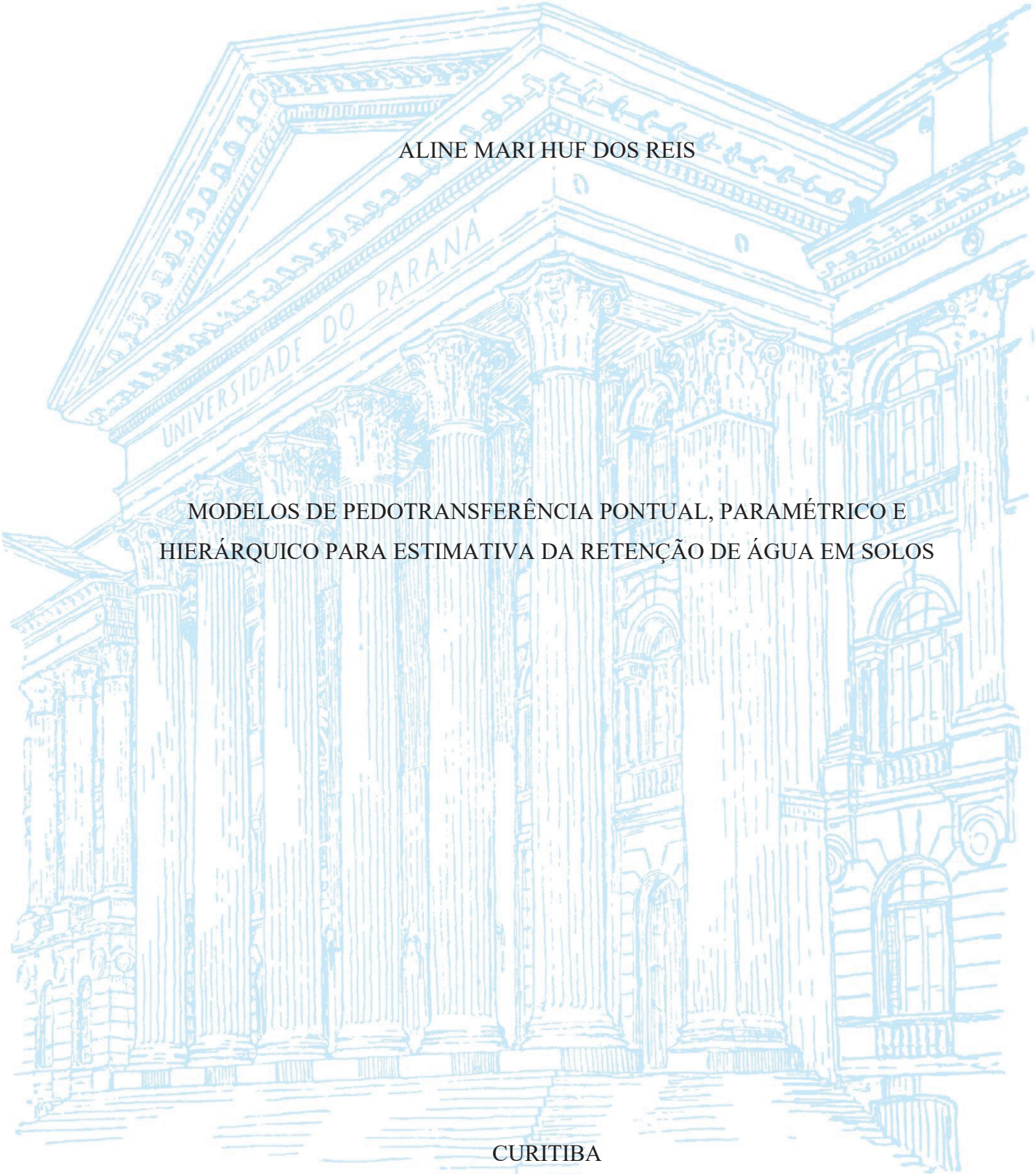
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ALINE MARI HUF DOS REIS



MODELOS DE PEDOTRANSFERÊNCIA PONTUAL, PARAMÉTRICO E HIERÁRQUICO PARA ESTIMATIVA DA RETENÇÃO DE ÁGUA EM SOLOS

CURITIBA

2020

ALINE MARI HUF DOS REIS

MODELOS DE PEDOTRANSFERÊNCIA PONTUAL, PARAMÉTRICO E HIERÁRQUICO PARA ESTIMATIVA DA RETENÇÃO DE ÁGUA EM SOLOS

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutora em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Robson André Armindo

Coorientador: Prof. Luiz Fernando Pires

CURITIBA

2020

Reis, Aline Mari Huf dos
Modelos de pedotransferência pontual, paramétrico e hierárquico para estimativa da retenção de água em solos. / Aline Mari Huf dos Reis. - Curitiba, 2020.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo.

Orientador: Robson André Armindo.

Coorientador: Luiz Fernando Pires.

1. Água do solo. 2. Solos - Características físicas. 3. Hidráulica agrícola. I. Armindo, Robson André. II. Pires, Luiz Fernando. III. Título. IV. Universidade Federal do Paraná.

Sistema de Bibliotecas/UFPR
Guilherme Luiz Cintra Neves - CRB9/1572

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIENCIAS AGRARIAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO CIÊNCIA DO SOLO - 40001016014P4

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIA DO SOLO da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **ALINE MARI HUF DOS REIS** intitulada: **MODELOS DE PEDOTRANSFERÊNCIA PONTUAL, PARAMÉTRICO E HIERÁRQUICO PARA ESTIMATIVA DA RETENÇÃO DE ÁGUA EM SOLOS**, sob orientação do Prof. Dr. ROBSON ANDRÉ ARMINDO, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 21 de Dezembro de 2020.

Assinatura Eletrônica
21/12/2020 12:10:07.0
ROBSON ANDRÉ ARMINDO
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
21/12/2020 12:09:58.0
MARCELO RIBEIRO VIOLA
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS)

Assinatura Eletrônica
21/12/2020 14:04:15.0
SERGIO MARTINS DE SOUZA
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS)

Assinatura Eletrônica
22/12/2020 09:50:37.0
TADEU MIRANDA DE QUEIROZ
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MATO GROSSO)

Assinatura Eletrônica
22/12/2020 09:54:22.0
GUILHERME KANGUSSÚ DONAGEMMA
Avaliador Externo (EMBRAPA SOLOS)

DEDICO

À toda minha família pelo apoio e cuidados recebidos por eles, especialmente à minha mãe, Mariane Esther Huf, por Deus tê-la escolhido para me amar e apoiar incondicionalmente, e ao meu avô, Erni Huf, por me ensinar que o conhecimento é o verdadeiro tesouro que carregamos durante nossa caminhada.

OFEREÇO

A todos os meus Professores do ensino básico, especialmente ao Prof. Darcy Cendron (Matemática), Profa. Iraide Cendron (Língua Portuguesa), Profa. Arlete Volpato Garcia (Química e Física), Profa. Dra. Marisa Smiderle (Química), Prof. Daniel Montibeller (Matemática) e Prof. Dr. Rafael Andre Mergener (Biologia), por me ensinarem com tanta sabedoria aquilo que vocês tinham de melhor a oferecer, a humildade ao transmitir o conhecimento!

AGRADECIMENTOS

Agradeço primariamente a Deus pela condução de minha vida até aqui, e por me agraciar com tantas pessoas boas que contribuíram com a minha formação pessoal e intelectual.

À minha família, em especial à minha amada mãe, Mariane Esther Huf, e aos meus preciosos avós, Olívia e Erni Huf, que nunca me abandonaram. Também à minha querida irmã e cunhado, Karina e Juliano Zachias, pelo apoio e companheirismo em mais essa etapa de minha vida. Agradeço a Deus pela vida de vocês.

Ao meu amado, Rafael Gobbi Molina, por todo o seu amor, carinho e compreensão dispensados a mim até aqui, além de toda ajuda e "socorro" técnico. Obrigada!

Agradeço também aos meus sogros por toda ajuda e incentivo, principalmente neste último ano.

Agradeço a companhia de todos os colegas do programa de pós-graduação em Ciência do Solo da UFPR, nesses quase três anos de curso. Especialmente ao colega e amigo Renato Teodoro de Lima pelo companheirismo nas atividades acadêmicas, e que, juntamente comigo, finaliza o seu doutorado.

Ao meu amigo Matheus F. D., por todo o incentivo e apoio em mais essa fase. Muito obrigada!

À minha amiga Dra. Jaqueline R. Borges, e sua família pela amizade e apoio para que eu concluísse mais essa etapa. Muito obrigada por tudo!

À minha amiga Ana Carolina M., pela força e apoio em todos esses anos de amizade. Obrigada pela sua presença!

Ao colega e amigo Jocenei A. T. de Oliveira, por confiar nas discussões acadêmicas que tivemos e que de alguma forma contribuíram para o seu trabalho de tese. Além de me fazer rir pelas redes sociais.

Agradeço também aos contribuintes de todo o Brasil por tornarem possível a realização de mais esse sonho sendo agraciada com bolsa de estudos pela CAPES.

Ao meu coorientador e amigo, Prof. Dr. Luiz Fernando Pires, pelos ensinamentos e oportunidades recebidos desde o período do Mestrado, agradeço a paciência e parceria para o desenvolvimento de mais esse trabalho.

E por fim e não menos importante, o responsável pela minha formação acadêmica desde o curso de graduação, o meu orientador e amigo, Prof. Dr. Robson André Armindo. Agradeço a oportunidade, incentivo e confiança recebidos, além de todos os ensinamentos transmitidos a mim ao longo desses anos. Serei sempre grata!

“Não se aprende nada nem se transpõe a zona de conforto quando se faz apenas o que se conhece bem.”

Justin Herald

“*Se nos propomos a ser grandes devemos decidir expor-nos a grandes livros e a grandes pessoas”*

John Maxwell

“A história agrícola de 10 a 13 milênios nos ensinou que o lema da civilização moderna deve ser "No solo confiamos".”

Rattan Lal

RESUMO

As funções de pedotransferência (*pedotransfer functions*) (PTFs) vêm sendo utilizadas há décadas como alternativa às práticas laboratoriais e de campo, as quais, muitas delas, são onerosas e demoradas. Análises de rotina, como a determinação da textura, densidade, pH e teor de matéria orgânica são necessárias e fornecem informações básicas para estimar propriedades físico-hidráulicas mais detalhadas e difíceis de se obter, como exemplo a curva de retenção de água (CRA) do solo. A CRA é uma função hidráulica de fundamental importância que auxilia na modelagem de projetos agrícolas, como os de irrigação, hidrologia e drenagem. Essa função relaciona a umidade volumétrica presente no solo (θ) a uma determinada tensão matricial (h) e é descrita por diversas equações que são ajustadas conforme os dados de $\theta(h)$ medidos em laboratório e no campo. Nesta tese selecionaram-se dados das bases UNSODA (internacional) e HYBRAS (nacional), totalizando um conjunto de 328 amostras com diversas propriedades físicas do solo. Com essas informações desenvolveram-se 26 novas PTFs pontuais para estimar valores chaves de $\theta(h)$ que compõem a CRA. A partir das PTFs de melhor desempenho de estimativa (precisão e exatidão), elaborou-se um modelo hierárquico-paramétrico de pedotransferência para estimar os parâmetros das equações de Van Genuchten (1980), Kosugi (1996) e Groenevelt & Grant (2004) para completa descrição da CRA. O desenvolvimento de novas PTFs pode dar suporte a programas de zoneamento agrícola de risco climático, auxiliando inclusive o financiamento monetário para produtores rurais.

Palavras-chave: Funções hidráulicas do solo; banco de dados de solos; pedofunção.

ABSTRACT

Pedotransfer functions (PTFs) have been applied as an alternative to laboratory and field practices, which are time-consuming and expensive. Routine analyses, such as soil texture, density, pH, and organic matter content are necessary and provide basic information used to estimate more detailed physical-hydraulic properties, which are difficult to obtain, such as the soil water retention curve (SWRC). SWRC is an important hydraulic function that supports modeling in agricultural water management and projects, such as irrigation, hydrology, and drainage. SWRC relates the volumetric soil water content (θ) as function of the soil water pressure head (h) and can be represented by several equations that are fitted with measured $\theta(h)$ data. In this work a set of 328 data from UNSODA and HYBRAS databases with a wide range of soil physical properties were selected. Twenty-six new point-PTFs were developed to estimate key $\theta(h)$ data that compose the SWRC. Based on the best prediction performance (precision and accuracy), a hierarchical-parametric pedotransfer model was developed to estimate the SWRC parameters of Van Genuchten (1980), Kosugi (1996), and Groenevelt & Grant (2004) equations. The development of new PTFs can hold up several programs of climate risk zoning to agriculture, even supporting in rural economic financing to agriculture practices.

Keywords: Soil hydraulic functions; soil database; pedofunction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Distribuição dos 328 pontos no triângulo textural segundo a classificação do USDA (Soil Survey Staff, 2014). 27

Figura 2.2 - Distribuição textural dos dados utilizados para calibração e validação dos modelos analisados. 30

Figura 2.3 – Comparação entre umidade medida na tensão matricial de 0,1 m e estimada pelas PTFs. (A) resultados da PTF-B1 de Botula (2013) original e recalibrada e (B) resultados das duas PTFs propostas (PTF1 e PTF2). 38

Figura 2.4 - Comparação entre umidade medida na tensão matricial de 0,3 m e estimada pelas PTFs. (A) resultados da PTF-B2 de Botula (2013) original e recalibrada; (B) e (C) resultados das quatro PTFs propostas (PTF1, PTF2, PTF3 e PTF4). 39

Figura 2.5 - Comparação entre umidade medida na tensão matricial de 0,6 m e estimada pelas PTFs. (A) resultados da PTF-B3 de Botula (2013) original e recalibrada, (B) e (C) resultados das quatro PTFs propostas (PTF1, PTF2, PTF3 e PTF4). 41

Figura 2.6 - Comparação entre umidade medida na tensão matricial de 1,0 m e estimada pelas PTFs. Resultados das equações originais e recalibradas da PTF-R1 de Rawls *et al*. (1982) (A), da PTF-Be1 de van den Berg *et al*. (1997) (B); da PTF-MH1 de Minasny & Hartemink (2011) (C), da PTF-B4 de Botula (2013) (D), da PTF-G1 de Gunarathna *et al*. (2019) (E); resultados das quatro PTFs desenvolvidas (PTF1, PTF2, PTF3 e PTF4) (F e G). 43

Figura 2.7 - Comparação entre umidade medida na tensão matricial de 3,3 m e estimada pelas PTFs. Resultados das equações originais e recalibradas da PTF-GL1 de Gupta & Larson (1979) (A), da PTF-R2 de Rawls *et al*. (1982) (B), da PTF-A1 de Arruda *et al*. (1987) (C), da PTF-TH1 de Tomasella & Hodnett (1998) (D); resultados das quatro PTFs desenvolvidas (PTF1, PTF2, PTF3 e PTF4) (E e F). 44

Figura 2.8 - Comparação entre umidade medida na tensão matricial de 10 m e estimada pelas PTFs. Resultados das equações originais e recalibradas da PTF-GL2 de Gupta & Larson (1979) (A), da PTF-R3 de Rawls *et al*. (1983) (B), da PTF-B5 de Botula (2013) (C); resultados das quatro PTFs desenvolvidas (PTF1, PTF2, PTF3 e PTF4) (D e E). 45

Figura 2.9 - Comparação entre umidade medida na tensão matricial de 150 m e estimada pelas PTFs. Resultados das equações originais e recalibradas da PTF-GL3 de Gupta & Larson (1979) (A), da PTF-R4 de Rawls *et al*. (1983) (B), da PTF-A2 de Arruda *et al*. (1987) (C), resultados da PTF-TH2 de Tomasella & Hodnett (1998) (D), da PTF-G2 de Gunarathna *et al*. (2019) (E); resultados das quatro PTFs desenvolvidas (PTF1, PTF2, PTF3 e PTF4) (F e G). 47

Figura 2.10 - Comparação entre a umidade medida nas tensões matriciais (*h*) de 0,1 m a 150 m e estimadas pelas PTFs desenvolvidas de melhor desempenho, pelas PTFs da literatura de melhor desempenho (PTF-B1, PTF-B2 e PTF-B3 de Botula (2013), PTF-MH1 de Minasny & Hartemink (2011), PTF-GL1 e PTF-GL2 de Gupta & Larson (1979) e PTF-R4 de Rawls *et al*. (1983)) e recalibradas ("recal"). A linha tracejada indica o valor médio de $\theta(h)$ medido do conjunto de dados. Os traços vermelhos correspondem ao $\theta(h)$ médio estimado pelas PTFs. 49

Figura 3.1 – Fluxograma do modelo hierárquico de PTFs para estimativa dos parâmetros das equações de VGM, Kosugi e GRT para descrição da CRA. Os sinais positivo (+) e negativo (-) referem-se a "sim" e "não", respectivamente.....59

Figura 3.2 – Valores de RMSE ($cm^3\ cm^{-3}$) para os quartis das estimativas de $\theta(h)$ com os dados medidos em relação aos dados estimados a partir das PTFs pontuais utilizadas nas funções hierárquicas (1, 2, 3 e 4) do modelo desenvolvido. VGM, Kosugi e GRT são as equações de Van Genuchten-Mualem (1980), Kosugi (1996) e Groenevelt & Grant (2004). 66

Figura 3.3 – Valores de *r* e RMSE calculados para as estimativas em cada tensão matricial avaliada, variando de *h*=10 até 15000 cm. Na análise de FH1 e FH3 utilizaram-se 328 amostras e de FH2 e FH4 110 amostras. VGM, Kosugi e GRT são as equações de Van Genuchten-Mualem (1980), Kosugi (1996) e Groenevelt & Grant (2004).....69

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Informações das bases UNSODA e HYBRAS quanto a localização, textura, coleta e metodologia para obtenção da CRA. 25

Tabela 2.2 – Estatística descritiva para as doze classes texturais (de acordo com a classificação da USDA), densidade do solo (ρ_b), densidade das partículas (ρ_p) e porosidade (ϕ). 28

Tabela 2.3 –PTFs pontuais na forma original utilizadas para avaliação dos valores de $\theta(h)$ que compõem a CRA. 31

Tabela 2.4 – Valores das constantes das PTFs utilizadas da literatura. 32

Tabela 2.5 – Modelos propostos de funções de pedotransferência (PTFs) para as sete tensões matriciais avaliadas 33

Tabela 2.6 - Estatística descritiva dos parâmetros da CRA pela equação de VGM. 35

Tabela 2.7 – Valores dos parâmetros empíricos das PTFs recalibradas. 36

Tabela 2.8 – Valores dos parâmetros empíricos das PTFs propostas. 37

Tabela 2.9 – Correlação de Spearman (λ) e o p-valor dos dados de entrada das PTFs propostas e os valores de θ medidos. 48

Tabela 3.1 – Equações para PTFs pontuais e aplicadas no modelo hierárquico desenvolvido. 58

Tabela 3.2 – Estatística descritiva para as doze classes texturais (de acordo com a classificação da USDA), densidade do solo (ρ_b), densidade das partículas (ρ_p) e porosidade (ϕ). 62

Tabela 3.3 – Correlação de Pearson (r), raiz do erro quadrático médio (RMSE) e o erro médio (ME) com relação as estimativas das CRAs em cada uma das quatro funções hierárquicas (FH). 65

Tabela 3.4 – Estatística descritiva dos parâmetros de VGM, GRT e Kosugi estimados pelo modelo de PTF hierárquico para descrição da CRA e dos parâmetros de VGM para os dados medidos 70

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL 14

1.1 OBJETIVO GERAL 17

REFERÊNCIAS 17

2. Capítulo II: EQUAÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PONTUAIS PARA ESTIMATIVA DA RETENÇÃO DE ÁGUA EM SOLOS 22

2.1 INTRODUÇÃO 23

2.2 MATERIAL E MÉTODOS 25

2.2.1 Seleção e descrição dos dados 25

2.2.2 Testando PTFs 29

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO 35

2.3.1 Os parâmetros de VGM e as constantes das PTFs utilizadas e propostas 35

2.3.2 Apresentação das estimativas pontuais da CRA 37

2.4 CONCLUSÕES 50

REFERÊNCIAS 51

3. Capítulo III: DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO HIERÁRQUICO E PARAMÉTRICO DE PEDOTRANSFERÊNCIA PARA RETENÇÃO DE ÁGUA EM SOLOS 55

3.1 INTRODUÇÃO 56

3.2 MATERIAL E MÉTODOS 58

3.2.1 Modelo hierárquico desenvolvido 58

3.2.2 Bases avaliadas 61

3.2.3 Estatística de análise de desempenho do modelo desenvolvido 63

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO 64

3.4 CONCLUSÃO 72

REFERÊNCIAS 73

1. INTRODUÇÃO GERAL

Segundo Karlen *et al*. (1997), a definição de qualidade do solo remete-se a capacidade que um tipo específico de solo tem em funcionar, tanto em um ecossistema natural quanto em solo manejado, sustentando a produção de plantas e animais, e dessa forma, manter ou melhorar os níveis de qualidade da água e do ar a fim de permitir a saúde e a habitação humana. No entanto, os critérios para definir a qualidade de um solo podem se basear no objetivo de uso dele. Embora a definição da qualidade do solo tenha sido atrelada, por longo período, a fertilidade química que garantisse a produção das culturas, entende-se atualmente que ela deva ser descrita pelo conjunto de propriedades físicas, químicas e biológicas inerentes a ele (Palojärvi & Nuutinen, 2002) e pelo objetivo de uso e ocupação do solo (Armindo & Wendroth, 2016).

Ao avaliar a qualidade do solo, devem-se reconhecer os efeitos dos processos dinâmicos ocorrentes em escalas espaciais e temporais variáveis (Karlen *et al*. 2001; Palojärvi & Nuutinen, 2002, Armindo & Wendroth, 2016). Análises de pequenas e grandes áreas geográficas dependem do uso de laboratórios e, frequentemente, o acesso a bancos de dados e de ferramentas que permitam a obtenção empírica de informações torna-se necessária.

A coleta de dados do solo pode ser demorada e onerosa, principalmente devido aos custos de transporte, pessoal e de laboratório para análise das amostras. Com o aumento de publicações de áreas estudadas, bancos de dados que apresentam propriedades básicas do solo de medição rotineira, como aspectos morfológicos, textura, estrutura, pH, conteúdo de matéria orgânica (MO) ou carbono orgânico (CO) se tornam realidade. Essas propriedades de mais fácil obtenção auxiliam na predição de propriedades mais complexas. Bouma (1989) definiu esse conceito com o termo função de pedotransferência, tradução de *pedotransfer function* (PTF), a fim de evitar confusão com o termo "funções transferidoras" (Bouma & van Lanen, 1987), utilizada com outros significados nas demais áreas da ciência. As PTFs permitem obter informações desconhecidas a partir de dados conhecidos.

As PTFs podem ser utilizadas para estimar alguns indicadores de qualidade física do solo (Huf dos Reis *et al*., 2018) além de outras propriedades desse meio poroso. A curva de retenção de água (CRA) do solo é um exemplo de função hidráulica que relaciona a fração volumétrica de água (θ) presente no solo a uma dada tensão matricial (h). A retenção de água ocorre devido ao fenômeno da capilaridade e da adsorção pelas superfícies das partículas do solo, resultando na tensão matricial da água do solo (Hillel, 1998). Portanto, um aumento na

tensão matricial implica na redução da água presente no solo. Assim, a curva descreve o comportamento da umidade do solo, que é uma propriedade chave para diversas aplicações como em projetos de irrigação, hidrologia, balanço hídrico, modelagem hidrológica, geotecnia e as ciências do solo em geral (Armindo & Wendroth, 2016; Hillel, 1998; Or & Wraith, 2001; Too *et al*., 2014).

Inúmeras equações foram propostas, e ainda são elaboradas, para descrever e modelar o comportamento da CRA. Ao longo das últimas décadas encontram-se modelos como os de Burdine, Gardner, Brooks & Corey, Brutsaert, Campbell, Mualem, Van Genuchten, Fredlund & Xing e Kosugi (Too *et al*., 2014; Van Looy *et al*., 2017). Portanto, a tese será focada no desenvolvimento de PTFs que estimam a CRA, uma vez que sua determinação exige treinamento e experiência, sendo complexa, demorada e onerosa.

Bouma (1989) definiu dois tipos de PTFs: as contínuas e as de classe. As PTFs contínuas utilizam referências contínuas de textura ou matéria orgânica, por exemplo, para formular equações empíricas. As PTFs de classe estimam certas propriedades com base na classe à qual pertence o solo. Por exemplo, estimar a fração de água disponível do solo com base na classe textural.

Já Minasny *et al*. (1999) subdividiram as PTFs para estimar a CRA em pontual e paramétrica, que geralmente são de origem contínua (Vereecken *et al*., 2010). Uma PTF pontual visa estimar a umidade volumétrica em tensões matriciais pré-definidas, como por exemplo, a umidade na capacidade de campo (θ_{fc}) e no ponto de murchamento permanente (θ_{pwp}). As PTFs paramétricas descrevem os parâmetros da equação da CRA, como por exemplo dos modelos de Brooks & Corey (1964) e Van Genuchten (1980).

Há também as PTFs fisicamente fundamentadas que inicialmente foram apresentadas no trabalho de Arya & Paris (1981) (Prevedello & Loyola, 2002; Meskini-Vishkaee *et al*., 2014; Freitas *et al*., 2019). Os modelos fisicamente fundamentados utilizam equações analíticas para gerar as estimativas sem a necessidade de calibração e validação por serem fundamentadas em relações puramente físicas. Como exemplo citam-se a PTF de Arya & Paris (1981), que estima a distribuição do tamanho de poros do solo preenchidos por água a partir da distribuição granulométrica, densidade do solo e das partículas e equação da capilaridade, as PTFs analíticas de Freitas *et al*. (2019), que estimam a densidade do solo e o coeficiente de expansão dos poros e a equação para cálculo da porosidade total, fisicamente fundamentada nos valores de densidade do solo e das partículas.

Haghverdi *et al*. (2012) trouxeram a discussão sobre a função pseudocontínua como um outro conceito de PTF. O objetivo dessa PTF é estimar a umidade para uma dada tensão matricial inserida, porém, sem a necessidade de utilizar uma equação específica. Dessa forma, o valor de tensão matricial inserido também é considerado um parâmetro de entrada na estimativa das informações.

Wösten *et al*. (2001) comentam que são múltiplas as propriedades do solo que afetam a retenção e o transporte de água e de componentes químicos no solo. Segundo a revisão apresentada por Van Looy *et al*. (2017), a distribuição do tamanho das partículas é uma informação bastante utilizada como dados de entrada em PTFs (Silva *et al*., 2017a; Silva *et al*., 2020; Wösten *et al*., 1999), bem como a densidade do solo e o conteúdo de MO ou CO (Saxton & Rawls, 2006; Vereecken *et al*., 1989). Algumas PTFs também recebem como parâmetros de entrada pontos medidos da CRA a fim de melhorar sua estimativa (Huf dos Reis *et al*., 2018; Schaap *et al*., 2001). Dessa forma, diversos trabalhos que visam o desenvolvimento de PTFs pelo mundo podem ser citados: Schaap *et al*. (2001), McBratney *et al*. (2002), Pachepsky & Rawls (2003), Saxton & Rawls (2006), Twarakavi *et al*. (2009), Botula *et al*. (2012), Haghverdi *et al*. (2012), Tóth *et al*. (2015), Zhang & Schaap (2017), Zhang & Schaap (2019).

