COPPE
Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia
UFRJ

SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS BASEADO NA ESTRUTURA DO ESPAÇO POROSO

Marta Vasconcelos Ottoni

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Orientadores: Otto Corrêa Rotunno Filho
Maria Leonor Ribeiro Casimiro Lopes Assad

Rio de Janeiro
Novembro de 2017

SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS BASEADO NA ESTRUTURA DO ESPAÇO POROSO

Marta Vasconcelos Ottoni

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:

_____
Prof. Otto Corrêa Rotunno Filho, Ph.D.

_____
Profa. Maria Leonor Ribeiro Casimiro Lopes Assad, Ph.D.

_____
Profa. Lúcia Helena Cunha dos Anjos, Ph.D.

_____
Profa. Maria Claudia Barbosa, D.Sc.

_____
Dr. Martinus Theodorus van Genuchten, Ph.D.

_____
Prof. Quirijn de Jong Van Lier, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
NOVEMBRO DE 2017

Ottoni, Marta Vasconcelos

Sistema de Classificação dos Solos baseado na Estrutura do Espaço Poroso/ Marta Vasconcelos Ottoni. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017.

XXVII, 179 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Otto Corrêa Rotunno Filho

Maria Leonor Ribeiro Casimiro Lopes Assad

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 154-178.

1. Classificação da Estrutura do Espaço Poroso. 2. Solos de Clima Tropical. 3. Solos de Clima Temperado. 4. Funcionalidade Hídrica. I. Rotunno Filho, Otto Corrêa *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

Ao meu pequenininho ser de luz *(in memoriam)*

O Solo

O solo se chama chão
apenas quando se pisa
e ao se pisar, nosso peso,
pouco a pouco, dia a dia,
comprime a areia, o saibro,
a pedra e o matacão.

E enquanto eu olho pro chão,
com ideias de matuto,
No fundo dos oceanos,
imensas placas terrestres,
se movem ao longo dos anos
movidas por elefantes!

E a chuva derrete montanhas
e aos poucos, constantemente,
o vento carrega poeira
modelando continentes...

E enquanto eu coço a cabeça
perdido nos meus devaneios,
Uma linda cientista
desvenda mistérios profundos,
da alma que a terra tem,
oculta por entre seus grãos
e que por falta de nome,
denomina-se “vazios”...

E ao fim, com mãos delicadas,
desenha uma curva elegante,
de um gráfico que revela
segredos que nunca se viu!
do solo do meu Brasil!

Luis Cândido Gomes de Campos, março de 2017

AGRADECIMENTOS

Ao meu pai, Theophilo Benedicto Ottoni Filho, pelo apoio incondicional para conclusão deste trabalho e por incessantemente me fazer lembrar sobre a importância de se desenvolver um trabalho científico com rigor científico, técnico e linguístico. Seu brilhantismo intelectual, bondade, vivacidade, em especial, sua habilidade de conciliar a vida material e espiritual me dão, a cada dia, mais certeza que vale a pena o esforço de se manter alinhado em direção a patamares superiores de evolução.

Ao meu orientador, Professor Otto Corrêa Rotunno Filho, por ter me dado sempre a oportunidade de avançar na minha carreira profissional, acadêmica e pessoal, e por ter, em momentos de turbulência, mostrado alternativas mais suaves e equilibradas de decisão. Agradeço, também, pelo seu incentivo na participação do doutorado sanduíche nos EUA, com suporte do Dr. Yakov Pachepsky (USDA/ARS) e por sua colaboração no livro editado pela Springer *Application of Soil Physics in Environmental Analyses: Measuring, Modelling and Data Integration* e na organização do evento *2nd Brazilian Soil Physics Meeting* realizado em 2013. À minha co-orientadora, Professora Maria Leonor Ribeiro Casimiro Lopes Assad, pelas calorosas discussões sobre o tema da tese e por abrir seu espaço íntimo para acolher minhas incertezas pessoais e profissionais. Agradeço, em especial, pelo apoio no desenvolvimento do banco de dados físico-hídrico em solos brasileiro, o HYBRAS, objeto desta tese, com seu fervoroso apoio.

À CPRM, empresa em que sou funcionária e colaboradora, pelo apoio incondicional ao projeto que coordeno na empresa intitulado "Estudo de Caracterização de Propriedades Hidráulicas em Solos", o qual faz parte da proposta do presente trabalho. Foram mais de cinco anos de uma relação de confiança, investimento profissional e financeiro nesse trabalho. Minha afeição pessoal segue ao amigo dehidiano (nome carinhosamente atribuido aos colaboradores do departamento de hidrologia da CPRM – DEHID) Achiles Monteiro, hoje, em patamares espirituais superiores ao nosso terrestre, porém muito próximo de nossas lembranças. A meu querido amigo e chefe do departamento de hidrologia da CPRM, Frederico Peixinho, pela confiança depositada e pronto atendimento às demandas do projeto que coordeno na empresa. Menção de agradecimento especial vai para minha atual chefe da divisão de hidrologia aplicada e grande amiga Adriana Dantas Medeiros. Nossa relação transcende apenas laços profissionais e de amizade. É um vínculo que afirmo certamente ser espiritual e de

caráter inclusive divino. Obrigada querida por seu pleno apoio durante este período de tese. Não poderia ter concluído este trabalho sem sua presença, dedicação e confiança. Um especial agradecimento segue para a amiga dehidiana Mariana Villas Lobos. Sua palavras de carinho e sustentação me ajudaram a seguir avante no trabalho de tese com mais segurança e determinação. A todos os demais colaboradores do DEHID, meu mais estimado agradecimento pela alegria que me proporcionaram durante esse período de tese. Os risos, brincadeiras e festas de empresa sempre me encheram de grande satisfação e alegria, estando certa de que esses eventos descontraídos e amizade sempre fraterna foram um braço fundamental na conclusão deste trabalho.

Agradecimento especial é direcionado à CAPES pela concessão de bolsa durante os nove meses do período de doutorado sanduíche na USDA/EUA.

Ao Programa de Engenharia Civil (PEC)/COPPE, pelo apoio incondicional ao meu trabalho de pesquisa e incentivo para participação do programa de doutorado sanduíche, com suporte de professores e funcionários técnico-administrativos. Registram-se agradecimentos adicionais, em nome do Laboratório de Recursos Hídricos e Meio Ambiente (LABH2O) do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, ao suporte da FAPERJ, pelo apoio financeiro através dos projetos FAPERJ – processo E-26/103.116/2011 (2012-2014), FAPERJ – Pensa Rio – Edital 34/2014 (2014-2018) – E-26/010.002980/2014 e projeto FAPERJ No. E_12/2015, e ao apoio do CNPq, por meio dos projetos CNPq Edital Universal No. 14/2013 – processo 485136/2013-9 e CNPq Edital No. 12/2016 – processo 306944/2016-2, pelo contínuo apoio à pesquisa científica e tecnológica no Brasil.

Um agradecimento também muito especial direciono às bibliotecárias de todas as bibliotecas que visitei no período de tese, que foram diversas, seja as no Brasil (CNEN, Embrapa Solos, CPRM), como a da gigantesca biblioteca da USDA/EUA, com a qual me encantei. Em todas minhas consultas, recebi total apoio dessas colaboradoras que gentilmente me forneceram os dados solicitados. Um carinhoso e especial agradecimento faço à chefe da biblioteca da CNEN (Comissão Nacional de Energia Nuclear), Sra. Maria Emilia Frade de Mello. Durante quase os mais de dez ano que a conheço, sempre atendeu minhas demandas, que foram muitas, com enorme presteza. Seu amor por sua profissão foi um grande estímulo na minha carreira. Muito obrigada querida!

Agradecimento adicionais são dirigidos a todos os diversos pesquisadores, alunos e professores que gentilmente forneceram suas bases de dados de solos para composição do HYBRAS - banco de dados hidrofísico de solos brasileiros proposto neste estudo. Uma relação muito sumária desse grupo é realizada no Capítulo 2 .

Aos meus grandes amigos do grupo da meditação transcendental, Alessandra Geraldi, Alexandre Portugal, Berenice Brendler, Carlos Fernando Pinto Machado e Silva, Elenice Aparecida Rosa Amaral, Elizabeth Siqueira, Fabiana Geraldi, Filipe Brendler Torres, Gustavo Cerna, Honorato Diogo, Jayme Torres, Julio Farias, Marcelo Geraldi, Marco Monteiro, Maria Natalina Ferreira de Castro, Monica Skacel, Verinha Antoun, Via Negromonte, Sarah Pondé, Valéria Portugal e tantos outros amigos desse grupo, segue meu enorme agradecimento a todos vocês. Foram peças fundamentais ao meu crescimento espiritual.

À Claudia Pereira, minha irmã de alma, segue meu agradecimento por sua amizade, carinho, dedicação e compartilhamento de suas mais profundas confidências.

Ao meu amado namorado, amigo, esposo, pai, Luis Cândido Gomes de Campos, o meu mais sincero agradecimento pelo apoio, compreensão, carinho e amor e aos seus familares pela demonstração de afeição comigo.

Presto meus finais agradecimentos à minha família: meu pai, Theophilo B. Ottoni Filho; minha mãe, Maria de Fatima Vasconcelos Ottoni; minhas irmãs, Ana Vasconcelos Ottoni e Isabel Ottoni Luiz; meus sobrinhos, Gabriela Ottoni Luiz e Rafael Ottoni Luiz; meu cunhado, Rodrigo Alvez dos Santos Luiz. Nenhuma palavra consegue traduzir o amor que sinto por vocês. Um agradecimento formal neste corpo de tese também é insuficiente para expressar minha gratidão. Por isso, prefiro manter o silêncio, estando certa que nesse campo mais poderoso e profundo da vida estaremos sempre ligados.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS BASEADO NA ESTRUTURA DO ESPAÇO POROSO

Marta Vasconcelos Ottoni

Novembro/2017

Orientadores: Otto Corrêa Rotunno Filho
Maria Leonor Ribeiro Casimiro Lopes Assad

Programa: Engenharia Civil

Propõe-se um sistema de classificação dos solos denominado SPSCS (*Soil Pore space-Structural Classification Syste*m) baseado na estrutura do espaço poroso e tendo como base a curva de retenção de água. O SPSCS foi fundamentado no sistema de classificação textural, sendo concebido um triângulo estrutural equivalente ao textural. Nove Ordens e quatro Subordens foram sugeridas, originando 36 Famílias estruturais que agrupam solos com curvas de disponibilidade de ar (A_a) semelhantes. Entende-se A_a como o complemento da curva de retenção em relação ao conteúdo de água na saturação. A metodologia de classificação levou em consideração uma parametrização da equação de van Genuchten para A_a. Simultaneamente, concebeu-se um banco de dados hidrofísicos para solos brasileiros como suporte para a abordagem metodológica proposta, permitindo, adicionalmente, o desenvolvimento de estudos de pedofunções de propriedades hidráulicas em regiões tropicais e temperadas. No contexto do SPSCS, revelou-se, via de regra, um claro padrão de similaridade entre as curvas A_a dentro das Famílias. O sistema foi implementado com sucesso a uma numerosa e diversa base de dados de solos compilada no estudo, sendo todas as Ordens e a maioria das Famílias representadas. A partir de um estudo de relações entre o sistema e características dos solos da base de dados, concluiu-se que o SPSCS se mostrou apto para identificar solos estruturalmente distintos ou semelhantes, em classes pedológicas e texturais análogas ou não. É o caso, dentre outros avaliados, de Ferralsols argilosos que se agruparam nas mesmas Famílias estruturais de solos arenosos. Conclui-se que o SPSCS é ferramenta promissora em estudos hidropedológicos e no desenvolvimento de pedofunções de propriedades hidráulicas.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

