



USO DE EQUAÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA (PTF) PARA ESTIMATIVA DA DENSIDADE DO SOLO NAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS AMAMBAI, IGUATEMI E IVINHEMA NO ESTADO DO MATO GROSSO DO SUL

Leticia Guimarães Pimentel¹
Wenceslau Geraldes Teixeira²
Luís Carlos Hernani³
Silvio Barge Bhering⁴
Lillyane Gomes de França Valle⁵

RESUMO

Referencial teórico: A densidade do solo (Ds) é uma propriedade física utilizada como indicador do grau de compactação do solo, influenciando o crescimento e a densidade de raízes, a movimentação e a retenção de água no solo. É uma propriedade indispensável para avaliações de estoques de carbono e de nutrientes no solo.

Objetivo: Este artigo avalia a acurácia e seleciona funções de pedotransferência (PTFs) para estimativas de Ds (PTF-Ds) para os solos das bacias dos Rios Amambai, Iguatemi e Ivinhema no Mato Grosso do Sul - MS.

Método: Foram feitas estimativas dos valores de Ds de 88 amostras por onze PTFs-Ds que foram calibradas para estimar Ds para solos do Brasil. A avaliação da acurácia das predições das PTFs-Ds baseia-se nos índices: menores valores da raiz do erro quadrático médio (RMSE) e maiores valores do coeficiente de determinação (R²).

Resultados e conclusão: As PTFs-Ds mais acuradas dentre as onze analisadas foram as PTFs-Ds 1, 2, 3 e 4 de Huf dos Reis et al. (2024) e a PTF-Ds 5 de Tomasella e Hodnett (1998). A PTF-Ds 3 que utiliza como preditores areia fina e grossa e argila apresentou maior acurácia para o conjunto total de dados (88 amostras). A PTF-Ds 5 obteve melhor acurácia ao estimar Ds em Latossolos Vermelhos, Argissolos Vermelho Amarelos e Neossolos Quartzarênicos.

Implicações da pesquisa: Encontrar as melhores PTFs para estimativa da Ds para os solos da área de estudo, permitirá cálculos de estoques de carbono e do uso de outras PTFs que necessitam dessa propriedade.

Originalidade/valor: PTFs para estimativa de Ds para os solos do estado do MS ainda não foram desenvolvidas, então há necessidade em indicar PTFs já existentes para o uso na região de estudo.

Palavras-chave: Função de Pedotransferência, Densidade do Solo, Classe de Solo, Classe Textural, Uso da Terra.

¹ Embrapa Solos, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil. E-mail: leticia.ambient@gmail.com
Orcid: <https://orcid.org/0009-0006-7096-4405>

² Embrapa Solos, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil. E-mail: wenceslau.teixeira@embrapa.br
Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-2010-6078>

³ Embrapa Solos, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil. E-mail: luis.hernani@embrapa.br
Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-1346-466X>

⁴ Embrapa Solos, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil. E-mail: silvio.bhering@embrapa.br
Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-0189-5905>

⁵ Embrapa Solos, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil. E-mail: lillyane.valle@gmail.com
Orcid: <https://orcid.org/0009-0002-2752-8502>



USE OF PEDOTRANSFER EQUATIONS (PTF) TO ESTIMATE SOIL DENSITY IN THE HYDROGRAPHIC BASINS OF THE AMAMBAL, IGUATEMI AND IVINHEMA RIVERS IN THE STATE OF MATO GROSSO DO SUL

ABSTRACT

Theoretical framework: Bulk density (Bd) is a physical property of soil used as an indicator of soil compaction, influencing root growth and density, water movement and retention in the soil, it is an essential characteristic for assessments of carbon stocks or other nutrients in the soil.

Objective: This study evaluates the accuracy and selects pedotransfer functions (PTFs) for Bd estimates for soils in the Amambai, Iguatemi, and Ivinhema River basins in Mato Grosso do Sul - MS.

Method: Estimates of Bd values of the samples were made using eleven PTFs-Bd that were calibrated to estimate Bd for Brazilian soils. The accuracy of PTFs-Bd predictions is evaluated based on the lower root mean square error (RMSE) and the higher coefficient of determination (R^2).

Results and conclusion: Among the eleven analyzed PTFs-Bd, the most accurate ones were PTFs- Ds 1, 2, 3, and 4 by Huf dos Reis et al. (2024) and the one by Tomasella and Hodnett (1998). PTF-Bd 3, which uses fine and coarse sand and clay as predictors, showed the highest accuracy for the total dataset (88 samples). PTF-Bd 5 obtained better accuracy in estimating Bd in Red Oxisols, Red Yellow Ultisols, and Entisols Quartzipsamments.

Research implications: Identifying the best PTFs for estimating Bd for the study area's soils will facilitate other research as carbon stocks estimation and use of hydrophysical PTFs that use Bd as predictor.

Originality/Value: PTFs for estimating Bd for soils in the state of MS have not yet been developed, highlighting the need to evaluate and indicate between existing PTFs the more accurate.

Keywords: Pedotransfer Function, Bulk Density, Soil Class, Textural Class, Land Use.

RGSA adota a Licença de Atribuição CC BY do Creative Commons (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



1 INTRODUÇÃO / REFERÊNCIAL TEÓRICO

A densidade do solo (D_s) é a razão entre a massa de uma amostra de solo seca (em g) e seu volume (sólidos mais poros, em cm^3) (Hillel, 1998).

É considerada uma das propriedades físicas fundamentais do solo. Indicador do grau de compactação do solo, influenciando o crescimento e a densidade de raízes, a movimentação e a retenção de água no solo, é uma característica indispensável para avaliações de estoques de carbono ou outros nutrientes no solo (Reichardt e Timm, 2004; De Vos et al., 2005).

O método do cilindro volumétrico é o mais utilizado para as medições da D_s . Consiste na coleta de uma amostra de solo indeformada, através da inserção no solo, de um cilindro volumétrico de volume conhecido para a determinação de uma amostra com volume e massa conhecida. As amostras são secas em estufa a 105°C sendo então pesadas para a obtenção da massa seca do solo. A D_s é então calculada pela divisão da massa (g) pelo volume do cilindro, em cm^3 (Teixeira et al., 2017).

Outro método de estimativa da D_s é o uso de Funções de Pedotransferência (PTFs), que vem sendo usado pelos cientistas do solo como forma de superar as restrições associadas às medições diretas (Obidike-Ugwu et al, 2023).

