de solos obtidos em estudos de outras regiões do Brasil. A confiabilidade das PTFs foi avaliada por meio de estatísticas como RMSE e R^2 e análises gráficas de dispersão de resíduos versus valores preditos e gráficos de correlação 1:1 entre dados preditos e observados de θ_{PMP} . Recomenda-se o uso dos valores $0,043 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ para textura arenosa, $0,143 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ para textura média, $0,278 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ para textura argilosa e $0,296 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ para textura muito argilosa, quando se conhece apenas o grupamento textural. A PTF- θ_{PMP} de Oliveira et al. (2002) é a que apresenta a melhor confiabilidade, sendo a mais indicada para estimar θ_{PMP} para os solos das bacias dos rios Ivinhema, Amambai e Iguatemi.

© 2024 SBAgro. Todos os direitos reservados.

Introdução

A umidade do solo no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), ou limite inferior de água disponível, desempenha um papel fundamental na determinação do volume e da disponibilidade de água no solo para as plantas. O θ_{PMP} representa o valor da umidade do solo no qual a água, mesmo presente, não estará mais disponível para as plantas. O conteúdo de água disponível no solo (AD) é, assim, calcu-

lado pela subtração dos valores da umidade na Capacidade de Campo (θ_{CC}) e no θ_{PMP} (Teixeira et al., 2021; Veihmeyer & Hendrickson, 1949), sendo que a θ_{CC} é a umidade do solo na qual, após a saturação, a drenagem interna praticamente cessa (Reichardt & Timm, 2004).

Segundo Wiecheteck et al. (2020), a partir de estudos pioneiros como de Briggs & Shantz (1911), Veihmeyer & Hendrickson (1928) e Richards & Weaver (1943), concluiu-se que diferentes espécies de plantas murcham de forma

permanente quando o potencial matricial atinge -1500 kPa, independentemente da textura do solo.

Várias técnicas e métodos de medição da θ_{PMP} foram desenvolvidos ao longo dos anos, sendo os indiretos os mais comuns, dentre esses ressaltam-se o da câmara de pressão de Richards (Teixeira et al. 2017), a psicrometria do ponto de orvalho (Klein, 2017; Maestá et al., 2019; Teixeira, et al., 2020) e o método da centrífuga (Sá & Viana, 2017).

A θ_{PMP} também pode ser estimada por funções matemáticas, chamadas de Funções de Pedotransferência (PTF). O termo PTF do inglês *PedoTransferFunction* foi introduzido por Bouma (1989) com o significado de “transformar dados que possuímos em dados que necessitamos”, ou seja, são funções usadas para estimar características do solo de difícil determinação a partir de outras facilmente obtidas.

Dentre as PTFs que permitem estimar o θ_{PMP} de solos do Brasil tem-se as propostas por Tomasella & Hodnett (1998), Tomasella et al. (2000, 2003), Tormena & da Silva (2002), de Mello et al. (2005), Fidalski & Tormena (2007), da Silva et al. (2008), Fiorin (2008), Barros et al. (2013), Medrado & Lima (2014) Barros & Jong van Lier (2014); Ottoni et al., (2018).

PTFs para estimar θ_{CC} , θ_{PMP} e AD foram desenvolvidas por Van den Berg et al. (1997) para Latossolos e outros solos com argilas de baixa atividade para dez países, incluindo solos brasileiros. Nascimento et al. (2010) também

desenvolveram PTFs para estimar θ_{CC} e θ_{PMP} específicos para classes de solos, como Latossolos Amarelos e Argissolos Amarelos. Tomasella & Hodnett (1998) desenvolveram equações para estimar o conteúdo de água em potenciais matriciais selecionados como a θ_{CC} e o θ_{PMP} para um conjunto de dados de solos amazônicos. PTFs para estimar o conteúdo de água nos potenciais de -33 e -1500 kPa e AD foram elaborados por Oliveira et al. (2002) para solos de Pernambuco. Estudos como os de Giarola et al. (2002), Urach (2007) e Reichert et al. (2009) desenvolveram PTFs para estimar θ_{CC} e θ_{PMP} para solos do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina.

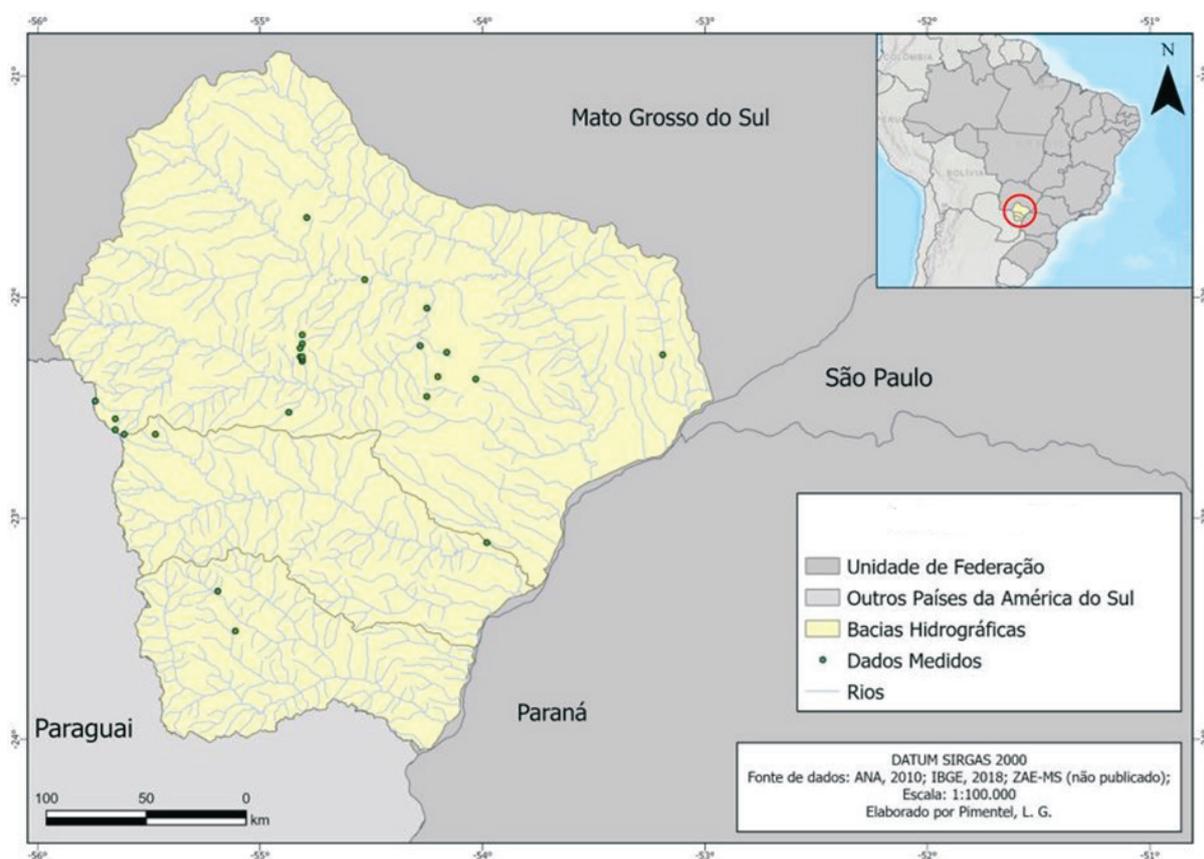
O objetivo deste estudo é avaliar a confiabilidade e indicar funções de pedotransferência (PTFs) num sistema hierárquico, para estimar a umidade volumétrica do solo no ponto de murcha permanente a -1.500 kPa (θ_{PMP}) para os solos predominantes das bacias dos rios Ivinhema, Amambai e Iguatemi, no Mato Grosso do Sul.

Material e métodos

Área de Estudo

A área de estudo se concentra nas bacias dos rios Ivinhema, Amambai e Iguatemi (no lado brasileiro), que se estendem pelo estado do Mato Grosso do Sul (Figura 1).

Figura 1. Mapa de localização das bacias dos rios Ivinhema, Amambai e Iguatemi, mostrando locais dos dados observados do BD-MS e os rios da região.



Fonte: ANA, 2010 e IBGE, 2021 e 2023, adaptado por Pimentel, L. G.

Juntas, essas bacias abrangem uma área considerável de aproximadamente 64 mil km², englobando 37 municípios.

Conforme a classificação de Köppen, o clima na área de estudo é classificado como subtipo Cwa, caracterizado como clima mesotérmico úmido, verões quentes e inverno seco. A temperatura média anual é de 23,3 °C, com chuvas concentradas no período de verão entre 1.000 mm e 2.033 mm (Fietz et al., 2024).