Botula *et al*. (2014) revisaram a utilização de PTFs para a estimativa da CRA de solos dos trópicos úmidos. Nessa revisão foi possível observar que o Brasil apresenta grande contribuição no desenvolvimento e publicações de PTFs, como por exemplo os trabalhos de Tomasella *et al*. (2000), Oliveira *et al* (2002), Tomasella *et al*. (2003), Fidalski & Tormena (2007), Silva *et al*. (2008), Reichert *et al*. (2009), Barros *et al*. (2013), Medrado & Lima (2014), Silva *et al*. (2017a), Silva *et al*. (2017b), Huf dos Reis *et al*. (2018), Freitas *et al*. (2019), Ottoni *et al*. (2019) e Silva *et al*. (2020). Contudo, a estratégia de formulação de PTFs não deve depender a todo custo da qualidade da estimativa da variável do solo desejada, mas, sobretudo, da dificuldade, esforço e custo necessário para a medição da propriedade de entrada a fim de não inviabilizar a justificativa do uso da PTF em questão.

Como exemplos de bancos de dados de solos pelo mundo têm-se o GRIZZLY (Haverkamp *et al*., 1997), HYPRES (Wösten *et al*., 1999), EU-HYDI (Weynants *et al*., 2013), UNSODA (Nemes *et al*., 2015) e HYBRAS (Ottoni *et al*., 2018), os quais têm sido utilizados a fim de elaborar e validar novas PTFs. O HYBRAS é um banco de dados de solos brasileiros, portanto, predominantemente de clima tropical. As demais bases citadas são de solos de clima temperado. Por existir diferenças químicas e físicas entre os solos dessas duas regiões, é que PTFs desenvolvidas para solos de região temperada apresentam baixo desempenho quando

aplicadas a solos de regiões tropicais (Medrado & Lima, 2014; Tomasella *et al*., 2000). Solos de clima tropical tendem a ser mais intemperizados que os de clima temperado, apresentando maior teor de argila com relação aos solos de clima temperado, que possuem maior proporção de silte (Hillel, 1998; Prevedello & Armindo, 2015).

No Brasil, PTFs têm sido aplicadas em diversas situações como em programas de zoneamento agrícola ou de análises de risco climático. Assim, a formulação de PTFs que sirvam para solos de propriedades físicas distintas é importante. Esta tese está apresentada em dois capítulos. O primeiro capítulo refere-se à seleção de dados de duas bases: UNSODA e HYBRAS. As amostras escolhidas apresentam informações sobre textura, densidade do solo, densidade das partículas, porosidade e umidade na saturação, além de pontos medidos da CRA. Com essas informações, pode-se desenvolver PTFs pontuais para descrição da CRA. O segundo capítulo baseia-se no uso de PTFs, desenvolvidas no primeiro capítulo, para desenvolver um modelo de pedotransferência paramétrico e hierárquico em relação aos dados de entrada.

1.1 OBJETIVO GERAL

Nesta tese, apresentar-se-ão dois capítulos abordando o desenvolvimento e avaliação de PTFs com dados de clima tropical e temperado. O primeiro capítulo é destinado a PTFs do tipo pontual (*point* PTF) para estimar umidades em tensões matriciais específicas e o segundo destinado a uma PTF paramétrica (*parametric* PTF) e hierárquica para estimar os parâmetros das equações de VGM, Kosugi e Groenevelt & Grant, as quais descrevem a curva de retenção da água no solo.

REFERÊNCIAS

Armindo, R.A., Wendroth, O., 2016. Physical soil structure Evaluation based on Hydraulic Energy Functions. **Soil Science Society of America Journal**. 80, 1167–1180.

Arya, L.M., Paris, J.F., 1981. A physico-empirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data. **Soil Science Society of America Journal**. 45, 1023–1030.

Barros, A.H.C., Van Lier, Q.J., Maia, A.H.N., Scarpare, F.V., 2013. Pedotransfer functions to estimate water retention parameters of soils in northeastern brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 37, 379–391.

Botula, Y.D., Cornelis, W.M., Baert, G., Van Ranst, E., 2012. Evaluation of pedotransfer functions for predicting water retention of soils in Lower Congo (D.R. Congo). **Agricultural Water Management**. 111, 1-10.

Botula, Y.D., Ranst, E.V., Cornelis, W.M., 2014. Pedotransfer functions to predict water retention for soils of the humid tropics: a review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 38, 679–698.

Bouma, J., van Lanen, H.A.J., 1987. Transfer functions and threshold values: from soil characteristics to land qualities. In: Proc. of the Int. **Workshop on Quantified Land Evaluation Procedures**, Washington, DC, USA, pp. 106–110.

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

Brooks, R.H., Corey, A.T., 1964. Hydraulic Properties of Porous Media. Civil Engineering Dept., Colorado State University, Fort Collins, CO, **Hydrological Paper.** 3, 27 pp.

Fidalski, J., Tormena, C.A., 2007. 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**. 37, 1316–1322.

Freitas, K.S., Armindo, R.A., Pires, L.F., Swinka, F.V., Ribeiro, J.S., 2019. A method to determine the soil bulk density of undisturbed samples with non-isodiametric shape. **Soil and Tillage Research**. 191, 344–352.

Haghverdi, A., Cornelis, W.M., Ghahraman, B., 2012. A pseudo-continuous neural network approach for developing water retention pedotransfer functions with limited data. **Journal of Hydrology**. 442–443, 46–54.

Haverkamp, R.C., Zammit, F., Bouraoui, K., Rajkai, J.L.A., Heckman, N., 1997. GRIZZLY, Grenoble Soil Catalogue. Soil survey of field data and description of particle size, soil water retention and hydraulic conductivity functions. **Laboratoire d'Étude des Transfers en Hydrologie et Environnement**, LTHE, UMR5564, CNRS, INPG, ORSTOM, UJF, BP 53, 38041 Grenoble Cédex 09, xz France.

Hillel, D. **Environmental soil physics**. United States of America: Academic Press, 1998. 881 p.

Huf dos Reis, A.M., Armindo, R.A., Durães, M.F., De Jong van Lier, Q., 2018. Evaluating pedotransfer functions of the Splintex model. **European Journal Soil Science.** 69, 685-697.

Karlen, D.L., Mausbach, M.J., Doran, J.W., Cline, R.G., Harris, R.F., Schuman, G.E., 1997. Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation. **Soil Science Society of America Journal.** 61, 4-10.

Karlen, D.L., Andrews, S.S., Doran, J.W., 2001. Soil quality: Current concepts and applications. **Advances in Agronomy**. 74, 1–40.

McBratney, A., Minasny, B., Cattle, S.R., Vervoort, R.W., 2002. From pedotransfer functions to soil inference systems. **Geoderma**. 109, 41–73.

Medrado, E., Lima, J.E.F.W., 2014. Development of pedotransfer functions for estimating water retention curve for tropical soils of the Brazilian savanna. **Geoderma Regional**. 1, 59–66.

Meskini-Vishkaee, F., Mohammadi, M.H., Vanclooster, M., 2014. Predicting the soil moisture retention curve, from soil particle size distribution and bulk density data using a packing density scaling factor. **Hydrology and Earth System Sciences**. 18, 4053-4063.

Minasny, B., McBratney, A.B., Bristow, K.L., 1999. Comparison of different approaches to the development of pedotransfer functions for water-retention curves. **Geoderma**. 93, 225-253.

Nemes, A., Schaap, M., Leij, F.J., Wösten, J.H.M., 2015. UNSODA 2.0: Unsaturated Soil Hydraulic Database. Database and program for indirect methods of estimating unsaturated hydraulic properties. US Salinity Laboratory - ARS - USDA.

Or, D., Wraith, J.M., 2001. Soil water content and water potential relationships. In: Soil physics companion. Ed. Warrick, A.W. CRC Press.

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

Ottoni, M.V., Ottoni, T.B., Lopes-Assad, M.L.R.C., Rotunno, O.C., 2019. Pedotransfer functions for saturated hydraulic conductivity using a database with temperate and tropical climate soils. **Journal of Hydrology**. 1–35.

Pachepsky, Y.A., Rawls, W.J., 2003. Soil structure and pedotransfer functions. **European Journal Soil Science**. 54, 443-451.

Palojärvi, A., Nuutinen, V., 2002. The soil quality concept and its importance in the study of Finnish arable soils. **Agricultural and Food Science in Finland**. 11, 329-342.

Prevedello, C.L., Armindo, R.A., 2015. Física do solo com problemas resolvidos. 2. ed. **Rev. e ampl**. Curitiba, 474 p.

Prevedello, C.L., Loyola, J.M.T., 2002. Modelo para estimar as propriedades hidráulicas de meios porosos a partir da curva granulométrica. **Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**, São Paulo, 2002. ABMS, Anais. São Paulo, pp.467–472.

Reichert, J.M., Albuquerque, J.A., Kaiser, D.R., Reinert, D.J., Urach, F.L., Carlesso, R., 2009. Estimation of water retention and availability in soils of Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 33, 1547–1560.

Saxton, K. E., Rawls, W. J., 2006. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. **Soil Science Society of America Journal**. 70, 1569–1578.

Schaap, M.G., Leij, F.J., Van Genuchten, M.Th., 2001. Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. **Journal Hydrology**. 251, 163–176.

Silva, A.C., Armindo, R.A., Brito, A.S., Schaap, M.G., 2017a. Splintex: A physically-based pedotransfer function for modeling soil hydraulic functions. **Soil and Tillage Research**.. 174, 261–272.

Silva, A.C., Armindo, R.A., Brito, A.S., Schaap, M.G., 2017b. An assessment of pedotransfer function performance for the estimation of spatial variability of key soil hydraulic properties. **Vadose Zone Journal.** 16, 1–10.

Silva, A.C., Armindo, R.A., Prevedello, C.L., 2020. Splintex 2.0: A physically-based model to estimate water retention and hydraulic conductivity parameters from soil physical data. **Computers and Eletronics in Agriculture**.169, *in press*.

Silva, A.P., Tormena, C.A., Fidalski, J., Imhoff, S., 2008. Pedotransfer functions for the soil water retention and soil resistance to penetration curves. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 32, 11–19.

Tomasella, J., Hodnett, M.G., Rossato, L., 2000. Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in Brazilian soils. **Soil Science Society of America Journal**. 64, 327–338.

Tomasella, J., Pachepsky, Y., Crestana, S., Rawls, W.J., 2003. Comparison of two techniques to develop pedotransfer functions for water retention. **Soil Science Society of America Journal**. 67, 1085–1092.

Tóth, B., Weynants, M., Nemes, A., Makó, A., Bilas, G., Tóth, G., 2015. New generation of hydraulic pedotransfer functions for Europe. **European Journal of Soil Science**. 66, 226-238.

Twarakavi, N.K.C., Simunek, J., Schaap, M.G., 2009. Development of Pedotransfer Functions for Estimation of Soil Hydraulic Parameters using Support Vector Machines. **Soil Science Society of America Journal**. 73, 1443–1452.

Van Genuchten, M.Th., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**. 44, 892–897.

Van Looy, K., Bouma, J., Herbst, M., Koestel, J., Minasny, B., Mishra, U., …Vereecken, H., 2017. Pedotransfer functions in Earth system science: Challenges and perspectives. **Reviews of Geophysics**, 55, 1199–1256.

Vereecken, H., Maes, J., Feyen, J., Darius, P., 1989. Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density, and carbon content. **Soil Science**. 148, 389–403.

Vereecken, H., Weynants, M., Javaux, M., Pachepsky, Y., Schaap, M.G., Van Genuchten, M.Th., 2010. Using pedotransfer functions to estimate the Van Genuchten–Mualem soil hydraulic properties: A review. **Vadose Zone Journal**. 9, 795–820.

Weynants, M., Montanarella, L., Tóth, G., Strauss, P., Feichtinger, F., Cornelis, W. *et al*. 2013. European HYdropedological Data Inventory (EU-HYDI). EUR – Scientific and Technical Research Series. **Publications Office of the European Union**, Luxembourg.

Wösten, J. H. M., Lilly, A., Nemes, A., Le Bas, C., 1999. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. **Geoderma,** 90, 169–185.

Wösten, J.H.M., Pachepsky, Y.A., Rawls, W.J. 2001. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. **Journal of Hydrology**. 251, 123–150.

Zacharias, S., Wessolek, G., 2007. Excluding organic matter content from pedotransfer predictors of soil water retention. **Soil Science Society of America Journal**. 71, 43–50.

Zhang, Y., Schaap, M.G., 2017. Weighted recalibration of the Rosetta pedotransfer model with improved estimates of hydraulic parameter distributions and summary statistics (Rosetta3). **Journal of Hydrology**. 547, 39–53.

Zhang, Y., Schaap, M.G., 2019. Estimation of saturated hydraulic conductivity with pedotransfer functions: A review. **Journal of Hydrology**. 575, 1011–1030.

2. Capítulo II: EQUAÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PONTUAIS PARA ESTIMATIVA DA RETENÇÃO DE ÁGUA EM SOLOS

RESUMO

Conhecer as propriedades físicas, químicas e biológicas de um solo torna-se fundamental para manejá-lo adequadamente sem afetar a estabilidade do ambiente ao qual participa, seja ele de produção agrícola ou não. Contudo, alguns dos processos de medição das propriedades de um solo são comumente demorados e onerosos, limitando a obtenção de informações-chave para a realização de diversos estudos. Dessa forma, o uso de funções de pedotransferência (PTFs) é uma ferramenta importante quanto à necessidade de se conhecer propriedades do solo de complexa obtenção. As PTFs geralmente utilizam informações mais básicas para estimar propriedades de maior complexidade ou custo de obtenção. A curva de retenção de água (CRA) do solo é uma função hidráulica de fundamental importância que auxilia a modelagem de fluxos hidráulicos em ecossistemas terrestres vegetados. A função CRA relaciona a umidade volumétrica presente no solo (θ) a uma determinada tensão matricial (h). PTFs pontuais são aquelas que estimam pontos chaves da CRA utilizando-se, geralmente, de dados de textura (areia, silte e argila), densidade do solo seco e das partículas sólidas, entre outros. A partir da seleção criteriosa de 328 dados das bases UNSODA e HYBRAS, desenvolveram-se 26 PTFs para estimar valores pontuais de $\theta(h)$ que variam entre 0,1 m e 150 m. As PTFs foram obtidas a partir de regressão não linear de dados de textura e outras propriedades relacionadas à estrutura do solo. As PTFs propostas apresentaram correlação (precisão) forte e muito forte, obtidas pela análise de correlação de Pearson ($r>0,7$). A exatidão das equações propostas, representada pelos valores da raiz do erro quadrático médio (RMSE), ficaram abaixo de 0,072 m^3 m^{-3}. Os resultados encontrados foram comparados com os obtidos por PTFs pontuais da literatura nas suas formas originais e recalibradas. A partir dessa avaliação, os resultados encontrados mostraram que o desempenho das PTFs desenvolvidas foi melhor do que o das PTFs selecionadas na literatura e de suas versões recalibradas, haja vista que muitas delas foram desenvolvidas para regiões específicas e sem grande amplitude de aplicação.

Palavras-chave: Curva de retenção de água no solo; curva característica da água no solo; pedofunção.

ABSTRACT

Knowing physical, chemical, and biological properties are essential to carry out the soil use and management to minimize the impact on the agricultural or natural environment. However, some procedures of measuring soil properties are commonly time-consuming and expensive, thus, pedotransfer functions (PTFs) are important tools to support multiple analyses of the environment. The soil water retention curve (SWRC) relates the volumetric soil water content

(θ) as a function of matric tension (h) and due to it plays an important role in the hydraulic modeling of process that occur in vegetated terrestrial ecosystems. Point-PTFs are those that estimate key points of the SWRC often using texture (sand, silt, and clay) and bulk density data. This study aimed to develop 26 point-PTFs to estimate $\theta(h)$ data ranging from $\theta(0.1\ m)$ to $\theta(150\ m)$ from the careful selection of 328 data set presented in UNSODA and HYBRAS databases to analyze soil water retention. PTFs were obtained from non-linear regression of data texture and other physical properties related to soil structure. The developed PTFs were strong and very strongly correlated with measured data. The accuracy of the developed PTFs, represented by the root mean square error (RMSE) values, was below 0.072 $m^3\ m^{-3}$. The obtained results were compared with those predicted by specific PTFs already published in their original and recalibrated forms to assess the estimation of some $\theta(h)$ points. The performance of the developed PTFs was better than that examined with the selected and recalibrated PTFs, since several of them were developed for specific regions and with a limited range of application.

Keywords: Soil water release curve; soil physical properties; pedotransfer functions.

2.1 INTRODUÇÃO

A determinação das propriedades físico-hidráulicas do solo possibilita o monitoramento, manejo e a modelagem do transporte de água e solutos, corroborando com análises realizadas em diversas áreas, tais como hidrologia, agronomia, meteorologia, geografia, ecologia e proteção ambiental (Pineda *et al*., 2018; Tomasella *et al*., 2003; Wösten *et al*., 2001). No entanto, a determinação dessas propriedades, que possuem acentuada variabilidade espaço-temporal, por meio de métodos diretos ainda é demorada e onerosa (Zhang & Schaap, 2017). Contudo, a utilização de métodos indiretos permite a aquisição de dados e informações mais facilmente obtidas, gerando as funções de pedotransferência (PTFs) (Bouma, 1989) para estimar as propriedades hidráulicas do solo de interesse (McBratney *et al*. 2002; Yang *et al*., 2015).

A curva de retenção de água (CRA) do solo é uma das principais funções hidráulicas de interesse e relaciona a umidade volumétrica (θ) como função da tensão matricial (h), sendo que sua medição exige treinamento especializado, tempo e equipamentos de alto custo (Minasny e McBratney, 2002a; Rabot *et al*., 2018). Há décadas que diversos modelos paramétricos para descrição da CRA, como o de Brooks & Corey (1964), Campbell (1974), Van Genuchten (1980) e Groenevelt & Grant (2004) são frequentemente utilizados (Armindo *et al*. 2019; Too *et al*., 2014). Alternativamente, inúmeras PTFs têm sido desenvolvidas a fim de estimar a CRA e a condutividade hidráulica do solo não saturado, outra importante função hidráulica (Van

Looy *et al*., 2017; Yang *et al*., 2015). Normalmente, as PTFs são baseadas em dados de textura (areia, silte e argila), densidade do solo e das partículas e conteúdo de matéria orgânica (MO) ou carbono orgânico (CO). Algumas ainda se baseiam em pontos medidos da CRA, funcionalizada por $\theta(h)$ ou $h(\theta)$, ou em outras informações adicionais a fim de aprimorar a estimativa dos parâmetros hidráulicos (Botula *et al*., 2012; Karup *et al*., 2017; Nemes *et al*., 2003), como o volume de fragmentos de rochas presentes em solos pedregosos (Pineda *et al*., 2018).

As PTFs são desenvolvidas, principalmente, a partir de modelos empíricos de análise de regressão linear e não linear (Barros *et al*., 2013; Ottoni *et al*., 2019; Saxton & Rawls, 2006), modelos fisicamente fundamentados (Freitas *et al*., 2019; Huf dos Reis *et al*., 2018; Meskini-Vishkaee *et al*., 2014; Silva *et al*., 2020) e inteligência artificial, seja por redes neurais (Minasny & McBratney 2002b; Schaap *et al*., 2001; Zhang & Schaap 2017) ou linguagens de aprendizado de máquina.

O trabalho de Arruda *et al*. (1987) foi, provavelmente, um dos primeiros a desenvolver PTFs para os solos brasileiros (sob clima tropical) utilizando amostras do estado de São Paulo. Os autores ajustaram equações matemáticas, previamente estabelecidas e utilizadas na literatura para as 218 amostras, baseando-se apenas nos teores de silte e argila para a determinação das umidades na capacidade de campo [$\theta(3{,}3\ m)$ ou θ_{fc}] e no ponto de murchamento permanente [$\theta(150\ m)$ ou θ_{pwp}]. Tóth *et al*. (2015) desenvolveram PTFs pontuais e paramétricas via regressão linear para estimar a CRA em solos de todo continente europeu (clima temperado). Os autores utilizaram dados de textura, densidade do solo, carbono orgânico, carbonato de cálcio e pH, além dos valores de $\theta(3{,}3\ m)$, da umidade na saturação [$\theta(0)$ ou θ_s] e outros que variavam entre $\theta(150\ m)$ e $\theta(160\ m)$.

Embora diversos autores recomendem usar PTFs específicas que foram desenvolvidas para uma determinada região ou tipo de solo (Pachepsky e Rawls, 1999; 2004), as PTFs apresentadas neste trabalho visam utilizar dados de diversos solos do mundo, valendo-se de dados de textura, densidade do solo, densidade das partículas e $\theta(0)$ a fim de descrever o comportamento da CRA para diversos solos, principalmente para regiões onde a existência de PTFs específicas é escassa. Botula *et al*. (2013) recomenda a existência de seis a oito pontos medidos ou estimados para ajustar a CRA, pois as equações de ajuste, como as de Brooks & Corey (1964), Van Genuchten (1980), Kosugi (1996) e Groenevelt & Grant (2014), possuem quatro ou mais parâmetros em suas formulações. Neste trabalho, objetivou-se desenvolver novas PTFs pontuais e aprimorar PTFs já existentes para estimar valores de $\theta(h)$ de solos sob

os climas temperado e tropical. Contudo, as informações de MO ou CO não foram incluídas para o desenvolvimento e avaliação das novas PTFs. Uma vez que a MO se correlaciona negativamente com a densidade do solo (Karup *et al*., 2016), seus efeitos na retenção de água podem ser atribuídos pelas variações da densidade do solo (Zacharias & Wessolek, 2007).

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 *Seleção e descrição dos dados*

Neste trabalho foram selecionados dados de propriedades das bases UNSODA (*Unsaturated Soil Hydraulic Database*, Nemes *et al*., 2015) e HYBRAS (*Hydrophysical database for Brazilian soils*, Ottoni *et al*., 2018), totalizando 328 amostras seguindo a classificação do USDA (*United States Department of Agriculture*) (Soil Survey Staff, 2014) (Tabela 2.1 e Figura 2.1). Os dados escolhidos foram baseados em no mínimo 7 pontos medidos da curva de retenção de água (CRA) no solo, considerando uma tensão inicial medida de no mínimo 0,1 m e final de no máximo 165 m.

Tabela 2.1 – Informações das bases UNSODA e HYBRAS quanto a localização, textura, coleta e metodologia para obtenção da CRA.

País	Classe textural	Nº de amostras	Equipamento	Camada de coleta (m)
Alemanha	Arenoso Argiloso Argilo siltoso Franco Franco arenoso Franco argilo siltoso Franco siltoso Siltoso	33	Câmara de pressão, Tensiometria e TDR	0 até 1,30
Australia	Argiloso Franco argilo siltoso	3	Câmara de pressão	0,17 até 1,20
Bélgica	Arenoso Areia franca Argiloso Franco arenoso Franco siltoso	49	Funil de tensão e câmara de pressão	0 até 0,93
Dinamarca	Arenoso Franco arenoso Franco argilo arenoso	19	Câmara de pressão	0,01 até 0,94

País	Classe textural	Nº de amostras	Equipamento	Camada de coleta (m)
Estados Unidos da América	Areia franca Argilo arenoso Franco arenoso Franco argilo arenoso Franco argilo siltoso	12	Célula de temperatura,Câmara de pressão e Funil de tensão	0 até 1,83
Holanda	Franco Franco arenoso	6	Funil de tensão e Câmara de pressão	0 até 1,0
Índia	Argiloso	1	Câmara de pressão	0 até 0,15
Itália	Franco Franco arenoso	9	Tensiometria, câmara de pressão e atenuação de raios gama	0,05 até 1,60
Nigéria	Arenoso Areia franca	6	Câmara de pressão	0 até 2,80
Suíça	Arenoso Areia franca Argiloso Franco Franco arenoso Franco argiloso Franco argilo arenoso Franco siltoso	65	Câmara de pressão	0 até 3,75
Estados brasileiros				
Amazonas	Argiloso Argilo arenoso Franco argiloso Franco argilo arenoso	8	Mesa de tensão e Câmara de pressão	0 até 1,80
Bahia	Areia franca Argilo arenoso Franco argilo arenoso	6	Mesa de tensão e Câmara de pressão	0 até 1,50
Goiás	Argiloso Argilo arenoso Franco argilo arenoso	50	Funil de tensão, Câmara de pressão e mesa de tensão	0 até 1,00
Pernambuco	Franco arenoso Franco argilo arenoso	3	Funil de tensão e Câmara de pressão	0,25 até 1,10
Rio Grande do Sul	Areia franca Argiloso Franco Franco arenoso Franco argilo arenoso Franco argilo siltoso Franco argiloso	17	Funil de tensão, Câmara de pressão e mesa de tensão	0 até 0,91
São Paulo	Areia franca Argiloso Argilo arenoso Franco argilo arenoso Franco argiloso	41	Funil de placa porosa, Câmara de pressão, Mesa de tensão	0 até 1,50

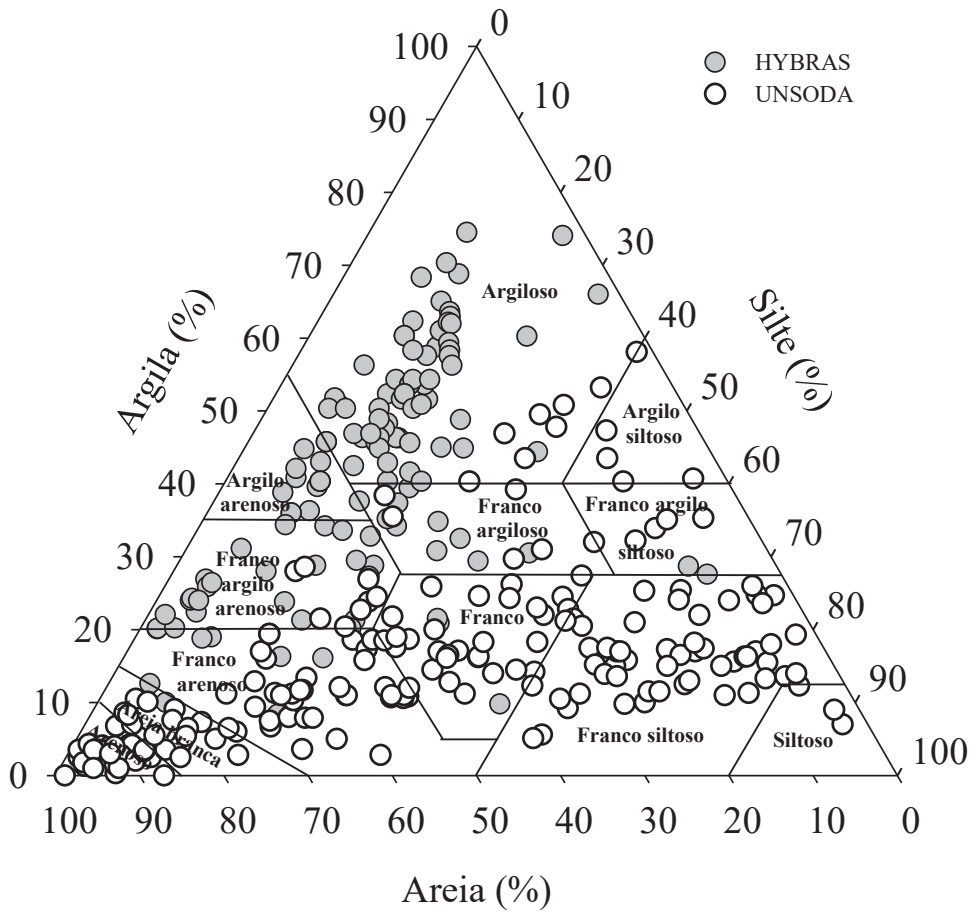


Figura 2.1 – Distribuição dos 328 pontos no triângulo textural segundo a classificação do USDA (Soil Survey Staff, 2014).