As funções de pedotransferência (*PedoTransferFunction* - PTF) são ferramentas estatísticas preditivas baseadas em propriedades físicas e químicas do solo mais amplamente



disponíveis e medidas (Bouma, 1989). Essas PTFs foram desenvolvidas para estimar Ds a partir de um conjunto de dados específicos como granulometria (teores das frações areia, silte e argila) conteúdo de carbono orgânico (CO), pH, soma de cátions (Benites et al., 2007, Alexander, 1980; Manrique e Jones, 1991; Kaur et al., 2002; Souza et al., 2016; Nanko et al., 2014), também dados da classe, uso da terra e da profundidade do solo (Palladino et al. 2022).

As PTFs para estimativas da Ds (PTFs-Ds) têm sido elaboradas tanto para estimativas regionais (Tomasella e Hodnett, 1998; Bernoux et al., 1998; de Souza, et al., 2016; Barros, et al., 2015), como também nacionais (Benites et al, 2007; Huf dos Reis, 2024) e mundiais (Rawls, 1983; Han et al., 2012; Al-Qinna e Jaber, 2013; Nanko et al., 2014; Sevastas et al., 2018; Palladino et al., 2022; Obidike-Ugwu, 2023). No entanto, o uso das PTFs em regiões diferentes das quais elas foram calibradas devem ter sua precisão avaliada previamente (Kaur et al., 2002; McBratney et al., 2002).

O objetivo deste estudo é avaliar a acurácia, selecionar e indicar PTFs para estimativas de Ds para os solos das bacias dos Rios Amambai, Iguatemi e Ivinhema no Mato Grosso do Sul.

Objetivos específicos:

1. Estimar a densidade do solo através de onze funções de pedotransferência;
2. Avaliar a acurácia das predições de densidade do solo nas diferentes bacias;
3. Indicar as PTFs mais acuradas para a região de estudo, em função da disponibilidade de parâmetros preditores para as bacias Amambai, Iguatemi e Ivinhema.

2 MÉTODO

2.1 Área de Estudo

O estudo abrangeu uma busca de dados de densidade do solo e parâmetros do solo nas áreas das bacias dos Rios Amambai, Iguatemi e Ivinhema no estado do Mato Grosso do Sul, que totalizam uma área de 64 mil km² de extensão abrangendo 37 municípios (Figura 1). O clima da região de estudo segundo a classificação de Köppen é o subtipo Cfa – subtropical úmido (Alvares et al., 2013).

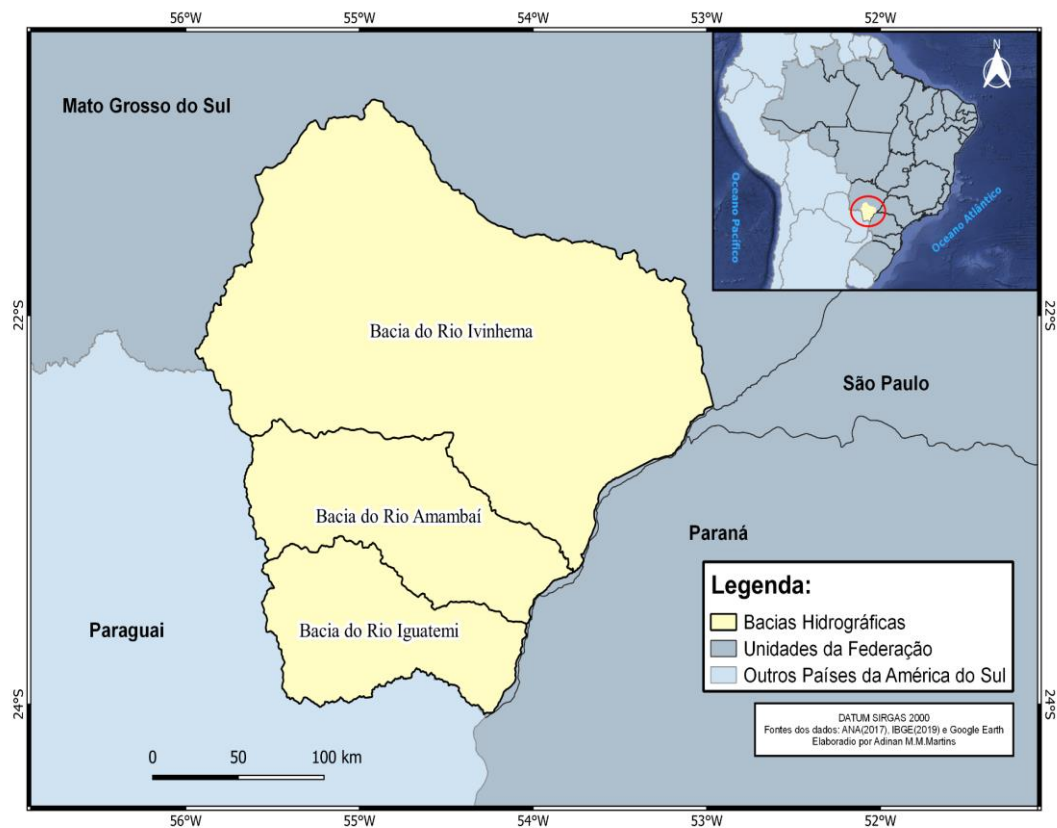


Figura 1: Mapa de localização das bacias dos Rios Ivinhema, Amambai e Iguatemi.

Fonte: ANA, 2017; IBGE-BDIA, 2019 e Google Earth, adaptado por Martins, A. M. M.

2.2 Seleção e Descrição de Dados

Um banco de dados (BD-MS_Ds) foi organizado com dados de densidade do solo (Ds) das três bacias da área de estudo, que foram obtidos em trabalhos publicados. O BD-MS_Ds totaliza 88 dados de Ds observados, incluindo informações de teores de argila, silte, areia fina e grossa e carbono orgânico (CO).

O BD-MS_Ds também conta com dados de localização, como município, microbacia, coordenadas e elevação. Além de classe de solo, sistemas de uso da terra, profundidade e classe textural.

Os dados de classe de solo e de classe textural foram harmonizados conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (dos Santos et al., 2023) e os sistemas de uso da terra pela legenda da Coleção 7 do MapBiomas (2023).

2.3 Seleção das PTFs para Estimativas de Ds (PTFs-Ds)

Foram feitas estimativas dos valores de Ds das amostras por onze PTFs-Ds que foram calibradas para estimar Ds para solos do Brasil (Tabela 1). Foram consideradas apenas as amostras que estavam dentro da faixa de valores granulométricos e de conteúdo de carbono para as quais as PTFs-Ds foram desenvolvidas (domínio da função). Estas PTFs-Ds e os preditores necessários delas estão descritos na Tabela 1 e seus domínios na Tabela 2.