SOIL CLASSIFICATION SYSTEM BASED ON THE PORE SPACE STRUCTURE

Marta Vasconcelos Ottoni

November/2017

Advisors: Otto Corrêa Rotunno Filho
Maria Leonor Ribeiro Casimiro Lopes Assad

Department: Civil Engineering

We propose a soil classification system named SPSCS (Soil Pore space-Structural Classification System), which is based on pore space structure and takes into account the water retention curve. SPSCS was designed according to the textural classification system and it conceives a structural triangle equivalent to the textural triangle. Nine Orders and four Suborders were proposed, resulting in 36 structural Families that group soils with similar air availability curves (A_a). A_a is understood as the complement of the water retention curve in relation to the saturated water content. The soil classification methodology took into consideration a parameterization of the van Genuchten equation for A_a. Simultaneously, we conceived a hydrophysical database for Brazilian soils as a support to the proposed methodological approach, allowing also the development of studies on pedotransfer functions for hydraulic properties involving tropical and temperate regions. In the context of SPSCS, we revealed a clear pattern of similarity among A_a curves within Families. The system was successfully implemented in an extensive and diversified soil database compiled in the study, where all soil Orders and most Families were represented. The study of the relationship between the soil classification system and soil characteristics in the database led to the conclusion that the SPSCS was able to confirm soil structural differences or similarities from analogue or distinct pedological and textural classes. Such is the case of clayey Ferralsols grouped in the same structural Families of sandy soils, among other evaluated cases. In conclusion, SPSCS is a promising tool in hydropedological studies and in the development of pedotransfer functions of hydraulic properties.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO 1

1.1 Considerações Gerais 1

1.2 Fundamentos e Justificativas 2

1.3 Objetivos 5

1.4 Contribuição científica 6

1.5 Organização do texto 6

CAPÍTULO 2 – BANCO DE DADOS HIDROFÍSICOS PARA SOLOS BRASILEIROS (HYBRAS) E SEU USO NA AVALIAÇÃO DE FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIAS PARA A RETENÇÃO DE ÁGUA 9

2.1 Introdução 9

2.2 HYBRAS: banco de dados hidrofísicos de solos no Brasil 11

2.2.1 Estrutura da base de dados 11

2.2.2 Coletânea e descrição dos dados 14

2.2.3 Dados hidrofísicos do solo 18

2.2.4 Parâmetros do modelo de VG e seus desempenhos na estimativa dos dados de retenção de água 22

2.3 HYBRAS: Estimativa de seus dados de retenção de água por meio de PTFs 26

2.3.1 Metodologia 26

2.3.1.1 Seleção de PTFs 26

2.3.1.2 Seleção da base de dados e aplicabilidade de PTFs 27

2.3.1.3 Critério de avaliação 27

2.3.2 Resultados e Discussão 28

2.3.2.1 Aplicabilidade das PTFs 28

2.3.2.2 Avaliação das PTFs selecionadas 28

2.4 Conclusões e Recomendações 34

CAPÍTULO 3 – DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PARA A CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

SATURADA USANDO UM BANCO DE DADOS DE SOLOS INTERNACIONAIS 37

3.1 Introdução 37

3.2 Materiais e Métodos 39

3.2.1 Banco de dados de solos 39

3.2.1.1 Banco de dados de calibração e validação 39

3.2.1.2 Descrição do banco de dados 40

3.2.2 Desenvolvimento e avaliação de funções de pedotransferências 44

3.2.2.1 Desenvolvimento de PTFs 44

3.2.2.2 PTFs publicadas na literatura 46

3.2.2.3 Critério de avaliação 47

3.3 Resultados e discussão 48

3.3.1 Calibração e validação dos modelos propostos 48

3.3.2 Validação das PTFs da literatura e comparação dos resultados com o desempenho dos modelos propostos 53

3.4 Conclusão 60

CAPITULO 4 – SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS BASEADO NA ESTRUTURA DO ESPAÇO POROSO. PARTE 1: METODOLOGIA 62

4.1 Considerações Gerais 62

4.2 Introdução 62

4.3 Considerações gerais do SPSCS 65

4.4 Representação das curvas de distribuição do tamanho dos poros e de disponibilidade de ar 66

4.5 Definição das Ordens, Subordens e Famílias estruturais de solo 68

4.6 Procedimento para classificação de solos 74

4.6.1 Protocolo para parametrização da equação de VG 74

4.6.2 Adequação da equação de VG para estimar os dados de retenção de água 75

4.7 Avaliação de curvas-tipo de distribuição do tamanho dos poros por Ordem de solo 77

4.8 Avaliação de curvas-tipo de disponibilidade de ar por Família de solo....85

4.9 Procedimentos para classificação de uma amostra de solo em Famílias estruturais....91

4.10 Conclusões e Recomendações 92

CAPITULO 5 –SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS BASEADO NA ESTRUTURA DO ESPAÇO POROSO. PARTE 2: APLICAÇÃO A UM BANCO DE DADOS DE SOLOS INTERNACIONAIS 96

5.1 Introdução 96

5.2 Enquadramento do banco de dados ao SPSCS....96

5.3 Validação do protocolo de classificação....102

5.3.1 Parametrização do modelo de van Genuchten 102

5.3.2 Caracterização dos solos quanto a qualidade do ajuste do modelo VG....109

5.4 Verificação das curvas estruturais....112

5.5 Conclusão....113

CAPITULO 6 – SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS BASEADO NA ESTRUTURA DO ESPAÇO POROSO. PARTE 3: RELAÇÕES COM CARACTERÍSTICAS DO SOLO 116

6.1 Introdução 116

6.2 Relações com a funcionalidade hídrica....119

6.2.1 Previsão da funcionalidade hídrica dos solos-tipo do SPSCS 119

6.2.2 Validação do SPSCS quanto à funcionalidade hídrica....123

6.3 Relações com diferentes solos 127

6.3.1 Descrição da base de dados 128

6.3.2 Relações das Ordens estruturais com textura para diferentes solos 130

6.3.3 Relações com perfis de Ferralsols....138

6.4 Relações com a densidade do solo e teor de matéria orgânica 142

6.5 Conclusão.....148

CAPITULO 7 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 150

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 154

ANEXO A - BANCO DE DADOS HIDROFÍSICOS EM SOLOS BRASILEIROS (HYBRAS) 179

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Diagrama conceitual mostrando o relacionamento da hidropedologia com outras disciplinas correlatas. Fonte: adaptada a partir de Lin (2012a). 2

Figura 1.2 - Visão esquemática geral da tese. 8

Figura 2.1 - Relacionamento das tabelas do HYBRAS. ns, indica o número de amostras; n, os diferentes métodos de determinação da variável indicada; nth, o número de pares de dados θ-s, onde θ é o conteúdo de água volumétrico e s é a sucção. 12

Figura 2.2 - Distribuição dos locais de amostragem do HYBRAS com dados selecionados de retenção de água no Brasil (1075 amostras).....17

Figura 2.3 - a) Distribuição das amostras de solo do HYBRAS (1075 amostras) no triângulo textural com distinção para os Ferralsols, Acrisols e Nitisols; e b) percentual do número total de amostras do HYBRAS nas diferentes classes texturais. 17

Figura 2.4 - Distribuição das propriedades físico-hídricas dos solos do HYBRAS. A linha interna no retângulo representado no diagrama de caixa indica o valor mediano, e seus extremos, os quartis de 25% e 75%. As barras extremas indicam a variabilidade fora do quartil superior e do quartil inferior (*whiskers* ou fio de bidode). Além desses limites, estão os valores extremos (*outliers*), representados, na figura, por pontos; †As percentagens de carbono orgânico foram convertidas para percentuais de matéria orgânica pelo uso do fator multiplicativo 1,724 (Embrapa, 2011) para 161 amostras; ns - número de amostras; ‡ Seis amostras não representadas contêm valores de Ks=0 cm d^{-1}; § Conteúdo de água na saturação ou porosidade total quando a primeira informação estava indisponível (289 amostras).....19

Figura 2.5 - Média dos valores dos parâmetros da equação de van Genuchten para os solos do HYBRAS (1063 amostras) e para o banco de dados de solos de clima tropical compilado em Hodnett e Tomasella (2002) nas diferentes classes texturais e nos grupos de solos de textura fina, média e grosseira, segundo Cassel *et al.* (1983). 23

Figura 2.6 - Curvas de retenção de água ajustadas pelo modelo de VG para alguns solos do HYBRAS, com os valores da raiz quadrada do erro quadrático médio da amostra ($RMSE_s$). 25

Figura 3.1 - Distribuição das amostras de solo das bases de dados de a) calibração e b) teste no triângulo textural. A linha mais cheia no interior do triângulo textural indica a divisão dos grupos das classes texturais em fino, médio e grosseiro, segundo a proposta de Cassel *et al.* (1983). Esses grupos estão representados nessa sequência, de cima para baixo no triângulo. 42

Figura 3.2 – Acurácia dos modelos propostos por grupos de classes texturais. O número de amostras de calibração é indicado em cada grupo de solos. Valores precedidos por † referem-se ao número de amostras para avaliação da acurácia do modelo WM_{60}. Sem asterisco $p_{paired\ t\text{-}test} \leq 0{,}001$; * $0{,}001 < p_{paired\ t\text{-}tes\ t} \leq 0{,}05$; ** $0{,}05 < p_{paired\ t\text{-}tes\ t} \leq 0{,}10$; *** $p_{paired\ t\text{-}test} > 0{,}10$. 50

Figura 3.3 – Desempenho de validação das PTFs para a base de dados de solos completa (1,077 amostras); † número de amostras para validação do modelo WM_{60}; Sem asterisco $p_{paired\ t\text{-}test} \leq 0{,}001$; * $0{,}001 < p_{paired\ t\text{-}tes\ t} \leq 0{,}05$; ** $0{,}05 < p_{paired\ t\text{-}tes\ t} \leq 0{,}10$; *** $p_{paired\ t\text{-}test} > 0{,}10$. 52

Figura 3.4 – Desempenho de validação das PTFs para solos brasileiros (412 amostras) e europeus (665 amostras); † número de amostras para validação do modelo WM_{60}; Sem asterisco $p_{paired\ t\text{-}test} \leq 0{,}001$; * $0{,}001 < p_{paired\ t\text{-}tes\ t} \leq 0{,}05$; ** $0{,}05 < p_{paired\ t\text{-}tes\ t} \leq 0{,}10$; *** $p_{paired\ t\text{-}test} > 0{,}10$. 52

Figura 3.5 – Desempenho de validação das PTFs para solos brasileiros e europeus, levando em conta as classes texturais: a) solos de textura fina e b) solos de textura média; † número de amostras para validação modelo WM_{60}; Sem asterisco $p_{paired\ t\text{-}test} \leq 0{,}001$; * $0{,}001 < p_{paired\ t\text{-}tes\ t} \leq 0{,}05$; ** $0{,}05 < p_{paired\ t\text{-}tes\ t} \leq 0{,}10$; *** $p_{paired\ t\text{-}test} > 0{,}10$. 52

Figura 3.6 – Acurácia e confiabilidade das PTFs baseadas em textura e densidade do solo em relação às PTFs em função da porosidade efetiva ($Ø_{330}$) ou macroporosidade ($Ø_{60}$), considerando uma base de dados de calibração brasileira com uma base de dados de validação europeia (Caso 1) e vice-versa (Caso 2). 55