O valor de 2,65 kg dm^{-3} para densidade das partículas (ρ_p) foi adotado para algumas amostras selecionadas que não possuíam essa informação. A porosidade total do solo (ϕ) foi calculada para os conjuntos de dados que não dispunham dessa informação, de acordo com:

$$\phi = 1 - \left(\rho_b / \rho_p \right) \tag{1}$$

em que ρ_b é a densidade (kg dm^{-3}) e ϕ a porosidade total (m^3 m^{-3}) do solo. Os valores das propriedades físicas básicas do solo encontram-se na Tabela 2.2, onde se apresenta a estatística descritiva do conjunto de amostras para cada classe textural.

Tabela 2.2 – Estatística descritiva para as doze classes texturais (de acordo com a classificação da USDA), densidade do solo (ρ_b), densidade das partículas (ρ_p) e porosidade (ϕ).

Classe textural	Resumo estatístico	Fração (% massa)			ρ_b	ρ_p	ϕ	Número de amostras
		Areia	Silte	Argila	kg dm^{-3}		(%)	
Arenoso	Mínimo	87,1	1,0	0,0	1,36	2,56	26,4	28
	Média	91,7	5,4	2,9	1,56	2,64	40,9	
	Máximo	98,9	12,9	6,8	1,95	2,70	48,7	
	DP	3,2	3,0	1,6	0,15	0,03	5,5	
	CV (%)	3,5	55,6	55,8	9,56	1,06	13,4	
Areia franca	Mínimo	60,2	3,9	2,5	1,13	2,56	34,1	21
	Média	80,6	11,6	7,9	1,50	2,65	43,5	
	Máximo	87,5	23,7	19,0	1,76	2,70	56,7	
	DP	6,3	5,5	4,0	0,16	0,04	6,2	
	CV (%)	7,8	47,4	50,2	10,98	1,54	14,2	
Argiloso	Mínimo	0,8	7,3	40,3	0,69	2,50	0,3	76
	Média	28,3	18,7	52,9	1,36	2,65	0,5	
	Máximo	45,0	51,2	74,5	1,76	2,81	0,7	
	DP	10,8	9,0	8,0	0,20	0,08	0,1	
	CV (%)	38,3	48,3	15,2	14,57	3,04	16,2	
Argilo arenoso	Mínimo	45,1	7,1	36,0	1,16	2,50	33,3	15
	Média	49,9	10,3	39,8	1,48	2,63	43,9	
	Máximo	54,0	17,3	44,8	1,72	2,70	56,2	
	DP	2,6	2,5	2,6	0,17	0,07	6,9	
	CV (%)	5,2	24,2	6,4	11,55	2,64	15,6	
Argilo siltoso	Mínimo	3,9	41,8	40,3	1,10	2,46	0,4	4
	Média	10,0	47,1	43,0	1,43	2,63	0,5	
	Máximo	12,7	55,4	47,3	1,64	2,70	0,6	
	DP	4,1	6,0	3,2	0,23	0,11	0,1	
	CV (%)	41,4	12,7	7,5	16,20	4,34	15,0	
Franco	Mínimo	23,8	29,1	9,8	0,59	2,33	32,9	32
	Média	40,8	40,2	18,9	1,33	2,60	49,2	
	Máximo	51,7	49,8	27,4	1,77	2,83	74,7	
	DP	7,4	6,3	4,6	0,31	0,09	10,9	
	CV (%)	18,1	15,7	23,8	23,65	3,33	22,2	
Franco arenoso	Mínimo	52,0	4,9	2,8	1,26	2,59	25,7	40
	Média	63,5	24,6	11,9	1,54	2,65	41,9	
	Máximo	82,5	37,2	19,4	1,97	2,70	52,5	
	DP	7,2	7,7	4,2	0,16	0,02	6,0	
	CV (%)	11,4	31,5	35,3	10,43	0,93	14,4	
Franco argilo arenoso	Mínimo	46,2	2,0	20,1	1,07	2,50	30,9	33
	Média	60,1	14,2	25,7	1,47	2,66	44,4	
	Máximo	77,9	25,9	34,4	1,81	2,94	59,6	
	DP	10,0	8,7	4,3	0,20	0,09	8,5	
	CV (%)	16,6	61,2	16,9	13,88	3,31	19,1	
Franco argilo siltoso	Mínimo	0,3	48,0	27,6	1,10	2,36	37,9	8
	Média	10,2	57,8	32,2	1,41	2,61	46,3	
	Máximo	20,0	68,2	35,3	1,66	2,76	53,6	
	DP	5,9	6,5	2,8	0,22	0,14	6,4	
	CV (%)	58,0	11,2	8,7	15,80	5,20	13,9	
Franco argiloso	Mínimo	25,7	19,9	29,4	0,49	2,48	0,3	14
	Média	36,2	29,6	34,1	1,31	2,66	0,5	
	Máximo	43,0	42,3	39,4	1,74	2,87	0,8	
	DP	6,1	8,0	3,6	0,41	0,12	0,1	
	CV (%)	16,7	26,8	10,4	31,00	4,55	28,7	
	Mínimo	2,3	4,4	5,1	0,91	2,50	35,4	
	Média	19,3	63,4	16,2	1,45	2,64	46,0	

Classe textural	Resumo estatístico	Fração (% massa)			ρ_b	ρ_p	ϕ	Número de amostras
		Areia	Silte	Argila	kg dm^{-3}		(%)	
Franco siltoso	Máximo	68,3	82,2	26,0	1,69	2,78	91,5	55
	DP	12,0	13,1	5,0	0,15	0,05	8,1	
	CV (%)	62,0	20,6	30,6	10,21	1,87	17,6	
Siltoso	Mínimo	3,0	88,0	7,0	1,42	2,65	41,2	2
	Média	3,0	89,0	8,0	1,49	2,65	43,8	
	Máximo	3,0	90,0	9,0	1,56	2,65	46,3	
	DP	0,0	1,4	1,4	0,10	0,00	3,6	
	CV (%)	0,0	1,6	17,7	6,64	0,00	8,2	

DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

Os valores de $\theta(h)$ de cada amostra foram ajustados para descrição da CRA a partir da equação de Van Genuchten (1980)-Mualem (Eq. 2), denominada doravante pelo acrônimo VGM, de acordo com:

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha h)^n\right]^{1-1/n}} \tag{2}$$

em que θ é a umidade volumétrica do solo (m^3 m^{-3}) como função da tensão matricial de água no solo (h), considerando $h > 0$ para solo não saturado (m). θ_r e θ_s são, respectivamente, as umidades residual e de saturação (m^3 m^{-3}) e α (m^{-1}) e n são parâmetros empíricos do formato da curva.

Como os dados selecionados apresentavam pontos medidos da CRA, foi necessário realizar o ajuste dessas curvas pela eq. 2, e então obter os parâmetros delas. A partir desses parâmetros foi possível estimar os pontos de interesse da CRA: $\theta(0,1m)$, $\theta(0,3m)$, $\theta(0,6m)$, $\theta(1,0m)$, $\theta(3,3m)$, $\theta(10m)$ e $\theta(150m)$, e posteriormente, considerá-los como valores "medidos" para comparação das estimativas geradas pelas PTFs da literatura (20 equações), recalibradas (20 equações) e desenvolvidas (26 equações).

2.2.2 Testando PTFs

As equações que descrevem as PTFs pontuais para estimativa da umidade volumétrica do solo nas tensões matriciais de interesse (de 0,1 a 150 m) foram avaliadas para o conjunto de dados selecionado. Os 328 dados selecionados das bases UNSODA e HYBRAS foram separados com a intenção de cobrir satisfatoriamente o máximo das classes texturais, direcionando-se 60% dos pontos (198) para calibração e 40% (130 pontos) para validação (Figura 2.2). Os valores máximos e mínimos dos teores de areia, silte e argila que compõem os

dados de calibração são 98,9 e 0,5%, 90 e 1%, 74,5 e 0,1%, respectivamente. Para os dados correspondentes da validação, os máximos e mínimos dos teores de areia, silte e argila são 95,9 e 0,8%, 90 e 2,01%, 74,05 e 0,1%, respectivamente.

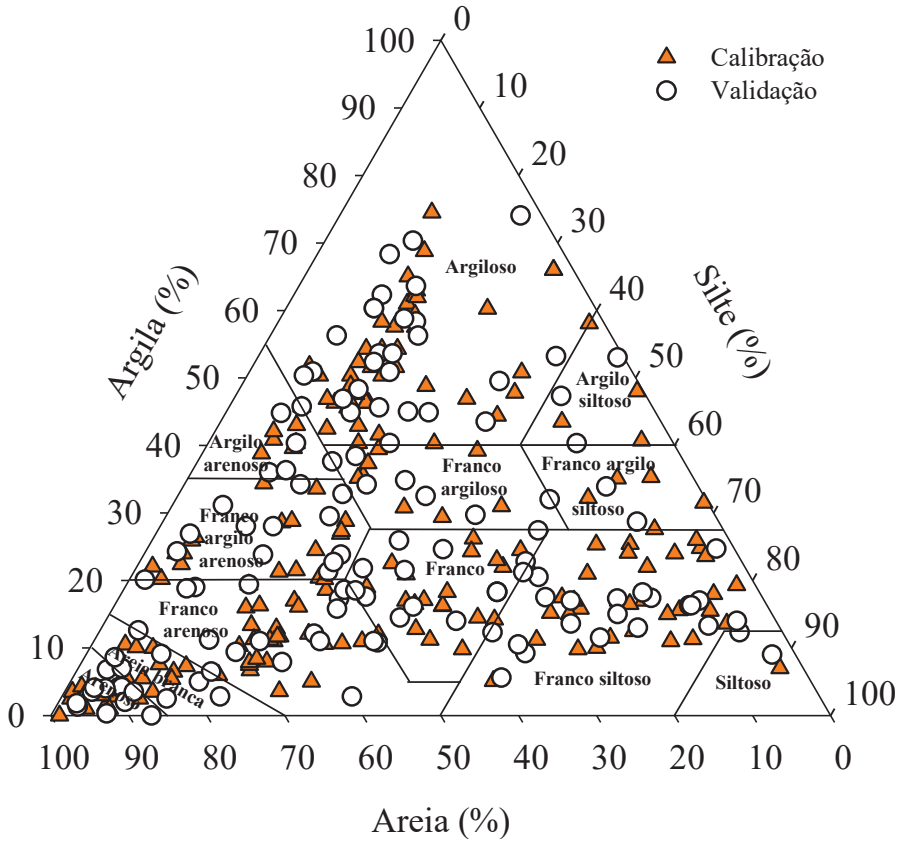


Figura 2.2 - Distribuição textural dos dados utilizados para calibração e validação dos modelos analisados.

Diversas PTFs encontradas na literatura foram analisadas com os dados selecionados para posterior comparação de desempenho de predição. Inicialmente, utilizaram-se os modelos propostos por Gupta & Larson (1979), Rawls *et al*. (1982;1983), Arruda *et al*. (1987), van den Berg *et al*. (1997), Tomasella & Hodnett (1998), Minasny & Hartemink (2011), Botula (2013) e Gunarathna *et al*. (2019), pois requerem como parâmetros de entrada dados relacionados a textura e estrutura do solo. As PTFs mencionadas e suas siglas correspondentes estão apresentadas na Tabela 2.3 a seguir:

Tabela 2.3 –PTFs pontuais na forma original utilizadas para avaliação dos valores de *θ(h)* que compõem a CRA.

PTFs avaliadas	Equações
PTF-B1: Botula (2013)	$\theta(0,1m) = A + B(Cl) - C\rho_b$
PTF-B2: Botula (2013)	$\theta(0,3m) = A - B(Sa) + C(Cl) - D\rho_b$
PTF-B3: Botula (2013)	$\theta(0,6m) = A - B(Sa)$
PTF-R1: Rawls *et al*. (1982)	$\theta(1,0m) = A - B(Sa) + C(Cl)$
PTF-Be1: van den Berg *et al*. (1997)	$\theta(1,0m) = A + B(Cl) + C(Si)$
PTF-MH1: Minasny & Hartemink (2011)	$\theta(1,0m) = A - B(\rho_b) - C(Sa)$
PTF-B4: Botula (2013)	$\theta(1,0m) = A - B(Sa)$
PTF-G1: Gunarathna *et al*. (2019)	$\theta(1,0m) = A - B(Sa) + C(Si) - D\rho_b$
PTF-GL1: Gupta & Larson (1979)	$\theta(3,3m) = A(Sa) + B(Si) + C(Cl) - D\rho_b$
PTF-R2: Rawls *et al*. (1982)	$\theta(3,3m) = A - B(Sa) + C(Cl)$
PTF-A1: Arruda *et al*. (1987)	$\theta(3,3m) = A\exp\left[B(Cl+Si) - C(Cl+Si)^2\right]D\rho_b$
PTF-TH1: Tomasella & Hodnett (1998)	$\theta(3,3m) = \left(A + B(Si) + C(Cl)\right)\rho_b$
PTF-GL2: Gupta & Larson (1979)	$\theta(10m) = A(Sa) + B(Si) + C(Cl) - D\rho_b$
PTF-R3: Rawls *et al*. (1983)	$\theta(10m) = A - B(Sa) + C(Cl) - D\rho_b$
PTF-B5: Botula (2013)	$\theta(10m) = A - B(Sa) + C(Cl) + D\rho_b$
PTF-GL3: Gupta & Larson (1979)	$\theta(150m) = A(Si) + B(Cl) - C(Sa) + D\rho_b$
PTF-R4: Rawls *et al*. (1983)	$\theta(150m) = A - B(Sa) + C(Cl) - D\rho_b$
PTF-A2: Arruda *et al*. (1987)	$\theta(150m) = A\exp\left[B(Cl+Si) - C(Cl+Si)^2\right]D\rho_b$
PTF-TH2: Tomasella & Hodnett (1998)	$\theta(150m) = \left(A + B(Si) + C(Cl)\right)D\rho_b$
PTF-G2: Gunarathna *et al*. (2019)	$\theta(150m) = A - B(Sa) - C\rho_b + D(\rho_b)^2$

θ(*0*,1m), *θ*(0,3m)... *θ(n)* correspondem a umidade na i-esima tensão matricial até o enésimo valor de 150 m; ρ_b é a densidade do solo (kg dm^{-3}); *Sa, Si* e *Cl* são, respectivamente, os teores de areia (%), silte (%) e argila (%). As constantes *A*, *B*, *C*, *D* são parâmetros empíricos de regressão das PTFs utilizadas.

Os valores das constantes presentes nas equações das PTFs da Tabela 2.3 encontram-se na Tabela 2.4 para melhor compreensão.

Tabela 2.4 – Valores das constantes das PTFs utilizadas da literatura.

PTFs avaliadas		Constantes			
		A	B	C	D
θ(0,1m)	PTF-B1	0,67228	0,00089	0,20057	–
θ(0,3 m)	PTF-B2	0,4808	0,00081	0,00067	0,06344
θ(0,6 m)	PTF-B3	0,44196	0,00252	–	–
θ(1,0 m)	PTF-R1	0,4118	0,003	0,0023	–
	PTF-Be1	0,1127	0,00367	0,00226	–
	PTF-MH1	0,599	0,0878	0,0031	–
	PTF-B4	0,4352	0,00296	–	–
	PTF-G1	0,4436	0,0028	0,0024	0,034
θ(3,3 m)	PTF-GL1	0,003075	0,005886	0,008039	0,1434
	PTF-R2	0,2576	0,002	0,0036	–
	PTF-A1	7,00138	0,039	0,000255	0,01
	PTF-TH1	0,04046	0,00426	0,00404	–
θ(10 m)	PTF-GL2	0,001563	0,00362	0,007154	0,05759
	PTF-R3	0,2352	0,0012	0,0043	0,0517
	PTF-B5	0,26478	0,00276	0,00091	0,042
θ(150 m)	PTF-GL2	0,00142	0,005766	0,000059	0,02671
	PTF-R4	0,0854	0,0004	0,0044	0,0182
	PTF-A2	2,14239	0,056588	0,00034568	0,01
	PTF-TH2	0,91	0,15	0,396	0,01
	PTF-G2	0,6397	0,0028	0,385	0,1169

Sabendo-se que as 20 PTFs da Tabela 2.3 não foram elaboradas a partir dos dados selecionados nesse trabalho, foi necessário recalibrá-las com a base de dados elaborada em busca de um melhor ajuste depois da recalibração. Adicionalmente, analisaram-se as correlações possíveis entre as informações coletadas nos bancos de dados para cada tensão matricial, a fim de escolher quais informações seriam utilizadas como dados de entrada para o desenvolvimento das novas PTFs. Assim, desenvolveram-se outras 26 PTFs para estimativa da umidade nas mesmas tensões matriciais (0,1 a 150 m), sendo dependentes dos dados de textura, densidade do solo seco (ρ_b), porosidade total (ϕ) e umidade volumétrica na saturação (θ_s) (Tabela 2.5). O método de regressão não linear com a função *nls* (*nonlinear least squares*) do *software R* (R Core Team, 2019) foi utilizado a fim de encontrar os parâmetros *A, B, C, D, j, t* e *u* para as novas funções de pedotransferência propostas, bem como para estimar os parâmetros da equação de VGM para cada CRA selecionada. A função *nls* utiliza processos iterativos para obter as estimativas dos parâmetros do modelo inserido na linha de comando. Em teoria, esses processos iterativos vão pouco a pouco aproximando a estimativa do valor real do parâmetro da função que melhor se ajusta aos dados. Em casos menos frequentes, o método de regressão não linear pode não convergir para a solução se as estimativas iniciais dos parâmetros não estiverem ao redor da solução. Contudo, problemas dessa natureza durante a execução dessa função do *software R* com os dados utilizados não ocorreram.

Tabela 2.5 – Modelos propostos de funções de pedotransferência (PTFs) para as sete tensões matriciais avaliadas

PTFs propostas	Equações
θ(0,1 m)-PTF1	$\theta(0,1m) = A\phi + B(Cl) + C$
θ(0,1 m)-PTF2	$\theta(0,1m) = A + B(Cl + Si)\ln(Cl + Si) - C\exp(-\theta_s)$
θ(0,3 m)-PTF1	$\theta(0,3m) = A - B(Sa)^{2,5} - C(\rho_b)^3$
θ(0,3 m) -PTF2	$\theta(0,3m) = A\phi + B(Sa) + C(Si) + D(Cl)$
θ(0,3 m) -PTF3	$\theta(0,3m) = A - B(Sa)^{2,5} - C\ln(\phi)^2$
θ(0,3 m)-PTF4	$\theta(0,3m) = A + B\ln(Cl + Si)^2 + C\ln(\theta_s)$
θ(0,6 m) -PTF1	$\theta(0,6m) = A - B(Sa)^{2,5} - C(\rho_b)^2\ln(\rho_b)$
θ(0,6 m) -PTF2	$\theta(0,6m) = A + B\ln(Cl + Si)^2 + C\ln(\theta_s)$
θ(0,6 m) -PTF3	$\theta(0,6m) = A + B\ln(Cl + Si)^2 - C\rho_b{}^2\ln(\rho_b)$
θ(0,6 m) -PTF4	$\theta(0,6m) = A + B\ln(Cl + Si)^2 - C\ln(\phi)^2$
θ(1,0 m) -PTF1	$\theta(1,0m) = A + B(Cl + Si)\ln(Cl + Si) - C(Cl + Si)^3$
θ(1,0 m) -PTF2	$\theta(1,0m) = A + B\ln(Cl + Si)^2 + C\ln(\theta_s)$
θ(1,0 m) -PTF3	$\theta(1,0m) = A - B(\rho_b)^2\ln(\rho_b) - C(Sa)^{2,5}$
θ(1,0 m) -PTF4	$\theta(1,0m) = A - B(Sa)^{2,5} - \dfrac{C}{\sqrt{\theta_s}}$
θ(3,3 m) -PTF1	$\theta(3,3m) = A + B(Cl + Si)^2 - C(Cl + Si)^2\ln(Cl + Si)$
θ(3,3 m) -PTF2	$\theta(3,3m) = A + B(Cl + Si)^2 - C(Cl + Si)^2\ln(Cl + Si) - D\rho_b{}^2\ln(\rho_b)$
θ(3,3 m) -PTF3	$\theta(3,3m) = A - B(Sa)^{1,5} + C\sqrt{Sa}\ln Sa$
θ(3,3 m) -PTF4	$\theta(3,3m) = A - B(Sa)^{2,5} - C(\theta_s)^2$
θ(10 m) -PTF1	$\theta(10m) = A(Cl + Si)^j - B\rho_b + C(Cl + Sa)^t$
θ(10 m) -PTF2	$\theta(10m) = A - B(Sa)^{2,5} + C\sqrt{Cl}\ln(Cl)$
θ(10 m) -PTF3	$\theta(10m) = A + B\sqrt{Cl}\ln(Cl) + C\ln(Cl + Si)^2$
θ(10 m) -PTF4	$\theta(10m) = A - B(Cl)^3 + C\sqrt{Cl}$
θ(150 m) -PTF1	$\theta(150m) = A(Cl + Si)^j + B(Cl + Sa)^t - C\rho_b$
θ(150 m) -PTF2	$\theta(150m) = A + B(Cl) - C(Cl)^3$

PTFs propostas	Equações
θ(150 m) -PTF3	$\theta(150m) = 2A + B(Cl + Si/\rho_b) + C(Cl)$
θ(150 m) -PTF4	$\theta(150m) = A(Cl + Si)^j + B(Cl + Sa)^t + C(Si + Sa)^u - D\rho_b$

As constantes *A*, *B*, *C*, *D*, *j, t* e *u* são parâmetros empíricos de regressão das PTFs desenvolvidas.

O coeficiente de correlação de Pearson (*r*), o erro médio (ME) e a raiz do erro quadrático médio (RMSE) foram utilizados para análise das estimativas das PTFs, de acordo com as equações:

$$r = \frac{cov\left(\theta_{est,i}, \theta_{mea,i}\right)}{DP_{\theta\,est,i} \cdot DP_{\theta\,mea,i}} \tag{3}$$

$$RMSE = \left[(1/N) \sum_{i=1}^{N} \left(\theta_{est,i} - \theta_{mea,i}\right)^2 \right]^{1/2} \tag{4}$$

em que $\theta_{mea,i}$ é a i-ésima variável medida, $\theta_{est,i}$ é a i-ésima variável estimada, *N* é o número de observações, *cov* é a covariância, $DP_{\theta est,i}$ e $DP_{\theta mea,i}$ são o desvio padrão dos dados estimados e dos dados medidos, respectivamente. O coeficiente de correlação de Spearman, aqui apresentado por λ para não confundir com outras propriedades, foi utilizado para avaliar a correlação entre as variáveis utilizadas no desenvolvimento das PTFs propostas (Eq. 5).

$$\lambda = 1 - \frac{6}{N\left(N^2 - 1\right)} \sum_{i=1}^{N} d_i^{\,2} \tag{5}$$

em que d_i é a diferença entre os dois postos de cada variável observada e *N* é o número de observações.

As correlações de Pearson e de Spearman seguiram a mesma classificação quanto aos valores resultantes de correlação entre fraca (<0,5), moderada (0,5-0,6), forte (0,7-0,9) e muito forte (>0,9) (Huf dos Reis *et al*., 2018). Os resultados da correlação de Spearman apresentam os valores do *p*-valor, que indicam a probabilidade da significância entre os resultados encontrados entre as variáveis avaliadas. Dessa forma, valores de *p* maiores que 0,05 indicam que não há significância entre a correlação ao nível de 5% de probabilidade e, consequentemente, nem para 1% ou 0,1%.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1 Os parâmetros de VGM e as constantes das PTFs utilizadas e propostas

A estatística descritiva dos parâmetros da equação de VGM, obtidos pelos ajustes dos dados, foram agrupados por classe textural e organizados na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 - Estatística descritiva dos parâmetros da CRA pela equação de VGM.