Tabela 1. Funções de pedotransferência de Huf dos Reis et al (2023), Tomasella e Hodnett (1998), Bernoux et al (1998) e Benites et al (2007), seus preditores e número de amostras utilizadas para desenvolver cada PTF-Ds.

Funções	Referências	Preditores	PTF	N°
		%		
PTF-Ds 1	Huf dos Reis et al, 2024 - 1	Areia, Argila	$Ds = 1.286 + 3.208 \times 10^{-3}(Areia) - 2.013 \times 10^{-3}(Argila)$	3.050
PTF-Ds 2	Huf dos Reis et al, 2024 - 2	Areia, Argila, CO	$Ds = 1.358 + 2.79 \times 10^{-3}(Areia) - 2.328 \times 10^{-3}(Argila) - 0.052(CO)$	2.827
PTF-Ds 3	Huf dos Reis et al, 2024 - 3	Areia f, Areia g, Argila	$Ds = 1.198 + 2.971 \times 10^{-3}(Areia f) + 4.472 \times 10^{-3}(Areia g) - 8.706 \times 10^{-4}(Argila)$	1.081
PTF-Ds 4	Huf dos Reis et al, 2024 - 4	Areia f, Areia g, Argila, CO	$Ds = 1.243 + 2.983 \times 10^{-3}(Areia f) + 4.187 \times 10^{-3}(Areia g) - 5.793 \times 10^{-4}(Argila) - 6.208 \times 10^{-2}(CO)$	990
PTF-Ds 5	Tomasella e Hodnett, 1998	Argila, Sil, CO	$Ds = 1,578 - 0,058(CO) - 0,006(Sil) - 0,004(Argila)$	2.827
PTF-Ds 6	Bernoux et al, 1998 - 1	Argila	$Ds = 1,352 - 0,0045(Argila)$	2.955
PTF-Ds 7	Bernoux et al, 1998 - 2	Argila, CO	$Ds = 1,398 - 0,0047(Argila) - 0,042(CO)$	2.711
PTF-Ds 8	Benites et al, 2007 - 1	Argila	$Ds = 1,5224 - 0,0005(Argila)$	3.050
PTF-Ds 9	Benites et al, 2007 - 2	Argila, CO	$Ds = 1,5688 - 0,0005(Argila) - 0,009(CO)$	2.804
PTF-Ds 10	Benites et al, 2007 - 3	Argila, CO	$Ds = 1,554 - 0,0004(Argila) - 0,01(CO)$	423
PTF-Ds 11	Benites et al, 2007 - 4	Argila, CO	$Ds = 1,567 - 0,0005(Argila) - 0,006(CO)$	345

N° - número de amostras; Areia f - areia fina; Areia g - areia grossa; CO - carbono orgânico;

Fonte: os autores.

Tabela 2. Domínios dos preditores das funções de pedotransferência de Huf dos Reis et al (2024), Tomasella e Hodnett (1998), Bernoux et al (1998) e Benites et al (2007).

Funções	Referências	Argila	Silte	Areia f	Areia g	Areia Total	CO
		%					
PTF-Ds 1	Huf dos Reis et al, 2024 - 1	0-96	NA	NA	NA	0-98,8	NA
PTF-Ds 2	Huf dos Reis et al, 2024 - 2	0-96	NA	NA	NA	0-98,8	0-9,8
PTF-Ds 3	Huf dos Reis et al, 2024 - 3	0-96	NA	0-97,2	0-97	NA	NA
PTF-Ds 4	Huf dos Reis et al, 2024 - 4	0-96	NA	0-97,2	0-97	NA	0-9,8
PTF-Ds 5	Tomasella e Hodnett, 1998	0-100	0-71	NA	NA	NA	NA
PTF-Ds 6	Bernoux et al, 1998 - 1	3,9-90,75	NA	NA	NA	NA	NA
PTF-Ds 7	Bernoux et al, 1998 - 2	3,9-90,75	NA	NA	NA	NA	0,04-12,16
PTF-Ds 8	Benites et al, 2007 - 1	0-96	NA	NA	NA	NA	0,03-20,6
PTF-Ds 9	Benites et al, 2007 - 2	0-96	NA	NA	NA	NA	0,03-20,6
PTF-Ds 10	Benites et al, 2007 - 3	0-96	NA	NA	NA	NA	0,03-20,6
PTF-Ds 11	Benites et al, 2007 - 4	0-96	NA	NA	NA	NA	0,03-20,6

Areia f - areia fina; Areia g - areia grossa; CO - carbono orgânico; NA - não se aplica;

Fonte: os autores.

A avaliação da acurácia das predições das PTFs-Ds foi baseada nos índices: raiz do erro quadrático médio (RMSE, do inglês *Root Mean Square Error*) estimado usando a Equação 1 e no coeficiente de determinação (R^2) que é baseado na covariância entre os valores de Ds observados e preditos (Equação 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:

\hat{y}_i é a estimativa do valor, \bar{y}_i é a média dos valores observados, y_i é o valor observado

A melhor acurácia média da predição entre as diferentes PTFs-Ds testadas é indicada por maiores valores de R^2 e dos menores valores de RMSE. A acurácia das estimativas das PTF-Ds foi estimada para o conjunto total de dados (88 amostras) e agrupadas por classe de solo, classe textural e sistema de uso do solo.

Gráficos de correlação 1:1 entre os dados preditos e os observados de Ds foram feitos para as cinco PTFs-Ds que apresentaram os menores RMSE (Huf dos Reis et al. 2024).

Análises gráficas de dispersão de resíduos *versus* valores preditos em relação às classes de solos, as classes texturais e dos sistemas de uso da terra.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados de Ds disponíveis no (BD-MS_Ds) compreende quatro classes de solo conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (dos Santos et al., 2023). A classe de solo com maior número de dados é o Latossolo Vermelho, com 75 amostras. As outras classes que têm dados de Ds na região estudada são os Plintossolos Argilúvicos, os Argissolos Vermelho Amarelos e o Neossolo Quartzarênico com, respectivamente, 5, 4 e 4 amostras (Tabela 4). As 88 amostras disponíveis estão distribuídas em oito classes texturais (Tabela 5). A textura muito argilosa é mais frequente com 34 amostras, e apenas uma amostra apresenta textura francoargilosa.

Cinco sistemas de uso da terra foram identificados, sendo os sistemas classificados como formação florestal e pastagem, os que apresentaram os maiores números de amostras com 35 e 27 amostras, respectivamente. Os sistemas que não foram possíveis de ser classificados estão denominados de mosaico de usos com cinco amostras, esse sistema de uso da terra não foi considerado nas análises de acurácia para sistemas de uso.