Figura 3.7 - Comparação entre os valores medidos e estimados de condutividade hidráulica saturada pelas PTFs de melhor confiabilidade em a) solos brasileiros e b) solos europeus; n – número de amostras, CI – intervalo de confiança a 95% para valores logaritmizados de Ks; linha tracejada indica os limites de CI. 59

Figura 4.1 – Curva esquemática da distribuição do tamanho dos poros; A(s), representada por três classes de tamanho de poros correspondentes às seguintes faixas de sucção: 0-60cm, 60-15000 cm, maior que 15000 cm; W(s) é o grau de saturação ativa; dmax é diâmetro máximo de poro equivalente; valores de sucção s na escala logarítmica. Para fins classificatórios, A(s) é caracterizada apenas na faixa intermediária de sucção 30 cm $\leq s \leq$ 18000 cm. 68

Figura 4.2 – Triângulo estrutural com isolinhas de a) m e b) $\log_{10}\alpha$ (cm^{-1}), e as áreas de abrangência das diferentes faixas de valores de c) m e d) $\log_{10}\alpha$. 69

Figura 4.3 – a) Curvas-tipo de A(s) das Ordens de solos no intervalo de sucção de 60 a 15000 cm, com as correspondentes curvas baricêntricas e extremas, representadas para a malha da Figura 4.2b. Os solos-tipo de menor similaridade com a curva baricêntrica (solos com SDIA>0,075) são representados por uma linha ponto-tracejada; b) Valores das curvas-tipo A(s) escaladas à curva baricêntrica da Ordem. Essas curvas-tipo escaladas são representadas para a malha de pontos da Figura 4.2a, com os valores do índice de dispersão de forma SDI da Ordem (Equação 4.9) e número (No) de solos-tipo modelados em uma Ordem de solo; valores de sucção s na escala logarítmica. 79

Figura 4.4 - Faixa de valores do índice de dispersão de forma da curva A(s) (em %) no triângulo estrutural. 83

Figura 4.5 - Curvas-tipo de disponibilidade de ar das 36 Famílias estruturais no intervalo de sucção de 60 a 15000cm. Os solos extremos e os baricêntricos das Famílias são também representados; valores de sucção na escala logarítmica. 88

Figura 4.6 - Valores das curvas-tipo de disponibilidade de ar escaladas nas 36 Famílias estruturais no intervalo de sucção de 30 a 15000 cm, com a representação das curvas baricêntricas. São também representados os índices de dispersão de forma das Famílias ($SDI_{Familia}$); valores de sucção na escala logarítmica. 89

Figura 4.7 - Faixas de valores do índice de dispersão de forma da curva de disponibilidade de ar (em %) no triângulo estrutural, para as 36 Famílias de solo.....90

Figura 5.1 – Distribuição do percentual das amostras na base de dados do estudo para diferentes faixas de seus valores de ERRORMAX e $RMSE_{30\text{-}18000}$ no grupo dos a) genuínos, b) adotados e c) rejeitados; ns – número de amostras. O número de amostras para ERRORMAX e $RMSE_{30\text{-}18000}$ é diferente pois o indicador $RMSE_{30\text{-}18000}$ não pode ser caracterizado para os 1499 solos europeus especiais. 99

Figura 5.2 – Distribuição das amostras dos solos genuínos no triângulo estrutural nas a) Ordens e b) Famílias do solo, segundo sua origem em termos de ambiente pedogenético; SB1 - Subordem 1, SB2 - Subordem 2, SB3 - Subordem 3, SB4 - Subordem 4.....101

Figura 5.3 – Distribuição do número de amostras de solos genuínos nas Ordens e Famílias estruturais segundo sua origem em termos de ambiente pedogenético. Valor entre parêntesis indica o valor percentual do número de amostras genuínas de uma Família em relação ao total de amostras de solos genuínos (2756); ns - número de amostras; BR - solos brasileiros; EU – solos europeus. 101

Figura 5.4 – Distribuição dos valores de RMSErs dos Casos 1 e 2 em diferentes faixas de sucção nas 1565 amostras de solos do estudo com medições de retenção de água em pelo menos seis pontos de sucção. A distribuição do número de medições nesses intervalos de sucção é também representada.....106

Figura 5.5 – Distribuição dos valores de MErs dos Casos 1 e 2 em diferentes faixas de sucção nas 1565 amostras de solos do estudo com medições de retenção de água em pelo menos seis pontos de sucção. 107

Figura 5.6 – Comparação dos valores de RMSEs entre os Casos 1 e 2, com identificação das amostras de solos com disponibilidade de medições de retenção de água no intervalo de sucção de 0 a 30 cm e com diferenças de RMSEs referentes a esses dois Casos, com valores superiores, em valor absoluto, a 0,0118 $cm^3\ cm^{-3}$, que é o percentil de 90% (linha tracejada) da distribuição acumulada de probabilidade dessas diferenças. 107

Figura 5.7 – Comparação dos valores do conteúdo de água estimados pelos Casos 1 e 2 nas 1565 amostras de solos do estudo com medições de retenção de água em pelo menos seis pontos de sucção.....108

Figura 5.8 – Comparação dos valores dos parâmetros de VG entre os Casos 1 e 2 nas 1565 amostras de solos do estudo com medições de retenção de água em pelo menos seis pontos de sucção. 108

Figura 5.9 - Exemplos de curvas de retenção de água calculados pelo SPSCS no intervalo de sucção de 30 a 15000 cm, e as correspondentes medições na base de dados do estudo, nos grupos dos a) genuinos, b) adotados e c) rejeitados. Apesar de indicadas, as curvas dos solos rejeitados não podem ser associadas a Famílias estruturais, segundo o SPSCS; † F - Famílias; valores de sucção na escala logarítmica. 110

Figura 5.10 – Curvas de disponibilidade de ar por Família estrutural de amostras selecionadas na base de dados do estudo e correspondentes curvas-tipo, curvas-tipo baricêntricas e extremas; valores de sucção na escala logarítmica. 114

Figura 5.11 – Amostras de solos genuinos brasileiros e europeus selecionadas para avaliação das curvas de disponibilidade de ar. 115

Figura 6.1 - Enquadramento das classes de a) capacidades de ar e água; b) permeabilidade (Ks) dos solos-tipo das Famílias estruturais, segundo o SPSCS. 125

Figura 6.2 - Distribuição do percentual de acerto das classes *aw* e de Ks nas Famílias estruturais contendo dez ou mais solos para as amostras das bases de dados consideradas no estudo. 127

Figura 6.3 - Distribuição do banco de dados de solos vulcânicos recentes nas Famílias estruturais; †ns - número de amostras.....129

Figura 6.4 - Distribuição dos solos brasileiros intemperizados (WBR), europeus temperados (TEU) e vulcânicos recentes (VUL) no triângulo estrutural, segundo os grupos de classes texturais grosseira (T1), média (T2) e fina (T3).....132

Figura 6.5 - Distribuição percentual dos solos brasileiros intemperizados (WBR), europeus temperados (TEU) e vulcânicos recentes (VUL) por Ordem estrutural,

em relação ao montante total das amostras avaliadas, levando em conta os grupos de classes texturais grosseira (T1), média (T2) e fina (T3) e as 12 classes texturais segundo USDA. S - areia; LS - areia franca; SL - franco arenoso; L - franco; SCL - franco argilo arenoso; SiL - franco siltoso; Si - silte; SiCL - franco argilo siltoso; SiC - argila siltosa; CL - franco argiloso; C - argila; SC - argila arenosa; † ED - Espaço poroso dominante; OR - Ordem de solo. 133

Figura 6.6 - Comparação de estruturas porosas (representadas pela curva de disponibilidade de ar) para quatro estudos de casos dos bancos de dados de solos brasileiros intemperizados (WBR), europeus temperados (TEU) e vulcânicos recentes (VUL); valores de sucção na escala logarítmica. 136

Figura 6.7 - Localização das amostras de solos dos quatro estudos de casos (Ex1, Ex2, Ex3 e Ex4) para avaliação das relações entre SPSCS, pedogênese e atributos do solo. 138

Figura 6.8 - a) três exemplos de perfis de Ferralsols, FE1, FE2 e FE3, no triângulo estrutural; curvas de disponibilidade de ar em várias profundidades dos perfis b1) FE1; b2) FE2 e b3) FE3; valores de sucção na escala logarítmica.....142

Figura 6.9 - Histograma da distribuição percentual nas Ordens estruturais dos valores de a) densidade do solo e b) teor de matéria orgânica para a base de dados do estudo, com o destaque para os percentuais totais nas classes baixas, moderadas e altas arbitradas para esses atributos do solo (segundo a seção 6.3.2). † OR - Ordem de solo; N_{BD} - número de amostras com valores de densidade do solo (BD); N_{OM} - número de amostras com valores de teor de matéria orgânica (OM). 144

Figura 6.10 - Histograma da distribuição percentual nas Subordens estruturais dos valores de a) densidade do solo e b) teor de matéria orgânica para a base de dados do estudo, com o destaque para os percentuais totais nas classes baixas, moderadas e altas arbitradas para esses atributos do solo (segundo a seção 6.3.2). † SB - Subordem; N_{BD} - número de amostras com valores de densidade do solo (BD); N_{OM} - número de amostras com valores de teor de matéria orgânica (OM). 146

Figura 6.11 - Distribuição percentual dos dados de a) densidade do solo (BD) e b) teor de matéria orgânica (OM) da base de dados do estudo nas quatro Subordens,

levando-se em conta três faixas de valores de densidade do solo e teor de matéria orgânica. O percentual estabelecido em cada Subordem foi definido para o montante total de amostras contidas em cada uma das referidas faixas. SB1 - Subordem 1; SB2 - Subordem 2; SB3 - Subordem 3; SB4 - Subordem 4. 148

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Relação das fontes bibliográficas dos solos do HYBRAS. 15

Tabela 2.2 - Métodos predominantes de determinação das propriedades de solo do HYBRAS. Os limites das frações granulométricas são os do USDA (USDA, 1987). 19

Tabela 2.3 – Valores médios dos dados hidrofísicos do HYBRAS para várias classes texturais e grupos de solos segundo o WRB (WRB, 2015). 21

Tabela 3.1 – Valores médios das propriedades de solo da base de dados de calibração (N=824†/660‡ amostras). Classes texturais com menos de 10 amostras não foram representadas. 43

Tabela 3.2 – Valores médios das propriedades de solo da base de dados de validação (N=1,077†/992‡), considerando os solos brasileiros e europeus. Classes texturais com menos de 10 amostras não foram representadas. 43

Tabela 3.3 - Características das PTFs de Ks e da base de dados de sua calibração. 47

Tabela 3.4 – Acurácia dos modelos propostos de Ks. 49

Tabela 3.5 - Desempenho dos modelos propostos neste estudo para uma base de dados de solos independente do Cerrado brasileiro.....53

Tabela 4.1 – Descrição dos nomes das nove Ordens estruturais de solo e escala correspondente de valores participando das classes de tamanho de poros. 72

Tabela 4.2 – Resumo das características das Ordens e Subordens no SPSCS. 73

Tabela 5.1 - Distribuição na base de dados do estudo dos grupos dos solos genuínos, adotados e rejeitados, e correspondentes percentuais dessa distribuição em relação ao total das amostras. 99

Tabela 5.2 – Indicadores de desempenho dos modelos de parametrização da equação de VG, Casos 1 e 2; N – número de dados de retenção de água. 106