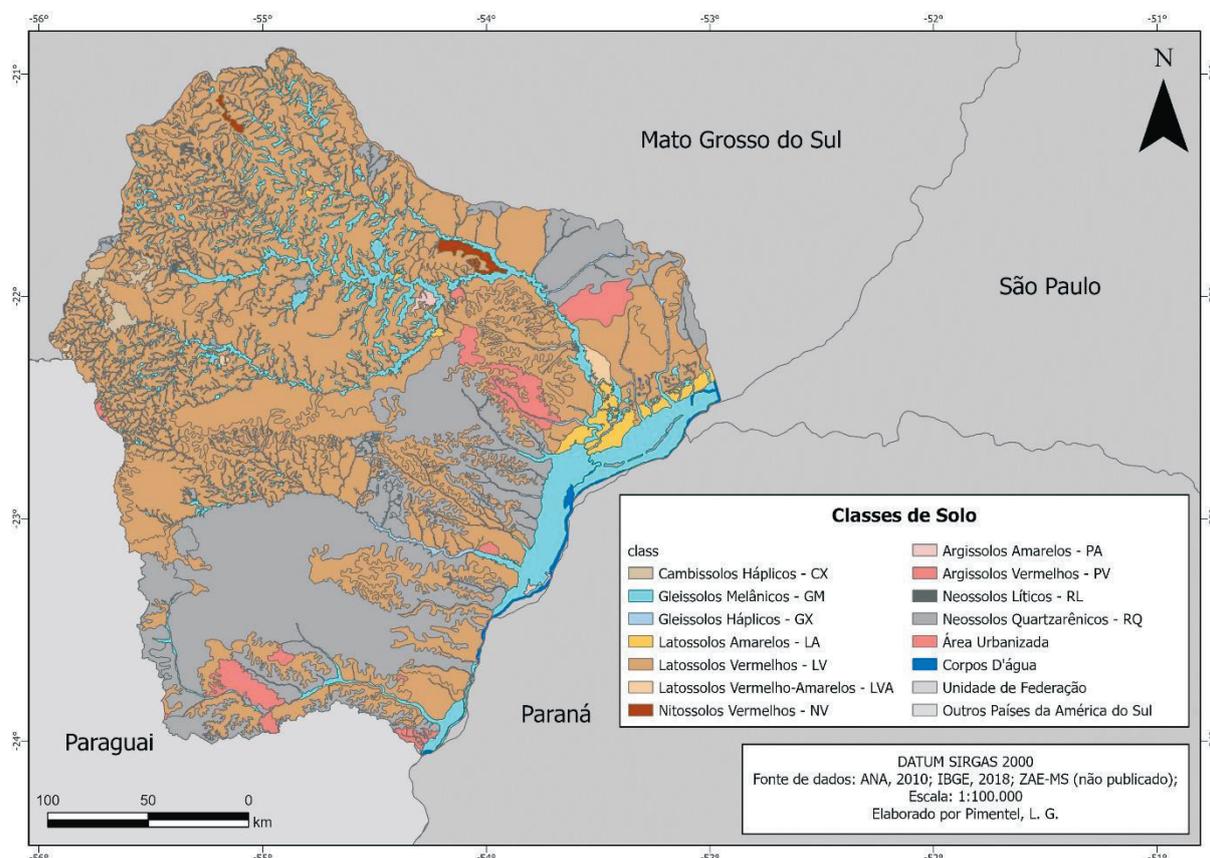
Os solos das bacias hidrográficas neste estudo estão passando por um processo de mapeamento abrangente. Com base em dados preliminares do Projeto Zoneamento Agroecológico do Mato Grosso do Sul (ZAE-MS), foi elaborada uma estimativa inicial das classes pedológicas predominantes na região (Figura 2).

Com este mapa preliminar, as áreas de cada classe taxonômica foram estimadas até o segundo nível categórico, em conjunto com o agrupamento textural. As áreas de cada classe e agrupamento textural foram calculadas em quilômetros quadrados e em porcentagem da área total de estudo.

A estimativa das áreas ocupadas pelas classes de solos foi realizada com uso os dados da legenda do mapa e a porcentagem de ocorrência em relação à área total da região de estudo. As áreas em quilômetros quadrados que cada classe textural ocupa também foram estimadas e compiladas.

Seleção e Descrição de Dados

Figura 2. Mapa sinótico de classes de solo das bacias dos rios Ivinhema, Amambai e Iguatemi.



Fonte: ANA, 2010; IBGE, 2018; ZAE-MS (não publicado); adaptado por Pimentel, L. G.

Dados da umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) dos solos (potencial de -1.500 kPa) na área de estudo foram obtidos em trabalhos publicados e organizados num banco de dados (BD-MS_PMP) totalizando 30 avaliações de θ_{PMP} (Fietz, 1998, Urchei, 2001; Scorza & Silva, 2006). Concomitantemente informações dos teores de argila, silte, areia total, matéria orgânica (MO) e da densidade do solo foram anotados. Também foram descritas informações sobre a microbacia, município, coordenadas (Lat - Long - Datum WGS84), elevação (m), classe de solo, classe textural e sistema de uso da terra do local de coleta de amostras. Os dados de classe de solo e de classe textural foram harmonizados conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (dos Santos et al., 2018) e os sistemas de uso da terra pela legenda proposta na Coleção 7 do MapBiomias (2023).

Sistema hierárquico para estimativa da umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP})

Umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) (- 1500 kPa) para agrupamentos texturais

Como o número de amostras para a avaliação da confiabilidade das estimativas de θ_{PMP} para a região é restrito e não abrange algumas das principais classes de solo e agrupamento textural, inicialmente fez-se uma análise grá-

fica em box-plot da relação entre a umidade no ponto de murcha permanente e os grupamentos texturais de 1.538 amostras de solos representativas da área de estudo, retiradas dos bancos de dados de Ottoni et al. (2018) e Fontana et al. (2023).

Umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) (- 1500 kPa) para classes de solos e grupamentos texturais

Para ampliar a análise da estimativa de θ_{PMP} somente por grupamento textural, foram calculadas as médias, medianas e intervalos de confiança (IC) dos valores estimados de θ_{PMP} para cada grupamento textural dentro de classe de solo. Esses valores foram obtidos dos mesmos dados utilizados para os grupamentos texturais (OTTONI et al., 2018; FONTANA et al., 2024).

Umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) (- 1500 kPa) utilizando parâmetros preditores

Foram obtidas estimativas dos valores θ_{PMP} por onze equações de PTFs- θ_{PMP} que foram calibradas para solos do Brasil (Tabela 1). Como preditores foram utilizados dados de areia, silte e argila e densidade do solo. A PTF- θ_{PMP} de Reichert et al. (2009) utiliza também o teor de MO como uma das variáveis predictoras. A MO (%) foi estimada a partir da equação de Bemelen (Teixeira et al., 2017), MO: CO (%) $\times 1,724$, onde CO (%) é o teor, em %, de carbono orgânico. Análises entre teor de argila (Figura 4) e teor de carbono orgânico (Figura 5) versus os dados observados de θ_{PMP} , foram geradas para as 30 avaliações de θ_{PMP} presentes do BD-MS_PMP.

As PTFs de Rosseti et al. (2022), Urach (2007), Giarola et al. (2002), Tomasella & Hodnett (1998), Van den Berg et al. (1997) apresentam os resultados com base em umidade volumétrica, e as PTFs- θ_{PMP} de Nascimento et al. (2010), Oliveira et al. (2002) e Reichert et al. (2009), os resultados

são umidade em base gravimétrica. Para interpretação dos dados, transformaram-se os valores estimados de umidade do solo em base gravimétrica para base volumétrica utilizando-se os valores de densidade do solo.

Para a utilização judiciosa de uma PTF, é fundamental verificar se os valores dos preditores utilizados na modelagem estão dentro do intervalo (valores mínimos e máximos) dos dados que foram utilizados para calibrar as PTFs. A validade da PTF em um determinado caso só é garantida se todos os preditores estiverem dentro dos intervalos apresentados na Tabela 2.

Confiabilidade (Reliability em ingles) refere-se à avaliação das PTFs usando dados distintos que foram usados no ajuste das PTFs (Ottoni et al., 2019; Pachepsky & Rawls, 1999). Para a avaliação da confiabilidade das predições das PTFs- θ_{PMP} , foram considerados como melhores PTFs as que apresentaram os menores valores da raiz do erro quadrático médio (RMSE, do inglês *Root Mean Square Error*), estimado usando a Equação 1. E valores dos coeficientes de determinação (R^2), calculado baseado na covariância entre os valores de θ_{PMP} observados e θ_{PMP} preditos (Equação 2). Como critério principal foi selecionado os menores valores de RMSE seguidos maiores valores de R^2 .

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad \text{Equação 1}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad \text{Equação 2}$$

Em que:

A melhor confiabilidade média da predição entre as diferentes PTFs- θ_{PMP} testadas é indicada por valores de R^2 próximos a 1,0 e de valores de RMSE próximos a 0,0.

Tabela 1. Funções de pedotransferência, seus preditores e número de amostras utilizadas para desenvolver cada PTF- θ_{PMP} .

Funções	Referências	Preditores	PTF	Nº	Regiões
		%	θ_{PMP}		
PTF- θ_{PMP} 1	Rosseti et al. (2022)	Argila, Areia	$\theta_{PMP} = 0,386 - 0,004 \times \text{Areia} - 0,002 \times \text{Argila}$	156	Mato Grosso
PTF- θ_{PMP} 2	Nascimento et al. (2010)	Argila	$\theta_{PMP} = 0,0221 + 0,000288 \times \text{Argila}$	874	Brasil
PTF- θ_{PMP} 3	Urach (2007)	Areia, Silte, Ds	$\theta_{PMP} = 0,462 - 0,00022 \times \text{Areia} - 0,000044 \times \text{Silte} - 0,1838 \times \text{Ds}$	86	Rio Grande do Sul
PTF- θ_{PMP} 4	Giarola et al. (2002) - A	Argila, Silte	$\theta_{PMP} = -0,031 + 0,005 \times \text{Silte} - 0,003 \times \text{Argila}$	35	Rio Grande do Sul
PTF- θ_{PMP} 5	Giarola et al. (2002) - B	Argila, Silte	$\theta_{PMP} = 0,024 + 0,005 \times \text{Silte} - 0,003 \times \text{argila}$	35	Rio Grande do Sul
PTF- θ_{PMP} 6	Tomasella & Hodnett. (1998)	Argila, Silte, Ds	$\theta_{PMP} = (0,91 + 0,15 \times \text{silte} + 0,396 \times \text{argila}) \times \text{Ds} \times 0,01$	838	Amazônia
PTF- θ_{PMP} 7	Oliveira et al. (2002)	Argila, Silte, Areia, Ds	$\theta_{PMP} = 0,000038 \times \text{areia} + 0,000153 \times \text{silte} + 0,000341 \times \text{argila} - 0,030861 \times \text{Ds}$	467	Pernambuco
PTF- θ_{PMP} 8	Van den Berg et al. (1997) - 1	Argila	$\theta_{PMP} = 3,83 + 0,272 \times \text{argila} + 0,212 \times \text{silte}$	91	Brasil
PTF- θ_{PMP} 9	Van den Berg et al. (1997) - 2	Argila, Silte	$\theta_{PMP} = 6,35 + 0,284 \times \text{argila}$	91	Brasil
PTF- θ_{PMP} 10	Reichert et al. (2009) - 1	Argila, Argila+Silte, MO, Ds	$\theta_{PMP} = -0,04 + 0,15 \times \text{argila} + 0,17 \times (\text{argila} + \text{silte}) + 0,91 \times \text{MO} + 0,026 \times \text{Ds}$	307	Rio Grande do Sul
PTF- θ_{PMP} 11	Reichert et al. (2009) - 2	Argila, Areia	$\theta_{PMP} = 0,236 + 0,045 \times \text{argila} - 0,21 \times \text{areia}$	685	Rio Grande do Sul