Os dados de Ds variaram entre 0,91 a 1,80 g cm⁻³, apresentando uma média de 1,33 g cm⁻³ (Tabela 3).

Na Tabela 3 são mostrados os intervalos de valores (máximo-mínimo) dos teores de argila, silte, areia fina, areia grossa e carbono orgânico das amostras de Ds que foram usados como preditores para as estimativas da Ds, com essas faixas é possível verificar se atendem o domínio dos parâmetros preditores com o qual as equações foram ajustadas (Tabela 2).

Tabela 3. Estatística descritiva dos valores de densidade do solo (Ds), frações granulométricas, e teores de carbono orgânico (CO) para o banco de dados de solos (BD-MS_Ds) do Mato Grosso do Sul.

Estatística descritiva	Ds	Argila	Silte	Areia total	Areia fina	Areia grossa	CO
	g/kg	-----%-----					
Máximo	1,80	77	34	93	56	51	2,92
Mínimo	0,91	3	3	11	5	2	0,10
Média	1,32	41	12	48	26	21	0,76
Mediana	1,40	54	11	27	16	10	0,71
Desvio padrão	0,23	26	7	29	15	16	0,73

Fonte: os autores.

A melhor acurácia entre as onze PTF-Ds avaliadas é indicada pelos menores valores de RMSE e maiores valores de R^2 (Tabela 4).

Entre as PTFs-Ds avaliadas, a proposta por Benites et al. (2007), identificada como PTF-Ds 11, exibiu o maior RMSE, alcançando um valor de 0,290. Por outro lado, a PTF-Ds 3,



também de autoria de Benites et al. (2007) e identificada como PTF-Ds 10, demonstrou o R^2 mais baixo, com um valor de 0,299. Esses resultados sugerem que essas funções exibiram as menores acurácias entre as equações analisadas.

A constatação de um valor reduzido de R^2 , como o observado nas propostas de Benites et al. (2007), que foi da ordem de 0,11, também foi corroborada por Souza et al. (2016). Este último estudo estimou os valores de densidade de solo (Ds) para 242 amostras de solo na bacia do rio Doce, localizada em Minas Gerais. Os autores atribuíram a diminuta acurácia das PTFs-Ds a uma elevada variabilidade presente no conjunto de dados utilizado para o desenvolvimento dessas equações.

As PTFs-Ds 1, 2, 3 e 4 de Huf dos Reis et al. (2024) e a PTF-Ds 5 de Tomasella e Hodnett (1998) obtiveram na combinação dos indicadores de acurácia, os melhores índices (baixos RMSE e altos R^2) dentre as onze PTFs testadas.

Tabela 4. Estimativas da acurácia das predições (Root Mean Square Error – RMSE e coeficiente de determinação R^2) da densidade do solo para as onze PTFs avaliadas inicialmente dos solos estudados nas bacias dos Rios Amambai, Iguatemi e Ivinhema no Mato Grosso do Sul.

Funções	Referências	RMSE	R^2
PTF-Ds 1	Huf dos Reis et al, 2024 - 1	0,1677	0,338
PTF-Ds 2	Huf dos Reis et al, 2024 - 2	0,1707	0,333
PTF-Ds 3	Huf dos Reis et al, 2024 - 3	0,1635	0,336
PTF-Ds 4	Huf dos Reis et al, 2024 - 4	0,1671	0,320
PTF-Ds 5	Tomasella e Hodnett, 1998	0,1685	0,318
PTF-Ds 6	Bernoux et al, 1998 - 1	0,2246	0,335
PTF-Ds 7	Bernoux et al, 1998 - 2	0,2022	0,336
PTF-Ds 8	Benites et al, 2007 - 1	0,2621	0,335
PTF-Ds 9	Benites et al, 2007 - 2	0,2895	0,317
PTF-Ds 10	Benites et al, 2007 - 3	0,2818	0,299
PTF-Ds 11	Benites et al, 2007 - 4	0,2902	0,330

Fonte: os autores.

Baixos teores de Ds geralmente são encontrados em solos com altos teores de matéria orgânica e ou de argila, especialmente os solos argilosos e muito argilosos bem estruturados como os Latossolos e Argissolos sob a vegetação original. O menor valor de Ds $0,91 \text{ g cm}^{-3}$ encontrado neste estudo, corroborando essa afirmativa, foi determinado num Latossolo Vermelho muito argiloso no estudo de Camargo e de Freitas, 1971.

Altos valores de Ds são encontrados em solos arenosos (p. ex: Neossolos Quartzarênicos e Espodossolos) (Huf dos Reis et al, 2024; Ottoni et al., 2018). No banco de dados (BD-MS_Ds) não há amostras de Espodossolos, apesar da ocorrência desse solo na região estudada (SEPLAN, 1988). O maior valor de Ds ($1,80 \text{ g cm}^{-3}$) foi encontrado num Plintossolo Argilúvico com classe textural franco-argilo-arenosa, sob pastagem (Camargo e Freitas, 1971).

A análise gráfica dos resíduos entre os dados de Ds observados e preditos para as funções de Huf dos Reis, et al (2024) e Tomasella e Hodnett (1998) apresentados na Figura 2, mostra que os maiores resíduos (subestimativas de ordem $0,4 \text{ g cm}^{-3}$) foram encontrados em seis amostras com os maiores valores de Ds, que variaram de $1,66$ a $1,80 \text{ g cm}^{-3}$ (Figura 2). Esses dados são provenientes de áreas com Latossolo Vermelho e Plintossolo Argilúvico, com sistema de uso de agricultura e de pastagem (Sobrinho et al. 2003; Camargo e Freitas, 1971). Esses sistemas de uso podem ter causado a compactação do solo devido a sistemas de manejo inadequados, como observado por Santana et al. (2018) em Argissolos Vermelho-Amarelo na região nordeste do Brasil. A classe textural dessas amostras é muito argilosa e argilosa, que geralmente têm baixos valores de Ds na sua condição original, entretanto solos dessas classes texturais são susceptíveis à compactação e ao aumento dos índices de Ds. Esses fatos reforçam que a especificidade do conjunto de dados utilizados para estimativa de Ds, pode alterar os



resultados das PTFs e o grande desafio para uma acurada PTF-Ds é a inclusão de um parâmetro estrutural, que permite diferenciar solos com granulometria e teores de carbono semelhantes, mas com diferentes estruturas ou graus de compactação.