Tabela 5.3 – Percentual de acertos do critério simplificado para representação das amostras em solos genuínos, adotados e rejeitados, tendo como referência o critério completo do SPSCS. 112

Tabela 6.1 – Classes simplificadas de capacidades de ar e água (classes *aw*). 121

Tabela 6.2 - Características dos bancos de dados de solos utilizados no estudo.....130

Tabela 6.3 - Características dos solos dos quatro estudos de casos para avaliação das relações entre SPSCS e atributos do solo.....137

Tabela 6.4 - Características dos perfis de Ferralsols selecionados para avaliação do SPSCS.....141

Tabela 6.5 - Módulo dos coeficientes de correlação de Spearman entre a porosidade ativa e outros atributos do solo, com os valores p de significância da correlação. 147

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

a	Capacidade de ar
A(s)	Grau de aeração ativa em função da sucção s
α, m	Parâmetros de forma de ajuste da equação de VG
A_{60}	Macroespaço ativo
$A_a(s)$	Curva de disponibilidade de ar
BC	Brooks e Corey
BD	Densidade do solo
BR	Solo brasileiro
C	Argila
CL	Franco argiloso
ERRORMAX	Erro máximo absoluto de estimativa dos três pontos experimentais θ_1, θ_2, θ_3
EU	Solo europeu
EU-HYDI	European HYdropedological Data Inventory
FAO	*Food and Agricultural Organization of the United States*
FC	Capacidade de campo (*field capacity*)
HYBRAS	*HYdrophysical database for BRAzilian Soils*
HYPRES	*Hydraulic PRoperties of European Soils*
Ks	Condutividade hidráulica saturada
L	Franco
Ln	Número de medições de retenção de água por amostra de solo
LS	Areia franca
M	Número de amostras com medições de Ks
ME	Erro médio

n	Número de diferentes métodos de determinação dos atributos do solo
N	Número de medições de retenção de água
No	Número de solos-tipo modelados em uma Ordem de solo
ns	Número de amostras do solo
Ns	Número de valores de porosidade ativa
nth	Número de pares de dados θ(s)
NW	Solos não intemperizados (*non-weathered soils*)
$Ø_{330}$	Porosidade efetiva
$Ø_{60}$	Macroporosidade
OC	Conteúdo de carbono orgânico
OM	Conteúdo de matéria orgânica
p	Número de parâmetros da equação de VG
PB	Profundidade da base
PT	Profundidade do topo
PTFs	Funções de pedotransferência
RMSE	Raiz quadrada do erro quadrático médio
RO	Modelo Ks do Rosetta
S	Areia
s	Sucção de água
SB1	Subordem 1
SB2	Subordem 2
SB3	Subordem 3
SB4	Subordem 4
SC	argila arenosa
SCL	Franco argilo arenoso

SDIA	Índice de dispersão de forma da curva A(s) (*shape dispersion index of A curve*)
$SDIA_a$	Índice de dispersão de forma da curva A_a(s) (*shape dispersion index of A_a curve*)
$\overline{SDIA_{a_j}}$	Valor $SDIA_{aj}$ médio da Subordem
$SDI_{Família}$	Valor médio global de $SDIA_a$ para uma Família de solo
SDI_{Ordem}	Valor médio global de SDIA para uma Ordem de solo
Si	Silte
SiBCS	Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
SiC	Argila siltosa
SiCL	Franco argilo siltoso
SiL	Franco siltoso
SL	Franco arenoso
SPSCS	*Soil Pore space-Structural Classification System*
T/S	Distinção entre solo de horizonte superficial (*topsoil*) e subsuperficial (*subsoil*)
T1	solos de textura grosseira
T2	solos de textura média
T3	solos de textura fina
TEU	Solos europeus de clima temperado (*temperate European soils*)
TH	Modelo Ks de Tomasella e Hodnett
TN	Número total de medições de retenção de água por faixa de sucção
TP	Porosidade total (*total porosity*)
UNSODA	Unsaturated Soil Hydraulic Database
VG	van Genuchten

VUL	Solos vulcânicos recentes (*vulcanic soils*)
w	Capacidade de água
W	Solos intemperizados (*weathered soils*)
W(s)	Grau de saturação ativa em função da sucção s
W_{15000}	Microespaço ativo
W_{60}	Grau de saturação ativa na sucção de 60 cm
W_{60}-W_{15000}	Mesoespaço ativo
WBR	Solos brasileiros intemperizados (*weathered Brazilian soils*)
WM_{330}	Modelo baseado na porosidade efetiva
WM_{60}	Modelo baseado na macroporosidade
WM_{sscbd}	Modelo baseado na textura e densidade do solo
WP	Ponto de murcha (*wilting point*)
WRB	*World Reference Base for Soil Resources*
θ	Conteúdo de água volumétrico
θ(15000)	Conteúdo de água volumétrico na sucção de 15000 cm
θ(330)	Conteúdo de água volumétrico na sucção de 330 cm
θ(60)	Conteúdo de água volumétrico na sucção de 60 cm
θ_{15000}	Conteúdo de água na sucção de 15000 cm
θ_{330}	Conteúdo de água na sucção de 330 cm
θ_{60}	Conteúdo de água na sucção de 60 cm
θ_m	Conteúdo de água medido
θ_p	Conteúdo de água predito
θr	Conteúdo de água residual
Φ	Conteúdo de água na saturação

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

Este capítulo aborda os fundamentos e justificativas para a escolha do tema central da tese, expõe os objetivos e delineia as diferentes seções que compõem o documento. Optou-se por redigir o documento em capítulos no formato de artigos científicos. Nesse sentido, por vezes, pode haver algum grau de sobreposição nos textos dos diferentes capítulos, em prol da clareza e do bom entendimento dos artigos. A estrutura proposta permite a leitura sequencial do documento, bem como torna possível ao leitor, alternativamente, a partir desta introdução, acessar os demais capítulos separadamente na ordem de seu interesse.

O objeto central da tese é a proposição de um sistema de classificação de solos baseado na estrutura do espaço poroso, e tem como resultado a caracterização abrangente e analítica dos diferentes arranjos estruturais dos vazios. Entende-se estrutura porosa dos solos como o formato, tamanho e arranjo dos poros no solo (Lal, 1991; Skvortsova e Utkaeva, 2008). A definição desse conjunto de variações estruturais do solo pelo sistema permite estabelecer relações com algumas características do solo, como é o caso das propriedades físico-hídricas. Este trabalho concentra, portanto, substancial atenção no campo científico interdisciplinar da hidropedologia, que busca estabelecer relações do conhecimento pedológico, no que diz respeito à arquitetura dos solos, suas funções e distribuição na paisagem, com aquele obtido no campo da hidrologia que trata dos processos de escoamento no meio poroso e na sua superfície em conjunto com processos de troca de massa e energia com a atmosfera (Lin, 2012a).

A partir da integração dos diferentes campos de conhecimento relacionados aos solos, como mostrado na Figura 1.1, a hidropedologia pretende, num conceito mais amplo, discutir: a) lacunas do conhecimento entre a pedologia e a hidrologia; b) a conexão de multiescalas, do nível microscópico ao macroscópico; c) a transformação dos dados contidos nas bases de dados de levantamento pedológico em informações hidráulicas do solo (Lin, 2003). De acordo com Pachepsky *et al.* (2008), a hidropedologia também discorre sobre a funcionalidade hídrica dos solos em várias escalas pela aplicação da integração de dados, o uso das funções de pedotransferências (PTFs) (Bouma, 1989) e outros modelos.

Apesar da caracterização quantitativa da estrutura porosa dos solos e de sua correspondente funcionalidade hídrica ser tema de relevância na hidropedologia (Lin, 2012a), conforme acima citado, o desenvolvimento de PTFs e de bases de dados hidrofísicos dos solos são assuntos também de destaque (como em Botula, 2013), e esses tópicos serão discutidos nesta tese, segundo enfoque apresentado na seção seguinte.

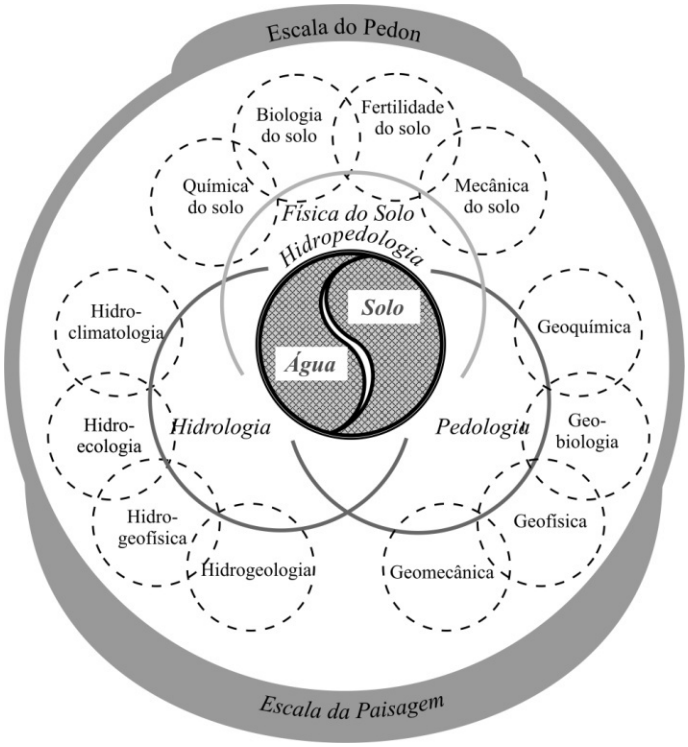


Figura 1.1 - Diagrama conceitual mostrando o relacionamento da hidropedologia com outras disciplinas correlatas. Fonte: adaptada a partir de Lin (2012a).

1.2 Fundamentos e Justificativas

Embora o solo constitua objeto de estudo de diversas áreas da ciência, é difícil reconhecer e caracterizar amplamente a complexidade e a funcionalidade da sua estrutura porosa. Uma justificativa repousa sobre o fato de que essa estrutura apresenta caráter dinâmico, fortemente afetada por atividades biológicas e por práticas de manejo (Ferreira, 2010), e com variabilidade espacial em diversas escalas, condicionada pela diversidade de arranjos e pela composição dos agregados do solo. Por outro lado, nos vazios do solo, dão-se os processos de retenção e fluxos de ar, de água e de nutrientes que permitem a manutenção da vida vegetal e demais organismos que neles residem. Além disso, os poros condicionam inúmeras reações físico-químicas e biológicas envolvendo também a superfície das partículas, viabilizando a imobilização de

contaminantes e de outras substâncias presentes na solução do solo, a absorção de nutrientes pelos vegetais, bem como a própria estruturação da matriz porosa.

Há inúmeras tentativas de se simular matematicamente as funcionalidades dos vazios do solo como ferramenta prática de suporte à decisão (Jarvis *et al.*, 1997). Essas relações matemáticas são potencialmente passíveis de serem inseridas, por exemplo, em modelos de escoamento em meios porosos, hidrológicos, hidrometeorológicos regionais e globais, com parametrizações espaço-temporais que abrangem a macro, meso e microescala (Dooge, 1997). No entanto, um dos grandes desafios desses modelos está na incorporação da descrição da estrutura porosa dos solos, levando em consideração sua complexidade (Entekhaby *et al.*,1999; Vereecken *et al.*, 2015).