Nº - número de amostras; Ds - Densidade do Solo; MO - Matéria Orgânica.

Tabela 2. Domínios dos preditores das funções de pedotransferência de Van den Berg et al. (1997), Tomasella & Hodnett (1998), Giarola et al. (2002), Oliveira et al. (2002), Urach (2007), Reichert et al. (2009), Nascimento et al. (2010) e Rosseti et al. (2022).

Funções	Referências	Ds g cm ⁻³	Argila	Silte %	Areia Total	MO
PTF- θ_{PMP} 1	Rosseti et al. (2022)	NA	2,82-74,45	NA	14,27-96,04	NA
PTF- θ_{PMP} 2	Nascimento et al. (2010)	NA	2-96	NA	NA	NA
PTF- θ_{PMP} 3	Urach (2007)	0,88-1,51	NA	2,1-78	3,7-95,8	NA
PTF- θ_{PMP} 4	Giarola et al. (2002) - A	NA	6-81	9,9-41,8	NA	NA
PTF- θ_{PMP} 5	Giarola et al. (2002) - B	NA	6-81	9,9-41,8	NA	NA
PTF- θ_{PMP} 6	Tomasella & Hodnett (1998)	0,72-1,91	1,7-96	0-71	NA	NA
PTF- θ_{PMP} 7	Oliveira et al. (2002)*	1,02-2,06	20-830	10-457	50-950	NA
PTF- θ_{PMP} 8	Van den Berg et al. (1997) - 1	NA	10-95	NA	NA	NA
PTF- θ_{PMP} 9	Van den Berg et al. (1997) - 2	NA	10-95	NA	NA	NA
PTF- θ_{PMP} 10	Reichert et al. (2009) - 1	0,86-1,85	1-82	1-78	NA	0-10
PTF- θ_{PMP} 11	Reichert et al. (2009) - 2	NA	1-82	NA	1-99	NA

*Preditores estão em g kg⁻¹; MO - matéria orgânica; Ds - densidade do solo; NA - não se aplica.

A confiabilidade das estimativas das PTF- θ_{PMP} foi estimada para o conjunto de 30 dados de θ_{PMP} observados em relação aos estimados. Análises gráficas de dispersão de resíduos *versus* valores preditos e gráficos de correlação 1:1 entre os dados preditos e os observados de θ_{PMP} foram avaliadas para as três PTFs- θ_{PMP} que apresentaram os menores RMSE e o número de estimativas de θ_{PMP} mais representativo. Neste tipo de correlação, a precisão é maior quanto menos pontos ficarem dispersos em relação à linha principal, que representa um ajuste perfeito.

Resultados

Na área de estudo ocorre predominantemente os Latossolos Vermelhos que representam 55,5% da extensão da área. Em seguida, aparecem os Neossolos Quartzarênicos, com 17%, e os Nitossolos Vermelhos, com 8,5% (Tabela 3). Os Latossolos Vermelhos e Nitossolos Vermelhos apresentam predominantemente textura média argilosa (Tabela 5).

Os valores da mediana de θ_{PMP} de solos de outras regiões do Brasil representativos dos grupamentos texturais que representam a área de estudo, estão sintetizados na Figura 3. Para os solos do Mato Grosso do Sul, foram observadas quatro classes de valores de θ_{PMP} em função dos grupamentos texturais: média, arenosa, muito argilosa e argilosa. Os resultados mostram valores de mediana na faixa de 0,043 a 0,296 cm³ cm⁻³.

O grupamento textural que compreende as texturas argilosa e muito argilosa, que ocorrem principalmente na classe dos Latossolos Vermelhos, apresentaram mediana de θ_{PMP} com valores semelhantes, respectivamente, 0,278 e 0,296 cm³ cm⁻³. Valores próximos aos encontrados para as medianas de θ_{PMP} dos Latossolos Vermelhos e suas classes texturais, respectivamente 0,282 e 0,276 cm³ cm⁻³ (Tabela 4).

Os Neossolos Quartzarênicos também são expressivos

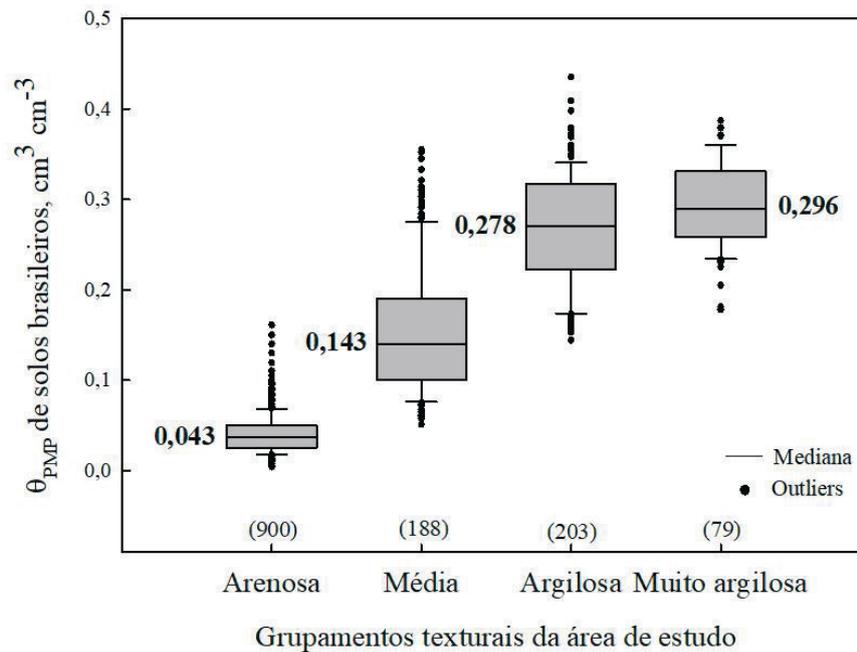
Tabela 3. Área estimada das classes de solo a partir do mapa preliminar de solos das bacias dos rios Ivinhema, Amambai e Iguatemi e do estado do Mato Grosso do Sul.

Classes de solo	Área (km ²)	Área (%)
Argissolo Amarelo	212,4	0,3
Argissolo Vermelho	2374,5	3,6
Cambissolo Háplico	238,0	0,4
Chernossolo Argilúvico	0,6	0,0
Gleissolo Háplico	1176,1	1,8
Gleissolo Melânico	4902,9	7,5
Latossolo Amarelo	488,5	0,7
Latossolo Vermelho	36309,0	55,6
Latossolo Vermelho-Amarelo	679,0	1,0
Neossolo Litólico	59,6	0,1
Neossolo Quartzarênico	11151,0	16,8
Nitossolo Vermelho	5660,5	8,7
Organossolo Háplico	322,5	0,3
Organossolo Fólico	216,1	2,5
Planossolo Háplico	1643,1	0,0
Plintossolo Argilúvico	27,2	0,5

na área e o valor da mediana encontrado para a classe textural arenosa foi de 0,037 cm³ cm⁻³, apenas 0,006 cm³ cm⁻³ menor que o valor encontrado para a grupamento textural arenosa de 0,043 (Figura 3). E o grupamento textural arenoso foi o que apresentou a maior homogeneidade entre os dados, indicado pelo reduzido tamanho do boxplot.

Os valores médios, medianos, mínimos, máximos, desvio padrão, coeficiente de variação do θ_{PMP} (cm³ cm⁻³) para classes de solos em combinação com grupamento textural estão apresentados na Tabela 4. Não foram encontrados dados de θ_{PMP} para alguns grupamentos texturais das classes Argissolos Vermelhos, Cambissolos Háplicos, Gleissolos Háplicos e Melânicos, Neossolos Líticos, Organossolo Fólico e Háplico e Plintossolo Argilúvico.

Figura 3. Umidade volumétrica no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) do Brasil em função dos grupamentos texturais de solos encontrados na área de estudo. Os números entre parênteses representam o número de amostras de cada grupamento textural.



Para a classe dos Latossolos Vermelhos, solo predominante da área de estudo, foram encontrados 202 dados nos grupos texturais média, argilosa e muito argilosa. Os valores máximos de θ_{PMP} da classe de solo, confirmam o valor encontrado para a estatística descritiva do BD-MS_PMP de $0,362 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$.