As PTFs-Ds de Huf et al. (2024) foram desenvolvidas num sistema hierárquico com a inclusão de diferentes parâmetros preditores da Ds (Tabela 1). A inclusão de maior número de parâmetros preditores não necessariamente melhoram os índices de acurácia (RMSE e R^2) (Tabela 4).

Neste estudo, as PTFs-Ds 2 e 3 obtiveram boas acurácias, com RMSE próximos aos encontrados pelas PTFs-Ds 2 e 3 de Huf dos Reis et al. ($0,16 \text{ g cm}^{-3}$) (Tabela 4 e Figura 2).

A PTF-Ds 1 de Huf dos Reis et al., (2024) que utilizou somente dados de argila e areia, apresentou o valor de RMSE de $0,167 \text{ g cm}^{-3}$. A PTF-Ds 2 que utiliza como preditores argila, areia e CO, teve aumento de RMSE para $0,170 \text{ g cm}^{-3}$. A PTF-Ds 3 que não utiliza CO, mas fraciona a areia total em areia fina e grossa, reduziu o valor da RMSE para $0,163 \text{ g cm}^{-3}$, sendo a que apresentou melhor acurácia dentre as quatro PTFs-Ds propostas por Huf et al., (2024). A PTF 4 que tem como preditores argila, areia fina, areia grossa e CO neste estudo apresentou um valor de $0,167 \text{ g cm}^{-3}$, mostrando que nem sempre o acréscimo de mais variáveis preditoras aumentará a acurácia.

Tomasella e Hodnett (1998) desenvolveram a PTF-Ds 5 (Tabela 1) a partir de resultados de Ds avaliados em solos da Amazônia, encontraram um valor de R^2 de $0,60 \text{ g cm}^{-3}$. Huf dos Reis et al (2024), utilizando dados de Ds de todo o Brasil estimou um RMSE de $0,20$ e R^2 de $0,37 \text{ g cm}^{-3}$ para a PTF-Ds 5. Boschi et al. (2018) avaliou um conjunto com 884 amostras de solo para todos os biomas brasileiros e constatou que PTF-Ds 5 apresentou um valor de R^2 de $0,40$ e RMSE de $0,19 \text{ g cm}^{-3}$. Benites et al. (2007) utilizando a PTF-Ds 5 de Tomasella e Hodnett (1998) encontrou um RMSE de $0,28 \text{ g cm}^{-3}$ num estudo com 613 amostras. O presente trabalho também encontrou boa acurácia para a PTF-Ds 5 de Tomasella e Hodnett (1998), que obteve um valor RMSE de $0,17 \text{ g cm}^{-3}$ o terceiro menor valor dentre as PTFs-Ds testadas (Tabela 4 e Figura 2).

De acordo com De Vos et al. (2005), uma PTF-Ds apresenta uma acurácia satisfatória quando o RMSE está entre $0,12$ e $0,25 \text{ g cm}^{-3}$. Seguindo este critério, as PTFs-Ds 1,2,3,4 e 5 mostraram boa acurácia para os solos do Mato Grosso do Sul quando analisados de forma global, sem distinção de classe textural, classe de solo e por uso da terra.

A Figura 3 mostra os resultados dos gráficos de dispersão 1:1 e dados de correlação (R^2) entre valores observados e previstos de Ds para as PTFs-Ds 1, 2, 3, 4 e 5, classificados também em classes de solos, classe textural e sistema de uso do solo. Observa-se que Ds tende a ser superestimada para Neossolos Quartzarênicos, principalmente em sistemas de uso como pastagem (Figura 3). Os valores de Ds dos Plintossolos Argilúvicos foram subestimados (Figura 2).

Foram feitas da RMSE por classe de solo, classe textural e uso da terra, apresentados nas Tabelas 5, 6 e 7 (Figuras 2 e 3). Os RMSEs reduziram seus valores quando classificados por esses critérios, menos para a classe de solo Plintossolo Argilúvico (Tabela 5), classe textural Francoarenosa e muito argilosa (Tabela 6) e sistema de uso da terra Agricultura (Tabela 7).

A PTF-Ds 3 desenvolvida por Huf dos Reis et al. (2024) obteve a melhor acurácia dentre os cinco modelos quando analisados todos os dados do Mato Grosso do Sul em conjunto (RMSE = $0,163 \text{ g cm}^{-3}$), porém se o conjunto de dados for analisado separadamente, pelos sistemas de uso, classe de solo e classe textural, as PTFs-Ds apresentam acurácias diferentes.

A PTF-Ds 5 de Tomasella e Hodnett (1998), que obteve a quarta melhor acurácia com todos os dados, foi o que apresentou maior melhora nos valores de RMSE quando os dados foram analisados separadamente. Considerando os dados mais representativos (maior número de amostras), a PTF-Ds 5 foi capaz de estimar a Ds de forma mais eficaz para Latossolos Vermelhos (RMSE = $0,154 \text{ g cm}^{-3}$) (Tabela 5) e para os sistemas de usos da terra, Formação



florestal (RMSE = 0,091 g cm⁻³) e Formação savânica (RMSE = 0,075 g cm⁻³) (Tabela 7). A PTF-Ds 1 de Huf dos Reis et al. (2024) se mostrou mais eficaz ao estimar Ds em solos de textura muito argilosa com RMSE de 0,206 g cm⁻³ e sistemas de Pastagem com RMSE de 0,160 g cm⁻³ (Tabela 6 e 7) e a PTF-Ds 4 de Huf dos Reis et al. (2024) obteve menor RMSE ao estimar Ds para solos com textura franco-argiloarenosa (RMSE = 0,148 g cm⁻³) (Tabela 6).

Tabela 5. Estimativas das incertezas das previsões (Root Mean Square Error – RMSE) da densidade do solo, por classe de solo dos solos estudados nas bacias dos Rios Amambai, Iguatemi e Ivinhema no Mato Grosso do Sul.

Classe de solo	Huf et al, 2024 - PTF-Ds 1	Huf et al, 2024 - PTF-Ds 2	Huf et al, 2024 - PTF-Ds 3	Huf et al, 2024 - PTF-Ds 4	Tomasella e Hodnett, 1998 - PTF-Ds 5	Nº de amostras
	-----RMSE-----					
Argissolo Vermelho Amarelo	0,056	0,065	0,049	0,043	0,049	4
Latossolo Vermelho	0,163	0,167	0,156	0,161	0,154	75
Neossolo Quartzarênico	0,121	0,140	0,084	0,102	0,073	4
Plintossolo Argilúvico	0,291	0,277	0,313	0,304	0,307	5

Números em negrito indicam os RMSEs para as amostras mais representativas de classe textural;

Fonte: os autores.