Visando, de forma relativamente simplificada, uma avaliação robusta e consistente do arranjo poroso dos solos, empregam-se, muitas vezes, suas propriedades hidráulicas, tais como as curvas de retenção de água e de condutividade hidráulica. A mensuração dessas propriedades, entretanto, também apresenta inconvenientes por demandar elevados custos e tempo para sua execução. Alternativamente, utilizam-se PTFs para estimar, por meio indireto, informações sobre o comportamento hidráulico do solo. Os preditores mais utilizados nessas funções são as frações granulométricas, a densidade do solo e a matéria orgânica (Schaap *et al.*, 2001; Saxton e Rawls, 2006), sendo mais raro o uso de variáveis estruturais do solo, como, por exemplo, o conteúdo de água em diferentes níveis de sucção.

O Brasil assume papel relevante na publicação de PTFs tropicais de retenção de água (Botula *et al.*, 2014), apesar do ainda frequente uso de correspondentes PTFs de clima temperado no país. Em Barros e De Jong van Lier (2014), é realizada extensa revisão sobre PTFs de retenção hídrica desenvolvidas para solos brasileiros. No que se refere às PTFs de condutividade hidráulica saturada (Ks), há poucos registros no Brasil. Constitui exceção, o modelo formulado por Tomasella e Hodnett (1997), desenvolvido para um pequeno número de amostras (124) e englobando poucas regiões do Brasil. Por outro lado, é expressivo o número de modelos de Ks para solos de clima temperado, sendo inexistente, de nosso conhecimento, PTFs de Ks que tenham sido desenvolvidas para ambientes tropicais e temperados conjuntamente. O uso indiscriminado de PTFs de ambiente temperado em solos de clima tropical pode acarretar resultados inconsistentes e enganosos nos estudos de modelagem, por ser reconhecida a existência de diferenças de comportamento hídrico entre solos de ambiente tropical e temperado (Tomasella e

Hodnett, 2004). Com a perspectiva de minimizar esses inconvenientes, torna-se necessário ampliar o conhecimento sobre as interfaces do comportamento físico-hídrico entre solos de clima tropical e temperado.

São diversas as técnicas para se determinar a estrutura dos espaços porosos, sendo algumas delas descritas em capítulos subsequentes. As descrições visuais e qualitativas das unidades porosas e agregados do solo, realizadas em campanhas de levantamentos pedológicos, são exemplos de método direto. A técnica de tomografia computadorizada é a de representação mais precisa dos poros, mas impõe custos elevados, além de demandar mão de obra muito especializada.

A descrição visual acima referida também apresenta restrições. Uma delas refere-se à sua incapacidade em representar, de maneira mais abrangente, as diversas variações de tamanho dos espaços porosos, já que estão limitadas principalmente à avaliação dos macroporos. Outra limitação diz respeito ao tipo de dado representado nessas descrições, de caráter qualitativo, como é o caso da descrição da forma, tamanho e quantidade ou abundância dos poros. Essas limitações restringem o uso desses dados em modelos numéricos e no desenvolvimento de PTFs. Além disso, como as descrições dos poros estão usualmente inseridas em manuais de classificação pedológica de diferentes nacionalidades, é difícil se estabelecer um padrão de descrição para uso amplo.

A definição da curva de retenção de água, apesar de ser um método indireto de representação dos vazios e limitado na caracterização da conectividade dos poros e de seu arranjo espacial, fornece uma evidência sobre a estrutura do espaço poroso em termos de sua distribuição volumétrica. A vantagem do método é que extensos bancos de dados com informações de retenção hídrica encontram-se disponíveis. Por outro lado, as bases de dados são, na sua maioria, provenientes de regiões de clima temperado, carecendo ainda de uma representação mais ampla para solos de clima tropical, entre outros climas. Além da vantagem do mais fácil acesso às informações de conteúdo hídrico, a curva de retenção pode ser convertida na curva da distribuição acumulada do tamanho dos poros pela consideração da teoria clássica da capilaridade. Essa última curva, que cresce com o aumento da sucção ou correspondente diminuição do raio do poro hidratado, é conceitualmente similar à da distribuição do tamanho das partículas. Portanto, é possível pressupor um sistema de classificação estrutural dos vazios dos solos, conceitualmente semelhante ao da classificação textural. Tal sistema

de classificação estrutural traria como benefício uma representação mais abrangente das possíveis variações estruturais do meio poroso. A importância da caracterização desse mapa estrutural pedológico é que, por meio dele, seria possível estabelecer relações entre as estruturas do solo reconhecidas pelo sistema e outras características do solo, como sua funcionalidade e propriedades físicas. O detalhamento dessas relações pode, então, ampliar o conhecimento hidropedológico e lançar luz sobre novas alternativas de se desenvolver PTFs de propriedades hídricas, levando em consideração a estrutura dos solos.

1.3 Objetivos

Face ao exposto, esta tese tem como principal objetivo propor um sistema de classificação dos solos, aqui denominado SPSCS (*Soil Pore space-Structural Classification Syste*m), baseado na estrutura dos seus vazios, a partir da curva de retenção de água no solo.

Com o objetivo de avaliar a aplicabilidade desse sistema e validar sua metodologia, foi compilado, neste estudo, um amplo e diverso banco de dados composto por solos brasileiros e europeus. No caso de solos brasileiros, concebe-se e disponibiliza-se uma estrutura de banco de dados hidrofísicos, uma vez constatada a limitação ou mesmo indisponibilidade dessas informações em bases organizadas e facilmente acessíveis. Um estudo de relações entre o SPSCS e características dos solos, incluindo a funcionalidade hídrica, textura, densidade do solo e teor de matéria orgânica foi, também, elaborado para a base de dados de solos internacionais do trabalho, com o propósito de avaliar o potencial do SPSCS como ferramenta de entendimento hidropedológico. Outros objetivos, de natureza mais específica, foram complementarmente examinados, buscando ampliar o entendimento sobre as interfaces do comportamento físico-hídrico entre solos de clima tropical e temperado, como também confirmar a importância do uso de variáveis relacionadas à estrutura do solo como preditores das propriedades hidráulicas. Assim, em síntese, são objetivos específicos desta tese:

a) avaliar as diferenças de comportamento estrutural entre solos de ambiente tropical e temperado pelo uso de PTFs de retenção de água e de condutividade hidráulica saturada;

b) desenvolver novas PTFs de condutividade hidráulica saturada a partir da base de dados de solos compilada e comparar seus desempenhos com o de outras

pedofunções da literatura; a PTF de melhor desempenho preditor foi escolhida para estimativa da funcionalidade hídrica, no quesito condutividade hidráulica saturada (permeabilidade), pelo sistema de classificação proposto.

1.4 Contribuição científica

A principal contribuição deste trabalho está na proposta do sistema de classificação da estrutura porosa dos solos, o SPSCS, que permite que uma amostra de solos possa ser caracterizada quanto à estrutura dos seus vazios, utilizando métodos analíticos e protocolados.

Outra contribuição deste trabalho, no contexto do SPSCS, é a caracterização mais abrangente das possíveis variações da estrutura dos vazios do solo, com vistas ao estudo das relações entre as classes estruturais de solo reconhecidas pelo sistema com outras características do solo. Essa diretriz possibilita ampliar o conhecimento hidropedológico e estabelecer novas frentes para desenvolvimento de pedofunções das propriedades hidráulicas que levem em consideração a estrutura porosa dos solos.

Estudos de desenvolvimento de pedofunções das propriedades hídricas são recorrentes na literatura, em especial em solos de clima temperado, onde amplos bancos de dados dessas variáveis do solo já se encontram disponíveis. Aproveitando-se do recurso de pedofunções hídricas, propõe-se, como contribuição secundária desta tese, um trabalho de comparação do comportamento estrutural entre solos de clima tropical e temperado, com vistas a identificar os principais constituintes do solo que interferem na distinção de seu comportamento hídrico. Outras contribuições complementares no contexto deste estudo são:

a) propor um amplo banco de dados hidrofísicos de solos brasileiros, de fácil acesso e consulta, com informações de propriedades hidráulicas e dos seus métodos de determinação, além de outros dados secundários, para uso em fins diversos, como a modelagem, projetos de engenharia de água e solo e estudos em mudanças climáticas;

b) aprimorar o desenvolvimento de pedofunções de condutividade hidráulica saturada que considere variáveis estruturais do solo e amplas bases de dados contendo informações de solos de ambiente tropical e temperado conjuntamente.

1.5 Organização do texto

Esta tese está estruturada segundo os objetivos traçados e contribuições previstas, conforme dispostos nas seções 1.3 e 1.4, respectivamente, sendo subdividida

em sete capítulos. Os capítulos foram reunidos em quatro grupos, conforme Figura 1.2, sendo o primeiro grupo associado ao Capítulo 1.

O segundo grupo abrange os Capítulos 2 e 3, que buscam compor e analisar os dados que permitirão avaliar os fundamentos metodológicos e a aplicabilidade do sistema de classificação proposto.

O Capítulo 2 contém uma descrição detalhada da base brasileira de dados de solos, compilada e estruturalmente organizada no contexto deste trabalho. Propõe-se, também, nesse capítulo, um estudo de comparação do comportamento estrutural entre solos de clima tropical e temperado a partir de PTFs de retenção de água da literatura e levando-se em consideração a base de dados de solos brasileiros.

No Capítulo 3, é realizada uma descrição e análise dos dados de condutividade hidráulica saturada (Ks) da base de dados do estudo, composta por solos brasileiros e europeus. São propostas novas PTFs de Ks a partir desses dados, levando-se em consideração informações de textura e variáveis estruturais. Foram, também, efetuadas comparações de desempenho dessas funções propostas com o de outras catalogadas na literatura para a base de dados de validação do trabalho. A PTF de Ks que apresentou melhor desempenho foi selecionada para previsão da condutividade hidráulica saturada pelo sistema de classificação a ser formalmente proposto e discutido no Capítulo 4.

O terceiro grupo de capítulos, com três capítulos, refere-se ao corpo central da tese, o sistema de classificação dos solos segundo a estrutura dos seus espaços porosos. O Capítulo 4 apresenta a metodologia detalhada do sistema. O Capítulo 5 faz uma aplicação do sistema para o banco de dados de solos do estudo, apresentado nos Capítulo 2 e 3. O Capítulo 6 encerra esse bloco com estudos das relações entre o sistema e características do solo.

Ao final, o quarto grupo inclui o Capítulo 7, que constitui o bloco que conclui as reflexões finais da pesquisa, contemplando o resumo dos resultados principais deste estudo e algumas recomendações para oportunos trabalhos futuros.