Os Neossolos Quartzarênicos apresentaram valores de média e mediana de θ_{PMP} de $0,040$ e $0,037 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$ para a textura arenosa (Tabela 4). Valores próximos ao valor mínimo de θ_{PMP} ($0,050 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$) da estatística descritiva do BD-MS_PMP, valor esse relacionado a um Argissolo Vermelho de classe textural Areia Franca (Scorza & Silva, 2006).

Os valores para a mediana de θ_{PMP} para os Latossolos Amarelos e Argissolos Vermelhos, dos grupamentos texturais argilosa e muito argilosa, variaram entre $0,170$ e $0,398 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$ (Tabela 4). Os baixos valores da mediana do θ_{PMP} desses solos que apresentam essas classes texturais, podem ser explicados devido ao fato de que no banco de dados HYBRAS, esses solos apresentam texturas que variam de textura argilosa a argilo arenosa com valores equilibrados de argila e areia ($36\% < \text{argila} < 59\%$, $32\% < \text{areia} < 59\%$).

Os Argissolos Amarelos, Gleissolos Háplicos e Neossolos Quartzarênicos tiveram valores medianos de θ_{PMP} variando entre $0,033$ a $0,053 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$ para o grupamento textural que engloba a textura arenosa (Tabela 4).

No grupamento de textura média, os valores para a mediana de θ_{PMP} variou entre as classes de solo. O menor valor foi encontrado nos Gleissolos Melânicos (de θ_{PMP} de $0,063 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$) e o maior valor em Chernossolos Argilúvicos (de θ_{PMP} de $0,282 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$).

Mas, em geral, comportam-se de forma similar nos Argissolos Amarelos e Argissolos Vermelhos, Cambissolos Háplicos, Gleissolos Háplicos, Latossolos Vermelhos e Latossolos Amarelos e Neossolos Líticos.

Embora com número de dados limitados para o grupamento textural arenosa, em diversas classes de solo, os valores da mediana da θ_{PMP} obtidos são similares, parecendo serem predominantemente controlados pela composição granulométrica. Contudo, nos grupamentos texturais que incluem as texturas média, argilosa e muito argilosa, existe grande variação nos valores do θ_{PMP} entre as classes dos solos.

Umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) estimado por equações PTFs (-1500 kPa)

Os dados de θ_{PMP} disponíveis no BD-MS- θ_{PMP} compreendem duas classes de solo. A classe com maior número de dados é a dos Latossolos Vermelhos, com 23 amostras e a outra classe é a dos Argissolos Vermelho-Amarelos com 7 amostras. As 30 amostras disponíveis são provenientes de 8 perfis, com 30 horizontes e estão divididas em três grupamentos texturais (média, argilosa e muito argilosa) que compreendem quatro classes texturais: Areia Franca, com sete amostras, Franco-argiloarenosa com sete amostras, Argilosa com seis amostras, e Muito Argilosa com dez amostras. Apenas um sistema de uso da terra foi identificado entre os dados disponíveis: agricultura, indicando a necessidade de obtenção de dados de valores de referência em áreas sem uso antrópico, em especial para os solos argilosos e muito argilosos, onde a compactação pode alterar os valores de θ_{PMP} . O aumento da densidade do solo, com o

Tabela 4. Estatística descritiva da umidade ponto de murcha permanente - θ_{PMP} (cm³ cm⁻³) calculada com 1.538 amostras de solos representativos da cobertura pedológica do Brasil, em função das classes de solos e grupamentos texturais.

Classe de solo	Grupamento textural	n°	Média	DP	CV	Mediana	Min	Max
Argissolo Amarelo	arenosa	2	0,053	0,01	19	0,053	0,046	0,06
	média	7	0,135	0,032	24	0,131	0,078	0,17
	argilosa	15	0,195	0,025	13	0,195	0,168	0,26
Argissolo Vermelho	arenosa	-	-	-	-	-	-	-
	média	19	0,199	0,020	10	0,190	0,170	0,250
	argilosa	4	0,265	0,057	21	0,240	0,230	0,350
Cambissolo Háplico	arenosa	-	-	-	-	-	-	-
	média	14	0,192	0,065	34	0,183	0,105	0,295
Chernossolo Argilúvico	média	21	0,281	0,048	17	0,282	0,167	0,355
	argilosa	5	0,37	0,064	17	0,398	0,278	0,435
Gleissolo Háplico	arenosa	3	0,037	0,018	49	0,033	0,021	0,056
	média	15	0,132	0,059	45	0,148	0,051	0,207
	argilosa	11	0,31	0,032	10	0,304	0,264	0,377
	muito argilosa	-	-	-	-	-	-	-
Gleissolo Melânico	arenosa	-	-	-	-	-	-	-
	média	3	0,074	0,025	34	0,063	0,055	0,103
	siltosa	-	-	-	-	-	-	-
	argilosa	-	-	-	-	-	-	-
	muito argilosa	-	-	-	-	-	-	-
Latossolo Amarelo	média	40	0,13	0,028	21	0,128	0,076	0,19
	argilosa	22	0,171	0,018	11	0,17	0,144	0,21
	muito argilosa	23	0,318	0,044	14	0,324	0,225	0,379
Latossolo Vermelho	média	31	0,138	0,074	54	0,118	0,06	0,352
	argilosa	125	0,238	0,049	17	0,282	0,156	0,379
	muito argilosa	51	0,279	0,045	16	0,276	0,178	0,378
Latossolo Vermelho-Amarelo	média	6	0,102	0,073	72	0,077	0,058	0,25
	argilosa	17	0,26	0,044	17	0,26	0,19	0,35
Neossolo Lítico	média	17	0,136	0,025	18	0,14	0,08	0,19
Neossolo Quartzarênico	arenosa	895	0,04	0,021	52	0,037	0,004	0,161
Nitossolo Vermelho	argilosa	4	0,308	0,028	9	0,305	0,28	0,341
	muito argilosa	5	0,307	0,032	11	0,3	0,26	0,341
Organossolo Fólico	média	-	-	-	-	-	-	-
	muito argilosa	-	-	-	-	-	-	-
Organossolo Háplico	média	-	-	-	-	-	-	-
	muito argilosa	-	-	-	-	-	-	-
Planossolo Háplico	média	18	0,084	0,01	12	0,081	0,072	0,11
	muito argilosa	-	-	-	-	-	-	-
Plintossolo Argilúvico	média	-	-	-	-	-	-	-
	muito argilosa	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Ottoni, et al. 2018; Fontana, et al. 2023; (-) representa que não foram encontrados dados para esses grupamentos texturais.

aumento da massa das frações granulométricas por determinado volume de solo, tende a aumentar os valores da θ_{PMP} e consequentemente reduzir os valores de AD.

A relação entre os valores de θ_{PMP} e os teores de argila mostrou que, os valores de θ_{PMP} aumentam com o aumento dos teores de argila (Figura 4). Esses resultados estão de acordo com a literatura (Van den Berg et al., 1997; Giarola et al., 2002; Oliveira et al., 2002; Tomasella et al., 2003; Ura-

ch, 2007; Silva, et al. 2008; Reichert et al., 2009; Alvarenga, et al. 2010; Klein et al., 2010; Santra et al. 2018; Reichert et al., 2020, Huf dos Reis et al., 2024), que indica que solos com maiores teores de argila tendem a ter maiores valores de umidade no PMP. Isso ocorre porque as argilas têm uma capacidade de reter um elevado volume de água em elevados potenciais devido à elevada superfície específica (SE) dessas partículas, em comparação com as partículas de sil-

te e areia (Reichert et al., 2009, Reichardt & Timm, 2004).

O maior valor de θ_{PMP} encontrado neste estudo foi de $0,362 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, tendo sido determinado num Latossolo Vermelho de textura muito argilosa, com teores de argila de 75% (Fietz, 1998). Solos com elevados valores de θ_{PMP} tendem a apresentar uma baixa disponibilidade de água para as plantas, pois um grande volume da água fica armazenada no solo em potenciais inferiores a -1500 kPa .

Solos que apresentam frações granulométricas semelhantes, mas com diferenças entre os valores de θ_{PMP} denota um fenômeno ainda pouco estudado, mas provavelmente estaria ligado à mineralogia da fração argila e sua superfície específica (SE). A SE das argilas 1:1 como a caulinita varia numa faixa de $10 \text{ a } 50 \text{ m}^2/\text{g}$ e de argilas 2:1, como as esmectitas, a SE apresenta valores entre $400 \text{ e } 1.180 \text{ m}^2/\text{g}$ (Souza & Torrent, 2021).

Correlações positivas entre carbono orgânico (CO) e θ_{PMP} são comumente encontradas na literatura (Van den Berg et al., 1997; Tomasella et al., 2003; Urach, 2007; Silva, et al. 2008; Reichert et al., 2009; Alvarenga, et al. 2010; Klein et al., 2010; Santra et al. 2018; Reichert et al., 2020, Huf dos

Reis et al., 2024). Contudo, neste estudo a falta de correlação entre os teores de carbono e da θ_{PMP} provavelmente está relacionado aos baixos teores relativos de carbono, entre $0,21\% \text{ e } 1,94\%$ e aos elevados percentuais de argila dessas amostras (Figura 5).

A estatística descritiva, com a apresentação dos valores de média, mediana, desvio padrão e valores mínimos e máximos dos preditores (granulometria, Ds e MO) utilizados nas estimativas das PTFs- θ_{PMP} são apresentados na Tabela 5. Os valores de θ_{PMP} , variaram entre $0,050 \text{ e } 0,362 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ com um valor médio de $0,205 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Os teores de argila variaram entre $8 \text{ e } 75\%$ com valor médio de 42% . Os valores medidos da densidade do solo variaram entre $1,02 \text{ a } 1,55 \text{ g cm}^{-3}$ com valor médio de $1,36 \text{ g cm}^{-3}$.