Tabela 6. Estimativas das incertezas das previsões (Root Mean Square Error – RMSE) da densidade do solo, por classe textural dos solos estudados nas bacias dos Rios Amambai, Iguatemi e Ivinhema no Mato Grosso do Sul.

Classe textural	Huf et al, 2024 - PTF-Ds 1	Huf et al, 2024 - PTF-Ds 2	Huf et al, 2024 - PTF-Ds 3	Huf et al, 2024 - PTF-Ds 4	Tomasella e Hodnett, 1998 - PTF-Ds 5	Nº de amostras
	-----RMSE-----					
Areia	0,118	0,133	0,083	0,095	0,067	3
Areia franca	0,099	0,105	0,081	0,080	0,065	8
Argiloarenosa	0,052	0,070	0,036	0,065	0,043	2
Argilosa	0,219	0,203	0,229	0,209	0,261	5
Franco-argiloarenosa	0,167	0,157	0,161	0,148	0,157	19
Francoarenosa	0,409	0,396	0,401	0,385	0,397	16
Francoargilosa	0,005	0,098	0,045	0,170	0,115	1
Muito argilosa	0,206	0,216	0,207	0,219	0,212	34

Números em negrito indicam os RMSEs para as amostras mais representativas de classe textural;

Fonte: os autores.

Tabela 7. Estimativas das incertezas das previsões (Root Mean Square Error – RMSE) da densidade do solo, por uso da terra dos solos estudados nas bacias dos Rios Amambai, Iguatemi e Ivinhema no Mato Grosso do Sul.

Uso da terra	Huf et al, 2024 - PTF-Ds 1	Huf et al, 2024 - PTF-Ds 2	Huf et al, 2024 - PTF-Ds 3	Huf et al, 2024 - PTF-Ds 4	Tomasella e Hodnett, 1998 - PTF-Ds 5	Nº de amostras
	-----RMSE-----					
Agricultura	0,313	0,339	0,312	0,337	0,339	10
Formação florestal	0,120	0,118	0,111	0,109	0,091	35
Formação savânica	0,112	0,099	0,097	0,079	0,075	11
Mosaico de usos	0,172	0,148	0,169	0,151	0,123	5
Pastagem	0,160	0,162	0,161	0,163	0,185	27

Números em negrito indicam os RMSEs para as amostras mais representativas de classe textural;

Fonte: os autores.

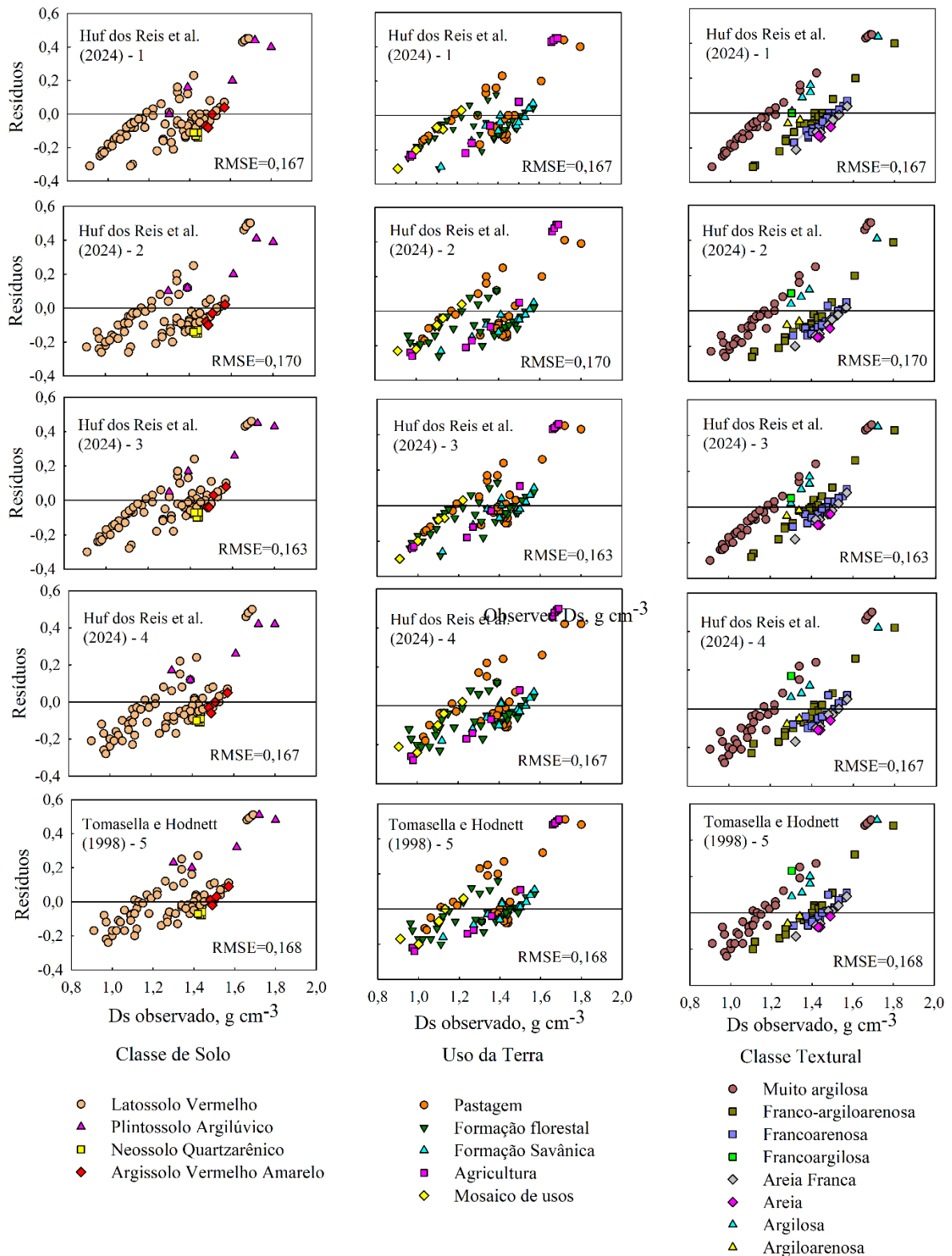


Figura 2. Dispersão dos resíduos *versus* valores de densidade observados pelas PTF-Ds 1, 2, 3 e 4 de Huf dos Reis et al. (2024) e PTF-Ds 5 de Tomasella e Hodnett (1998) dos solos estudados nas bacias dos Rios Amambai, Iguatemi e Ivinhema no Mato Grosso do Sul, organizados pela classe textural, classe de solo e uso da terra.

Fonte: Os autores.