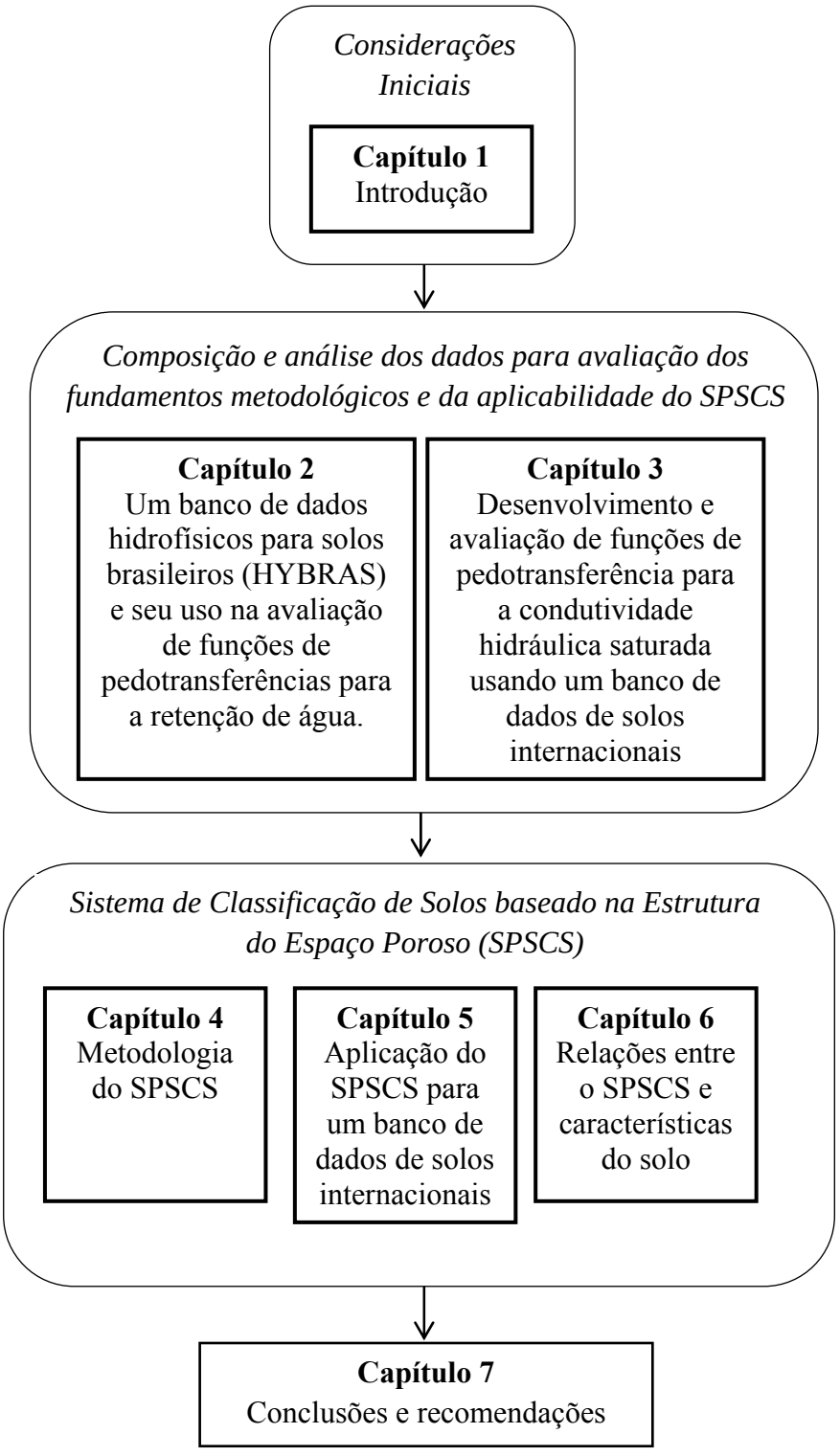


Figura 1.2 - Visão esquemática geral da tese.

CAPÍTULO 2 – BANCO DE DADOS HIDROFÍSICOS PARA SOLOS BRASILEIROS (HYBRAS) E SEU USO NA AVALIAÇÃO DE FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIAS PARA A RETENÇÃO DE ÁGUA

2.1 Introdução

Dados de retenção de água no solo são fundamentais em estudos de modelagem em solos. Sua mensuração direta demanda elevados custos e laboriosos trabalhos de campo, tornando inviável sua execução para grandes áreas. Como resultado, tem crescido o desenvolvimento e o emprego de funções de pedotransferências (PTFs) (Bouma, 1989) para predição de informações de retenção de água a partir de atributos de solos rotineiramente medidos e facilmente disponíveis.

O Brasil desempenha papel relevante na publicação de PTFs tropicais de retenção de água (Botula *et al.*, 2014). Barros e De Jong van Lier (2014) fizeram extensa revisão sobre PTFs de retenção de água em solos brasileiros. Essas PTFs podem ser utilizadas para estimar água disponível a partir da predição da capacidade de campo e do ponto de murcha, e seu uso está usualmente restrito a um determinado tipo de solo ou região geográfica (Barros and De Jong van Lier, 2014). Conforme nosso conhecimento, com respaldo adicional segundo Barros e De Jong van Lier (2014), os estudos de Tomasella e Hodnett (1998), Tomasella *et al.* (2000), Tormena e Silva (2002), Tomasella *et al.* (2003), Mello *et al.* (2005), Fidalski e Tormena (2007), Silva *et al.* (2008), Fiorin (2008), Barros *et al.* (2013) e Medrado e Lima (2014) são as principais publicações voltadas ao desenvolvimento de PTFs para os parâmetros da curva de retenção de água no Brasil, as chamadas PTFs paramétricas, que podem ser diretamente utilizadas por modelos matemáticos (Patil and Singh, 2016). As PTFs acima foram geradas para limitadas bases de dados e/ou específicas regiões geográficas, e alguns de seus preditores não são facilmente acessíveis, como a umidade equivalente, utilizada em Tomasella *et al.* (2000, 2003). Como esses fatores limitam o uso das PTFs brasileiras paramétricas em estudos de modelagem em solos, PTFs de clima temperado são frequentemente utilizadas em solos brasileiros.

Uma das principais razões para avanços não muito expressivos na produção e no uso de PTFs no Brasil comparativamente à geração e ao emprego em regiões temperadas reside no fato de ainda não estar disponível, no país, uma base organizada de dados físico-hídricos de solos (Barros and Lier, 2014). O estudo de Ottoni *et al.* (2014) indica, no entanto, a viabilidade do desenvolvimento de um banco hidrofísico

abrangente e representativo para solos brasileiros a partir do inventário de 52 publicações com informações disponíveis de propriedades físico-hídricas. Mais recentemente, foi lançado o Sistema de Informações de Solos Brasileiros, BDSOLOS[1], reunindo dados de perfis e amostras de solos, provenientes de todas as regiões do Brasil. As informações de mensurações de propriedades hídricas são, no entanto, praticamente inexistentes nesse banco de dados. Por exemplo, apenas 14 registros foram encontrados com informações de retenção de água em ampla faixa de sucção (0-15000 cm). Em solos de ambiente temperado, há alguns extensos bancos de dados físico-hídricos, tais como o UNSODA (Nemes *et al.*, 2001) e, mais recente, o EU-HYDI (Tóth *et al.*, 2015).

O uso indiscriminado das PTFs elaboradas para solos de clima temperado em solos de ambiente tropical pode induzir a que se produzam resultados inconsistentes nos estudos de modelagem e tomadas de decisão inadequadas ou incorretas (Botula *et al.*, 2012). As PTFs de regiões temperadas podem não representar as funcionalidades hidráulicas típicas de solos de clima tropical, como o comportamento híbrido dos Latossolos, solos intemperizados com predomínio de argilas cauliníticas e minerais oxídicos (Tomasella e Hodnett, 2004). Além disso, as PTFs de regiões temperadas praticamente não cobrem a faixa de teores de argila usualmente presentes nos Latossolos de ambiente tropical (Tomasella e Hodnett, 2004). Hodnett e Tomasella (2002) e Minasny e Hatermink (2011) registram também outras diferenças relevantes entre os solos de clima tropical e temperado, como as que envolvem a sua densidade do solo e a capacidade de troca catiônica. Tomasella *et al.* (2000), Tomasella e Hodnett (2004), Reichert *et al.* (2009), Botula *et al.* (2012) e Nguyen *et al.* (2015a) confirmam essas diferenças pelo desempenho superior das PTFs de solos de ambiente tropical em relação ao das PTFs de clima temperado na estimativa de algumas propriedades hídricas de seus solos tropicais. Manyame *et al.* (2007) comentam, por outro lado, que, para solos de regiões tropicais de textura arenosa na Nigéria, as PTFs de ambiente temperado podem ser usadas para modelar suas propriedades hidráulicas com razoável confiabilidade. Botula *et al.* (2012) destacam, também, a boa capacidade de predição das PTFs de ambientes temperados de Schaap *et al.* (2001) na estimativa da capacidade de campo e do ponto de murcha em solos africanos tropicais. Assim, a ampliação do conhecimento sobre as interfaces do comportamento físico-hídrico entre solos de clima tropical e temperado faz-se necessária, o que pode aumentar o entendimento das

[1] http://www.bdsolos.cnptia.embrapa.br/consulta_publica.html

interações entre os processos pedogenéticos e hidráulicos, além de ajudar a esclarecer a abrangência de uso das PTFs. Portanto, são necessários, no Brasil, estudos comparando o desempenho preditivo das PTFs brasileiras de retenção de água com as PTFs desenvolvidas para solos de clima temperado, utilizando uma ampla e independente base de dados de solos brasileiros e cobrindo diferentes tipos de solos e regiões. Tomasella *et al.* (2000) foi um dos trabalhos pioneiros nessa direção. Reichert *et al.* (2009) e Medeiros *et al.* (2014) também desenvolveram trabalhos nessa linha. No entanto, as bases de dados de solos independentes utilizadas nos dois últimos estudos estão limitadas a certas regiões geográficas do Brasil, notadamente o estado do Rio Grande do Sul e a região Amazônica, respectivamente. Adicionalmente, os estudos de Tomasella e Medeiros usaram um número restrito de amostras de solos na validação de suas PTFs (113 e 67 amostras, respectivamente).

Os objetivos do estudo conduzido neste capítulo foram: i) apresentar um banco de dados físico-hídricos de solos para o Brasil; ii) utilizar a base de dados para comparar o desempenho das estimativas de retenção de água baseadas no desenvolvimento de PTFs para solos brasileiros e de clima temperado.

2.2 HYBRAS: banco de dados hidrofísicos de solos no Brasil

O banco de dados hidrofísicos de solos no Brasil (HYBRAS - *HYdrophysical database for BRAzilian Soils*) é uma iniciativa do Departamento de Hidrologia do Serviço Geológico do Brasil (CPRM, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais), com o suporte da Universidade Federal do Rio de Janeiro. O principal objetivo do projeto HYBRAS foi prover dados hidrofísicos consistentes e de boa qualidade apropriados para o desenvolvimento de PTFs. O projeto HYBRAS desenvolveu-se entre 2011 e 2015, contando com a colaboração de pesquisadores nacionais e internacionais.

O HYBRAS 1.0 (versão 1) buscou consolidar os dados de retenção de água e de condutividade hidráulica saturada (Ks), associados aos atributos básicos de solo e aos métodos de determinação dessas propriedades. A inclusão de medições de condutividade hidráulica não saturada está prevista para uma versão futura. O HYBRAS encontra-se em meio digital (em DVD), em anexo neste documento (Anexo A).

2.2.1 Estrutura da base de dados

O banco de dados do HYBRAS foi desenvolvido em Microsoft Access-2007®. A estrutura do banco de dados (Figura 2.1) baseou-se prioritariamente no HYPRES (Wösten *et al.*, 1999) e parcialmente no UNSODA (Nemes *et al.*, 2001). Os campos e as

descrições das tabelas, assim como seus nomes, estão em inglês, embora o conteúdo dos registros esteja em português, pois a proposta é tornar o HYBRAS um banco de dados de amplo e irrestrito acesso.