Classe textural	Resumo estatístico	θ_s	θ_r	α	n	RSE	θ_{pwp}	Número de amostras
		$m^3\ m^{-3}$		m^{-1}	-	$m^3\ m^{-3}$		
Arenoso	Mínimo	0,265	0,000	0,967	1,282	0,003	0,016	28
	Média	0,379	0,034	4,44	2,119	0,013	0,043	
	Máximo	0,476	0,078	14,64	4,277	0,030	0,079	
	Mediana	0,381	0,035	3,193	2,003	0,012	0,036	
	DP	0,051	0,021	3,735	0,745	0,007	0,019	
	CV (%)	13,5	61,9	84,1	35,2	52,9	43,4	
Areia franca	Mínimo	0,311	0,000	0,804	1,100	0,005	0,032	21
	Média	0,407	0,057	6,812	1,736	0,013	0,072	
	Máximo	0,563	0,117	21,56	3,984	0,026	0,170	
	Mediana	0,401	0,059	6,157	1,610	0,014	0,065	
	DP	0,053	0,032	5,407	0,570	0,005	0,036	
	CV (%)	12,9	55,7	79,4	32,8	38,9	50,2	
Argiloso	Mínimo	0,363	0,000	0,353	1,100	0,002	0,163	76
	Média	0,556	0,233	17,68	1,355	0,012	0,292	
	Máximo	0,759	0,381	570,3	2,089	0,038	0,386	
	Mediana	0,564	0,256	7,623	1,320	0,011	0,297	
	DP	0,062	0,097	0,652	0,205	0,006	0,044	
	CV (%)	11,1	41,6	368,5	15,2	53,4	15,0	
Argilo arenoso	Mínimo	0,332	0,000	0,088	1,100	0,003	0,156	15
	Média	0,492	0,161	15,22	1,478	0,012	0,226	
	Máximo	0,644	0,266	61,44	2,475	0,027	0,272	
	Mediana	0,525	0,211	7,697	1,326	0,012	0,240	
	DP	0,102	0,101	17,20	0,433	0,007	0,041	
	CV (%)	20,6	62,9	113,1	29,3	54,5	18,2	
Argilo siltoso	Mínimo	0,315	0,000	0,207	1,106	0,004	0,219	4
	Média	0,436	0,041	0,397	1,149	0,007	0,270	
	Máximo	0,550	0,165	0,539	1,258	0,011	0,323	
	Mediana	0,440	0,000	0,420	1,116	0,006	0,269	
	DP	0,096	0,082	0,138	0,073	0,003	0,044	
	CV (%)	22,1	200,0	34,8	6,3	44,4	16,2	
Franco	Mínimo	0,307	0,000	0,191	1,100	0,001	0,111	32
	Média	0,477	0,044	7,744	1,198	0,014	0,195	
	Máximo	0,837	0,276	73,90	1,597	0,034	0,392	
	Mediana	0,437	0,000	4,069	1,164	0,014	0,185	
	DP	0,123	0,078	13,13	0,115	0,009	0,059	
	CV (%)	25,8	174,6	169,6	9,6	61,4	30,3	
Franco arenoso	Mínimo	0,238	0,000	0,170	1,112	0,003	0,053	40
	Média	0,387	0,039	3,369	1,365	0,012	0,106	
	Máximo	0,519	0,158	11,28	1,936	0,028	0,254	
	Mediana	0,388	0,000	2,179	1,295	0,012	0,099	
	DP	0,065	0,048	3,133	0,186	0,006	0,037	
	CV (%)	16,9	124,2	93,0	13,6	53,8	34,8	
Franco argilo arenoso	Mínimo	0,309	0,000	0,071	1,100	0,004	0,083	33
	Média	0,441	0,096	10,66	1,455	0,011	0,157	

Classe textural	Resumo estatístico	θ_s	θ_r	α	n	RSE	θ_{pwp}	Número de amostras
		$m^3\ m^{-3}$		m^{-1}	-	$m^3\ m^{-3}$		
	Máximo	0,694	0,220	32,22	3,184	0,031	0,314	
	Mediana	0,432	0,091	6,872	1,362	0,009	0,148	
	DP	0,101	0,072	9,235	0,401	0,006	0,050	
	CV (%)	22,8	74,5	86,6	27,6	55,4	31,6	
Franco argilo siltoso	Mínimo	0,388	0,000	0,272	1,100	0,005	0,199	8
	Média	0,460	0,113	251,1	1,176	0,010	0,255	
	Máximo	0,562	0,284	1000,0	1,380	0,025	0,359	
	Mediana	0,460	0,113	2,114	1,116	0,008	0,243	
	DP	0,062	0,101	461,9	0,120	0,006	0,051	
	CV (%)	13,5	89,6	183,7	10,2	67,3	20,0	
Franco argiloso	Mínimo	0,328	0,000	0,056	1,100	0,003	0,169	14
	Média	0,495	0,106	20,44	1,231	0,011	0,219	
	Máximo	0,825	0,292	88,05	1,449	0,030	0,308	
	Mediana	0,433	0,101	9,499	1,213	0,012	0,210	
	DP	0,151	0,081	28,62	0,117	0,007	0,045	
	CV (%)	30,6	77,0	140,0	9,5	62,5	20,5	
Franco siltoso	Mínimo	0,355	0,000	0,069	1,100	0,004	0,072	55
	Média	0,419	0,015	1,822	1,345	0,018	0,133	
	Máximo	0,640	0,114	12,83	3,754	0,058	0,272	
	Mediana	0,402	0,000	0,663	1,264	0,017	0,119	
	DP	0,056	0,030	2,712	0,371	0,010	0,043	
	CV (%)	13,3	192,5	148,9	27,6	57,8	32,5	
Siltoso	Mínimo	0,404	0,000	0,411	1,359	0,017	0,074	2
	Média	0,423	0,000	0,471	1,383	0,019	0,083	
	Máximo	0,441	0,000	0,532	1,406	0,021	0,092	
	Mediana	0,423	0,000	0,471	1,383	0,019	0,083	
	DP	0,027	0,000	0,085	0,033	0,003	0,012	
	CV (%)	6,3	0,0	18,1	2,4	13,9	14,7	

θ_r, θ_s e θ_{pwp} são, respectivamente, as umidades volumétricas residual, de saturação e do ponto de murchamento permanente, α e n são parâmetros empíricos do formato da curva. RSE é o erro dos resíduos. DP e CV são, respectivamente, o desvio padrão e o coeficiente de variação.

Os valores recalibrados dos parâmetros empíricos presentes em cada uma das PTFs utilizadas da literatura encontram-se na Tabela 2.7Tabela 2.7.

Tabela 2.7 – Valores dos parâmetros empíricos das PTFs recalibradas.

PTFs recalibradas		Constantes			
		A	B	C	D
θ(0,1 m)	PTF-B1	0,7216659	0,00199	0,2425896	–
θ(0,3 m)	PTF-B2	0,6270443	0,0009724	0,0014779	0,1660636
θ(0,6 m)	PTF-B3	0,4602312	0,0024909	–	–
θ(1,0 m)	PTF-R1	0,379717	0,002157	0,001553	–
	PTF-Be1	0,164014	0,00371	0,002157	–
	PTF-MH1	0,574538	0,094714	0,002527	–
	PTF-B4	0,448465	0,002776	–	–
	PTF-G1	0,54207	0,00188	0,001	0,1122
θ(3,3 m)	PTF-GL1	0,0012342	0,0034608	0,005256	0,0141415
	PTF-R2	0,3250728	0,002244	0,0018446	–
	PTF-A1	0,03488	0,05108	0,0003332	–
	PTF-TH1	5,24736	0,15455	0,34358	–
θ(10 m)	PTF-GL2	0,001	0,0027539	0,0052117	0,0182053
	PTF-R3	0,2484879	0,0017762	0,0025211	0,0001
	PTF-B5	0,2325903	0,0017893	0,0025587	0,0105943

PTFs recalibradas		Constantes			
		A	B	C	D
θ(150 m)	PTF-GL2	0,001	0,004575	0,00001	0,0181208
	PTF-R4	0,0981397	0,0005522	0,0039005	0,001
	PTF-A2	0,962176	0,0805464	0,0005649	–
	PTF-TH2	1,58764	0,03899	0,35977	–
	PTF-G2	0,322847	0,002007	0,041486	0,001

Os valores dos parâmetros empíricos das PTFs desenvolvidas estão apresentados na Tabela 2.8.

Tabela 2.8 – Valores dos parâmetros empíricos das PTFs propostas.

PTFs desenvolvidas	Constantes						
	A	B	C	D	j	t	u
θ(0,1 m)-PTF1	0,5262	0,002	0,127	–	–	–	–
θ(0,1 m)-PTF2	1,2047	$6{,}74\cdot10^{-5}$	1,248	–	–	–	–
θ(0,3 m)-PTF1	0,5323	$1{,}7\cdot10^{-6}$	0,035	–	–	–	–
θ(0,3 m)-PTF2	0,4119	0,001	0,002	0,0035	–	–	–
θ(0,3 m)-PTF3	0,5193	$1{,}7\cdot10^{-6}$	0,146	–	–	–	–
θ(0,3 m)-PTF4	0,4835	0,007	0,251	–	–	–	–
θ(0,6 m)-PTF1	0,4556	$2{,}45\cdot10^{-6}$	0,062	–	–	–	–
θ(0,6 m)-PTF2	0,3304	0,011	0,183	–	–	–	–
θ(0,6 m) -PTF3	0,2127	0,0125	0,0619	–	–	–	–
θ(0,6 m) -PTF4	0,2280	0,0125	0,1003	–	–	–	–
θ(1,0 m)-PTF1	0,1251	0,0013	$3{,}91\cdot10^{-7}$	–	–	–	–
θ(1,0 m)-PTF2	0,2401	0,0134	0,145	–	–	–	–
θ(1,0 m)-PTF3	0,4256	0,0447	$2{,}87\cdot10^{-6}$	–	–	–	–
θ(1,0 m)-PTF4	0,6573	$2{,}62\cdot10^{-6}$	0,182	–	–	–	–
θ(3,3 m)-PTF1	0,0687	$4{,}58\cdot10^{-4}$	$9{,}44\cdot10^{-6}$	–	–	–	–
θ(3,3 m)-PTF2	0,0907	$4{,}46\cdot10^{-4}$	$9{,}21\cdot10^{-5}$	0,0183	–	–	–
θ(3,3 m)-PTF3	0,3048	$6{,}23\cdot10^{-4}$	0,00739	–	–	–	–
θ(3,3 m)-PTF4	0,3473	$3{,}37\cdot10^{-6}$	0,001	–	–	–	–
θ(10 m)-PTF1	0,0163	0,0667	$4{,}88\cdot10^{-4}$	–	0,683	1,216	–
θ(10 m)-PTF2	0,2151	$2{,}14\cdot10^{-6}$	0,0042	–	–	–	–
θ(10 m)-PTF3	0,0058	0,0046	0,0103	–	–	–	–
θ(10 m)-PTF4	0,0042	$3{,}30\cdot10^{-7}$	0,0516	–	–	–	–
θ(150 m)-PTF1	0,0066	$2{,}34\cdot10^{-4}$	0,0965	–	0,842	1,467	–
θ(150 m)-PTF2	0,0302	0,0066	$6{,}12\cdot10^{-7}$	–	–	–	–
θ(150 m)-PTF3	0,0081	0,001	0,0034	–	–	–	–
θ(150 m)-PTF4	0,0056	0,001	0,001	0,1022	0,871	1,163	0,01

2.3.2 Apresentação das estimativas pontuais da CRA

As PTFs dos autores citados foram comparadas entre a equação original e a recalibrada e, posteriormente comparadas às 26 PTFs desenvolvidas para o banco de dados selecionado. As calibrações e validações foram analisadas graficamente e com os indicadores de desempenho estatístico (eqs. 3, 4 e 5).

Botula (2013) elaborou e testou 7 PTFs hierárquicas para estimar pontos da CRA desde a faixa mais úmida [*θ(0,1 m)*] até a mais seca [*θ(150 m)*] de solos da República Democrática do Congo. Três dessas PTFs, sendo elas de base textural e com a informação de ρ_b, foram utilizadas para estimar as umidades *θ(0,1 m)*, *θ(0,3 m)* e *θ(0,6 m)* que posteriormente foram comparadas aos dados selecionados neste trabalho. Utilizou-se para *θ(0,1 m)* a PTF-B1 que considera as variáveis ρ_b e *Cl* (Tabela 2.3). Na Figura 2.3A há três pontos com *θ* medido maiores que 0,6 m^3 m^{-3}. Essas são amostras de baixa densidade e com os teores de argila e silte em dominância ao teor de areia.

As duas PTFs propostas (PTF1 e PTF2) para estimativa de *θ(0,1 m)*, descritas na Tabela 2.5, apresentaram melhor desempenho (precisão e exatidão) em sua estimativa que a PTF-B1 original e a recalibrada, sendo a PTF2 com valor de *r*=0,944 e valor para RMSE=0,023 m^3 m^{-3} (Figura 2.3B). Essa PTF2 utilizou-se da soma *Cl+Si* e do valor de θ_s. Segundo os resultados da correlação de Spearman (Tabela 2.9) entre os dados de entrada das PTFs e os valores de *θ(h)*, o teor de silte não foi significativo para estimar *θ(0,1 m),* pois apresentou *p*-valor igual a 0,1461*,* mas o teor de argila e θ_s foram significativos (correlação moderada e muito forte, respectivamente), haja vista que *θ(0,1 m)* ocorre próximo a θ_s.

Na elaboração de PTFs para estimar a CRA de solos da República Democrática do Congo, Botula (2013) observou a importância de utilizar o teor de argila na predição da umidade próximo a saturação, ou seja, a *θ(0,1 m)*, bem como o valor da densidade do solo.

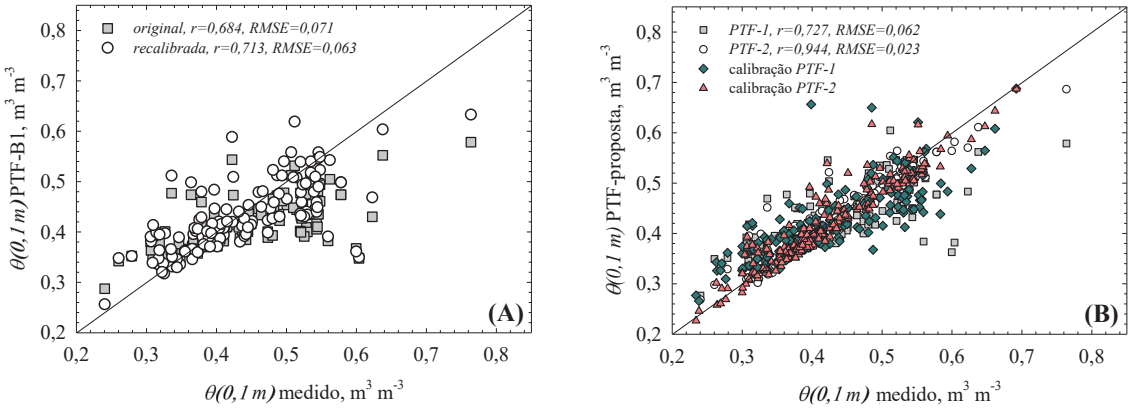


Figura 2.3 – Comparação entre umidade medida na tensão matricial de 0,1 m e estimada pelas PTFs. (A) resultados da PTF-B1 de Botula (2013) original e recalibrada e (B) resultados das duas PTFs propostas (PTF1 e PTF2).

A PTF-B2 para *θ(0,3 m)* estimou bem o conjunto de dados destinado a validação. Essa PTF leva em consideração as variáveis *Sa*, *Cl* e ρ_b. No entanto, mesmo com o processo de recalibração o valor de *r* se manteve em 0,735 e o valor de RMSE reduziu de 0,073 para 0,062

$m^3\ m^{-3}$. Ou seja, melhorou a exatidão da estimativa dos pontos de umidade. Pela Tabela 2.9 notou-se correlação moderadamente negativa e significativa entre o teor de areia e ρ_b para *θ(0,3 m),* já o teor de argila com relação a *θ(0,3 m)* apresentou correlação positiva, demonstrando ser um fator importante na estimativa de *θ(0,3 m).*

As quatro PTFs propostas para estimar *θ(0,3 m)* apresentaram forte correlação com os pontos medidos ($r > 0,7$). No entanto, a PTF4 apresentou melhor precisão (r=0,873) e exatidão (RMSE=0,045 $m^3\ m^{-3}$) na estimativa, valendo-se da soma *Cl+Si* e θ_s. Tanto os teores de silte e argila e de água na saturação apresentaram correlação (λ) positiva e significativa à *θ(0,3 m)* (Tabela 2.9). A PTF1 apresentou menor valor de r (0,717) dentre as 4 propostas, utilizando o teor de areia e ρ_b que apresentaram correlação negativa com *θ(0,3 m)*. A PTF3 utiliza a informação de ϕ ao invés de ρ_b, como ocorre na PTF1. A variável ϕ apresentou correlação positiva e significativa à *θ(0,3 m),* diferentemente de ρ_b e do teor de *areia* para a estimativa da umidade nessa tensão.

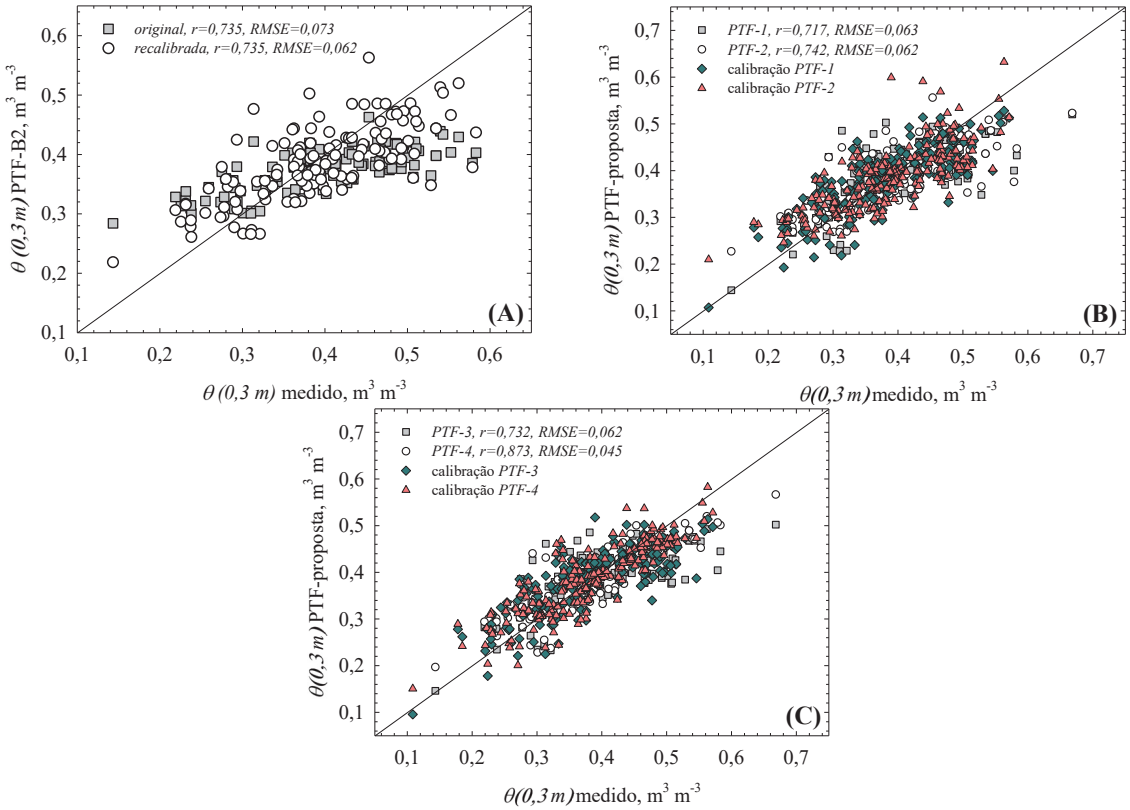
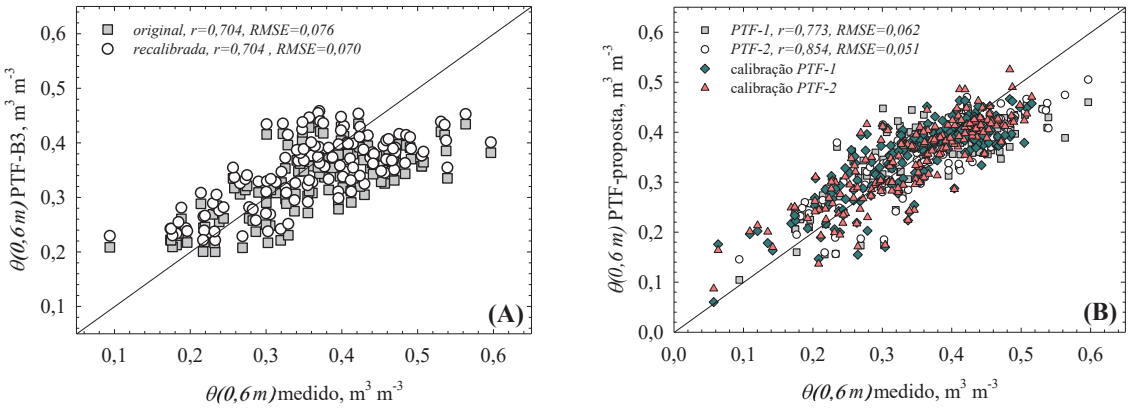


Figura 2.4 - Comparação entre umidade medida na tensão matricial de 0,3 m e estimada pelas PTFs. (A) resultados da PTF-B2 de Botula (2013) original e recalibrada; (B) e (C) resultados das quatro PTFs propostas (PTF1, PTF2, PTF3 e PTF4).

Botula (2013) também apresentou uma PTF textural para estimar *θ(0,6 m)* e que leva em consideração apenas o teor de areia. Na Figura 2.5A encontram-se os resultados da PTF-B3 para o banco de dados avaliado. Igualmente como ocorreu para a PTF-B2 na tensão de 0,3 m, tanto a PTF original quanto a recalibrada não alteraram o valor de *r* (0,704), ocorrendo uma pequena redução no valor de RMSE para a PTF-B3 recalibrada, que passou de 0,076 para 0,070 $m^3 m^{-3}$. Os resultados foram melhores dentre as quatro PTFs propostas para estimar a *θ(0,6 m)*. A PTF1 utilizou-se das variáveis *Sa* e ρ_b para a estimativa de *θ(0,6 m)*. A PTF2, que apresentou melhor resultado em relação a PTF1 (Figura 2.5B), assim como as PTFs 3 e 4 (Figura 2.5C), utilizou a soma *Cl+Si* e θ_s onde o valor de θ_s foi também um importante parâmetro de entrada para a estimativa de *θ(0,6 m)*. Tanto θ_s quanto os teores de silte e argila apresentaram correlação positiva e significativa para a estimativa de *θ(0,6 m),* diferentemente de *Sa* e ρ_b, utilizados na PTF1. A PTF4 utiliza-se da variável ϕ, ao invés de θ_s, apresentando uma correlação (*r*) ligeiramente maior que a PTF3, que também utiliza a soma *Cl+Si,* mas com ρ_b. O formato das equações para as PTFs 2, 3 e 4 é semelhante, alterando apenas as variáveis correspondentes a estrutura do solo.

Percebe-se no trabalho de Botula *et al*. (2013) a importância de se utilizar ρ_b na estimativa de pontos da região mais úmida da CRA. Além disso, a partir da tensão matricial *h*=0,3 m, o teor de areia tornou-se uma importante variável de entrada juntamente com as variáveis *Cl* e ρ_b.



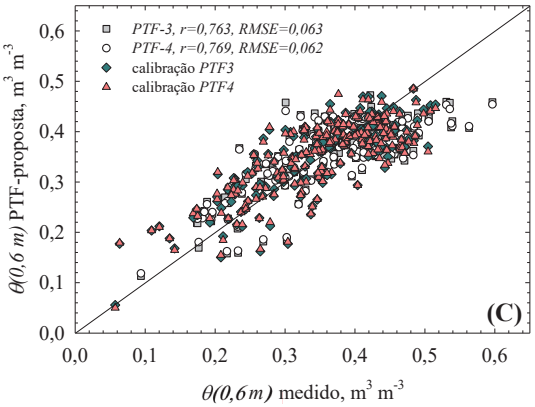


Figura 2.5 - Comparação entre umidade medida na tensão matricial de 0,6 m e estimada pelas PTFs. (A) resultados da PTF-B3 de Botula (2013) original e recalibrada, (B) e (C) resultados das quatro PTFs propostas (PTF1, PTF2, PTF3 e PTF4).

Essa observação também foi constatada por Ghanbarian-Alavijeh & Millán (2010), corroborando com os resultados deste estudo. Na Figura 2.6 apresentam-se os resultados para as estimativas de *θ(1,0 m),* utilizando-se 5 PTFs da literatura. A PTF-MH1 (Figura 2.6C) foi a que apresentou melhor resultado com relação às outras quatro (PTF-R1, PTF-Be1, PTF-B4, PTF-G1), com r=0,781 para a PTF-MH1 original e r=0,782 para a PTF-MH1 recalibrada. Nessa PTF os autores utilizaram as variáveis *Sa* e ρ_b para estimar *θ(1,0 m)* e para o banco de dados avaliado tais variáveis correlacionaram-se negativamente com a estimativa, de formas fraca e moderada, respectivamente. Contudo, as demais PTFs apresentaram resultados de r próximos ao da PTF-MH1, variando de 0,675 a 0,767. A PTF-G1 foi a que apresentou um pequeno aumento na precisão após a recalibração da equação, passando de r=0,675 para r=0,733, e reduzindo o RMSE de 0,089 para 0,070 $m^3 m^{-3}$, melhorando a exatidão da estimativa (Figura 2.6E).

As demais PTFs variaram o valor de r apenas na terceira casa decimal quando recalibradas. A PTF-G1 utiliza os teores de areia e silte, além de ρ_b. Dentre essas três variáveis de entrada, apenas *Si* se correlacionou positivamente com *θ(1,0 m),* porém, de maneira fraca (r=0,4356). Dentre as 4 PTFs para estimar *θ(1,0 m)*, a PTF1 utiliza apenas a soma *Cl*+*Si* e que, na PTF2 também são utilizados, além de θ_s. Dentre essas duas PTFs, a PTF2 proporcionou maior precisão, com r=0,864, e menor valor de RMSE (0,053 $m^3 m^{-3}$) (Figura 2.6F).

Conforme os resultados de correlação de Spearman, tanto *Cl*, *Si* e θ_s apresentaram correlação positiva e significativa para *θ(1,0 m).* As outras duas PTFs utilizam *Sa* e ρ_b (PTF3) e θ_s (PTF4) para estimar *θ(1,0 m)*. A PTF4 apresentou melhor r (0,865) em relação à PTF3 (r=0,814). Ademais, notou-se que a PTF2 e a PTF4 apresentaram valores muito próximos de r

e RMSE, embora suas funções sejam diferentes, o que têm em comum é a variável de entrada θ_s.

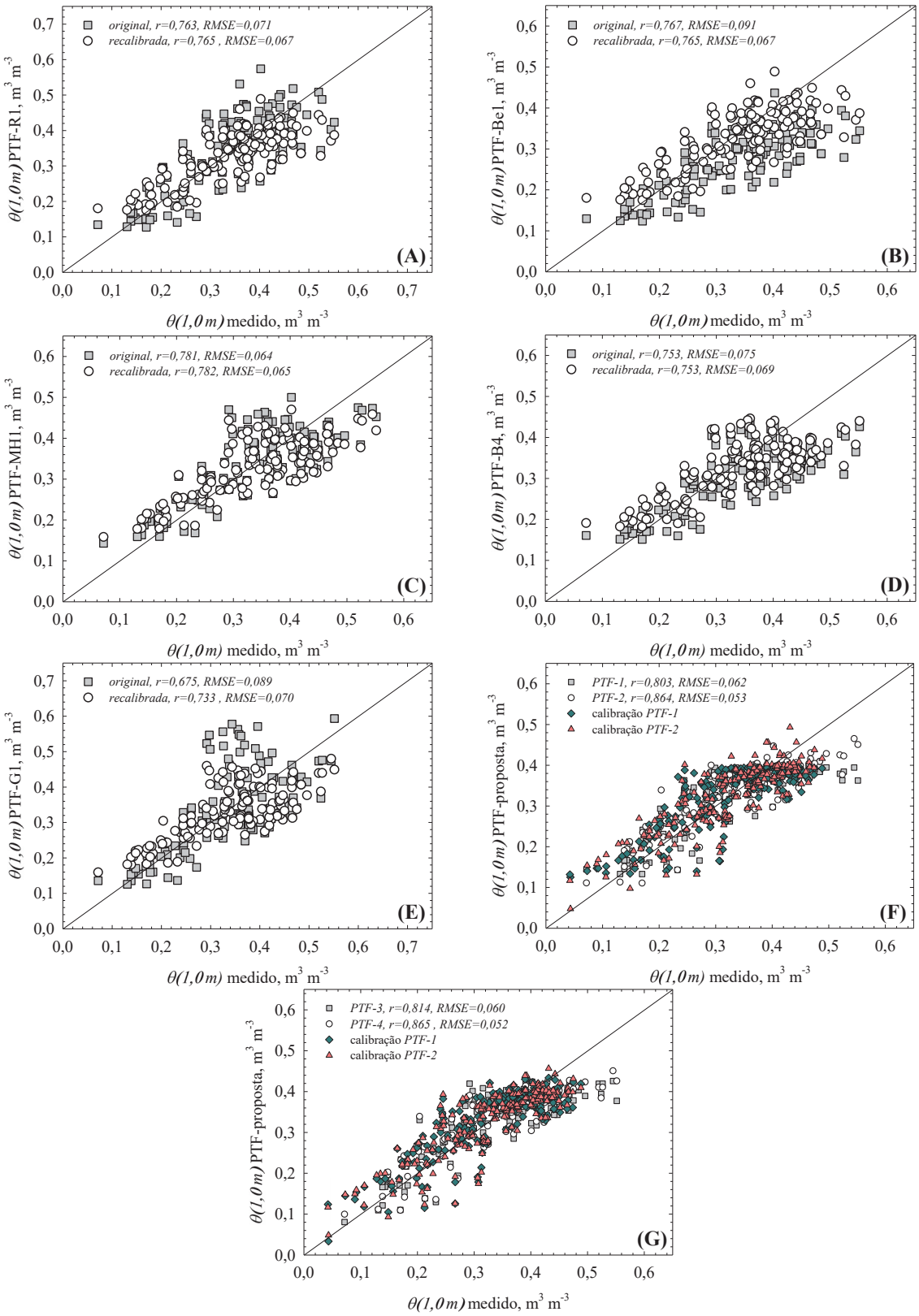


Figura 2.6 - Comparação entre umidade medida na tensão matricial de 1,0 m e estimada pelas PTFs. Resultados das equações originais e recalibradas da PTF-R1 de Rawls *et al*. (1982) (A), da PTF-Be1 de van den Berg *et al*. (1997) (B); da PTF-MH1 de Minasny & Hartemink (2011) (C), da PTF-B4 de Botula (2013) (D), da PTF-G1 de Gunarathna *et al*. (2019) (E); resultados das quatro PTFs desenvolvidas (PTF1, PTF2, PTF3 e PTF4) (F e G).