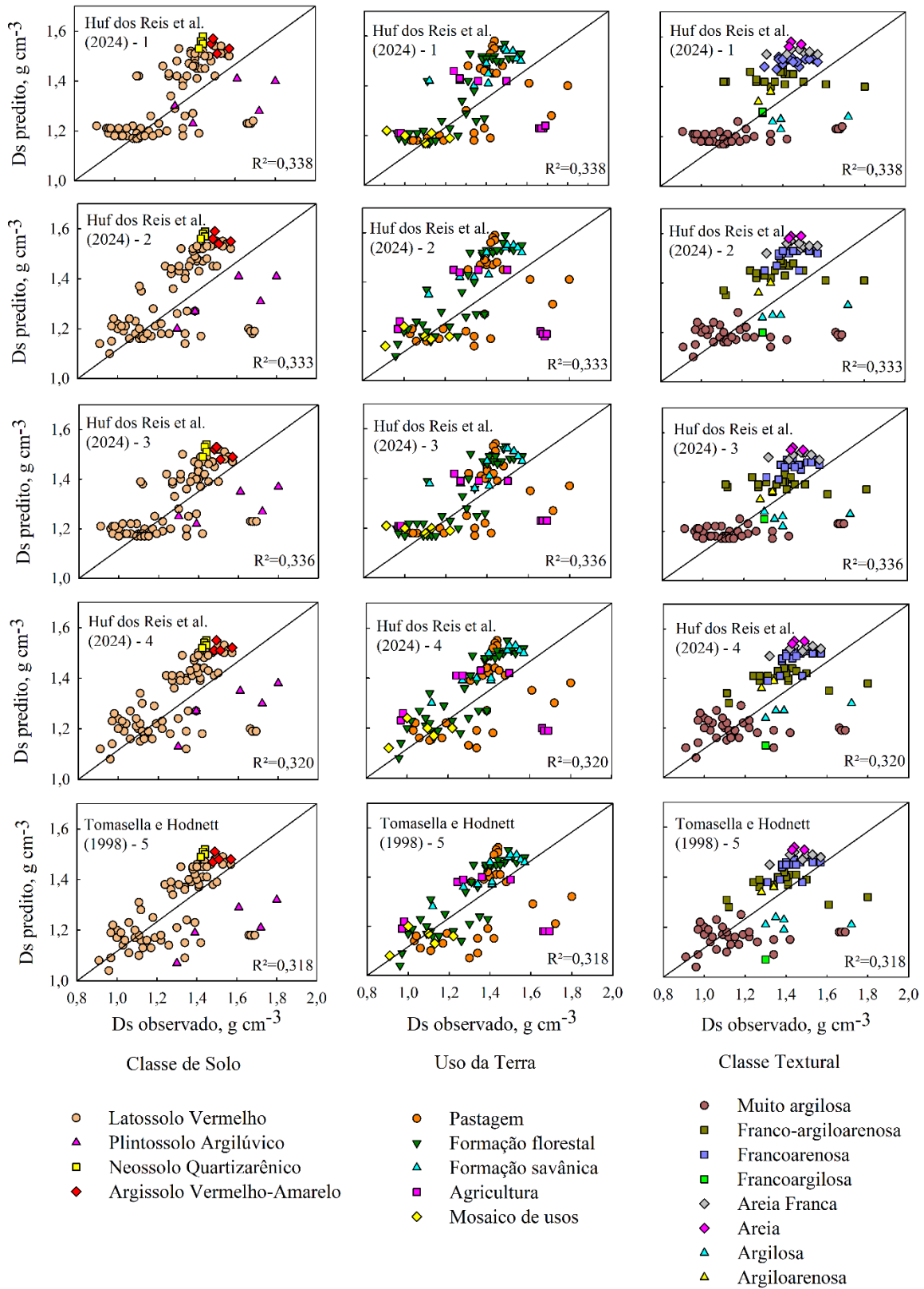


Figura 3. Gráficos de dispersão 1:1 dos dados de valores de densidade do solo (Ds) observados *versus* Ds preditos pelas funções 1, 2, 3 e 4 de Huf dos Reis et al., (2024) e PTf-Ds 5 de Tomasella e Hodnett (1998) dos solos s nas bacias dos Rios Amambai, Iguatemi e Ivinhema no Mato Grosso do Sul, classificados por classe de solo, classe textural e sistema de uso da terra.

Fonte: Os autores.



4 CONCLUSÕES

Dentre as onze PTFs-Ds avaliadas as mais acuradas foram as PTF-Ds 1, 2, 3 e 4 de Huf dos Reis et al. (2024) e a PTF-Ds 5 de Tomasella e Hodnett (1998) com os menores RMSE.

Ao estimar a Ds para solos do Mato Grosso do Sul, a PTF-Ds 3 de Huf dos Reis et al. (2024) é recomendada quando estiverem disponíveis somente dados de granulometria. Quando as amostras adicionalmente dados dos teores de carbono orgânico a PTF-Ds 4 de Huf dos Reis et al. (2024) tende ser a mais acurada.

Para estimativa de Ds nos solos do Mato Grosso do Sul com classe textural Latossolo Vermelho, a PTF-Ds 5 de Tomasella e Hodnett (1998) tende ser a mais acurada.

A PTF-Ds 1 de Huf dos Reis et al. (2024) se mostrou mais acurada em solos de textura muita argilosa, e a PTF-Ds 4 de Huf dos Reis et al. (2024) para solos com textura franco-argiloarenosa.

Recomenda-se o ajuste de novas PTFs-Ds para a área das bacias dos Rios Amambai, Iguatemi e Ivinhema no estado do Mato Grosso do Sul, em especial com dados de outras classes de solos além dos Latossolos Vermelhos, que consiste no maior percentual dos dados disponíveis para região.

REFERÊNCIAS

Alexander, E. B. (1980). Bulk densities of California soils in relation to other soil properties. *Soil Science Society of America Journal*, 44(4), 689-692.

Al-Qinna, M. I., e Jaber, S. M. (2013). Predicting soil bulk density using advanced pedotransfer functions in an arid environment. *Transactions of the ASABE*, 56(3), 963-976.

Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, J. D. M., e Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische zeitschrift*, 22(6), 711-728.

ANA – Agência Nacional de Águas. Bacias Hidrográficas. (2017). Disponível em: <https://dadosabertos.ana.gov.br/maps/4db0ad90eca84da0836cef9458dcb285>. Acesso em: 27 ago. 2023

Barros, H. S., e Fearnside, P. M. (2015). Pedo-transfer functions for estimating soil bulk density in central Amazonia. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 39, 397-407.