Os valores de RMSE, de R^2 e o número de predições de θ_{PMP} para cada PTFs- θ_{PMP} são apresentados na Tabela 6.

Algumas amostras não apresentaram resultados das estimativas para algumas PTFs em virtude de suas propriedades estarem fora dos domínios para as quais foram desenvolvidas, ou não apresentarem todos os parâmetros necessários para a estimativa.

Figura 4. Teor de argila versus valores da umidade volumétrica ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) dos solos estudados nas bacias dos rios Ivinhema, Amambai e Iguatemi.

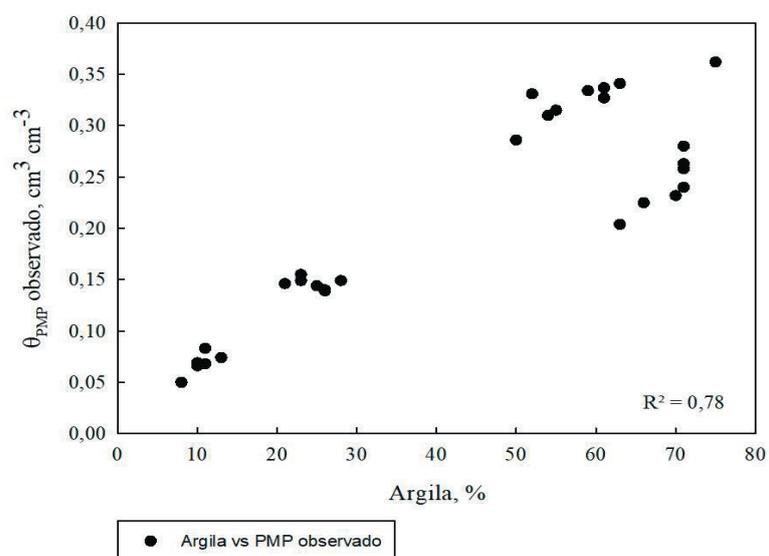
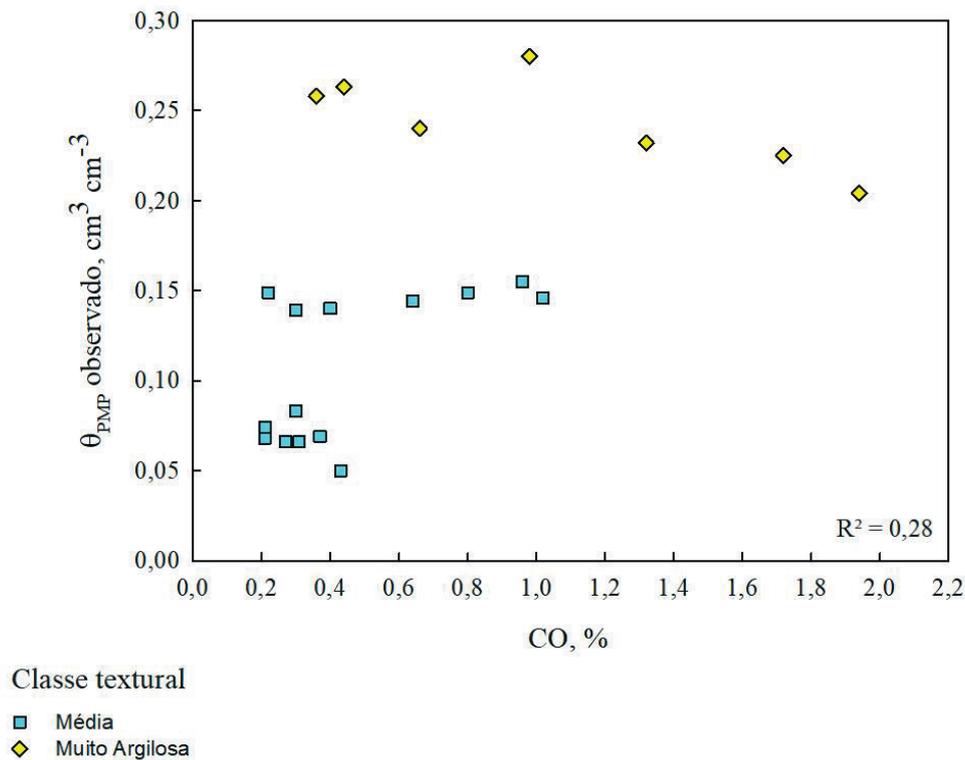


Tabela 5. Estatística descritiva dos valores de umidade no ponto de murcha permanente θ_{PMP} , densidade (Ds), frações granulométricas, e teores de matéria orgânica (MO) para o banco de dados de solos (BD-MS_PMP) do Mato Grosso do Sul.

Estatística descritiva	θ_{PMP} $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$	Ds g cm^{-3}	Argila -----%	Silte -----%	Areia total -----%	Argila + Silte -----%	MO
Máximo	0,362	1,55	75	34	89	91	3,34
Mínimo	0,050	1,02	8	3	9	11	0,37
Média	0,205	1,36	42	12	47	51	1,14
Mediana	0,214	1,35	59	14	21	79	2,64
Desvio padrão	0,10	0,20	23	7	29	29	2

θ_{PMP} - umidade no ponto de murcha permanente; Ds - densidade do solo; MO - matéria orgânica.

Figura 5. Carbono orgânico versus valores da umidade volumétrica ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) em solos das bacias dos rios Ivinhema, Amambai e Iguatemi.



As PTFs- θ_{PMP} 7, 8 e 9 de Oliveira et al. (2002) e Van den Berg et al. (1997) obtiveram o melhor índice (baixos valores de RMSE) dentre as onze PTFs testadas.

Valores elevados de R^2 ($0,965 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), como observado no modelo proposto por Oliveira et al. (2002), é corroborado pelos estudos de Reichert et al. (2020), que encontraram valor de R^2 para prever θ_{PMP} próximos a $0,95 \text{ kg kg}^{-1}$. Este último estudo desenvolveu PTFs para estimar θ_{PMP} para 85 horizontes superficiais e subsuperficiais de solos do estado do Rio Grande do Sul.

A análise gráfica da dispersão dos resíduos, em conjunto com o RMSE, é mostrada na Figura 6. O gráfico 1:1 entre valores observados e preditos de θ_{PMP} , em conjunto com os valores de R^2 , estão na Figura 7.

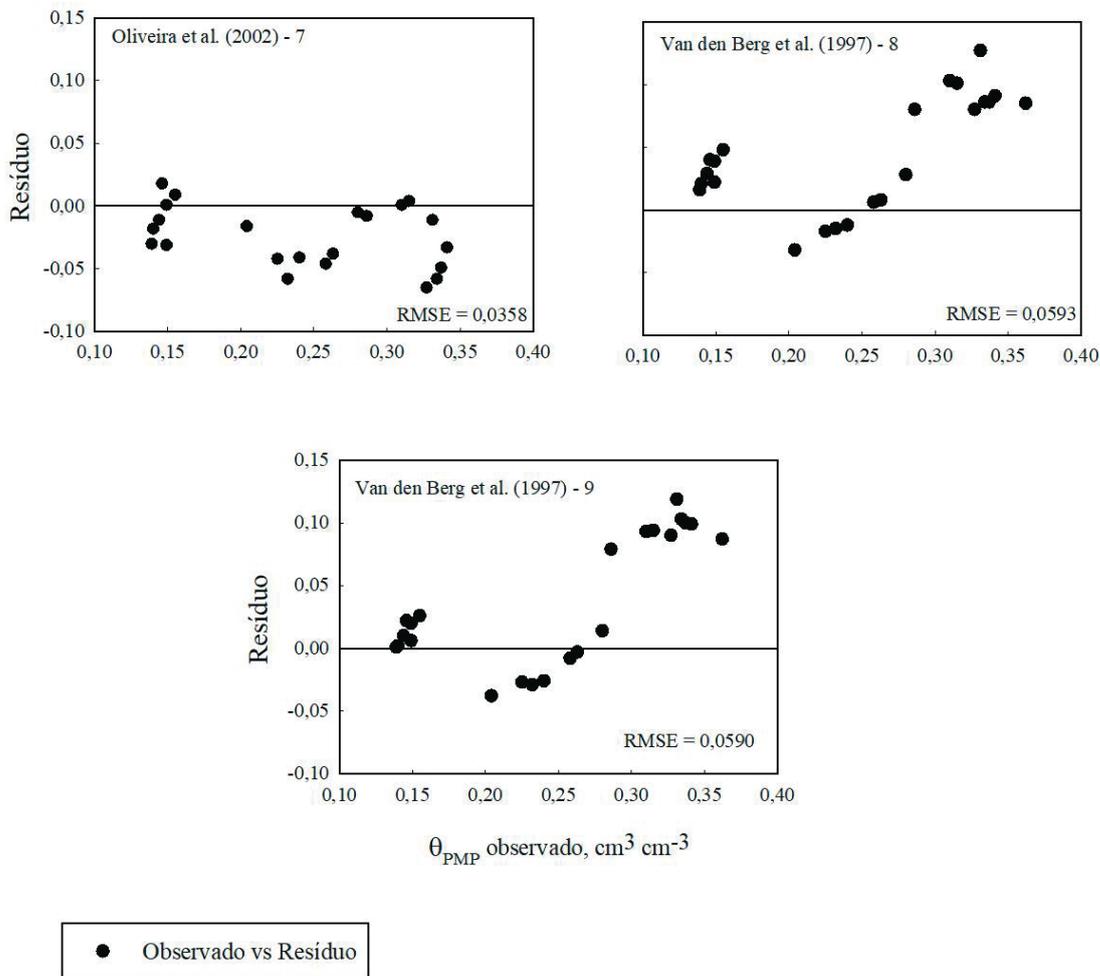
A PTF- θ_{PMP} 5 de Giarola et al. (2002) obteve o segundo menor valor de RMSE dentre as onze PTFs. Contudo essa PTF foi testada apenas com um pequeno número de amostras, pois alguns parâmetros estavam fora do domínio (Tabela 2). Devido a isso, a PTF- θ_{PMP} 9 de Van den Berg et al. (1997) que utiliza silte e argila para estimar θ_{PMP} teve

Tabela 6. Estimativas da confiabilidade das predições (Root Mean Square Error – RMSE e coeficiente de determinação R^2) da umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) para as onze PTFs avaliadas inicialmente dos solos estudados nas bacias dos rios Ivinhema, Amambai e Iguatemi no Mato Grosso do Sul.