As PTFs utilizadas para estimar *θ(3,3 m)* (Tabela 2.3) mesmo após a recalibração não apresentaram um melhor desempenho em relação a equação original. O modelo recalibrado da Gupta & Larson (1979) (PTF-GL1, Figura 2.7A) apresentou uma ligeira redução de *r* e baixou o valor de RMSE (0,064 $m^3 m^{-3}$), sendo esse o melhor resultado de exatidão (RMSE) obtido em comparação aos demais modelos de Rawls *et al*. (1982), Arruda *et al*. (1987) e Tomasella & Hodnett (1998) (Figura 2.7).

Dentre as 4 PTFs propostas, a PTF2 apresentou desempenho ligeiramente melhor na estimava de *θ(3,3 m)*. Pela PTF2 os dados de entrada são a soma *Cl*+*Si* e ρ_b (Tabela 2.5). Conforme apresentado na Tabela 2.9, observa-se correlação positiva entre os teores de *Cl* e *Si* (moderada e fraca, respectivamente) em relação à *θ(3,3 m)* e fraca correlação negativa de ρ_b, sendo que ambas as correlações são significativas. No entanto, as outras três PTFs geraram resultados próximos aos da PTF2 (Figura 2.7E e F). A PTF4 utilizou dados de *Sa* e θ_s, apresentando *r*=0,835 e RMSE=0,061 $m^3 m^{-3}$. O teor de *Sa* apresentou correlação negativa moderada (*r*=0,6966) e significativa contra *θ(3,3 m),* diferentemente de θ_s que se correlacionou significantemente de forma positiva e moderada (*r*=0,6125).

Segundo Van Looy *et al*. (2017), Gupta & Larson (1979) foram os primeiros a elaborar uma regressão linear para estimar vários pontos da CRA a partir de dados de distribuição do tamanho das partículas, matéria orgânica e densidade do solo. Rawls *et al*. (1982) utilizaram apenas os teores de *Sa* e *Cl* e de matéria orgânica para estimativa de *θ(3,3 m).* Já Arruda *et al.* (1987) e Tomasella & Hodnett (1998) utilizaram os teores de *Cl* e *Si* e ρ_b para predição da umidade volumétrica *θ(3,3 m)*.

A PTF-GL2 para estimar *θ(10 m)* apresentou melhor precisão na estimativa tanto com a equação original quanto após a recalibração, mantendo o valor de *r*=0,824. Após a recalibração o valor de RMSE diminuiu de 0,073 para 0,060 $m^3 m^{-3}$, demonstrando melhor exatidão na estimativa dos dados para *θ(10 m).* A informação da retenção de água nessa tensão matricial é importante em estudos de adsorção de água ou da relação água-solo em condições semi-áridas (Karup *et al*., 2017). Essa PTF requer dados de textura e de ρ_b, sendo que *Sa* e ρ_b se mostraram inversas à *θ(10 m).*

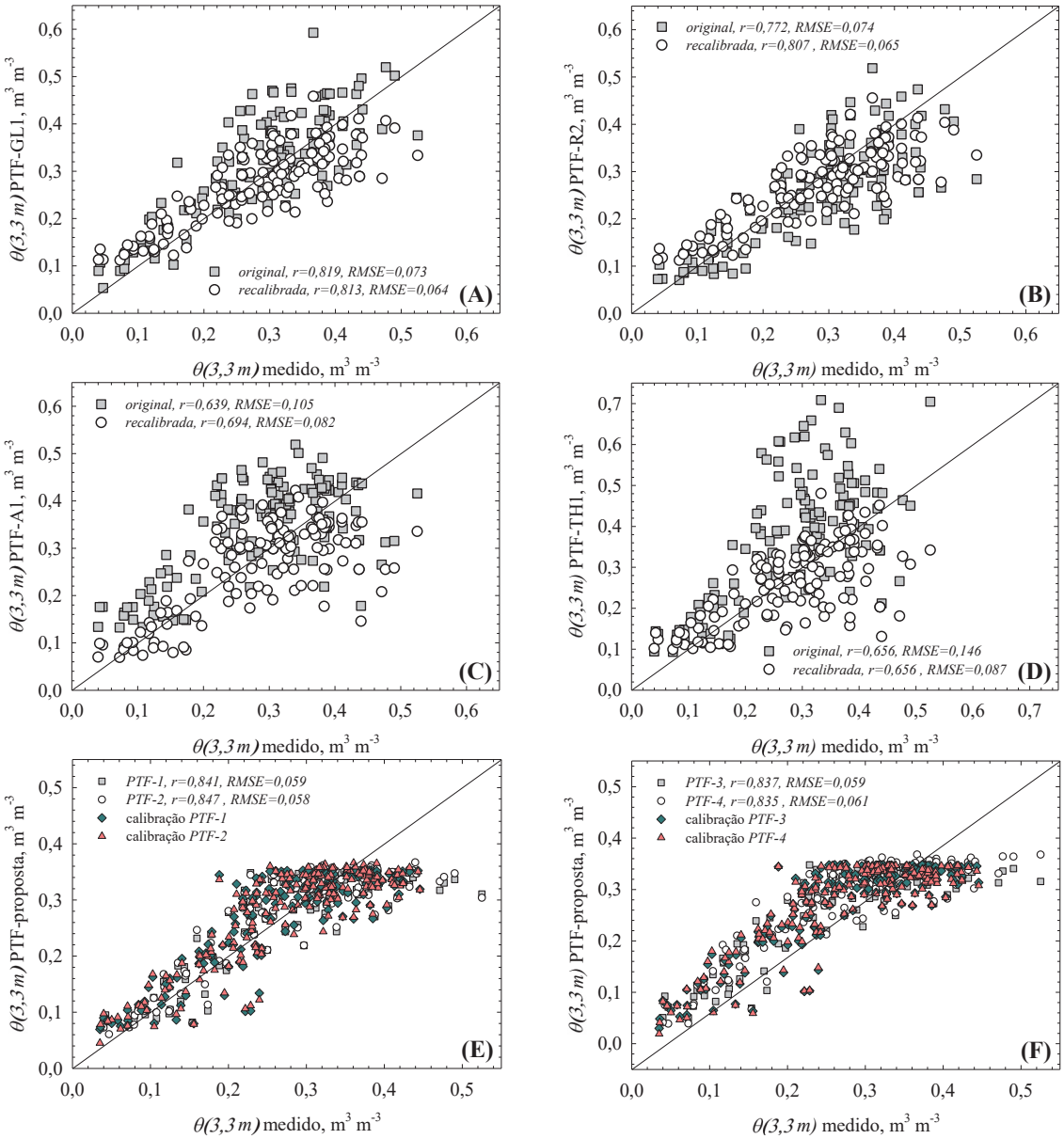


Figura 2.7 - Comparação entre umidade medida na tensão matricial de 3,3 m e estimada pelas PTFs. Resultados das equações originais e recalibradas da PTF-GL1 de Gupta & Larson (1979) (A), da PTF-R2 de Rawls *et al*. (1982) (B), da PTF-A1 de Arruda *et al*. (1987) (C), da PTF-TH1 de Tomasella & Hodnett (1998) (D); resultados das quatro PTFs desenvolvidas (PTF1, PTF2, PTF3 e PTF4) (E e F).

A PTF-R3 e a PTF-B5 utilizam os teores de areia e argila, além de ρ_b. Contudo, uma vez que as duas sejam semelhantes quanto ao formato da equação, as estimativas para *θ(10 m)* foram próximas tanto para os valores de *r* quanto para RMSE (Figura 2.7B e C).

Foram elaboradas 4 PTFs para a estimativa de *θ(10 m)*, sendo que a PTF2 apresentou precisão de r=0,844 e RMSE=0,056 m^3 m^{-3} (exatidão). Os teores de areia e argila são utilizados para tal estimativa. No entanto, a PTF1 apresentou um comportamento semelhante, com r=0,843 (Figura 2.8D e E). Essa PTF baseou-se nas somas *Cl+Si* e *Cl+Sa* e nos valores de ρ_b.

A PTF4 baseou-se apenas em *Cl*, e apresentou a menor precisão (*r*=0,730) com relação às outras três PTFs propostas.

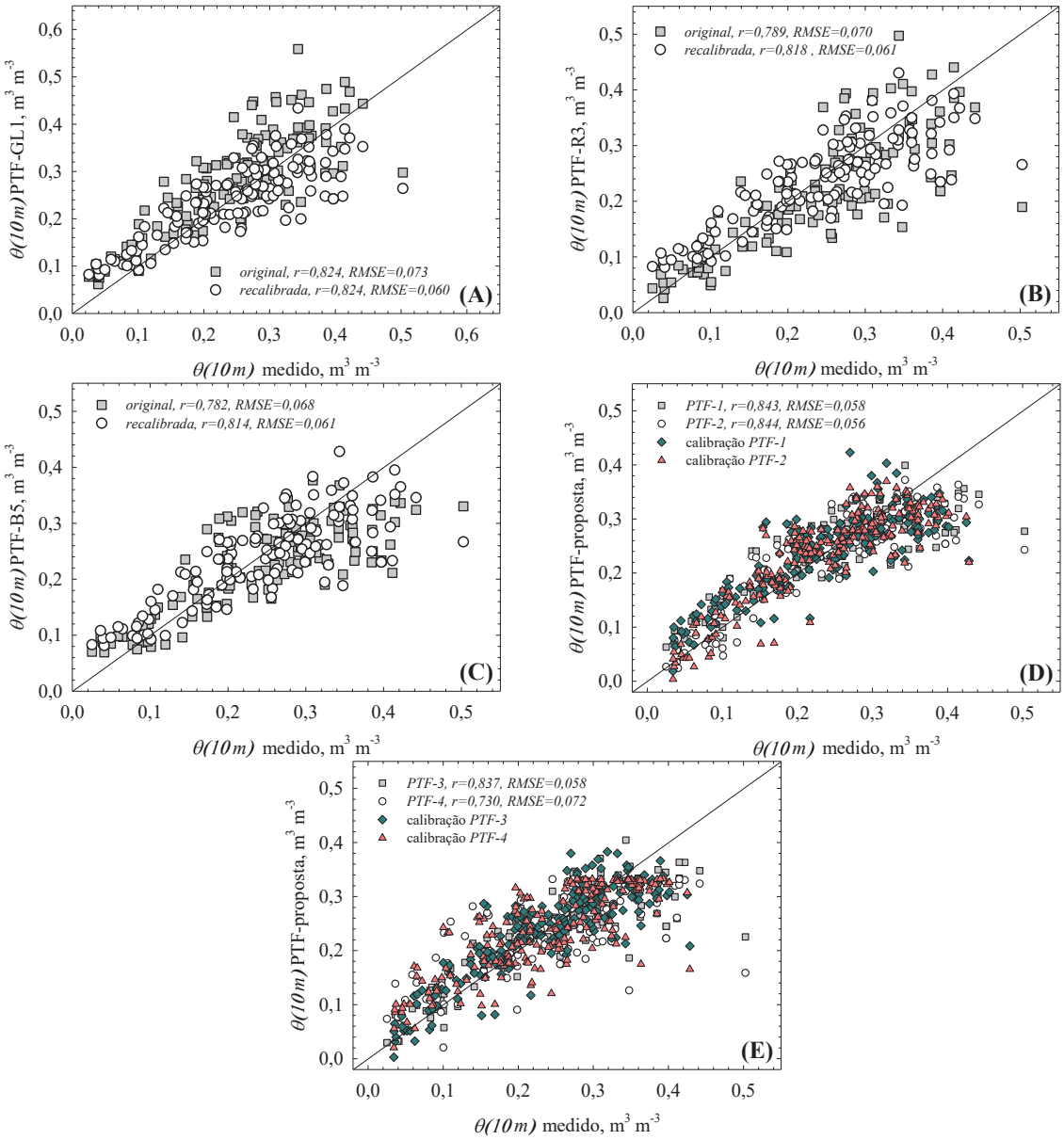
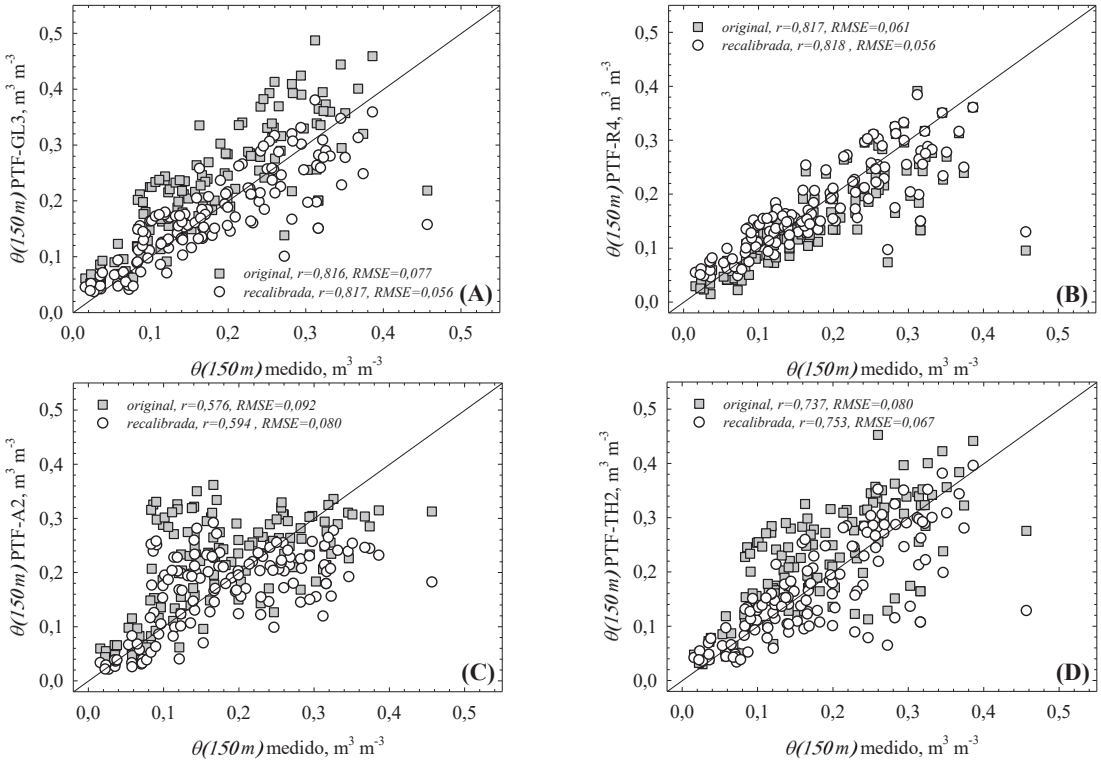


Figura 2.8 - Comparação entre umidade medida na tensão matricial de 10 m e estimada pelas PTFs. Resultados das equações originais e recalibradas da PTF-GL2 de Gupta & Larson (1979) (A), da PTF-R3 de Rawls *et al*. (1983) (B), da PTF-B5 de Botula (2013) (C); resultados das quatro PTFs desenvolvidas (PTF1, PTF2, PTF3 e PTF4) (D e E).

Para as estimativas de *θ(150 m)* (Figura 2.9), ponto da CRA em que se considera o ponto de murchamento permanente (Salter & Williams, 1965) do girassol, observou-se que as PTFs GL3 e R4 apresentaram maior precisão (*r*=0,816 e *r*=0,817, respectivamente) em relação às PTFs A2, TH2 e G2.

Verificaram-se 4 PTFs propostas para a estimativa de *θ(150 m)*. As PTFs 1 e 4 apresentaram comportamento semelhante na distribuição de dados e precisão (Figura 2.9F e G). A PTF1 utiliza as somas *Cl+Si* e *Cl+Sa*, além do atributo ρ_b. Para a PTF4, além do apresentado para a PTF1, acrescentou-se o somatório dos conteúdos de areia e silte. A PTF3 apresentou a maior precisão (r=0,828), mas não foi a melhor em exatidão (RMSE=0,064 $m^3\ m^{-3}$). Embora a PTF2 tenha apresentado um *r* um pouco menor que as outras, sua estimativa não ficou aquém da esperada.

O conteúdo de argila significantemente correlacionou-se de forma positiva e forte (r=0,8371) à *θ(150 m)*. *Sa* e ρ_b correlacionaram-se significantemente de forma negativa, moderada e fraca, respectivamente. Contudo, o teor de silte apresentou correlação não significativa (λ=0,0663) para *θ(150 m)*.



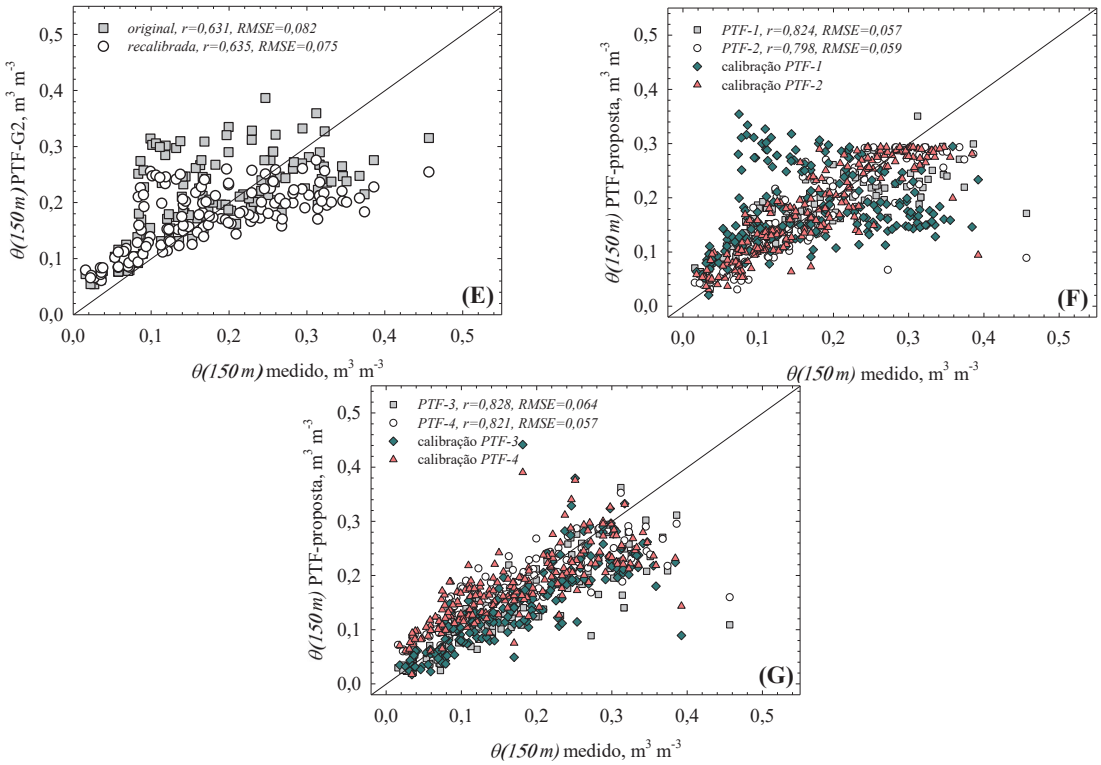


Figura 2.9 - Comparação entre umidade medida na tensão matricial de 150 m e estimada pelas PTFs. Resultados das equações originais e recalibradas da PTF-GL3 de Gupta & Larson (1979) (A), da PTF-R4 de Rawls *et al*. (1983) (B), da PTF-A2 de Arruda *et al*. (1987) (C), resultados da PTF-TH2 de Tomasella & Hodnett (1998) (D), da PTF-G2 de Gunarathna *et al*. (2019) (E); resultados das quatro PTFs desenvolvidas (PTF1, PTF2, PTF3 e PTF4) (F e G).

Em cada tensão matricial avaliada, com exceção de h=0,1 m, uma das equações analisadas da literatura apresentou forte correlação ($r > 0,7$) ao estimar a umidade. No entanto, sob outras tensões matriciais, outras PTFs não apresentaram maior precisão depois do processo de recalibração para o banco de dados avaliado.

O teor de areia se correlacionou negativa e significativamente com a umidade nas tensões avaliadas segundo a correlação de Spearman (Tabela 2.9). Por outro lado, o teor de argila apresentou correlação significativa e positivamente moderada ($\lambda > 0,5$) e forte ($\lambda > 0,7$) com relação a todas as umidades nas tensões de interesse. Botula (2013) ao utilizar a regressão linear múltipla para predizer a retenção de água em diferentes tensões matriciais obteve resposta semelhante ao comportamento com os teores de areia e argila. As areias apresentam características pouco favoráveis para a retenção de água. A superfície específica, por exemplo, é muito menor em relação à fração argila, e isso dificulta não somente a retenção de água e solutos, mas propriedades físico-mecânicas como plasticidade e coesão. As argilas apresentam maior superfície específica que a areia, uma vez que apresentam estrutura em forma de placas e, portanto, alta atividade físico-química (Hillel, 1998; Prevedello & Armindo, 2015).

A variável ρ_b se correlacionou negativamente às variáveis ϕ e θ_s, bem como com os demais valores de $\theta(h)$. Ou seja, quando uma variável aumenta o valor da outra reduz. E no caso da variável ρ_b os valores da correlação negativa decaem de ϕ (λ=−0,9757) à θ(150 m) (λ=−0,3226). A ρ_b é um indicador indireto da estrutura por se relacionar com ϕ (Botula *et al*., 2013), sendo muito influenciada pelas condições de uso do solo (Reynolds *et al*., 2002; Zacharias & Wessolek, 2007). Ou seja, solos com a estrutura mais densa (compactada) tendem a apresentar menor porosidade total do que aqueles com a estrutura mais granular, e, portanto, a ρ_b se correlaciona negativamente com a ϕ.

Tabela 2.9 – Correlação de Spearman (λ) e o *p*-valor dos dados de entrada das PTFs propostas e os valores de θ medidos.

	Areia	Silte	Argila	ρ_b	ϕ	θ_s
			λ-valor			
Areia	1,0000	–	–	–	–	–
Silte	−0.7050	1,0000	–	–	–	–
Argila	−0.5250	−0.0700	1,0000	–	–	–
ρ_b	0.3074	−0,2444	−0,2102	1,0000	–	–
ϕ	−0,3063	0,2371	0,2157	−0,9757	1,0000	–
θ_s	−0,3315	0,0090	0,5429	−0,5731	0,5692	1,0000
θ(0,1m)	−0,4346	0,1282	0,5374	−0,5585	0,5635	0,9284
θ(0,3m)	−0,5856	0,3112	0,5461	−0,4761	0,4759	0,7934
θ(0,6m)	−0,6584	0,4056	0,5535	−0,4121	0,4084	0,7031
θ(1,0m)	−0,6787	0,4356	0,5621	−0,3868	0,3785	0,6632
θ(3,3m)	−0,6966	0,4252	0,6170	−0,3503	0,3417	0,6125
θ(10m)	−0,6839	0,3376	0,7275	−0,3287	0,3266	0,6363
θ(150m)	−0,5884	0,1616	0,8371	−0,3226	0,3168	0,6675
			p-valor			
Areia	1,0000	–	–	–	–	–
Silte	$2{,}2\cdot10^{-16}$	1,0000	–	–	–	–
Argila	$1{,}36\cdot10^{-10}$	0,4276	1,0000	–	–	–
ρ_b	$3{,}75\cdot10^{-4}$	$5{,}065\cdot10^{-3}$	0,01635	1,0000	–	–
ϕ	$3{,}93\cdot10^{-4}$	$6{,}595\cdot10^{-3}$	0,0137	$2{,}20\cdot10^{-16}$	1,0000	–
θ_s	$1{,}17\cdot10^{-4}$	0,9194	$2{,}50\cdot10^{-11}$	$1{,}04\cdot10^{-12}$	$1{,}58\cdot10^{-12}$	1,0000
θ(0,1m)	$2{,}38\cdot10^{-7}$	0,1461	$4{,}31\cdot10^{-11}$	$5{,}02\cdot10^{-12}$	$2{,}90\cdot10^{-12}$	$2{,}20\cdot10^{-16}$
θ(0,3m)	$2{,}51\cdot10^{-13}$	$3{,}13\cdot10^{-4}$	$1{,}82\cdot10^{-11}$	$1{,}03\cdot10^{-8}$	$1{,}05\cdot10^{-8}$	$2{,}20\cdot10^{-16}$
θ(0,6m)	$2{,}20\cdot10^{-16}$	$1{,}69\cdot10^{-6}$	$8{,}50\cdot10^{-12}$	$1{,}10\cdot10^{-6}$	$1{,}40\cdot10^{-6}$	$2{,}20\cdot10^{-16}$
θ(1,0m)	$2{,}20\cdot10^{-16}$	$2{,}21\cdot10^{-7}$	$3{,}40\cdot10^{-12}$	$5{,}50\cdot10^{-6}$	$8{,}90\cdot10^{-6}$	$2{,}20\cdot10^{-16}$
θ(3,3m)	$2{,}20\cdot10^{-16}$	$4{,}58\cdot10^{-7}$	$5{,}40\cdot10^{-15}$	$4{,}40\cdot10^{-5}$	$6{,}90\cdot10^{-5}$	$9{,}70\cdot10^{-15}$
θ(10m)	$2{,}20\cdot10^{-16}$	$8{,}57\cdot10^{-5}$	$2{,}20\cdot10^{-16}$	$1{,}34\cdot10^{-4}$	$1{,}49\cdot10^{-4}$	$4{,}10\cdot10^{-16}$
θ(150m)	$1{,}82\cdot10^{-13}$	0,0663	$2{,}20\cdot10^{-16}$	$1{,}81\cdot10^{-4}$	$2{,}39\cdot10^{-4}$	$2{,}20\cdot10^{-16}$

ρ_b: densidade do solo; ϕ: porosidade; θ_s: umidade volumétrica na saturação; $\theta(0,1)$, θ(0,3)... θ_n correspondem a umidade na i-esima tensão determinada até 150 m.

Gráficos do tipo *boxplot* (Figura 2.10) foram adicionalmente inseridos para comparação da média, mediana e dispersão dos dados medidos e estimados pelas PTFs desenvolvidas e encontradas na literatura (originais e recalibradas).

Os resultados apresentados são os resultados do processo de validação das PTFs, ou seja, 132 valores de $\theta(h)$ medidos e estimados. A dispersão dos resultados de $\theta(h)$ medidos e

estimados está representada pelos círculos, a mediana pela linha contínua preta dentro do *box* e a média pela linha vermelha. Nota-se que os valores médios gerados pelas PTFs desenvolvidas se aproximam da linha tracejada que representa a umidade média dos dados medidos.