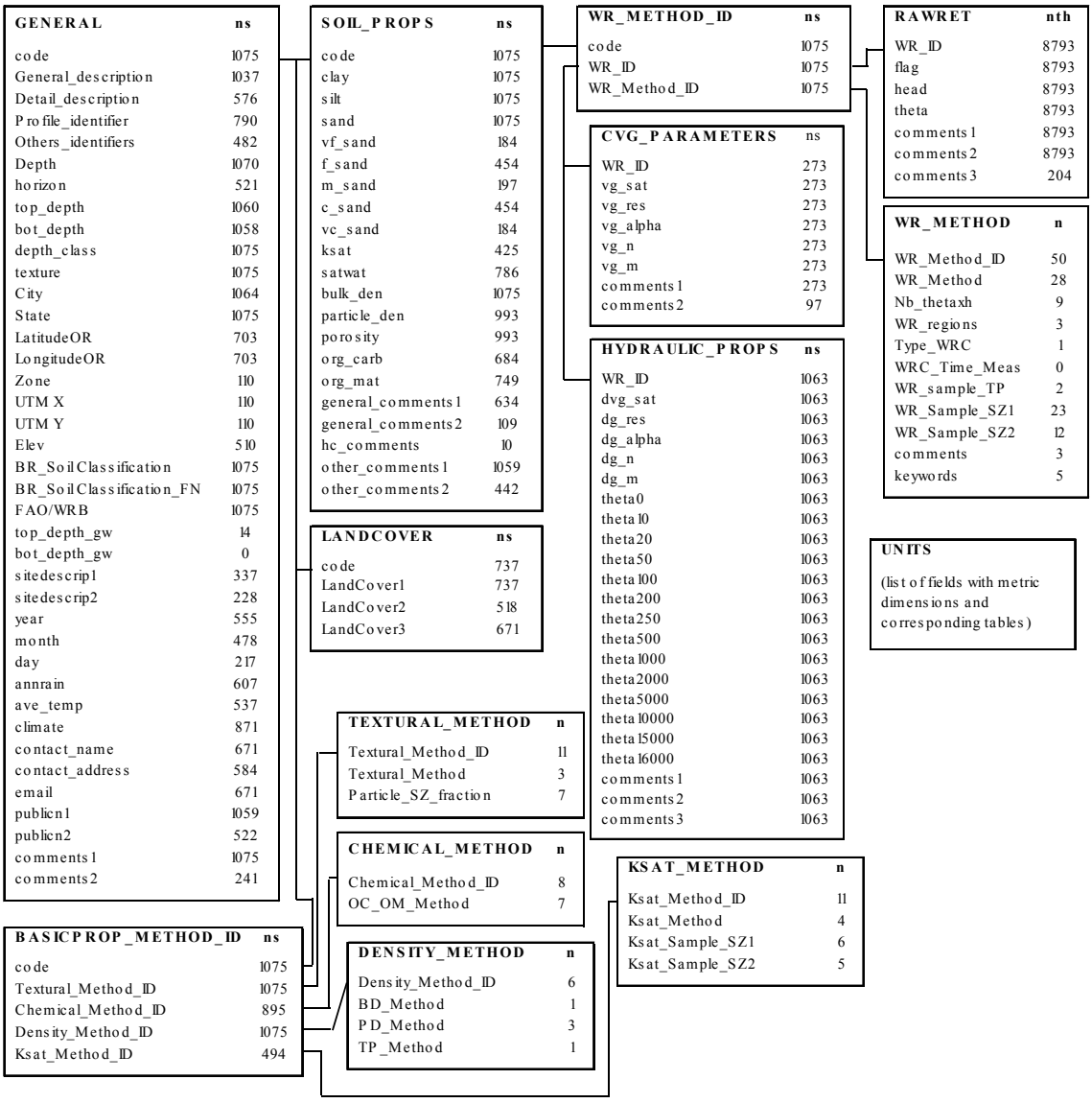


Figura 2.1 - Relacionamento das tabelas do HYBRAS. ns, indica o número de amostras; n, os diferentes métodos de determinação da variável indicada; nth, o número de pares de dados θ-s, onde θ é o conteúdo de água volumétrico e s é a sucção.

O HYBRAS possui, atualmente, 14 tabelas para armazenar os dados, cada uma contendo um conjunto de campos lógicos que podem estar relacionados. A codificação das amostras de solo é dada pelo campo "code", presente em quase todas as tabelas do banco de dados, e por meio do qual são usualmente conectadas. A esse campo, são atribuídos valores numéricos inteiros. A estrutura de cada tabela e os nomes, tipo de

dados e descrição de cada campo da tabela podem ser acessados pela abertura de uma tabela no modo *Design*. Todos os campos não preenchidos são representados pelo valor NULL, com exceção dos campos vazios das tabelas de descrição dos métodos de determinação de atributos dos solos, esses registrados com a sequência 999.

O corpo principal da base de dados é composto pela tabela GENERAL, onde estão referenciadas as informações gerais de cada amostra de solo (localização, classificação pedológica, descrição dos perfis de solo, entre outras). Atributos físicos das amostras encontram-se relacionados na tabela SOIL_PROPS, além da condutividade hidráulica saturada, umidade de saturação e porosidade total. A tabela LANDCOVER faz a descrição de classes de cobertura do solo, hierarquizadas em três níveis. O primeiro nível segue os critérios de classificação do primeiro nível categórico do sistema de classificação de uso e cobertura de solos do sistema europeu LUCAS-*Land Use/Cover Area Frame Survey* (European Commission, 2009). O segundo e terceiro níveis de hierarquização caracterizam, respectivamente, o tipo de cultivo e o tratamento experimental de amostragem do solo. A motivação para organização desse tipo de dado é a sua capacidade em possivelmente aprimorar as estimativas de propriedades hidráulicas por meio de PTFs estabelecidas por classes de cobertura de solos.

Os dados de conteúdo volumétrico de água (θ) para diferentes valores de sucção (s, estabelecido como positivo) são armazenados na tabela RAWRET. Os resultados dos parâmetros da equação de van Genuchten (VG) (van Genuchten, 1980) registrados na publicação de origem foram compilados na tabela CVG_PARAMETERS, juntamente com a metodologia de ajuste dos parâmetros. A tabela HYDRAULIC_PROPS agrupa os valores dos parâmetros de VG otimizados aos dados de retenção de água contidos em RAWRET, como também os respectivos θ calculados para valores de s pré-determinados e a metodologia de ajuste dos parâmetros. Os dados das três tabelas descritas neste parágrafo são identificados por códigos não numéricos descritos no campo “WR_ID”, o qual permite vinculação dos demais campos dessas três tabelas ao campo “code” (Figura 2.1). Embora HYBRAS não contenha medições da curva de condutividade hidráulica não saturada, essa propriedade hidráulica do solo pode ser preliminarmente estimada pelos parâmetros da curva de retenção de água e por dados de Ks utilizando o modelo tradicional de Mualem-van Genuchten (van Genuchten, 1980).

As tabelas de métodos de determinação dos atributos e propriedades hidráulicas de solo são de dois tipos, um que agrupa os campos de códigos e o outro que reúne as descrições dos métodos de mensuração. As Tabelas BASICPROP_METHOD_ID e WR_METHOD_ID contêm os campos dos códigos, a primeira referente aos atributos básicos de solos e a segunda aos dados de retenção de água. As descrições dos métodos estão representadas nas tabelas KSAT_METHOD, TEXTURAL_METHOD, DENSITY_METHOD, CHEMICAL_METHOD, WR_METHOD. Os dados dessas cinco últimas tabelas são também identificados por um campo específico de códigos, nomeados com a terminação "Method_ID", a partir do qual as tabelas BASICPROP_METHOD_ID e WR_METHOD_ID estão ligadas (Figura 2.1). Algumas tabelas auxiliares foram incluídas no HYBRAS. A tabela UNITS faz a declaração das unidades de medida dos campos numéricos presentes na base de dados. Duas tabelas adicionais "Example_Query1_general_information" e "Example_Query2_WRdata" foram inseridas para auxiliar no caso de necessidade de ser realizada pesquisa. Para fazer essa consulta, o usuário deve selecionar uma dessas tabelas de consulta no modo *Design*, inserindo ou excluindo, em seguida, os campos e tabelas de interesse. Ao fim da consulta, será exibido o resultado final da pesquisa no modo "Folha de Dados".

2.2.2 Coletânea e descrição dos dados

Os dados do HYBRAS foram extraídos de publicações inventariadas no trabalho de Ottoni *et al.* (2014), além de outras fontes (Tabela 2.1). A seleção das amostras de solos levou em consideração alguns critérios: serem amostras indeformadas e terem medições de pelo menos cinco pontos da curva de retenção numa larga faixa de sucção (0-15000cm), sendo essas medições realizadas por métodos onde a pressão de água e a umidade da amostra fossem diretamente mensuradas (como é o caso do método da placa porosa em câmara de pressão). Para garantir que os pontos da curva de retenção estivessem bem distribuídos ao longo da faixa de sucção, um ponto foi sempre para condições de saturação (a umidade de saturação ou a porosidade total); outros três pontos tinham que estar, respectivamente, nos seguintes intervalos de sucção: 30-80 cm, 250-500 cm e 9000-15000 cm; um quinto ponto não deveria ser incluso em qualquer das faixas acima, não havendo restrições quanto à sucção dos demais pontos da curva. Além disso, os dados da amostra deveriam conter informações sobre os percentuais de areia, silte e argila e sobre a densidade do solo.

Tabela 2.1 - Relação das fontes bibliográficas dos solos do HYBRAS.

Trabalhos	Estados	ns†
Aguiar (2008)	Ceará, Minas Gerais	6
Andrade (1987)	Minas Gerais	5
Araujo Junior *et al.* (2011)	Minas Gerais	45
Azevedo (1976)	Minas Gerais	10
Barcelos (1996)	Rio Grande do Sul	9
Bhering (2007)	Rio de Janeiro	9
Carducci *et al.* (2011)	Goiás	10
Cintra e Libardi (1998)	Sergipe	5
Coelho *et al.* (2005a), Coelho *et al.* (2005b)	Amazonas	35
Base de dados Cooper‡	São Paulo	76
Costa e Libardi (1999), Costa (1986)	São Paulo	10
Costa (1993)	Rio Grande do Sul	23
Embrapa/FAO (1991)	Maranhão, Pará	62
Ferreira (2007)	São Paulo	55
Grego *et al.* (2011)	São Paulo	15
Leal (2011)	Rio de Janeiro	50
Lumbreiras (1996)	Maranhão	20
Macedo (1991)	Rio de Janeiro	45
Marques *et al.* (2010)	Amazonas	25
Moreira e Silva (1987)	Pernambuco	5
Nacif (1994), Nacif *et al.* (2008)	Bahia	20
Nebel *et al.* (2010), Parfitt (2009)	Rio Grande do Sul	100
Neuwald (2005)	Santa Catarina	75
Parfitt (2009)	Rio Grande do Sul	99
Rojas (1998)	Rio Grande do Sul	36
Scardua (1972)	São Paulo	12
Silva *et al.* (2005), Silva (2003)	Rio Grande do Sul	16
Souto Filho (2012)	Mato Grosso do Sul	12
Souza e Souza (2001)	Bahia	36
Base de dados Stone §	Goiás	88
Thurler (2000)	Espírito Santo, Rio de Janeiro	13
Toma (2012)	São Paulo	15
Vasconcellos (1993)	Rio Grande do Sul	33
	Total	1075

†número de amostras de solos com dados de retenção de água; ‡ dados cedidos por Miguel Cooper, de ESALQ, Universidade de São Paulo, Brasil; § dados cedidos por Luis Fernando Stone, da EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Arroz e Feijão, Goiás, Brasil.