Funções	Referências	RMSE	R^2	n°
PTF- θ_{PMP} 1	Rosseti et al. (2022)	0,1056	0,867	29
PTF- θ_{PMP} 2	Nascimento et al. (2010)	0,1853	0,917	30
PTF- θ_{PMP} 3	Urach (2007)	0,0874	0,215	27
PTF- θ_{PMP} 4	Giarola et al. (2002) - A	0,0888	0,107	12
PTF- θ_{PMP} 5	Giarola et al. (2002) - B	0,0516	0,107	12
PTF- θ_{PMP} 6	Tomasella & Hodnett (1998)	0,0615	0,854	22
PTF- θ_{PMP} 7	Oliveira et al. (2002)	0,0358	0,965	30
PTF- θ_{PMP} 8	Van den Berg et al. (1997) - 1	0,0593	0,778	26
PTF- θ_{PMP} 9	Van den Berg et al. (1997) - 2	0,0590	0,704	26
PTF- θ_{PMP} 10	Reichert et al. (2009) - 1	0,1396	-	21
PTF- θ_{PMP} 11	Reichert et al. (2009) - 2	0,1675	0,316	30

n° - número de estimativas de umidade no PMP para cada equação, considerando os ranges;

Figura 6. Dispersão dos resíduos versus valores de umidade no ponto de murcha permanente observados pelas PTF- θ_{PMP} 7, 8 e 9 de Oliveira et al. (2002) e Van den Berg et al. (1997) dos solos estudados nas bacias dos rios Ivinhema, Amambai e Iguatemi Ivinhema no Mato Grosso do Sul.



o segundo melhor desempenho indicado pelo baixo valor do RMSE, sendo assim, é mais adequada quando há falta de dados de densidade do solo (Figura 6). O critério de confiabilidade baseado nos valores de R^2 foram utilizados como critério secundário, por essa razão as equações de Rossetti et al. (2022) e Nascimento et al. (2010) que apresentaram os maiores valores de R^2 , mas altos valores de RMSE não foram indicadas.

A Figura 7 indica que, em geral, a umidade no PMP foi subestimada pelas PTFs- θ_{PMP} , exceto pela PTF- θ_{PMP} 7 que superestimou os valores de θ_{PMP} . A análise gráfica e parâmetros estatísticos mostram que a PTF- θ_{PMP} 7, proposta por Oliveira et al. (2002), como a de melhor desempenho global entre as amostras estudadas. A boa performance dessa PTF foi também verificada nos estudos de Urach (2007) e Reichert et al. (2009) que encontraram valores de $R^2 = 0,70$ para a PTF- θ_{PMP} 8 e $R^2 = 0,80$ para a PTF- θ_{PMP} 9, valores esses que variaram 0,07 para a PTF- θ_{PMP} 8 e 0,10 para a PTF- θ_{PMP} 9 encontrados neste trabalho.

Conclusões

Estimativas do θ_{PMP} baseadas apenas no conhecimento do agrupamento textural e/ou classe de solo

Quando se conhece apenas agrupamento textural se recomenda utilizar os valores de $\theta_{PMP} = 0,043 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$; $0,143 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$; $0,278 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e $0,296 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ para os grupos arenosa, média, argilosa e muito argilosa, respectivamente.

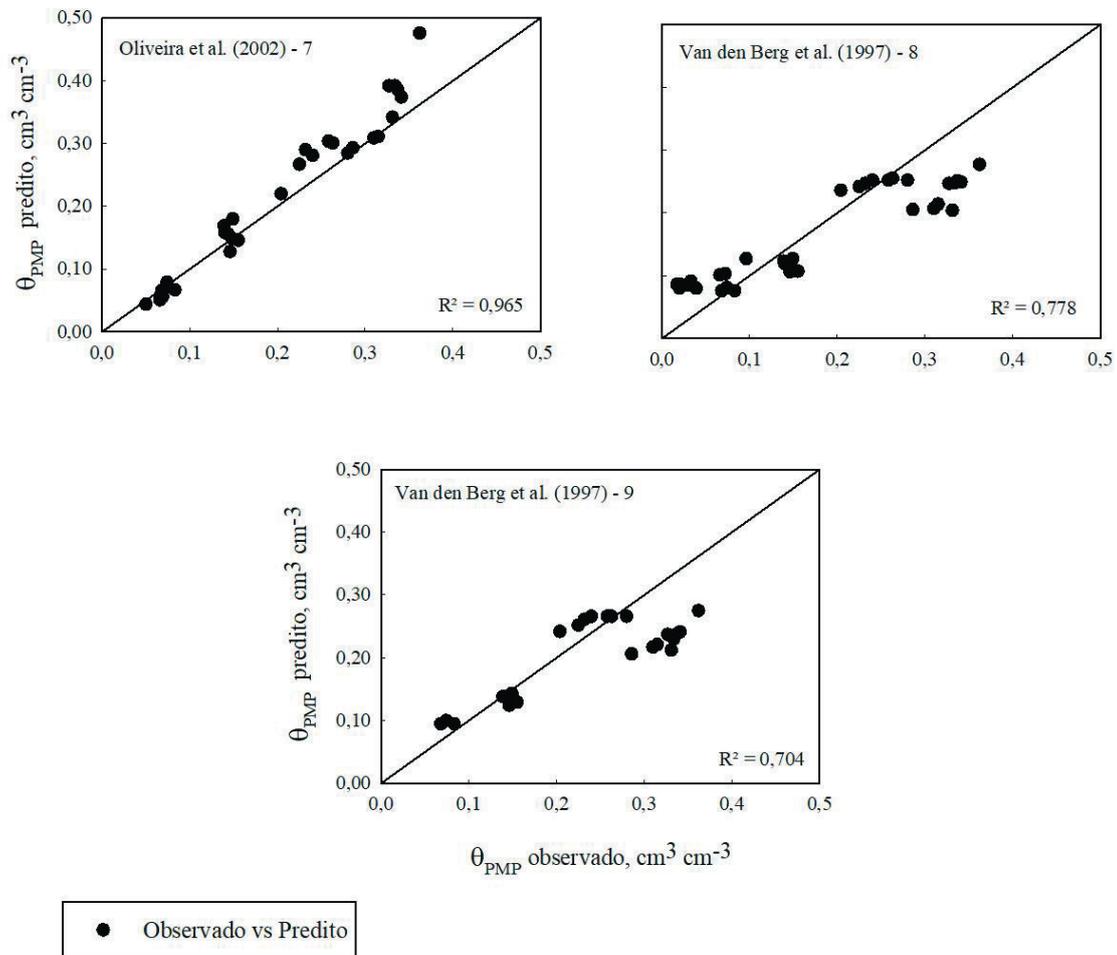
Para os Latossolos Vermelhos nos agrupamentos texturais média, argilosa e muito argilosa os valores recomendados de θ_{PMP} são $0,282$; $0,118$; e $0,276 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, respectivamente.

Para os Neossolos Quartzarênicos é indicado o valor do θ_{PMP} é de $0,037 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$.

Estimativas do θ_{PMP} baseadas em parâmetros do solo (granulometria, densidade do solo)

Para a estimativa de θ_{PMP} na região estudada, a PTF- θ_{PMP}

Figura 7. Gráficos de dispersão 1:1 dos dados de valores de umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) observados versus θ_{PMP} preditos pelas funções 7, 8 e 9 de, Oliveira et al. (2002) e Van den Berg et al. (1997) dos solos nas bacias dos rios Ivinhema, Amambai e Iguatemi no Mato Grosso do Sul.



9 de Van den Berg et al. (1997) é a indicada quando houver disponibilidade de dados de granulometria.

A PTF- θ_{PMP} de Oliveira et al. (2002), com maior confiabilidade, é indicada quando se dispõe de dados de granulometria, e da densidade do solo, em especial para a classe dos Latossolos Vermelhos classe texturais muito argiloso e Argissolo Vermelho argiloso.

Agradecimentos

A primeira autora agradece a bolsa do projeto de Ação Integrada de Solo e Água - AISA, parceria entre Embrapa Solo, FAPED e Itaipu Binacional e também a Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ e ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, em especial ao corpo docente, pela oportunidade de realizar o mestrado. W. G. Teixeira agradece ao CNPq pela bolsa de produtividade.

Contribuição dos Autores

L. G. PIMENTEL concepção do trabalho, aquisição e análise dos dados e redação do texto. W. G. TEIXEIRA con-

cepção do trabalho, análise dos dados, redação e revisão do texto. L. C. HERNANI e S. B. BHERING coordenação do projeto, concepção do trabalho e revisão do texto.