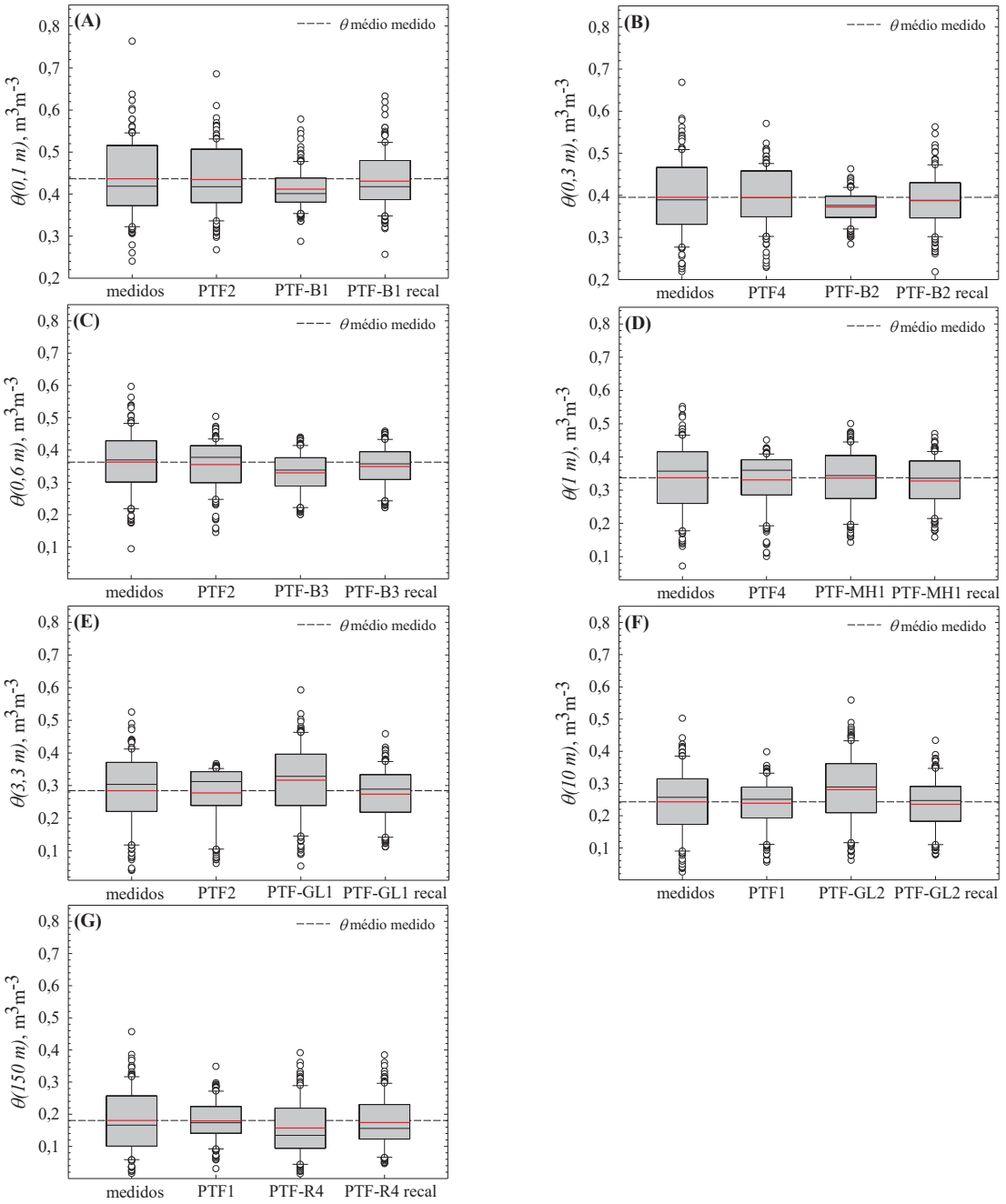


Figura 2.10 - Comparação entre a umidade medida nas tensões matriciais (*h*) de 0,1 m a 150 m e estimadas pelas PTFs desenvolvidas de melhor desempenho, pelas PTFs da literatura de melhor desempenho (PTF-B1, PTF-B2 e PTF-B3 de Botula (2013), PTF-MH1 de Minasny & Hartemink (2011), PTF-GL1 e PTF-GL2 de Gupta & Larson (1979) e PTF-R4 de Rawls *et al*. (1983)) e recalibradas ("recal"). A linha tracejada indica o valor médio de *θ(h)* medido do conjunto de dados. Os traços vermelhos correspondem ao *θ(h)* médio estimado pelas PTFs.

Os resultados obtidos pelas PTFs recalibradas também se aproximaram da linha tracejada, uma vez que no processo de recalibração o desempenho de predição dessas PTFs foi aprimorado. As PTFs de Botula (2013), Minasny & Hartemink (2011), Gupta & Larson (1979) e Rawls *et al*. (1983), dispostas na comparação por *boxplot*, apresentaram melhor desempenho de predição dentre as PTFs da literatura e foram aprimoradas na recalibração, desempenhando semelhante estimativa de $\theta(h)$ das PTFs desenvolvidas neste estudo.

2.4 CONCLUSÕES

Neste estudo, 26 novas funções de pedotransferência (PTFs) pontuais foram desenvolvidaspara estimar a retenção de água em solos com propriedades físicas variadas e, comparadas com outras 20 PTFs já existentes na literatura. Para isso, selecionaram-se dados das bases UNSODA e HYBRAS com diferentes propriedades físicas e dividiram-se em um grupo para calibração e outro para validação das 46 PTFs. A umidade do solo nas tensões entre 0,1 a 150 m foram estimadas a partir de dados de textura, densidade do solo e porosidade total. Em comparação a outras PTFs selecionadas na literatura, sejam elas para solos de clima tropical ou temperado, as PTFs desenvolvidas apresentaram melhor desempenho de predição da umidade. Dentre as PTFs da literatura que foram recalibradas, a que apresentou maior precisão e exatidão para o conjunto de dados selecionado foi a de Gupta & Larson (1979) para ambas as tensões matriciais de 3,3 m e 10 m. As 26 novas PTFs pontuais foram fortemente correlacionadas e exatas para estimar a umidade do solo utilizando dados de textura e propriedades relacionadas a estrutura do solo.

A informação da densidade do solo foi necessária não somente para estimativa da umidade a uma dada tensão matricial na faixa seca da curva, mas também para faixa úmida, que possui maior dependência da estrutura do solo. A aplicação de PTFs desenvolvidas e existentes (recalibradas) para estimar os pontos da CRA tiveram um bom desempenho e podem, portanto, ser aplicadas em várias práticas e modelagem hidráulica de solo.

REFERÊNCIAS

Armindo, R.A., De Jong van Lier Q., Turek, M.E., Reis, A.M.H., Melo, M.L.A., Ramos, M.E.P., Ono, G.M., 2019. Performance of the Groenevelt and Grant Model for fitting soil water retention data from Brazilian soils. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 43, 1–12.

Arruda, F.B., Zullo, J.J., Oliveira, J.B., 1987. Parâmetros de solo para o cálculo da água disponível com base na textura do solo. Revista Brasileira de Ciência do Solo 11, 11–15.

Barros, A.H.C., Van Lier, Q.J., Maia, A.H.N., Scarpare, F.V., 2013. Pedotransfer functions to estimate water retention parameters of soils in northeastern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 37, 379–391.

Botula, Y.-D., Cornelis, W.M., Baert, G., Van Ranst, E., 2012. Evaluation of pedotransfer functions for predicting water retention of soils in Lower Congo (D.R. Congo). **Agricultural Water Management**. 111, 1-10.

Botula, Y.-D. 2013. Indirect methods to predict hydrophysical properties of soils of Lower Congo. PhD thesis, Ghent University.

Botula, Y.-D., Nemes, A., Mafuka, P., Van Ranst, E., Cornelis, W.M., 2013. Prediction of Water Retention of Soils from the Humid Tropics by the Nonparametric k-Nearest Neighbor Approach. **Vadose Zone Journal.** 12, 1–17.

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

Brooks, R.H., Corey, A.T., 1964. Hydraulic Properties of Porous Media. Civil Engineering Dept., Colorado State University, Fort Collins, CO, **Hydrological Paper.** 3, 27 pp.

Campbell, G.S., 1974. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. **Soil Science**. 117, 311–314.

Freitas, K.S., Armindo, R.A., Pires, L.F., Swinka, F.V., Ribeiro, J.S., 2019. A method to determine the soil bulk density of undisturbed samples with non-isodiametric shape. **Soil and Tillage Research**. 191, 344 –352.

Ghanbarian-Alavijeh, B., Millán, H., 2010. Point pedotransfer functions for estimating soil water retention curve. **International Agrophysics.** 24, 243–251.

Groenevelt, P.H., Grant, C.D., 2004. A new model for the soil-water retention curve that solves the problem of residual water contents. **European Journal of Soil Science**. 55, 479–485.

Gunarathna, M.H.J.P., Sakai, K., Nakandakari, T., Momii, K., Kumari, M.K.N., Amasekara, M.G.T.S., 2019. Pedotransfer functions to estimate hydraulic properties of tropical Sri Lankan soils. **Soil and Tillage Research**. 190, 109–119.

Gupta, S.C., Larson, W.E., 1979. Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent, and bulk density. **Water Resources Research.** 15, 6, 1633–1635.

Huf dos Reis, A.M., Armindo, R.A., Durães, M.F., De Jong van Lier, Q., 2018. Evaluating pedotransfer functions of the Splintex model. **European Journal Soil Science.** 69, 685-697.

Karup, D., Moldrup, P., Tuller, M., Arthur, E., de Jonge, L.W., 2017. Prediction of the soil water retention curve for structured soil from saturation to oven-dryness. **European Journal of Soil Science**. 68, 57–65.

Kosugi, K., 1996. Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties. **Water Resources Research.** 32, 9, 2697–2703.

McBratney, A., Minasny, B., Cattle, S.R., Vervoort, R.W., 2002. From pedotransfer functions to soil inference systems. **Geoderma**. 109, 41–73.

Meskini-Vishkaee, F., Mohammadi, M.H., Vanclooster, M., 2014. Predicting the soil moisture retention curve, from soil particle size distribution and bulk density data using a packing density scaling factor. **Hydrology and Earth System Sciences**. 18, 4053-4063.

Minasny, B., Hartemink, A.E., 2011. Predicting soil properties in the tropics. **Earth-Science Reviews.** 106, 52–62.

Minasny, B., McBratney, A.B., 2002a. The efficiency of various approaches to obtaining estimates of soil hydraulic properties. **Geoderma**. 107, 55–70.

Minasny, B., McBratney, A.B., 2002b. The *Neuro-m* method for fitting neural network parametric pedotransfer functions. **Soil Science Society of America Journal**. 66, 352–361.

Nemes, A., Schaap, M., Wösten, J.H.M., 2003. Functional evaluation of pedotransfer functions derived from different scales of data collection. **Soil Science Society of America Journal**. 67, 1093-1102.

Nemes, A., Schaap, M., Leij, F.J., Wösten, J.H.M., 2015. UNSODA 2.0: Unsaturated Soil Hydraulic Database. Database and program for indirect methods of estimating unsaturated hydraulic properties. US Salinity Laboratory - ARS - USDA.

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

Ottoni, M.V., Ottoni, F.T.B., Lopes-Assad, M.L.R.C., Rotunno, F.O.C., 2019. Pedotransfer functions for saturated hydraulic conductivity using a database with temperate and tropical climate soils. **Journal of Hydrology**. 575, 1345–1358.

Pachepsky, Ya. A., Rawls, W.J., 1999. Accuracy and reliability of pedotransfer functions as affected by grouping soils. **Soil Science Society of America Journal**. 63, 1748-1756.

Pachepsky, Ya., Rawls, W.J., 2004. Development of pedotransfer functions in soil hydrology. **Developments in Soil Science**. Vol. 30. Elsevier.

Pineda, M.C., Viloria, J., Martínez-Casasnovas, J.A., Valera, A., Lobo, D., Timm, L.C., Pires, L.F., Gabriels, D., 2018. Predicting soil water content at − 33 kPa by pedotransfer functions in stoniness 1 soils in northeast Venezuela. **Environmental Monitoring and Assessment.** 190, 161.

R Core Team, 2019. R: A Language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna.

Rabot, E., Wiesmeier, M., Schlüter, S., Vogel, H.-J., 2018. Soil structure as an indicator of soil functions: a review. **Geoderma**. 314, 122–137.

Rawls, W.J., Brakensiek, D.L., Saxton, K.E., 1982. Estimation of soil water properties. **Transactions of ASAE**. 25, 5, 1316 – 1320.

Rawls, W.J., Brakensiek, D.L., Soni, B., 1983. Agricultural Management Effects on Soil Water Processes Part I: Soil Water Retention and Green and Ampt Infiltration Parameters. **Transactions of ASAE**. 26, 1747–1752.

Reynolds, W.D., Bowman, B.T., Drury, C.F., Tan, C.S., Lu, X., 2002. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. **Geoderma**. 110, 131–146.

Salter, P.J., Williams, J.B., 1965. The influence of texture on the moisture characteristics of soils. I. A critical comparison of techniques for determining the available-water capacity and moisture characteristic curve of a soil. **Journal of Soil Science**. 16, 1−15.

Saxton, K. E., Rawls, W. J., 2006. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. **Soil Science Society of America Journal**. 70, 1569–1578.

Schaap, M.G., Leij, F.J., Van Genuchten, M.Th., 2001. Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. **Journal Hydrology**. 251, 163–176.

Silva, A.C., Armindo, R.A., Prevedello, C.L., 2020. Splintex 2.0: A physically-based model to estimate water retention and hydraulic conductivity parameters from soil physical data. **Computers and Eletronics in Agriculture**.169, *in press*.

Soil Survey Staff, 2014. Keys to Soil Taxonomy, 12th ed. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.

Tomasella, J., Hodnett, M.G., 1998. Estimating soil water retention characteristics from limited data in Brazilian Amazonia. Soil Science. 163, 3, 190–202.

Tomasella, J., Pachepsky, Y., Crestana, S., Rawls, W.J., 2003. Comparison of two techniques to develop pedotransfer functions for water retention. **Soil Science Society of America Journal**. 67, 1085–1092.

Too, V.K., Omuto, C.T., Biamah, E.K., Obiero, J.P., 2014. Review of soil water retention characteristic (SWRC) models between saturation and oven dryness. **Open Journal of Modern Hydrology**. 4, 173–182.

Tóth, B., Weynants, M., Nemes, A., Makó, A., Bilas, G., Tóth, G., 2015. New generation of hydraulic pedotransfer functions for Europe. **European Journal of Soil Science**. 66, 226-238.

van den Berg, M., Klamt, E., van Reeuwijk, L.P., Sombroek, W.G., 1997. Pedotransfer functions for the estimation of moisture retention characteristics of Ferralsols and related soils. **Geoderma**. 78, 161–180.

Van Genuchten, M.Th., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**. 44, 892–897.

Van Looy, K., Bouma, J., Herbst, M., Koestel, J., Minasny, B., Mishra, U., …Vereecken, H., 2017. Pedotransfer functions in Earth system science: Challenges and perspectives. **Reviews of Geophysics**, 55, 1199–1256.

Wösten, J.H.M., Pachepsky, Y.A., Rawls, W.J. 2001. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. **Journal of Hydrology**. 251, 123–150.

Yang, W.-H., Clifford, D., Minasny, B., 2015. Mapping soil water retention curves via spatial Bayesian hierarchical models. **Journal of Hydrology**. 524, 768–779.

Zacharias, S., Wessolek, G., 2007. Excluding organic matter content from pedotransfer predictors of soil water retention. **Soil Science Society of America Journal**. 71, 43–50.

Zhang, Y., Schaap, M.G., 2017. Weighted recalibration of the Rosetta pedotransfer model with improved estimates of hydraulic parameter distributions and summary statistics (Rosetta3). **Journal of Hydrology**. 547, 39–53.

3. Capítulo III: DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO HIERÁRQUICO E PARAMÉTRICO DE PEDOTRANSFERÊNCIA PARA RETENÇÃO DE ÁGUA EM SOLOS

RESUMO

O conhecimento dos parâmetros físico-hidráulicos do solo é imprescindível no monitoramento e no manejo dos processos de armazenamento e condução da água em solos de produção agrícola e de sistemas ecológicos. Todavia, a determinação desses parâmetros exige mão-de-obra especializada, tempo e instrumentos para a análise em campo e em laboratório. A fim de facilitar a obtenção dessas informações utilizam-se alternativamente funções de pedotransferência (PTFs), que são funções matemáticas que traduzem as propriedades do solo conhecidas em propriedades que se deseja conhecer. Propriedades físicas do solo de fácil obtenção, como a textura e densidade, podem ser utilizadas para a estimativa dos parâmetros hidráulicos desse meio poroso. Das PTFs obtidas no capítulo 2, utilizaram-se as 12 melhores para compor um modelo hierárquico-paramétrico de pedotransferência para estimar os parâmetros de três equações que descrevem a curva de retenção de água (CRA) de solos sob clima tropical e temperado. As equações utilizadas na descrição da CRA foram as de Van Genuchten (1980)-Mualem, Kosugi (1996) e Groenevelt & Grant (2004). O modelo de pedotransferência desenvolvido apresenta quatro funções hierárquicas (FHs) que diferem entre si quanto aos dados de entrada. As funções FH1 e FH3 foram avaliadas com os 328 dados utilizados no capítulo 2, e as funções FH2 e FH4 com 110 daqueles 328 dados, pois as duas funções hierárquicas requerem o valor de θ_s medido como parâmetro de entrada. Dessa forma, os parâmetros das três equações de ajuste da CRA foram estimados para solos de diversas classes texturais apresentando desempenho satisfatório.

Palavras-chave: Curva de retenção de água; PTF paramétrica; propriedades hidráulicas do solo.

ABSTRACT

The knowledge of the soil's physical-hydraulic properties is essential in the management of water storage in agricultural production and ecological systems. The determination of these properties is time- consuming and requires specialized instruments for the complete analysis in the laboratory. In order to easy obtain this information, pedotransfer functions (PTFs), which are mathematical functions that translate known soil properties into desired properties, are alternatively used to estimate these key-properties. From the PTFs developed and tested in chapter 2, the twelve best were selected to develop a hierarchical-parametric pedotransfer model to estimate the parameters of three equations used to describe the complete soil water retention curve (SWRC). The developed model has four hierarchical functions (HFs) that differ

in terms of input data. The functions HF1 and HF3 were evaluated using the same 328 data used in chapter 2, and the functions HF2 and HF4 were evaluated by 110 data because these two hierarchical functions require the measured θ_s value as input. Thus, the parameters that compose the Van Genuchten (1980), Kosugi (1996), and Groenevelt & Grant (2004) equations were estimated with satisfactory performance for soils of different textural classes and under different climates.

Keywords: Water retention curve; parametric PTFs; soil hydraulic properties.

3.1 INTRODUÇÃO

As funções de pedotransferência (PTFs) podem ser definidas como funções que relacionam características e propriedades do solo entre si para alguma estimativa. Assim, as PTFs transferem os atributos do solo que foram medidos em propriedades que não foram medidas (Wösten *et al*., 2001). Embora elas também sejam desenvolvidas para predizer parâmetros químicos e biológicos do solo, as PTFs são amplamente elaboradas e utilizadas para estimar propriedades hidráulicas. Isso porque a medição de algumas propriedades hidráulicas é onerosa e exige tempo e habilidade técnica para execução (McBratney *et al*., 2002; Vereecken *et al*., 2010).

As funções hidráulicas do solo, como as curvas de retenção de água (CRA) e de condutividade hidráulica (CCH), são as mais caracterizadas via PTFs. O entendimento dessas curvas permite a avaliação do armazenamento e disponibilidade de água para as plantas, o entendimento dos ciclos biogeoquímicos locais, o transporte de solutos em geral, além de outros processos de transferência de massa e energia nesse meio (McBratney *et al*., 2002; Pachepsky & Rawls, 2003; Prevedello & Armindo, 2015; Van Looy *et al*., 2017).

Frequentemente, dados de textura (teores de areia, silte e argila), densidade do solo, matéria orgânica ou carbono orgânico, pH, capacidade de troca catiônica e outros elementos químicos presentes no solo são utilizados para estimar parâmetros hidráulicos de equações ou valores discretos das propriedades em questão (Botula *et al*., 2013; Pachepsky & Rawls, 2003; Tóth *et al*., 2015). As PTFs podem ser elaboradas a partir de equações analíticas (fisicamente fundamentadas) ou compostas por equações empíricas, provenientes de diversas técnicas de regressão como *machine learning* (Botula *et al*., 2014; McBratney *et al*., 2002; Schaap *et al*. 1998; Van Looy *et al*., 2017) e outras estruturas de algoritmos mais robustos com inteligência artificial, como as redes neurais e lógica *fuzzy* (Tranter *et al*., 2010). Depois de desenvolvidas,

as PTFs são validadas para um conjunto de dados regionais ou continentais, no entanto, alguns modelos análiticos não precisam de calibração e validação, como é o caso do Splintex (Huf dos Reis *et al*., 2018; Prevedello & Loyola, 2002; Silva *et al*., 2020) ou da mais antiga PTF pontual analítica, que é a equação para o cálculo da porosidade total, igualada, frequentemente, a umidade volumétrica na saturação (Meskini-Vishkaee *et al*., 2014; Mohammadi & Vanclooster, 2011; Ottoni *et al*., 2019). As PTFs são geralmente desenvolvidas com dados de uma determinada região ou zona climática, apresentando ineficiência de predição quando aplicadas à uma condição contrária à que foi calibrada e validada. Tomasella *et al*. (2000) desenvolveram uma PTF para estimar a CRA de solos brasileiros, comparando-a com outras PTFs propostas por Vereecken *et al*. (1989) e Saxton *et al*. (1986). Os autores verificaram que as estimativas das equações de pedotransferência desenvolvidas para solos de clima temperado não foram condizentes com as propriedades dos solos brasileiros.

O Brasil é um dos principais países no desenvolvimento e publicações de PTFs (Botula *et al*., 2014), principalmente para a estimativa da CRA. Existem diversas equações paramétricas que descrevem a CRA e a CCH. Elas estão há décadas sendo utilizadas pelos cientistas, entretanto, a equação de Van Genuchten (1980), descrita com a restrição de Mualem (1976), doravante simplificada por VGM, é a equação mais utilizada por se ajustar bem a quase totalidade dos solos analisados pela literatura sendo já consagrada (Prevedello & Armindo, 2016; Van Looy *et al*., 2017). Armindo *et al*. (2019) verificaram que a equação de Groenevelt & Grant (2004) (GRT) também se ajusta bem aos dados de CRA de solos brasileiros. A equação de Kosugi (1996) é outra opção que se ajusta satisfatoriamente a CRA de diversos solos ao redor do mundo (Haghverdi *et al*., 2020; Zhang *et al*., 2018). Assim, funções que estimam os parâmetros dessas equações são classificadas como PTFs do tipo paramétricas (Vereecken *et al*., 2010).

Neste capítulo, objetivou-se desenvolver, calibrar e validar um modelo hierárquico e paramétrico de pedotransferência de PTFs empíricas para estimar os parâmetros das equações de VGM, Kosugi e GRT para descrição da curva de retenção da água para solos de diversos climas.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

Dentre as 26 equações desenvolvidas no capítulo anterior, as melhores PTFs pontuais desenvolvidas (12 PTFs, Tabela 3.1) para predição da umidade volumétrica (θ) como função da tensão matricial (h) nos pontos θ(10 cm), θ(30 cm), θ(60 cm), θ(100 cm), θ(330 cm), θ(1000 cm) e θ(15000 cm) foram aplicadas no desenvolvimento de um modelo de estrutura hierárquica para estimar os parâmetros das equações que caracterizam a CRA a partir dos valores de $\theta(h)$.

Tabela 3.1 – Equações para PTFs pontuais e aplicadas no modelo hierárquico desenvolvido.

PTFs pontuais	Equações	Indicadores de desempenho		
		r	RMSE	ME
θ(10 cm)-PTF1	$\theta(10cm) = 0,5262\phi + \ 0,002(Cl) + 0,127$	0,727	0,062	-0,0130
θ(10 cm)-PTF2	$\theta(10cm) = 1,2047 + 6,74\cdot10^{-5}(Cl+Si)\ln(Cl+Si) - 1,248\exp(-\theta_s)$	0,944	0,023	-0,0019
θ(30 cm)-PTF3	$\theta(30cm) = 0,4119\phi + 0,001(Sa) + 0,002(Si) + 0,0035(Cl)$	0,742	0,062	-0,0098
θ(30 cm)-PTF4	$\theta(30cm) = 0,4835 + 0,007\ln(Cl+Si)^2 + 0,251\ln(\theta_s)$	0,873	0,045	-0,0005
θ(60 cm)-PTF5	$\theta(60cm) = 0,4556 - 2,45\cdot10^{-6}(Sa)^{2,5} - 0,062(\rho_b)^2\ln(\rho_b)$	0,773	0,062	-0,0073
θ(60 cm)-PTF6	$\theta(60cm) = 0,3304 + 0,011\ln(Cl+Si)^2 + 0,183\ln(\theta_s)$	0,854	0,051	-0,0077
θ(100 cm)-PTF7	$\theta(100cm) = 0,4256 - 0,0447(\rho_b)^2\ln(\rho_b) - 2,87\cdot10^{-6}(Sa)^{2,5}$	0,814	0,060	-0,0076
θ(100 cm)-PTF8	$\theta(100cm) = 0,6573 - 2,62\cdot10^{-6}(Sa)^{2,5} - 0,182/\sqrt{\theta_s}$	0,865	0,052	-0,0066
θ(330 cm)-PTF9	$\theta(330cm) = 0,0907 + 4,46\cdot10^{-4}(Cl+Si)^2 - 9,21\cdot10^{-5}(Cl+Si)^2\ln(Cl+Si) - 0,0183\rho_b{}^2\ln(\rho_b)$	0,847	0,058	-0,0067
θ(330 cm)-PTF10	$\theta(330cm) = 0,3473 - 3,37\cdot10^{-6}(Sa)^{2,5} - 0,001(\theta_s)^2$	0,835	0,061	-0,0095
θ(1000 cm)-PTF11	$\theta(1000cm) = 0,0163(Cl+Si)^{0,683} - 0,0667\rho_b + 4,8810^{-4}(Cl+Sa)^{1,216}$	0,843	0,058	-0,0043
θ(15000 cm)-PTF12	$\theta(15000cm) = 0,0066(Cl+Si)^{0,842} + 2,34\cdot10^{-4}(Cl+Sa)^{1,467} - 0,0965\rho_b$	0,824	0,057	-0,0014

Sa: areia; *Si*: silte; *Cl*: argila; ρ_b: densidade do solo; ϕ: porosidade; θ_s: umidade volumétrica na saturação.

3.2.1 Modelo hierárquico desenvolvido

As equações apresentadas na Tabela 3.1 foram agrupadas em um modelo hierárquico de equações (Figura 3.1) que estima, a partir dos dados disponibilizados de entrada, os valores pontuais de $\theta(h)$ e os parâmetros das equações de VGM, Kosugi e GRT que descrevem a CRA.