Benites, V. M., Machado, P. L., Fidalgo, E. C., Coelho, M. R., e Madari, B. E. (2007). Pedotransfer functions for estimating soil bulk density from existing soil survey reports in Brazil. *Geoderma*, 139(1-2), 90-97.

Bernoux, M., Cerri, C., Arrouays, D., Jolivet, C., e Volkoff, B. (1998). Bulk densities of Brazilian Amazon soils related to other soil properties. *Soil Science Society of America Journal*, 62(3), 743-749.

Boschi, R. S., Bocca, F. F., Lopes-Assad, M. L. R. C., e Assad, E. D. (2018). How accurate are pedotransfer functions for bulk density for Brazilian soils? *Scientia Agricola*, 75, 70-78.

Bouma, J. (1989). Using soil survey data for quantitative land evaluation. *Advances in Soil Science*: 9, 177-213.



Camargo, M., e de Freitas, F. G. (1971). *Levantamento de reconhecimento dos solos do Sul do Estado de Mato Grosso*. (Vol. 18, 1º ed., pp. 839). Rio de Janeiro – RJ: Ministério da Agricultura.

De Vos, B., Van Meirvenne, M., Quataert, P., Deckers, J., e Muys, B. (2005). Predictive quality of pedotransfer functions for estimating bulk density of forest soils. *Soil Science Society of America Journal*, 69(2), 500-510.

dos Santos, H. G., Jacomine, P. K. T., dos Anjos, L. H. C., de OLIVEIRA, V. A., Lumbreras, J. F., Coelho, M. R., ... e Marques, F. A. (2023). Proposta de atualização da 5ª edição do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos: ano 2023.

Han, G. Z., Zhang, G. L., Gong, Z. T., e Wang, G. F. (2012). Pedotransfer functions for estimating soil bulk density in China. *Soil Science*, 177(3), 158-164.

Hillel, D. (1998). *Environmental soil physics*. Academic Press, San Diego.

Huf dos Reis, A. M., Teixeira, W. G., Fontana, A., Barros, A. Vasques, G., Victoria, D., Samuel-Rosa, A., Ottoni, M., B. A. Monteiro, J. E. (2024). Hierarchical Pedotransfer Functions to Predict Bulk Density in Brazilian Soils. *Scientia Agricola*. In press.

IBGE. Banco de Informações Ambientais – BdiA. (2019). Disponível em: <https://bdiaweb.ibge.gov.br/#/home> Acesso em: 05 out. 2023

Kaur, R., Kumar, S., e Gurung, H. P. (2002). A pedo-transfer function (PTF) for estimating soil bulk density from basic soil data and its comparison with existing PTFs. *Soil Research*, 40(5), 847-858.

Manrique, L. A., e Jones, C. A. (1991). Bulk density of soils in relation to soil physical and chemical properties. *Soil Science Society of America Journal*, 55(2), 476-481.

MAPBIOMAS. Codes of the legend classes and color palette used in MapBiomias Collection 7. (2023). Disponível em: https://mapbiomas-br-site.s3.amazonaws.com/downloads/_EN_C%C3%B3digos_da_legenda_Cole%C3%A7%C3%A3o_7.pdf. Acesso em: 27 ago. 2023.

McBratney, A. B., Minasny, B., Cattle, S. R., e Vervoort, R. W. (2002). From pedotransfer functions to soil inference systems. *Geoderma*, 109(1-2), 41-73.

Nanko, K., Ugawa, S., Hashimoto, S., Imaya, A., Kobayashi, M., Sakai, H., ... e Kaneko, S. (2014). A pedotransfer function for estimating bulk density of forest soil in Japan affected by volcanic ash. *Geoderma*, 213, 36-45.

Obidike-Ugwu, E. O., Ogunwole, J. O., e Eze, P. N. (2023). Derivation and validation of a pedotransfer function for estimating the bulk density of tropical forest soils. *Modeling Earth Systems and Environment*, 9(1), 801-809.

Ottoni, M. V., Ottoni Filho, T. B., Schaap, M. G., Lopes-Assad, M. L. R., e Rotunno Filho, O. C. (2018). Hydrophysical database for Brazilian soils (HYBRAS) and pedotransfer functions for water retention. *Vadose Zone Journal*, 17(1), 1-17.



- Palladino, M., Romano, N., Pasolli, E., e Nasta, P. (2022). Developing pedotransfer functions for predicting soil bulk density in Campania. *Geoderma*, 412, 115726.
- Rawls, W. J. (1983). Estimating soil bulk density from particle size analysis and organic matter content1. *Soil Science*, 135(2), 123-125.
- Reichardt, K., e Timm, L. C. (2004). *Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações*. (2 ed. Pp. 524). Barueri: Manole.
- Santana, M. D. S., de Andrade, E. M., Giongo, V., Salviano, A., e Cunha, T. (2018). Impacto da mudança do uso da terra sobre a densidade do solo em Argissolo no Semiárido.
- SEPLAN - SECRETARIA DE PLANEJAMENTO E COORDENAÇÃO GERAL. (1988). Projeto estudos integrados do potencial de recursos naturais: solo. Disponível em: <https://www.semadesc.ms.gov.br/estudos-integrados-do-potencial-de-recursos-naturais-de-mato-grosso-do-sul/>. Acesso em: 11 out. 2023.
- Sevastas, S., Gasparatos, D., Botsis, D., Siarkos, I., Diamantaras, K. I., e Bilas, G. (2018). Predicting bulk density using pedotransfer functions for soils in the Upper Anthemountas basin, Greece. *Geoderma Regional*, 14, e00169.
- Sobrinho, T. A., Vitorino, A. C., de Souza, L. C., Gonçalves, M. C., e Carvalho, D. F. D. (2003). Infiltração de água no solo em sistemas de plantio direto e convencional. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 7, 191-196.
- Souza, E. D., Fernandes Filho, E. I., Schaefer, C. E. G. R., Batjes, N. H., Santos, G. R. D., e Pontes, L. M. (2016). Pedotransfer functions to estimate bulk density from soil properties and environmental covariates: Rio Doce basin. *Scientia Agricola*, 73, 525-534.
- Teixeira, P. C., Donagemma, G. K., Fontana, A., e Teixeira, W. G. (2017). *Manual de métodos de análise de solo*. (3 ed. pp. 574). Brasília, DF: Embrapa.
- Tomasella, J., e Hodnett, M. G. (1998). Estimating soil water retention characteristics from limited data in Brazilian Amazonia. *Soil science*, 163(3), 190-202.
- Van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America journal*, 44(5), 892-898.