Referências

- ALVARENGA, C. C.; MELLO, C. R.; ÁVILA, L. F.; CÔRREA, M. P.; BORGES, L. A. Determinação da umidade do solo na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente com base em atributos físicos do solo. In: XIX CONGRESSO DE PÓS-GRADUAÇÃO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS, 2010, Lavras. **Anais do XIX Congresso da Pós-Graduação**. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2010.
- ANA - Agência Nacional de Águas. **Países**. 2010. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/7cfd53c4-b4e1-4aba-a79b-857a19649df6>. Acesso em: 7 de jan. de 2024.
- BARROS, A. H. C.; DE JONG VAN LIER, Q.; MAIA, A. H. N.; SCARPARE, F. V. Pedotransfer functions to estimate water retention parameters of soils in northeastern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.37, p.379-391, 2013. DOI: 10.1590/S0100-06832013000200009
- BARROS, A. H. C.; DE JONG VAN LIER, Q. Pedotransfer functions for Brazilian soils. eBook: Springer, 2014. Separata de: TEIXEIRA, W. G.; CEDDIA, M. B.; OTTONI, M. V.; DONNAGEMMA, G. K. (Ed.). **Application of Soil Physics in Environmental Analyses: Measuring, Modelling and Data Integration**. eBook: Springer, 2014. p131-162. DOI: 10.1007/978-3-319-06013-2_6

- BOUMA, J. Using soil survey data for quantitative land evaluation. *Advances in Soil Science*, v. 9, p. 177-213, 1989. DOI: 10.1007/978-1-4612-3532-3_4
- BRIGGS, L. J.; SHANTZ, H. L. The wilting coefficient for different plants and its indirect determination. *Journal of the Washington Academy of Sciences*, v.1 n.8, p.228-232, 1911. DOI: [10.2134/agronmonogr8.c16](https://doi.org/10.2134/agronmonogr8.c16)
- DA SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; IMHOFF, S. Pedotransfer functions for the soil water retention and soil resistance to penetration curves. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.32, p.1-10, 2008. DOI: 10.1590/S0100-06832008000100001
- DE MELLO, C. R.; OLIVEIRA, G. C.; FERREIRA, D. F.; LIMA, J. M.; LOPES, D. Models for determination of parameters of van Genuchten equation for a Cambisol. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.9, p.23-29, 2005. DOI: 10.1590/S1415-43662005000100004
- DOS SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. *Sistema brasileiro de classificação de solos - SiBCS*. 5.ed. rev. e ampl. Brasília: Embrapa, 2018. 356p. ISBN: 978-85-7035-817-2.
- DOS SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.; LIMA, H. N.; MARQUES, F. A. *Proposta de atualização da 5ª edição do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 1.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2023. 141p. ISSN: 1517-2627
- FIDALSKI, J.; TORMENA, C. A. Funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração em sistemas de manejo com plantas de cobertura permanente em citros. *Ciência Rural*, v. 37, p. 1316-1322, 2007. DOI: 10.1590/S0103-84782007000500015
- FIETZ, C. R. *Variabilidade espacial do armazenamento de água no solo visando o manejo da irrigação por aspersão*. 1998. 116p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998. DOI: 10.11606/T.11.2019.tde-20191220-111207
- FIETZ, C.; FISCH, G.; COMUNELLO, E.; FLUMIGNAN, D. L. *O clima de Dourados e Rio Brillhante, Mato Grosso do Sul*. 21 ed. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2024. 51p. ISSN 1516-845X / e-ISSN 1679-043X
- FIORIN, T. T. *Estimativa da infiltração de água no solo a partir de pedofunções*. 2008. 116p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.
- FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G.; DONAGEMMA, G. K.; SILVA, A. L.; BARROS, A. H. C.; OLIVEIRA, A. P.; COSTA, A.; CHAGAS, C. S.; VICTORIA, D. C.; COUTO, E. G.; SANTOS, F. C.; OLIVEIRA, F. P.; TORRES, G. N.; ALBUQUERQUE, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.; LUMBRERAS, J. F.; VIANA, J. H. M.; FIDALSKI, J.; PIMENTEL, L. G.; DI RAIMO, L. A. D. L.; HERNANI, L. C.; ALBUQUERQUE FILHO, M. R.; OTTONI, M. V.; COELHO, M. R.; FERREIRA, P. L.; FREITAS, P. L.; OLIVEIRA, V. Á. *“Dados de composição física, química e retenção de água em solos arenosos do Brasil”*. Brasília: Embrapa/Redape, 2024.
- GIAROLA, N. F. B.; SILVA, A. P.; IMHOFF, S. Relações entre propriedades físicas e características de solos da região Sul do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.26, n.4, p. 885-893, 2002. DOI: 10.1590/S0100-06832002000400005
- HUF DOS REIS, A. M.; TEIXEIRA, W. G.; FONTANA, A.; BARROS, A. H. C.; VICTORIA, D. C.; VASQUES, G. M.; SAMUEL-ROSA, A.; OTTONI, M. V.; MONTEIRO, J. E. B. A. Hierarchical Pedotransfer Functions to Predict Bulk Density in Brazilian Soils. *Scientia Agrícola*, v. 81, p. e20220255, 2024. DOI: 10.1590/1678-992X-2022-0255
- IBGE. *Mapa de Solos*. 2018. Escala 1: 250.000. IBGE. Disponível em: <https://bdiaweb.ibge.gov.br/#/consulta/pedologia>. Acesso em: 7 de jan. de 2024.
- IBGE. *Bacias e Divisões Hidrográficas do Brasil*. 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/informacoes-ambientais/31653-bacias-e-divisoes-hidrograficas-do-brasil.html>. Acesso em: 7 de jan. de 2024.
- IBGE. *Bases Cartográficas Contínuas*. 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/bases-cartograficas-continuas/15759-brasil.html>. Acesso em: 7 de jan. de 2024.
- KLEIN, V. A.; BASEGGIO, M.; MADALOSSO, T.; MARCOLIN, C. D. Textura do solo e a estimativa do teor de água no ponto de murcha permanente com psicrômetro. *Ciência Rural*, v.40, p.1550-1556, 2010. DOI: 10.1590/S0103-84782010005000110
- KLEIN, V. A. Retenção de água no solo pelo método do psicrômetro. Brasília: Embrapa, 2017. Separata de: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (Ed). *Manual de Métodos de Análise de Solo*. Brasília: Embrapa, 2017. p.47-52.
- MAESTÁ, B. C.; TEIXEIRA, W. G.; NOGUEIRA, J. N. P.; LUMBRERAS, J. F. Uso do Psicrômetro na avaliação do potencial da água no ponto de murcha permanente (PMP – 1500 kPa) em amostras de solos. In: SEMINÁRIO PIBIC EMBRAPA SOLOS, 2018/2019, Rio de Janeiro. *Anais do Seminário Pibic*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2019.
- MAPBIOMAS. *Codes of the legend classes and color palette used in MapBiomass Collection 7*. Disponível em: https://mapbiomas-br-site.s3.amazonaws.com/downloads/_EN_C%3%B3digos_da_legenda_Cole%3%A7%3%A3o_7.pdf. Acesso em: 27 de ago. de 2023.
- MARQUES, A. F. S. M.; FLORES, C. A.; BELINASSO, I. F.; CARDOSO, J. D.; LEMOS, R. C. *Mapa do Levantamento semidetalhado de solos e aptidão agrícola em áreas abrangidas pelo PDRI, Município de Parintins*. Minas Gerais: Fundação Centro Tecnológica de Minas Gerais - CETEC, 1986. escala 1:70.000.
- MEDRADO, E.; LIMA, J. E. F. W. Development of pedotransfer functions for estimating water retention curve for tropical soils of the Brazilian savanna. *Geoderma Regional*, v.1, p.59-66, 2014. DOI: 10.1016/j.geodrs.2014.08.003
- NASCIMENTO, G. B.; ANJOS, L. H. C.; PEREIRA, M. G.; FONTANA, A.; SANTOS, H. G. Funções de pedotransferência do conteúdo de água em Latossolos Amarelos e Argissolos Amarelos. *Revista Brasileira de Ciência Agrárias*, v.4, n.5, p.560-569, 2010. DOI: 10.5239/agraria.v5i4.551
- OLIVEIRA, L. B.; RIBEIRO, M. R.; JACOMINE, P. K. T.; RODRIGUES, J. J. V. MARQUE, F. A. Funções de pedotransferência para predição da umidade retida a potenciais específicos em solos do estado de Pernambuco. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.26, n.26, p.315-323, 2002. DOI:10.1590/S0100-06832002000200004
- OTTONI, M. V.; RIBEIRO, M. R.; JACOMINE, P. K. T.; RODRIGUES, J.; MARQUES, F. A. Hydrophysical database for Brazilian soils (HYBRAS) and pedotransfer functions for water retention. *Vadose Zone Journal*, v.17, n.1, p.1-17, 2018. DOI: 10.2136/vzj2017.05.0095
- OTTONI, M. V.; OTTONI FILHO, T. B.; LOPES-ASSAD, M. L.; ROTUNNO FILHO, O. C. Pedotransfer functions for saturated hydraulic conductivity using a database with temperate and tropical climate soils. *Journal of Hydrology*, v. 575, p. 1345-1358, 2019. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.05.050
- PACHEPSKY, Y.; RAWLS, W. J. Accuracy and reliability of pedotransfer functions as affected by grouping soils. *Soil Science Society of America Journal*, v.63, p. 1748-1757, 1999. DOI: 10.2136/sssaj1999.6361748x
- REICHARDT, K.; TIMM, L. C. Solo, Planta e Atmosfera: conceitos, processos e aplicações. In: REICHARDT, K. (Ed.). *Redistribuição da água no solo*. Barueri: Manole, 2004. c.12, p.269-292.
- REICHERT, J. M.; ALBUQUERQUE, J. A.; KAISER, D. R.; REINERT, D. J.; URACH, F. L.; CARLESSO, R. Estimation of water retention and availability in soils of Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.33, p.1547-1560, 2009. DOI: 10.1590/S0100-06832009000600004
- 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*, v.21, e00277, 2020. DOI: 10.1016/j.geodrs.2020.e00277
- RICHARDS, L. A.; WEAVER, L. R. Fifteen-atmosphere percentage as related to the permanent wilting percentage. *Soil Science*, v.56, n.5, p.331-340, 1943. DOI: 10.1097/00010694-194311000-00002
- ROSSETI, R. A. C.; AMORIM, R. S. S.; DI RAIMO, L. A. D. L.; TORRES, G. N.; SILVA, L. C. M.; ANDRADE, I. A. Pedotransfer functions for predicting soil-water retention under Brazilian Cerrado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.27, e02474, 2022. DOI: 10.1590/S1678-3921.pab2022.v57.02474