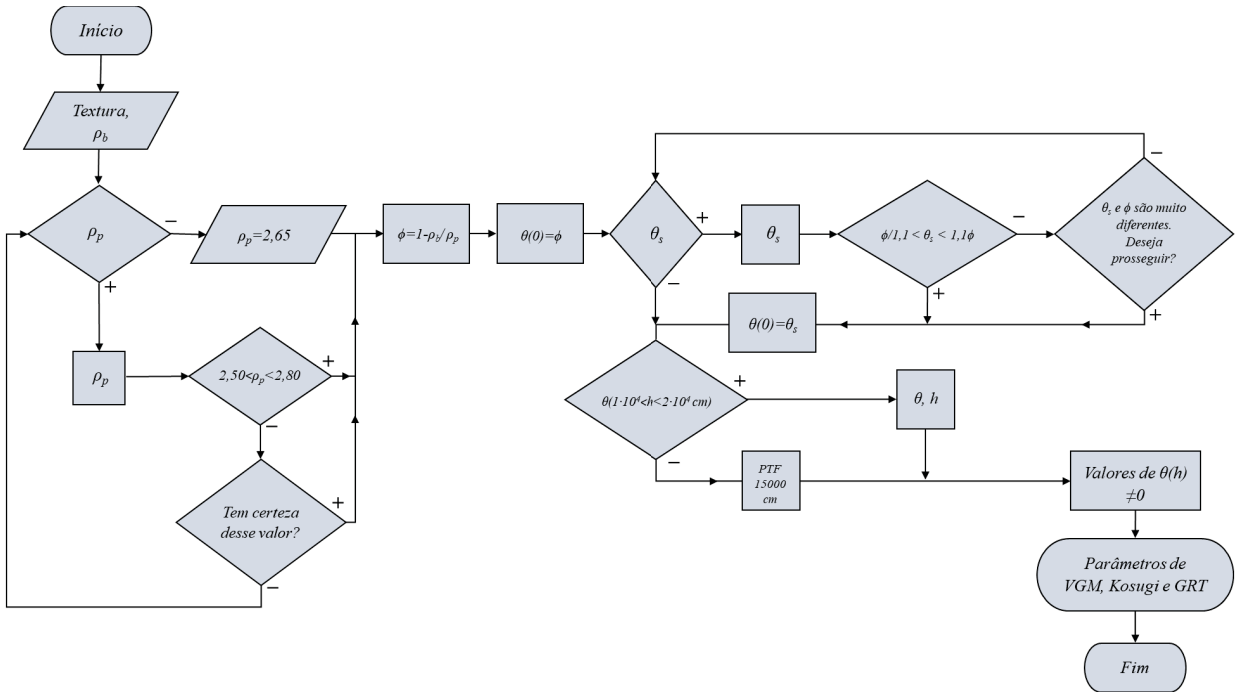


Figura 3.1 – Fluxograma do modelo hierárquico de PTFs para estimativa dos parâmetros das equações de VGM, Kosugi e GRT para descrição da CRA. Os sinais positivo (+) e negativo (-) referem-se a “sim” e “não”, respectivamente.

As equações foram agrupadas em uma estrutura de forma que opções de estimativa são seguidas a partir dos dados disponíveis de entrada para predição. Como exemplo, para estimativa de θ(30 cm), caso o usuário possua apenas dados das frações texturais areia, silte, argila e as densidades do solo (ρ_b) e das partículas (ρ_p), a PTF3 será a equação utilizada, pois ela estima o valor de θ(30 cm) com as variáveis de textura e porosidade (ϕ). Nesse caso, a porosidade será calculada utilizando-se os valores de ρ_b e ρ_p (ϕ=1−ρ_b/ρ_p). Entretanto, caso o usuário possua o valor medido da umidade na saturação (θ_s), além das informações texturais, a PTF4 será a melhor opção, pois em comparação a PTF3, a correlação *r* é aumentada e os erros sistemáticos RMSE e ME diminuídos. As estimativas são realizadas e aprimoradas a partir dos dados disponíveis de predição. Por analogia, o mesmo seguimento é realizado para o cálculo dos demais valores de $\theta(h)$.

O modelo desenvolvido não é capaz de realizar predições dos parâmetros dessas equações apenas com informações texturais (teores de areia, silte e argila), uma vez que essa foi a condição mínima imposta no modelo desenvolvido, já que PTFs texturais são insensíveis a variações estruturais do solo, negligenciando, assim, diferenças na retenção de água causadas pelas práticas de uso e manejo do solo. Ressalta-se que, diante da imposição inserida no modelo, a predição dos parâmetros que compõe as equações da CRA de um solo qualquer sob mata nativa não serão os mesmos parâmetros preditos do mesmo solo sob cultivo, a não ser que a prática de cultivo não tenha propiciado alterações nas propriedades estruturais medidas ρ_b, ϕ, θ_s e θ(10000<h< 20000 cm).

As equações de Van Genuchten (1980)-Mualem (VGM), Kosugi (1996) e Groenevelt & Grant (2004) (GRT), inseridas no modelo hierárquico de PTF desenvolvido, podem ser descritas por:

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha h)^n\right]^{1-1/n}} \quad (1)$$

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{1}{2}(\theta_s - \theta_r)\, erfc\left[\frac{\ln(h/h_m)}{\sigma\sqrt{2}}\right] \quad (2)$$

$$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r)\left\{1 - \exp\left[-\left(\frac{k}{h}\right)^p\right]\right\} \quad (3)$$

em que θ é a umidade volumétrica ($cm^3\ cm^{-3}$) em função da tensão matricial da água no solo (h), sendo h o módulo do potencial matricial da água no solo (cm), θ_r e θ_s são, respectivamente,

as umidades residual e de saturação ($cm^3\ cm^{-3}$), α (cm^{-1}), k (cm), h_m (cm), σ, n e p são parâmetros empíricos do formato da curva. Os valores inseridos de tensão matricial (h) foram padronizados em cm ao invés de m, uma vez que a equação de Kosugi (1996) requer a unidade de cm para melhor ajuste da CRA.

O modelo de PTF (Figura 3.1) para estimativa dos parâmetros das eqs. (1), (2) e (3) possui 4 funções hierárquicas (FH) de predição, descritas da seguinte forma:

FH1: Os parâmetros das equações são estimados se o usuário possui apenas como entrada, as variáveis medidas *Sa*, *Si*, *Cl*, ρ_b e ρ_p (opcional). Nessa função, o valor de 2,65 kg dm^{-3} é admitido na ausência da densidade das partículas e a PTF12 para estimativa de θ(15000 cm) é aplicada.
FH2: Os parâmetros das equações são estimados se o usuário possui como entrada dados medidos de *Sa*, *Si*, *Cl*, ρ_b e θ_s. Nessa função a PTF12 é aplicada para estimativa de θ(15000 cm).
FH3: Os parâmetros das equações são estimados se o usuário possui como entrada dados medidos de *Sa*, *Si*, *Cl*, ρ_b, ρ_p (opcional) e θ(10000<h<20000 cm). Nessa função, o valor de 2,65 kg dm^{-3} é admitido na ausência da densidade das partículas e a inserção da umidade medida em qualquer tensão entre 10000 e 20000 cm é aplicada objetivando melhorar a predição, uma vez que esse valor pode ser facilmente medido por psicrômetros possibilitando assim a melhora da estimativa em altas tensões.
FH4: Os parâmetros das equações são estimados se o usuário possui como entrada dados medidos de *Sa*, *Si*, *Cl*, ρ_b, ρ_p (opcional), θ_s e θ(10000<h<20000 cm). Nessa função, o valor de 2,65 kg dm^{-3} é admitido na ausência da densidade das partículas.

As funções hierárquicas (FHs) do modelo de pedotransferência desenvolvido foram rodadas separadamente em planilhas eletrônicas com a base de dados selecionada para avaliação do desempenho de estimativa do modelo a partir da análise de índices de precisão e exatidão, posteriormente descritos no item 3.2.3.

3.2.2 Bases avaliadas

A fim de testar o modelo proposto, utilizou-se a mesma base de dados selecionada no capítulo anterior, cujas informações foram acessadas das bases UNSODA (*Unsaturated Soil Hydraulic Database*, Nemes *et al*., 2015) e HYBRAS (*Hydrophysical database for Brazilian*

soils, Ottoni *et al*., 2018). As principais informações a respeito das propriedades físicas das 328 amostras selecionadas estão apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Estatística descritiva para as doze classes texturais (de acordo com a classificação da USDA), densidade do solo (ρ_b), densidade das partículas (ρ_p) e porosidade (ϕ).

Classe textural	Resumo estatístico	Fração (% massa)			ρ_b	ρ_p	ϕ	Número de amostras
		Areia	Silte	Argila	kg dm^{-3}		(%)	
Arenoso	Mínimo	87,1	1,0	0,0	1,36	2,56	26,4	28
	Média	91,7	5,4	2,9	1,56	2,64	40,9	
	Máximo	98,9	12,9	6,8	1,95	2,70	48,7	
	DP	3,2	3,0	1,6	0,15	0,03	5,5	
	CV (%)	3,5	55,6	55,8	9,56	1,06	13,4	
Areia franca	Mínimo	60,2	3,9	2,5	1,13	2,56	34,1	21
	Média	80,6	11,6	7,9	1,50	2,65	43,5	
	Máximo	87,5	23,7	19,0	1,76	2,70	56,7	
	DP	6,3	5,5	4,0	0,16	0,04	6,2	
	CV (%)	7,8	47,4	50,2	10,98	1,54	14,2	
Argiloso	Mínimo	0,8	7,3	40,3	0,69	2,50	0,3	76
	Média	28,3	18,7	52,9	1,36	2,65	0,5	
	Máximo	45,0	51,2	74,5	1,76	2,81	0,7	
	DP	10,8	9,0	8,0	0,20	0,08	0,1	
	CV (%)	38,3	48,3	15,2	14,57	3,04	16,2	
Argilo arenoso	Mínimo	45,1	7,1	36,0	1,16	2,50	33,3	15
	Média	49,9	10,3	39,8	1,48	2,63	43,9	
	Máximo	54,0	17,3	44,8	1,72	2,70	56,2	
	DP	2,6	2,5	2,6	0,17	0,07	6,9	
	CV (%)	5,2	24,2	6,4	11,55	2,64	15,6	
Argilo siltoso	Mínimo	3,9	41,8	40,3	1,10	2,46	0,4	4
	Média	10,0	47,1	43,0	1,43	2,63	0,5	
	Máximo	12,7	55,4	47,3	1,64	2,70	0,6	
	DP	4,1	6,0	3,2	0,23	0,11	0,1	
	CV (%)	41,4	12,7	7,5	16,20	4,34	15,0	
Franco	Mínimo	23,8	29,1	9,8	0,59	2,33	32,9	32
	Média	40,8	40,2	18,9	1,33	2,60	49,2	
	Máximo	51,7	49,8	27,4	1,77	2,83	74,7	
	DP	7,4	6,3	4,6	0,31	0,09	10,9	
	CV (%)	18,1	15,7	23,8	23,65	3,33	22,2	
Franco arenoso	Mínimo	52,0	4,9	2,8	1,26	2,59	25,7	40
	Média	63,5	24,6	11,9	1,54	2,65	41,9	
	Máximo	82,5	37,2	19,4	1,97	2,70	52,5	
	DP	7,2	7,7	4,2	0,16	0,02	6,0	
	CV (%)	11,4	31,5	35,3	10,43	0,93	14,4	
Franco argilo arenoso	Mínimo	46,2	2,0	20,1	1,07	2,50	30,9	33
	Média	60,1	14,2	25,7	1,47	2,66	44,4	
	Máximo	77,9	25,9	34,4	1,81	2,94	59,6	
	DP	10,0	8,7	4,3	0,20	0,09	8,5	
	CV (%)	16,6	61,2	16,9	13,88	3,31	19,1	
Franco argilo siltoso	Mínimo	0,3	48,0	27,6	1,10	2,36	37,9	8
	Média	10,2	57,8	32,2	1,41	2,61	46,3	
	Máximo	20,0	68,2	35,3	1,66	2,76	53,6	
	DP	5,9	6,5	2,8	0,22	0,14	6,4	
	CV (%)	58,0	11,2	8,7	15,80	5,20	13,9	
Franco argiloso	Mínimo	25,7	19,9	29,4	0,49	2,48	0,3	14
	Média	36,2	29,6	34,1	1,31	2,66	0,5	
	Máximo	43,0	42,3	39,4	1,74	2,87	0,8	

Classe textural	Resumo estatístico	Fração (% massa)			ρ_b	ρ_p	ϕ	Número de amostras
		Areia	Silte	Argila	kg dm^{-3}		(%)	
	DP	6,1	8,0	3,6	0,41	0,12	0,1	
	CV (%)	16,7	26,8	10,4	31,00	4,55	28,7	
Franco siltoso	Mínimo	2,3	4,4	5,1	0,91	2,50	35,4	55
	Média	19,3	63,4	16,2	1,45	2,64	46,0	
	Máximo	68,3	82,2	26,0	1,69	2,78	91,5	
	DP	12,0	13,1	5,0	0,15	0,05	8,1	
	CV (%)	62,0	20,6	30,6	10,21	1,87	17,6	
Siltoso	Mínimo	3,0	88,0	7,0	1,42	2,65	41,2	2
	Média	3,0	89,0	8,0	1,49	2,65	43,8	
	Máximo	3,0	90,0	9,0	1,56	2,65	46,3	
	DP	0,0	1,4	1,4	0,10	0,00	3,6	
	CV (%)	0,0	1,6	17,7	6,64	0,00	8,2	

DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

3.2.3 Estatística de análise de desempenho do modelo desenvolvido

O coeficiente de correlação de Pearson (r), o erro médio (ME) e a raiz do erro quadrático médio (RMSE) foram utilizados para análise das estimativas das FHs, de acordo com as equações:

$$r = \frac{cov\left(\theta_{est,i}, \theta_{mea,i}\right)}{DP_{\theta\ est,i} \cdot DP_{\theta\ mea,i}} \tag{4}$$

$$ME = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(\theta_{est,i} - \theta_{mea,i}\right) \tag{5}$$

$$RMSE = \left[\left(1/N\right)\sum_{i=1}^{N}\left(\theta_{est,i} - \theta_{mea,i}\right)^2\right]^{1/2} \tag{6}$$

em que $\theta_{mea,i}$ é a i-ésima variável medida, $\theta_{est,i}$ é a i-ésima variável estimada, N é o número de observações, cov é a covariância, $DP_{\theta est,i}$ e $DP_{\theta mea,i}$ são o desvio padrão dos dados estimados e dos dados medidos, respectivamente.

A eq. (4) foi utilizada para avaliar os erros aleatórios de predição, associados a precisão do modelo, uma vez que quanto mais próximo de 0 menos preciso é o modelo, aumentando-se a precisão ou correlação quanto mais próximo de 1 ou -1 for o resultado. A exatidão nas estimativas foi avaliada com os erros sistemáticos, avaliados pelas eqs. (5) e (6). Quanto mais próximo de 0 forem os índices RMSE e ME, mais exatas foram consideradas as estimativas do modelo. Adicionalmente, o índice ME indica a tendência de subestimativa (para valores negativos) ou superestimativa (para valores positivos) das predições do modelo desenvolvido.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As funções hierárquicas (FHs) do modelo de PTF desenvolvido foram rodadas separadamente em planilhas eletrônicas. As FH1 e FH3 foram analisadas com todas as 328 amostras, uma vez que foram analisadas inserindo-se ou não o valor de ρ_p e sem o valor de θ_s, sendo que a inserção de um ponto medido entre as tensões de 10000 e 20000 cm foi o que diferiu o desempenho entre as estimativas. Já as FH2 e FH4 foram rodadas para 110 pontos amostrais, por apresentarem θ_s medido, e, portanto, auxiliaram na predição do modelo. Os índices de precisão (r) e exatidão (RMSE) foram calculados em um arranjo fatorial envolvendo cada FH e cada equação que descreve a CRA (VGM, Kosugi e GRT). Os resultados encontrados estão apresentados na Tabela 3.3.

A estimativa dos parâmetros de VGM via FH2 apresentou as melhores médias de correlação ou precisão (r=0,9961) e exatidão (RMSE=0,0062 cm^3 cm^{-3}) dentre as 12 estimativas possíveis do modelo hierárquico proposto. A segunda melhor média de precisão ocorreu na estimativa dos parâmetros de Kosugi via FH2 (r=0,9936). Por outro lado, a estimativa dos parâmetros da equação de GRT pela FH3 foi a que apresentou menor média de precisão (r=0,9650). No entanto, esse valor se mantém classificado como correlação muito forte (Huf dos Reis *et al*., 2018) para a estimativa dos parâmetros dessa equação.

A estimativa da equação de Kosugi com a FH1 apresentou uma precisão ligeiramente maior que a de VGM, quando comparados os valores médios de *r.* Já as estimativas das equações de VGM e Kosugi por meio da FH4 correlacionaram-se mais, em média (r=0,9877 e r=0,9844, respectivamente) do que com GRT (r=0,9752). Contudo, esses valores são próximos demonstrando a qualidade da estimativa dos parâmetros das equações pela função FH4. As estimativas via FH3 para os parâmetros das equações de VGM e GRT apresentaram valores médios de *r* ligeiramente menores do que os resultados obtidos com FH4. Contudo, a estimativa dos parâmetros da equação de Kosugi foi ligeiramente melhor (r=0,9846 em FH3) que em FH4 (r=0,9844).

De modo geral, os valores de erro médio (ME) para as estimativas geradas foram próximos de zero, ou subestimaram as estimativas com relação aos valores medidos. Esse resultado norteou a discussão da exatidão das estimativas para o índice RMSE.

Tabela 3.3 – Correlação de Pearson (*r*), raiz do erro quadrático médio (RMSE) e o erro médio (ME) com relação as estimativas das CRAs em cada uma das quatro funções hierárquicas (FH).

	VGM			KOSUGI			GRT		
FH1	*r*	RMSE	ME	*r*	RMSE	ME	*r*	RMSE	ME
Mínimo	0,9077	0,0011	-0,0007	0,9070	0,0018	-0,0001	0,8789	0,0035	0,0000
Média	0,9906	0,0109	0,0000	0,9912	0,0100	0,0000	0,9713	0,0205	0,0000
Mediana	0,9942	0,0098	0,0000	0,9950	0,0092	0,0000	0,9728	0,0187	0,0000
Máximo	0,9999	0,0395	0,0071	0,9999	0,0369	0,0000	0,9988	0,0578	0,0000
FH2	*r*	RMSE	ME	*r*	RMSE	ME	*r*	RMSE	ME
Mínimo	0,9049	0,0023	-0,0003	0,9047	0,0024	-0,0062	0,9065	0,0076	0,0000
Média	0,9961	0,0062	0,0000	0,9936	0,0077	-0,0002	0,9799	0,0184	0,0000
Mediana	0,9987	0,0055	0,0000	0,9985	0,0056	0,0000	0,9815	0,0192	0,0000
Máximo	0,9997	0,0182	0,0000	0,9996	0,0568	0,0000	0,9974	0,0311	0,0000
FH3	*r*	RMSE	ME	*r*	RMSE	ME	*r*	RMSE	ME
Mínimo	0,5044	0,0010	-0,0013	0,5731	0,0010	-0,0009	0,3048	0,0032	0,0000
Média	0,9832	0,0127	0,0000	0,9846	0,0119	0,0000	0,9650	0,0218	0,0000
Mediana	0,9925	0,0119	0,0000	0,9922	0,0112	0,0000	0,9734	0,0198	0,0000
Máximo	0,9999	0,0523	0,0060	0,9999	0,0570	0,0000	0,9990	0,0651	0,0000
FH4	*r*	RMSE	ME	*r*	RMSE	ME	*r*	RMSE	ME
Mínimo	0,8369	0,0032	-0,0006	0,6719	0,0021	-0,0099	0,8333	0,0100	0,0000
Média	0,9877	0,0115	0,0000	0,9844	0,0118	-0,0002	0,9752	0,0190	0,0000
Mediana	0,9940	0,0106	0,0000	0,9941	0,0094	0,0000	0,9817	0,0181	0,0000
Máximo	0,9994	0,0444	0,0000	0,9997	0,0601	0,0000	0,9948	0,0448	0,0000

VGM, Kosugi e GRT são as equações de Van Genuchten (1980)-Mualem, Kosugi (1996) e Groenevelt & Grant (2004), respectivamente. RMSE: raiz do erro médio quadrático e ME: erro médio.

Retas 1:1 foram elaboradas para analisar o desempenho de cada equação de predição da CRA nas 4 FHs (Figura 3.2). No entanto, esses resultados gráficos foram representados apenas pelas amostras correspondentes aos quartis de zero a quatro para melhor visualização quando apresentados. O quartil zero representa o menor valor de RMSE em um dos conjuntos de dados avaliados. Já o 4º quartil representa o maior valor de RMSE do conjunto. Isso significa que apenas 5 amostras de pares $\theta(h)$ de cada conjunto avaliado (por exemplo: equação de Kosugi pela função FH4) estão apresentados na Figura 3.2.

A maior exatidão (menor RMSE) nas estimativas do modelo hierárquico proposto foi obtida para a equação de Kosugi, cujos parâmetros foram estimados a partir da FH3 (RMSE=0,0009 $cm^3\ cm^{-3}$). Igualmente, na estimativa por FH4, os parâmetros da equação de Kosugi foram estimados com maior exatidão (RMSE=0,0021 $cm^3\ cm^{-3}$). Nessas duas funções é necessário apresentar um ponto medido da CRA entre as tensões de 10000 e 20000 cm a fim de aprimorar as estimativas.

Para as outras duas funções, FH1 e FH2, a estimativa dos parâmetros de VGM apresentou maior exatidão com relação às estimativas dos parâmetros de Kosugi e GRT.

Utilizando-se FH1 encontrou-se o menor RMSE (0,0011 $cm^3\ cm^{-3}$) e utilizando-se FH2 o menor RMSE foi de 0,0023 $cm^3\ cm^{-3}$, ambos para a estimativa dos parâmetros de VGM. No entanto, a estimativa de Kosugi-FH2 apresentou praticamente a mesma exatidão que VGM-FH2, com RMSE=0,0024 $cm^3\ cm^{-3}$, mas com ME superior (-0,0062) ao ME de VGM (-0,0003) (Tabela 3.3).

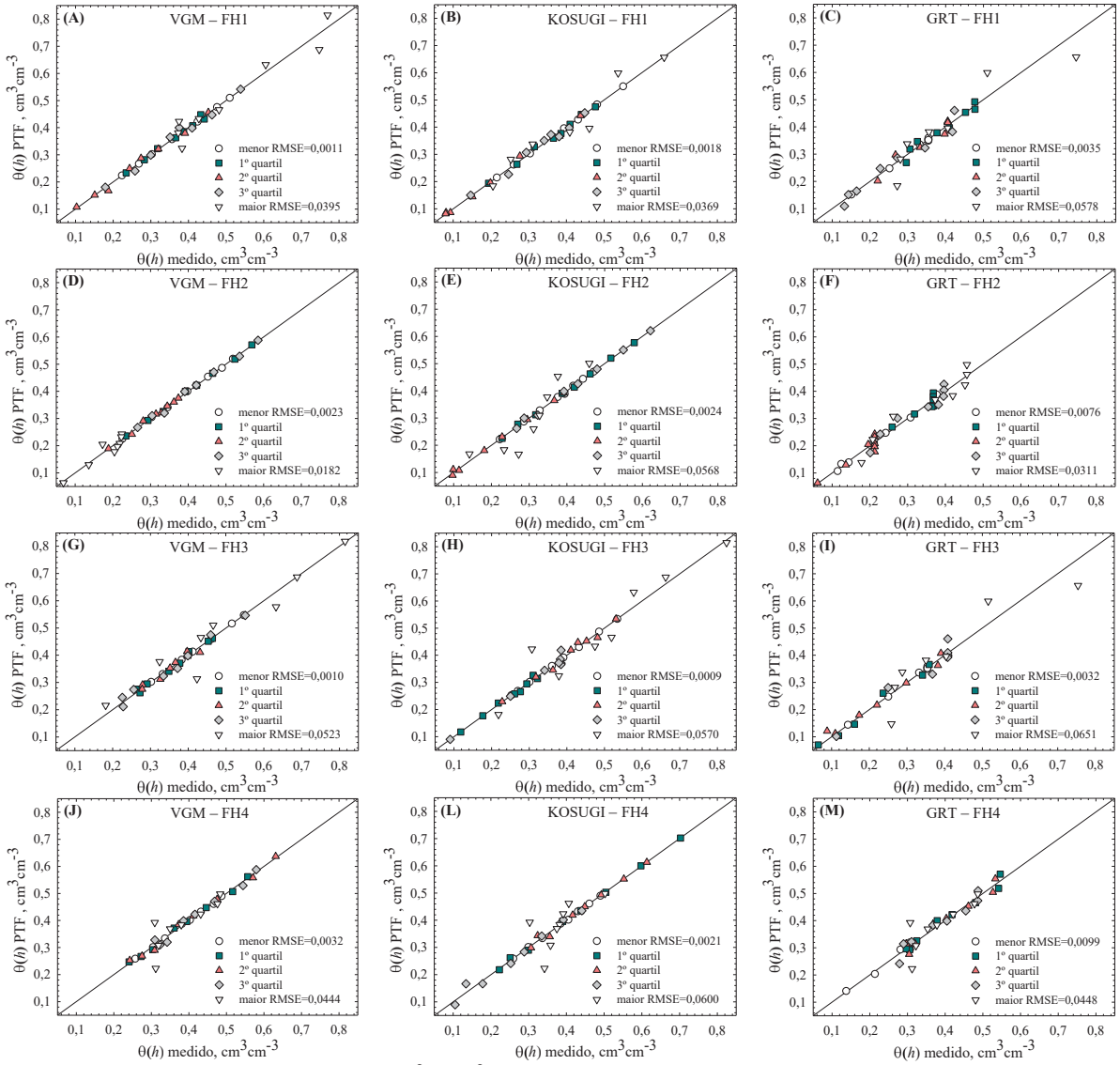


Figura 3.2 – Valores de RMSE ($cm^3\ cm^{-3}$) para os quartis das estimativas de *θ(h)* com os dados medidos em relação aos dados estimados a partir das PTFs pontuais utilizadas nas funções hierárquicas (1, 2, 3 e 4) do modelo desenvolvido. VGM, Kosugi e GRT são as equações de Van Genuchten-Mualem (1980), Kosugi (1996) e Groenevelt & Grant (2004).

Deve-se lembrar que a FH1 é a função mais básica, que não exige o valor medido de ρ_p e nenhum ponto da CRA, como por exemplo θ_s. Já FH2 requer a inserção de θ_s para que o ajuste seja melhor do que o obtido por FH1. De acordo com a Tabela 3.3, os melhores índices de

precisão e exatidão (valores médios) foram confirmados para as estimativas dos parâmetros das três equações (VGM, Kosugi e GRT), quando obtidos com a FH2, em detrimento à FH1.

Na Figura 3.3 são apresentados os valores de precisão e exatidão na obtenção dos parâmetros das equações de VGM, Kosugi e GRT, quando avaliados separadamente em cada tensão matricial (h).

Graficamente, as funções FH2 e FH4 geraram melhores estimativas na faixa mais úmida da CRA (h<100 cm) pelas três equações. Embora as duas funções considerem o valor da umidade na saturação medida (θ_s), a estimativa por Kosugi apresentou menor precisão do cálculo de $\theta(10\ cm)$, ou seja, em uma tensão mais próxima a zero ($\sim\theta_s$).

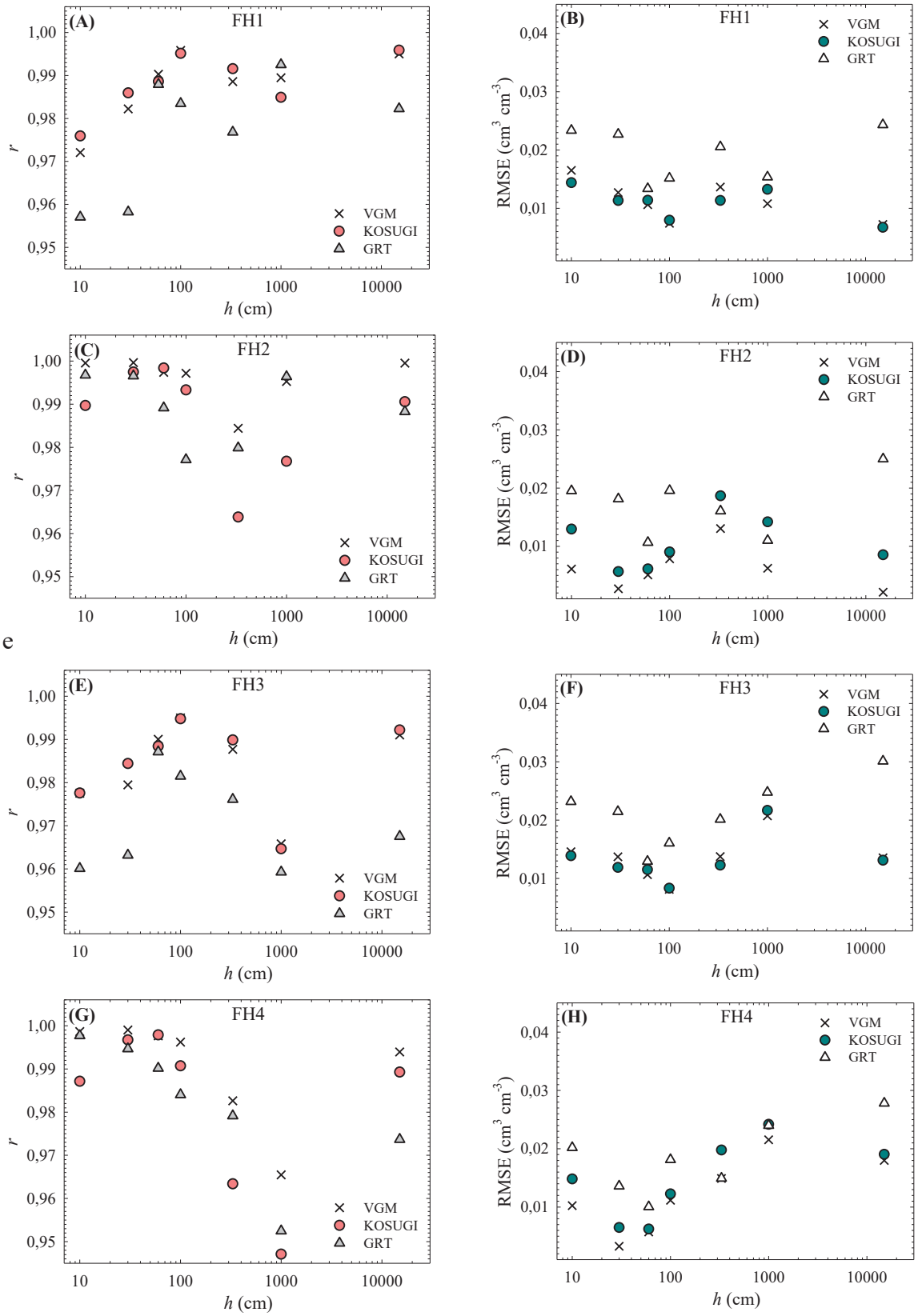
As estimativas de $\theta($330 cm$)$ foram mais precisas para VGM e Kosugi pelas funções FH1 e FH3. Notou-se que, tanto pela FH3 como pela FH4, a precisão das estimativas foi reduzida para as três equações na tensão de 1000 cm (Figura 3.3E e G). Para a função FH4, especificamente, a precisão da equação de Kosugi foi inferior em relação à VGM e GRT (r < 0,95) (Figura 3.3G). Contudo, ressalta-se que o número de dados avaliados entre FH3 (328) e FH4 (110) foi diferente.

Com relação às estimativas de $\theta(15000\ cm)$, os maiores valores relacionados a precisão (r > 0,99) e menores relacionados a exatidão (RMSE<0,01 $cm^3\ cm^{-3}$) foram obtidas para VGM e Kosugi quando analisadas via FH1 e FH2 (Figura 3.3A, B, C e D), sendo que nessas duas funções não é necessário inserir um ponto da CRA medido entre 10000<h<20000 cm. Ou seja, para uma boa estimativa da retenção de água nessa tensão matricial específica não é necessário informar um ponto medido da CRA, mas apenas as frações texturais e a densidade do solo (Tabela 3.1, PTF12).

As estimativas dos parâmetros da equação de Kosugi por FH1 foram mais exatas e precisas em toda a faixa de tensão matricial avaliada. A estimativa dos parâmetros de VGM pela FH2 apresentou-se mais precisa e exata em toda a faixa de h. Já as estimativas via FH3 foram mais precisas e exatas tanto para Kosugi quanto para VGM em toda a faixa de h, sendo que Kosugi gerou ligeiramente estimativas mais exatas que VGM. As estimativas para VGM por FH4 foram mais precisas e exatas para toda a faixa de tensão matricial.

Ressalta-se que nenhuma das estimativas dos parâmetros das equações de VGM, Kosugi ou GRT apresentou precisão inferior a r=0,94 ou erro sistemático (exatidão) maior do que RMSE=0,04 $cm^3\ cm^{-3}$. Esses resultados mostram um desempenho satisfatório de predição do modelo desenvolvido, uma vez que Wösten *et al*. (2001) e Pachepsky *et al*. (2001) encontraram

variações entre 0,06 e 0,11 m^3 m^{-3} como erros sistemáticos comuns para estimativa da CRA em solos de diferentes texturas.



e

Figura 3.3 – Valores de *r* e RMSE calculados para as estimativas em cada tensão matricial avaliada, variando de *h*=10 até 15000 cm. Na análise de FH1 e FH3 utilizaram-se 328 amostras e de FH2 e FH4 110 amostras. VGM, Kosugi e GRT são as equações de Van Genuchten-Mualem (1980), Kosugi (1996) e Groenevelt & Grant (2004).

Na Tabela 3.4 apresentam-se os resultados da estatística descritiva dos parâmetros de cada uma das equações. Identificou-se que o maior valor médio estimado para θ_s de todo o conjunto ocorreu para a equação de Kosugi via FH2 (0,502 cm^3 cm^{-3}), enquanto o menor valor médio para a equação de GRT via FH1 e FH3 foi o de 0,434 cm^3 cm^{-3} nas duas FHs. O maior valor médio de θ_r foi identificado na estimativa de GRT via FH2 (0,258 cm^3 cm^{-3}), já o menor ocorreu para VGM-FH1 (0,105 cm^3 cm^{-3}).

Com relação as estimativas dos parâmetros de VGM, o valor mínimo para θ_s (0,207 cm^3 cm^{-3}) ocorreu em FH4 e o valor máximo (0,915 cm^3 cm^{-3}) em FH3. O valor máximo para θ_r ocorreu na estimativa com FH3 (0,362 cm^3 cm^{-3}). Para o parâmetro α o menor valor encontrado nas estimativas foi 0,0001 cm^{-1} (FH3) e valor máximo também foi identificado na estimativa com FH3 (0,762 cm^{-1}). O valor mínimo para o parâmetro *n* foi igual a 0,696 e foi obtido na FH4, já o maior valor também ocorreu em FH4 (15,842).

Nas estimativas dos parâmetros de Kosugi o valor máximo para θ_s foi observado para FH3 (0,918 cm^3 cm^{-3}). O valor mínimo desse mesmo parâmetro foi igual a 0,204 cm^3 cm^{-3} e obtido por FH4. O máximo valor estimado de θ_r foi igual a 0,457 cm^3 cm^{-3}. O mínimo valor do parâmetro σ foi igual a $1 \cdot 10^{-5}$, tanto com FH3 quanto com FH4. Já o máximo valor obtido foi igual a 12,65, cuja estimativa ocorreu via FH4. O parâmetro h_m apresentou valor mínimo igual a 21,2 cm pela estimativa de FH3 e o maior valor ($4{,}50 \cdot 10^3$ cm) encontrado por FH1.

Com relação ao parâmetro θ_s de GRT, o valor mínimo estimado foi igual a 0,205 cm^3 cm^{-3} pelas FH2 e FH4. Já o valor máximo obtido foi igual a 0,877 cm^3 cm^{-3}, estimado com FH3. O máximo valor de θ_r estimado de 0,619 cm^3 cm^{-3} também foi encontrado com FH3. O valor mínimo para o parâmetro *k* foi igual a 0,282 cm no conjunto de FH3 e o valor máximo de 58,878 cm com FH4. O valor máximo de *p* também apareceu em FH4 e foi igual a 20,607. O valor mínimo desse parâmetro foi igual a 1,805 e estimado via FH3.

Silva *et al.* (2020) apresentaram a segunda versão do modelo de PTF fisicamente fundamentado denominado Splintex, que inicialmente foi desenvolvido por Prevedello & Loyola (2002) (Splintex 1.0). O Splintex, que possui princípio de funcionamento diferente do modelo desenvolvido neste estudo, é um programa de computador que utiliza o modelo simplificado de Arya & Paris (1981) para converter a distribuição de frequência das partículas

em distribuição de frequência de poros e, posteriormente, nos dados de umidade, condutividade e tensão matricial para compor as equações de VGM que descrevem a CRA e a CCH. Dessa forma, o Splintex não necessita de calibração e pode ser utilizado para qualquer meio poroso, principalmente em solos onde não há PTFs específicas já calibradas. Igualmente ao modelo aqui proposto, o Splintex permite ao usuário informar ou não os valores medidos para densidade das partículas (ρ_p), para a umidade na saturação (θ_s), ou um par de valores de $\theta(h)$. Os autores obtiveram melhores resultados para as estimativas de $\theta(h)$ quando os valores dessas propriedades medidas foram inseridos.

Tabela 3.4 – Estatística descritiva dos parâmetros de VGM, GRT e Kosugi estimados pelo modelo de PTF hierárquico para descrição da CRA e dos parâmetros de VGM para os dados medidos.

	Parâmetros de VGM para os dados medidos											
	θ_s	θ_r	α	n								
Mínimo	0,238	0,000	0,001	1,100	-	-	-	-	-	-	-	-
Média	0,458	0,097	0,152	1,432	-	-	-	-	-	-	-	-
Mediana	0,432	0,053	0,041	1,303	-	-	-	-	-	-	-	-
Máximo	0,837	0,381	10,00	4,277	-	-	-	-	-	-	-	-
DP	0,101	0,108	0,840	0,433	-	-	-	-	-	-	-	-
CV	22,1	110,9	554,0	30,2	-	-	-	-	-	-	-	-
	VGM				KOSUGI				GRT			
FH1	θ_s	θ_r	α	n	θ_s	θ_r	σ	h_m	θ_s	θ_r	k	p
Mínimo	0,265	0	0,001	1,110	0,265	0	0,381	$2{,}47{\cdot}10^{1}$	0,264	0,141	6,509	2,278
Média	0,454	0,105	0,063	1,424	0,458	0,158	2,229	$4{,}48{\cdot}10^{2}$	0,434	0,239	19,057	6,671
Mediana	0,436	0,088	0,041	1,290	0,442	0,152	2,123	$1{,}88{\cdot}10^{2}$	0,416	0,231	14,942	5,230
Máximo	0,914	0,377	0,598	4,786	0,917	0,377	5,214	$4{,}50{\cdot}10^{3}$	0,884	0,613	45,681	15,988
DP	0,086	0,093	0,081	0,388	0,086	0,079	0,895	$6{,}83{\cdot}10^{2}$	0,080	0,058	10,378	3,631
CV	18,9	88,3	129,0	27,3	18,8	50,2	40,1	$1{,}52{\cdot}10^{2}$	18,4	24,2	54,5	54,4
FH2	θ_s	θ_r	α	n	θ_s	θ_r	σ	h_m	θ_s	θ_r	k	p
Mínimo	0,209	0	0,001	1,105	0,232	0	0,239	$4{,}33{\cdot}10^{1}$	0,205	0,118	8,968	3,374
Média	0,499	0,149	0,059	1,518	0,502	0,186	2,250	$2{,}93{\cdot}10^{2}$	0,478	0,258	15,917	5,576
Mediana	0,547	0,165	0,069	1,335	0,551	0,213	2,214	$8{,}13{\cdot}10^{1}$	0,522	0,271	11,736	4,108
Máximo	0,699	0,319	0,094	7,128	0,703	0,335	5,217	$2{,}43{\cdot}10^{3}$	0,660	0,415	52,877	18,507
DP	0,102	0,079	0,024	0,815	0,102	0,076	0,825	$4{,}79{\cdot}10^{2}$	0,095	0,053	10,314	3,607
CV	20,4	53,2	40,7	53,7	20,3	41,0	36,7	$1{,}64{\cdot}10^{2}$	20,0	20,5	64,8	64,7
FH3	θ_s	θ_r	α	n	θ_s	θ_r	σ	h_m	θ_s	θ_r	k	p
Mínimo	0,265	0	$1{\cdot}10^{-4}$	0,812	0,265	0	$1{\cdot}10^{-5}$	$2{,}12{\cdot}10^{1}$	0,265	0,051	0,282	1,805
Média	0,453	0,118	0,061	1,585	0,458	0,157	2,115	$4{,}47{\cdot}10^{2}$	0,434	0,241	18,879	6,635
Mediana	0,434	0,079	0,038	1,365	0,440	0,145	2,051	$1{,}19{\cdot}10^{2}$	0,418	0,238	13,050	4,574
Máximo	0,915	0,362	0,762	15,467	0,918	0,457	4,799	$3{,}24{\cdot}10^{3}$	0,877	0,619	48,777	17,072
DP	0,087	0,117	0,082	1,027	0,087	0,107	0,892	$6{,}98{\cdot}10^{2}$	0,078	0,076	11,607	4,047
CV	19,1	98,7	135,1	64,8	18,9	68,0	42,2	$1{,}56{\cdot}10^{2}$	18,1	31,4	61,5	61,0
FH4	θ_s	θ_r	α	n	θ_s	θ_r	σ	h_m	θ_s	θ_r	k	p
Mínimo	0,207	0	0,001	0,696	0,204	0	$1{\cdot}10^{-5}$	$3{,}53{\cdot}10^{1}$	0,205	0,096	8,269	2,894
Média	0,498	0,192	0,052	1,750	0,501	0,210	2,115	$2{,}51{\cdot}10^{2}$	0,481	0,245	14,117	4,946
Mediana	0,544	0,223	0,051	1,491	0,550	0,240	1,813	$6{,}32{\cdot}10^{1}$	0,527	0,250	10,860	3,818

Máximo	0,698	0,357	0,097	15,842	0,703	0,358	12,650	$2{,}35 \cdot 10^{3}$	0,661	0,414	58,878	20,607
DP	0,099	0,109	0,021	1,579	0,102	0,098	1,396	$4{,}51 \cdot 10^{2}$	0,097	0,064	8,933	3,124
CV	20,0	56,8	40,3	90,2	20,3	46,9	66,0	$1{,}80 \cdot 10^{2}$	20,2	26,0	63,3	63,2

VGM, Kosugi e GRT são as equações de Van Genuchten (1980)-Mualem, Kosugi (1996) e Groenevelt & Grant (2004), respectivamente. θ_r e θ_s são, respectivamente, as umidades residual e de saturação ($cm^3\ cm^{-3}$), α (cm^{-1}), k (cm), h_m (cm), σ, n e p são parâmetros empíricos do formato da curva.

Botula *et al.* (2013) também simularam as estimativas da umidade do solo ao longo de 8 pontos de tensão matricial da CRA, valendo-se da metodologia não paramétrica do vizinho mais próximo (*k*-NN). Os autores utilizaram não apenas dados de textura e estrutura do solo, mas também informações químicas, como pH, matéria orgânica e a capacidade de troca catiônica, avaliadas hierarquicamente. Ou seja, realizaram as simulações com todas as combinações possíveis dos dados de entrada. A partir de um banco de dados de solos de clima tropical, os autores identificaram que os melhores dados de entrada para estimar a umidade nos 8 pontos de tensão avaliados foram as frações texturais, densidade do solo e a capacidade de troca catiônica.

Rosetta é um modelo computacional baseado em redes neurais artificiais para estimar a CRA e a condutividade hidráulica do solo com PTFs hierárquicas (Zhang & Schaap, 2017). As cinco PTFs (H1-H5) consideram, hierarquicamente, a entrada de dados de textura, densidade do solo (ρ_b), pontos medidos de *θ(330 cm) e θ(15000 cm).* Contudo, a função H1 se apresenta como uma PTF de classe gerando parâmetros médios para cada classe textural classificada, classificada de acordo com a USDA (Soil Survey Staff, 2014). As PTFs utilizadas no Rosetta foram calibradas com dados de solos internacionais (Estados Unidos da América e Europa). Desde sua primeira publicação por Schaap *et al*. (2001), o Rosetta vem sendo utilizado em ampla escala por outros pesquisadores ao redor do mundo (Khodaverdiloo *et al*., 2011; Ottoni *et al*., 2019; Silva *et al*., 2017; Twarakavi *et al*., 2009).

As PTFs utilizadas no modelo hierárquico apresentado nesse capítulo foram calibradas com os dados de $\theta(h)$ obtidos por meio da equação de VGM a partir da função de regressão não linear *nls* pelo software *R* (R Core Team, 2019). Dessa forma, as estimativas dos parâmetros da equação de VGM por meio das 4 funções hierárquicas pode ser favorecida. Contudo, os resultados de precisão e exatidão obtidos para a equação de Kosugi foram similares aos de VGM, indicando que essa equação para caracterização da CRA se ajusta muito bem a solos de clima tropical (Souza Filho *et al*., 2013) e temperado (Haghverdi *et al*., 2020). A equação de GRT, também avaliada por Armindo *et al*. (2019) para a estimativa da retenção de água em solos brasileiros, apresentou melhor desempenho na estimativa da retenção de água em alguns potenciais matriciais, entretanto, considerando a completa faixa de tensão (0,1 a 150 m), as

estimativas de VGM e Kosugi apresentaram, no geral, melhor desempenho (precisão e exatidão).

3.4 CONCLUSÃO

As quatro FHs estimaram os parâmetros das equações de VGM, Kosugi e GRT com elevado desempenho (precisão e exatidão), embora as FHs tenham sido avaliadas com um número amostral diferente.

A fim de analisar a retenção de água em uma tensão matricial específica, pode-se escolher a FH que mais se adequa às informações disponíveis, tendo sempre como resposta os parâmetros de três equações para descrição da CRA. As FH2 e FH4 apresentaram melhor desempenho na estimativa da retenção de água em baixa tensão, uma vez que as duas FHs utilizam o valor de θ_s medido, favorecendo o ajuste da CRA pela equação de VGM. Com relação às funções FH1 e FH3, as estimativas dos parâmetros de Kosugi apresentaram maior exatidão (menor RMSE) e maior precisão (maior *r*). Contudo, as estimativas para VGM via FH3 foram próximas às de Kosugi, tanto em exatidão quanto em precisão. As estimativas dos parâmetros da equação de GRT pelas 4 FHs ficou um pouco aquém das estimativas para as outras equações, mas ainda assim com desempenho aceitável.

REFERÊNCIAS

Armindo, R.A., De Jong van Lier Q., Turek, M.E., Reis, A.M.H., Melo, M.L.A., Ramos, M.E.P., Ono, G.M., 2019. Performance of the Groenevelt and Grant Model for fitting soil water retention data from Brazilian soils. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 43, 1–12.

Arya, L.M., Paris, J.F., 1981. A physico-empirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data. **Soil Science Society of America Journal**. 45, 1023–1030.

Botula, Y.D., Nemes, A., Mafuka, P., Van Ranst, E., Cornelis, W.M., 2013. Prediction of water retention of soils from the Humid Tropics by the nonparametric *k*-Nearest neighbor approach. **Vadose Zone Journal**. 12, 1–17.

Botula, Y.D., Ranst, E.V., Cornelis, W.M., 2014. Pedotransfer functions to predict water retention for soils of the humid tropics: a review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 38, 679–698.

Groenevelt, P.H., Grant, C.D., 2004. A new model for the soil-water retention curve that solves the problem of residual water contents. **European Journal of Soil Science**. 55, 479–485.

Haghverdi, A., Najarchi, M., Öztürk, H.S., Durner, W., 2020. Studying Unimodal, Bimodal, PDI and Bimodal-PDI Variants of Multiple Soil Water Retention Models: I. Direct Model Fit Using the Extended Evaporation and Dewpoint Methods. **Water.** 12, 3, 900.

Huf dos Reis, A.M., Armindo, R.A., Durães, M.F., De Jong van Lier, Q., 2018. Evaluating pedotransfer functions of the Splintex model. **European Journal Soil Science.** 69, 685-697.

Khodaverdiloo, H., Homaee, M., Van Genuchten, M.Th., Dashtaki, S.G., 2011. Deriving and validating pedotransfer functions for some calcareous soils. **Journal of Hydrology**. 399, 93–99.

Kosugi, K., 1996. Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties. **Water Resources Research.** 32, 9, 2697–2703.

McBratney, A., Minasny, B., Cattle, S.R., Vervoort, R.W., 2002. From pedotransfer functions to soil inference systems. **Geoderma**. 109, 41–73.

Meskini-Vishkaee, F., Mohammadi, M.H., Vanclooster, M., 2014. Predicting the soil moisture retention curve, from soil particle size distribution and bulk density data using a packing density scaling factor. **Hydrology and Earth System Sciences**. 18, 4053-4063.

Mohammadi, M.H., Vanclooster, M., 2011. Predicting the soil moisture characteristic curve from soil particle size distribution with a simple conceptual model. **Vadose Zone Journal.** 10, 594–602.

Mualem, Y. 1976. New model for predicting hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Research**. 12, 513–522.

Nemes, A., Schaap, M., Leij, F.J., Wösten, J.H.M., 2015. UNSODA 2.0: Unsaturated Soil Hydraulic Database. Database and program for indirect methods of estimating unsaturated hydraulic properties. US Salinity Laboratory - ARS - USDA.

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

Ottoni, M.V., Ottoni, F.T.B., Lopes-Assad, M.L.R.C., Rotunno, F.O.C., 2019. Pedotransfer functions for saturated hydraulic conductivity using a database with temperate and tropical climate soils. **Journal of Hydrology**. 575, 1345–1358.

Pachepsky, Y.A., Rawls, W.J., Gimenez, D., 2001. Comparison of soil water retention at field and laboratory scales. **Soil Science Society American Journal**. 65, 460–462.

Pachepsky, Y.A., Rawls, W.J., 2003. Soil structure and pedotransfer functions. **European Journal Soil Science**. 54, 443-451.

Prevedello, C.L., Armindo, R.A., 2015. Física do solo com problemas resolvidos. 2. ed. **Rev. e ampl**. Curitiba, 474 p.

Prevedello, C.L., Armindo, R.A., 2016. Generalization of the Green-Ampt theory for horizontal infiltration into homogeneous soil. **Vadose Zone Journal**. 15, 1–10.

Prevedello, C.L., Loyola, J.M.T., 2002. Modelo para estimar as propriedades hidráulicas de meios porosos a partir da curva granulométrica. **Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**, São Paulo, 2002. ABMS, Anais. São Paulo, pp. 467–472.

R Core Team, 2019. R: A Language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna.

Saxton, K.E., W.J. Rawls, J.S Romberger, and R.I. Papendick., 1986. Estimating generalized soil water characteristics from texture. **Soil Science Society of America Journal**. 50, 1031-1036.

Schaap, M.G., Leij, F.J., Van Genuchten, M.Th., 1998. Neural Network Analysis for Hierarchical Prediction of Soil Hydraulic Properties. **Soil Science Society of America Journal**. 62, 847–855.

Schaap, M.G., Leij, F.J., Van Genuchten, M.Th., 2001. ROSETTA: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. **Journal of Hydrology**. 251, 163–176.

Silva, A.C., Armindo, R.A., Brito, A.S., Schaap, M.G., 2017. An Assessment of Pedotransfer Function Performance for the Estimation of Spatial Variability of Key Soil Hydraulic Properties. **Vadose Zone Journal.** 16, 9, 1–10.

Silva, A.C., Armindo, R.A., Prevedello, C.L., 2020. Splintex 2.0: A physically-based model to estimate water retention and hydraulic conductivity parameters from soil physical data. **Computer and Eletronics in Agriculture.** 169, *in press.*

Soil Survey Staff, 2014. Keys to Soil Taxonomy, 12th ed. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.

Souza Filho, P.S., Heldwein, A.B., Zamberlan, J.F., Corrêa, H.C., 2013. Parâmetros físicos do solo relacionados com o avanço da frente de molhamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. 17, 2, 153–161.

Tomasella, J., Hodnett, M.G., Rossato, L., 2000. Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in Brazilian soils. **Soil Science Society of America Journal**. 64, 327–338.

Tóth, B., Weynants, M., Nemes, A., Makó, A., Bilas, G., Tóth, G., 2015. New generation of hydraulic pedotransfer functions for Europe. **European Journal of Soil Science**. 66, 226-238.

Tranter, G., Minasny, B., McBratney, A.B., 2010. Estimating Pedotransfer Function Prediction Limits Using Fuzzy k-Means with Extragrades. **Soil Science Society of America Journal**. 74, 1967–1975.

Twarakavi, N.K.C., Simunek, J., Schaap, M.G., 2009. Development of Pedotransfer Functions for Estimation of Soil Hydraulic Parameters using Support Vector Machines. **Soil Science Society of America Journal**. 73, 1443–1452.

Van Genuchten, M.Th., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**. 44, 892–897.

Van Looy, K., Bouma, J., Herbst, M., Koestel, J., Minasny, B., Mishra, U., …Vereecken, H., 2017. Pedotransfer functions in Earth system science: Challenges and perspectives. **Reviews of Geophysics**, 55, 1199–1256.

Vereecken, H., Maes, J., Feyen, J., Darius, P., 1989. Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density, and carbon content. **Soil Science**. 148, 389–403.

Vereecken, H., Weynants, M., Javaux, M., Pachepsky, Y., Schaap, M.G., Van Genuchten, M.Th., 2010. Using pedotransfer functions to estimate the Van Genuchten–Mualem soil hydraulic properties: A review. **Vadose Zone Journal**. 9, 795–820.

Wösten, J.H.M., Pachepsky, Y.A., Rawls, W.J. 2001. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. **Journal of Hydrology**. 251, 123–150.

Zhang, Y., Schaap, M.G., 2017. Weighted recalibration of the Rosetta pedotransfer model with improved estimates of hydraulic parameter distributions and summary statistics (Rosetta3). **Journal of Hydrology**. 547, 39–53.

Zhang, Y., Schaap, M.G., Zha, Y., 2018. A High-Resolution Global Map of Soil Hydraulic Properties Produced by a Hierarchical Parameterization of a Physically-Based Water Retention Model. **Water Resources Research.** 54, 9774–9790.