- SÁ, M. A. C.; VIANA, J. H. M. Retenção de água no solo pelo método da centrífuga. Brasília: Embrapa, 2017. Separata em: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA W. G. (Ed). **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3 ed. rev. e ampl. Brasília: Embrapa, 2017. p.53-64.
- SANTRA, P.; KUMAR, M.; KUMAWAT, R. N.; PAINULI, D. K.; HATI, K. M.; HEUVELINK, G. B. M.; BATJES, N. H. Pedotransfer functions to estimate soil water content at field capacity and permanent wilting point in hot Arid Western India. **Journal of Earth System Science**, v.127, p.1-16, 2018. DOI: 10.1007/s12040-018-0937-0
- SAXTON, K. E.; RAWLS, W. J. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. **Soil science society of America Journal**, v.70, n.5, p.1569-1578, 2006. DOI: 10.2136/sssaj2005.0117
- SCORZA JÚNIOR, R. P.; SILVA, J. P. Avaliação do potencial de contaminação dos recursos hídricos por pesticidas na Bacia do Rio Dourados, MS. **Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente**, v.17, p.87-106, 2006. DOI: 10.5380/pes.v17i0.10666
- SILVA, Á. P.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; IMHOFF, S. Funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.1-10, 2008. DOI: 10.1590/S0100-06832008000100001
- SOUZA, A. C.; TORRENT, J. Caracterização físico-química de argilas do bioma Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.45, e0007111, 2021. DOI: 10.3891/rbcs.2021.e0007111
- TEIXEIRA, W. G.; BHERING, S. B. Retenção de água no solo pelos métodos da mesa de tensão e da câmara de Richards. Brasília: Embrapa, 2020. Separata de: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA W. G. (Ed). **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3 ed. rev. e ampl. Brasília: Embrapa, 2017. p.33-46.
- TEIXEIRA, W. G.; MARTINS, A. L. S. C. M. M.; LUMBRERAS, J. F. Retenção de água em amostras de solos da XIII RCC, estado do Maranhão. Brasília: Embrapa, 2020. Separata de: SILVA, M. B.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; OLIVEIRA, V. A. (Ed.). **Guia de campo da XIII Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos: RCC do Maranhão**. Brasília: Embrapa, 2020. c.14, ePub.
- TEIXEIRA, W. G.; VICTORIA, D. C.; BARROS, A. H. C.; LUMBRERAS, J. F.; ARAUJO FILHO, J. C.; SILVA, F. A. M.; LIMA, E. P.; BUENO FILHO, J. S. S.; MONTEIRO, J. E. B. A. **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 de pesquisa e desenvolvimento 272. ISSN: 1678-0892
- TEIXEIRA, W. G.; MARTINS, A. L. S.; PIMENTEL, L. G.; HUF DOS REIS, A. M.; VALLE, L. G. F.; SANTOS, G. D.; PEREIRA, C. M. M.; LUMBRERAS, J. F. Avaliação e estimativas dos teores de água retida a 1500 kPa (ponto de murcha permanente) em amostras dos horizontes de solos dos perfis da XIV Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos - RCC de Goiás e Tocantins. Brasília: Embrapa, 2023. Separata de: SANTOS, G. G.; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, R. E. M. de; MADARI, B. E. (Ed.). **Guia de campo da XIV Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos: RCC de Goiás e Tocantins**. Brasília: Embrapa, 2023. c.18, ePub.
- TOMASELLA, J.; HODNETT, M. G. Estimating soil water retention characteristics from limited data in Brazilian Amazonia. **Soil science**, v.163, n.3, p.190-202, 1998. DOI: 10.1097/00010694-199803000-00003
- TOMASELLA, J.; HODNETT, M. G.; ROSSATO, L. Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in Brazilian soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.64, p.327-338, 2000. DOI: 10.2136/sssaj2000.641327x
- TOMASELLA, J.; PACHEPSKY, Y.; CRESTANA, S.; RAWLS, W. J. Comparison of two techniques to develop pedotransfer functions for water retention. **Soil Science Society of America Journal**, v.67, p.1085-1092, 2003. DOI: 10.2136/sssaj2003.1085
- TORMENA, C. A.; DA SILVA, A. P. Incorporation of the bulk density to two models adjusted to the soil water retention curve. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** v.26, p.305-314, 2002. DOI: 10.1590/S0100-06832002000200003
- URACH, F. L. **Estimativa da retenção de água em solos para fins de irrigação**. 2007. 79p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.
- URCHEI, M. A. O potencial dos solos de Mato Grosso do Sul para Agricultura Irrigada. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2001. Separata de: URCHEI, M. A.; FIETZ, C. R. **Princípios de Agricultura Irrigada: Caracterização e Potencialidades em Mato Grosso do Sul**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2001. c.6 p.77-99.
- VAN DEN BERG, M.; KLAMT, E.; REEUWIJK, L. P.; SOMBROEK, W. G. Pedotransfer functions for the estimation of moisture retention characteristics of Ferralsols and related soils. **Geoderma**, v. 78, n. 3-4, p. 161-180, 1997. DOI: 10.1016/S0016-7061(97)00045-1
- VEIHMEYER, F. J.; HENDRICKSON, A. H. Soil moisture at permanent wilting of plants. **Plant Physiology**, v. 3, n. 3. P. 355-357, 1928. DOI: 10.1104/pp.3.3.355
- VEIHMEYER, F. J.; HENDRICKSON, A. H. Methods of measuring field capacity and permanent wilting percentage of soils. **Soil Science**, v. 68, n. 1, p. 75-94, 1949. DOI: 10.1097/00010694-194907000-00007
- WIECHETECK, L. H.; GIAROLA, N. F. B.; LIMA, R. P.; TORMENA, C. A.; TORRES, L. C.; PAULA, A. L. Comparing the classical permanent wilting point concept of soil (-15.000 hPa) to biological wilting of wheat and barley plants under contrasting soil textures. **Agricultural Water Management**, v. 230, n. 1, p. e105965, 2020. DOI: 10.1016/j.agwat.2019.105965

REFERENCIAÇÃO

- PIMENTEL, L. G.; TEIXEIRA, W. G.; BHERING, S. B.; HERNANI, L. C. Estimativa da umidade do solo no ponto de murcha permanente para solos do sul do Mato Grosso do Sul. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v.32, e027637, 2024.



Soil water content estimation at permanent wilting point in southern Mato Grosso do Sul soils, Brazil

Leticia Guimarães Pimentel^{1(*)}, Wenceslau Geraldes Teixeira², Silvio Barge Bhering² and Luís Carlos Hernani²

¹Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rua São Francisco Xavier, 524, CEP 20550-900 Rio de Janeiro, RJ, Brazil. Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental - PEAMB - E-mail: leticia.ambient@gmail.com

²Embrapa Solos. Rua Jardim Botânico, 1024, CEP 22460-000 Rio de Janeiro, RJ, Brazil.

E-mails: wenceslau.teixeira@embrapa.br, silvio.bhering@embrapa.br and luis.hernani@embrapa.br

(*)Corresponding author.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 17 April 2024

Accepted 9 September 2024

Index terms:

permanent wilting point

pedotransfer function

hierarchy

textural group

soil class

ABSTRACT

The study aims to evaluate the reliability of pedotransfer functions (PTFs) to estimate soil moisture at the permanent wilting point (θ_{PMP}) in soils in southern Mato Grosso do Sul, in a hierarchical system, using θ_{PMP} values as a function of the textural group and the soil class. Data on θ_{PMP} , particle size, soil density and organic matter content were collected from 30 soil samples. A box-plot graphical analysis of the relationship between θ_{PMP} and textural groups was carried out and means, medians and confidence intervals were obtained for θ_{PMP} values estimated for soil classes obtained in studies from other regions of Brazil. The reliability of the PTFs was evaluated using statistics such as RMSE and R^2 and graphical analyzes of residue dispersion versus predicted values and 1:1 purification graphs between predicted and collected θ_{PMP} data. It is recommended to use the values $0.043 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ for sandy texture, $0.143 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ for medium texture, $0.278 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ for clayey texture and $0.296 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ for very clayey texture, when only the textural group is known. The PTF- θ_{PMP} of Oliveira et al. (2002) is the one that presents the best reliability, being the most suitable for estimating θ_{PMP} for the soils of the Ivinhema, Amambai and Iguatemi river basins.

© 2024 SBAgro. All rights reserved.

CITATION

PIMENTEL, L. G.; TEIXEIRA, W. G.; BHERING, S. B.; HERNANI, L. C. Estimativa da umidade do solo no ponto de murcha permanente para solos do sul do Mato Grosso do Sul. *Agrometeoros*, Passo Fundo, v.32, e027637, 2024.