Aproximadamente 9000 amostras foram inventariadas, principalmente fruto de pesquisa em cerca de 60 trabalhos científicos (Ottoni *et al.*, 2014), sendo a maioria delas descartadas por não atenderem os critérios acima descritos. Os dados de solos selecionados encontravam-se em diferentes formatos, em meio impresso ou digital. A padronização dessas informações foi realizada segundo a estrutura proposta para o HYBRAS, a partir da qual os dados foram consistidos (a metodologia de consistência dos dados não é apresentada neste trabalho). O HYBRAS 1.0 comporta aproximadamente 16 Megabytes de dados com 445 locais (ou perfis) amostrados e correspondentes 1075 amostras de solos, muito das quais georreferenciadas (813 amostras), representando 15 estados brasileiros das 26 unidades federativas existentes e

11 grupos de solos de acordo com o *World Reference Base for Soil Resources* (WRB) (WRB, 2015). A classificação dos perfis de solos do HYBRAS nos grupos de solos do WRB foi efetuada por equivalência aproximada com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, seguindo a correspondência indicada em Santos *et al.* (2013a, páginas 340-341). Seria possível agrupar apenas 588 amostras para o banco de dados do HYPRES (Wösten *et al.*, 1999) caso fossem aplicados os mesmos critérios de seleção das amostras do HYBRAS. Essa comparação mostra o potencial do HYBRAS quanto ao agrupamento de dados de retenção de água numa faixa ampla de sucção (0-15000 cm).

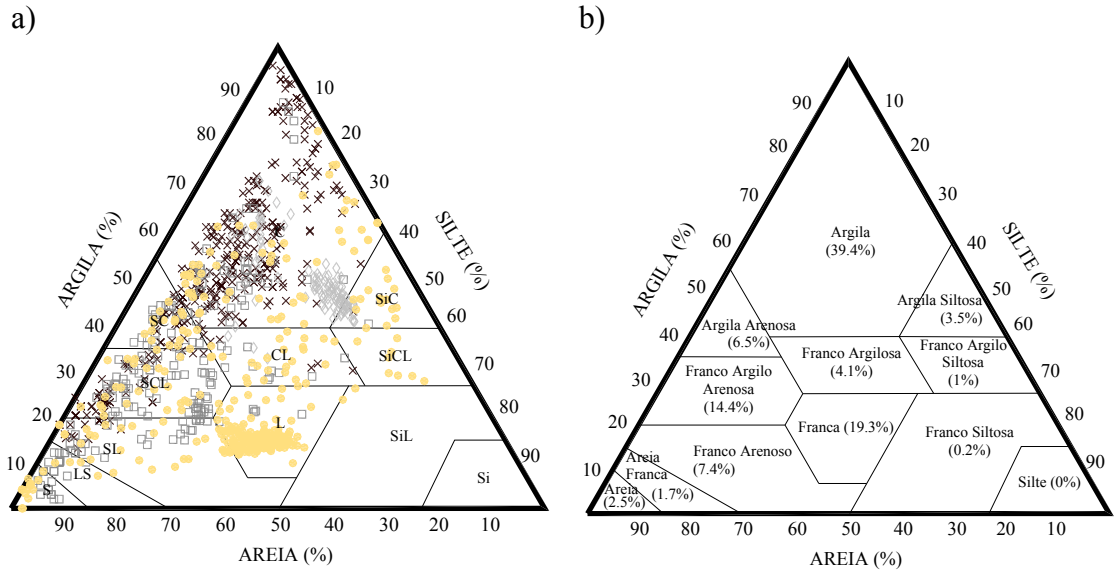
A Figura 2.2 mostra a localização geográfica dos locais de amostragem do HYBRAS com a identificação do número de amostras por estado. Os estados de maior expressão de dados são o Rio Grande do Sul, São Paulo, Rio de Janeiro, três regiões onde se concentram importantes centros de pesquisas pedológicas no país. Os tipos de solos predominantes no HYBRAS, segundo o sistema da WRB (WRB, 2015), foram os Ferrasols (355 amostras), Acrisols (209 amostras) e Nitisols (108 amostras), solos representativos de ambientes tropicais intemperizados, os dois primeiros predominantes no Brasil, cobrindo cerca de 60% do seu território (Ottoni *et al.*, 2014). Planosols (192 amostras), Gleysols (82), Cambisols (69), Phaeozems[2] (28), Podzols (16), Histosols (8), Regosols (6) e Fluvisols (2) também foram representados. A plotagem dos solos brasileiros intemperizados no triângulo textural, conforme a Figura 2.3a, mostra um agrupamento majoritário na faixa de baixo teor de silte (<20%), conforme também destacado por Oliveira (1968) apud Tomasella *et al.* (2000) para seus solos de ambiente tropical. As demais amostras do HYBRAS (403 amostras) foram também registradas no triângulo textural, além da identificação do percentual do número total de amostras (1075 amostras) em cada uma das classes texturais (Figura 2.3b). Apesar da baixa representatividade de solos de textura mais grosseira (areia e areia franca) no HYBRAS, a presença de Arenosols e de outros solos com elevado teor de areia não é rara no país. Solos com alto teor de silte (acima de 50%) foram mal representados no HYBRAS, pois

[2] Segundo o SiBCS (Santos *et al.*, 2013a, pg. 340), os Chernossolos da classificação brasileira correspondem a Chernozems, ou Kastanozems ou Phaeozems no Sistema WRB. Considerando as carcaterísticas de cada um deles, estima-se que no Brasil predominem os Phaeozems, que apresentam uma camada superficial rica em matéria orgânica bem espessa, sem camada de deposição de carbonatos de cálcio, por serem mais lixiviados, em climas quentes e úmidos. Como não é objetivo deste trabalho fazer reclassificação de amostras de solos inventariadas, optou-se por adotar a classificação mais provável.

são muito pouco frequentes nas condições brasileiras (Benedetti *et al.*, 2008; Leão, 2016).



Figura 2.2 - Distribuição dos locais de amostragem do HYBRAS com dados selecionados de retenção de água no Brasil (1075 amostras).



Legenda:

× FERRALSOLS
□ ACRISOLS
◊ NITISOLS
● OUTROS SOLOS

C - Argila, SC - Argila Arenosa, CL - Franco Argilosa, SCL - Franco Argilo Arenosa, SL - Franco Arenoso, LS - Areia Franca, S - Areia, L - Franca, SiC - Argila Siltosa, SiCL - Franco Argilo Siltosa, SiL - Franco Siltosa, Si - Silte

Figura 2.3 - a) Distribuição das amostras de solo do HYBRAS (1075 amostras) no triângulo textural com distinção para os Ferralsols, Acrisols e Nitisols; e b) percentual do número total de amostras do HYBRAS nas diferentes classes texturais.

2.2.3 Dados hidrofísicos do solo

A base de dados HYBRAS apresenta métodos consistentes e bem definidos de medição das propriedades do solo (Tabela 2.2). As variáveis de solo abrangeram uma grande cobertura de valores (Figura 2.4), englobando as faixas de valores dos atributos correspondentes registradas por outras fontes bibliográficas em solos brasileiros (Assad *et al.*, 2001; Tomasella *et al.*, 2003; Reichert *et al.*, 2009; Costa *et al.*, 2013; Barros *et al.*, 2013; Medeiros *et al.*, 2014; Medrado and Lima, 2014). Complementarmente, observe-se que as amplitudes das faixas de valores dos dados ficaram muito próximas daquelas do trabalho de Hodnett e Tomasella (2002), que levou em consideração solos de clima tropical do mundo. Esses fatores reforçam a representatividade dos dados do HYBRAS e seu potencial de gerar PTFs de retenção de água.

Solos com elevado teor de matéria orgânica (>6%) e baixa densidade (<0,8 g cm^{-3}) foram pouco representados no HYBRAS, assim como aqueles com alto teor de silte (>50%) (Figura 2.4), conforme já anunciado. Valores médios das propriedades fisicas e hidráulicas da base de dados do HYBRAS para as várias classes texturais e grupos de solos de referência de acordo com o WRB (WRB, 2015) são mostrados na Tabela 2.3. Embora a condutividade hidráulica saturada tenha sido representada em apenas 425 amostras, seus dados cobriram uma extensa amplitude de valores (Figura 2.4). A média geométrica de Ks para solos brasileiros de textura argilosa foi de 65 cm d^{-1} (Tabela 2.3), valor esse altamente contrastante com a faixa usual de Ks de 2-5 cm d^{-1} reportada na literatura para os solos argilosos de clima temperado (Tietje e Hennings, 1996; Rawls, 2004). O valor médio de água disponível, arbitrariamente determinada pela diferença entre a capacidade de campo e ponto de murcha, foi baixo, na ordem de 0,07 cm^3cm^{-3} (média para 896 amostras). Nesse caso, foram também adotados arbitrariamente os conteúdos de água clássicos nas sucções de 330 cm e 15000 cm para expressar a capacidade de campo e o ponto de murcha, respectivamente. Esse resultado para água disponível foi próximo ao registrado em Batjes (1996) para Ferralsols de textura fina (0,08 cm^3cm^{-3}).

Tabela 2.2 - Métodos predominantes de determinação das propriedades de solo do HYBRAS. Os limites das frações granulométricas são os do USDA (USDA, 1987).

Propriedade do Solo	ns – número de medições	Método de Determinação Predominante	Percentual
Condutividade hidráulica saturada	425	Permeâmetro de carga constante	80%
Frações granulométricas	1075	Pipeta	67%
		Densímetro	27%
Carbono orgânico	910	Walkley e Black (1934) por titulação	85%
Densidade das partículas	1075	Balão volumétrico e picnômetro	91%
Densidade de solo	1075	Anel volumétrico	100%
Curva de retenção de água	1075	Mesa de tensão para sucções entre saturação e 60 cm e placa porosa em câmara de pressão para sucções superiores.	60%
		Placa porosa em câmara de pressão para a faixa de sucção completa	22%

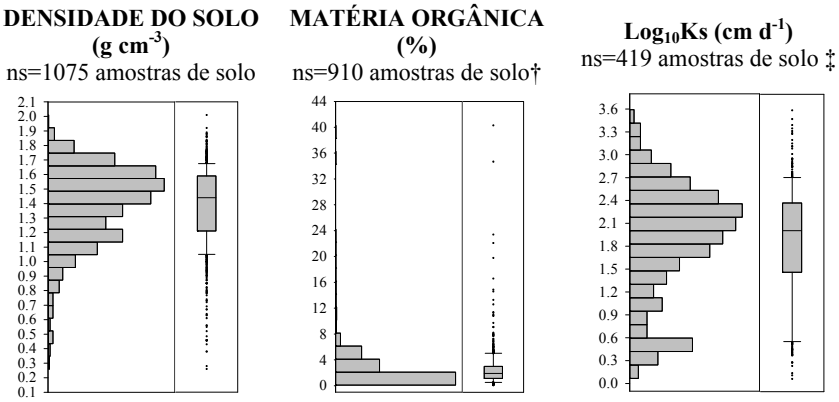


Figura 2.4 - Distribuição das propriedades físico-hídricas dos solos do HYBRAS. A linha interna no retângulo representado no diagrama de caixa indica o valor mediano, e seus extremos, os quartis de 25% e 75%. As barras extremas indicam a variabilidade fora do quartil superior e do quartil inferior (*whiskers* ou fio de bidode). Além desses limites, estão os valores extremos (*outliers*), representados, na figura, por pontos; †As percentagens de carbono orgânico foram convertidas para percentuais de matéria orgânica pelo uso do fator multiplicativo 1,724 (Embrapa, 2011) para 161 amostras; ns - número de amostras; ‡ Seis amostras não representadas contêm valores de Ks=0 cm d^{-1}; § Conteúdo de água na saturação ou porosidade total quando a primeira informação estava indisponível (289 amostras).

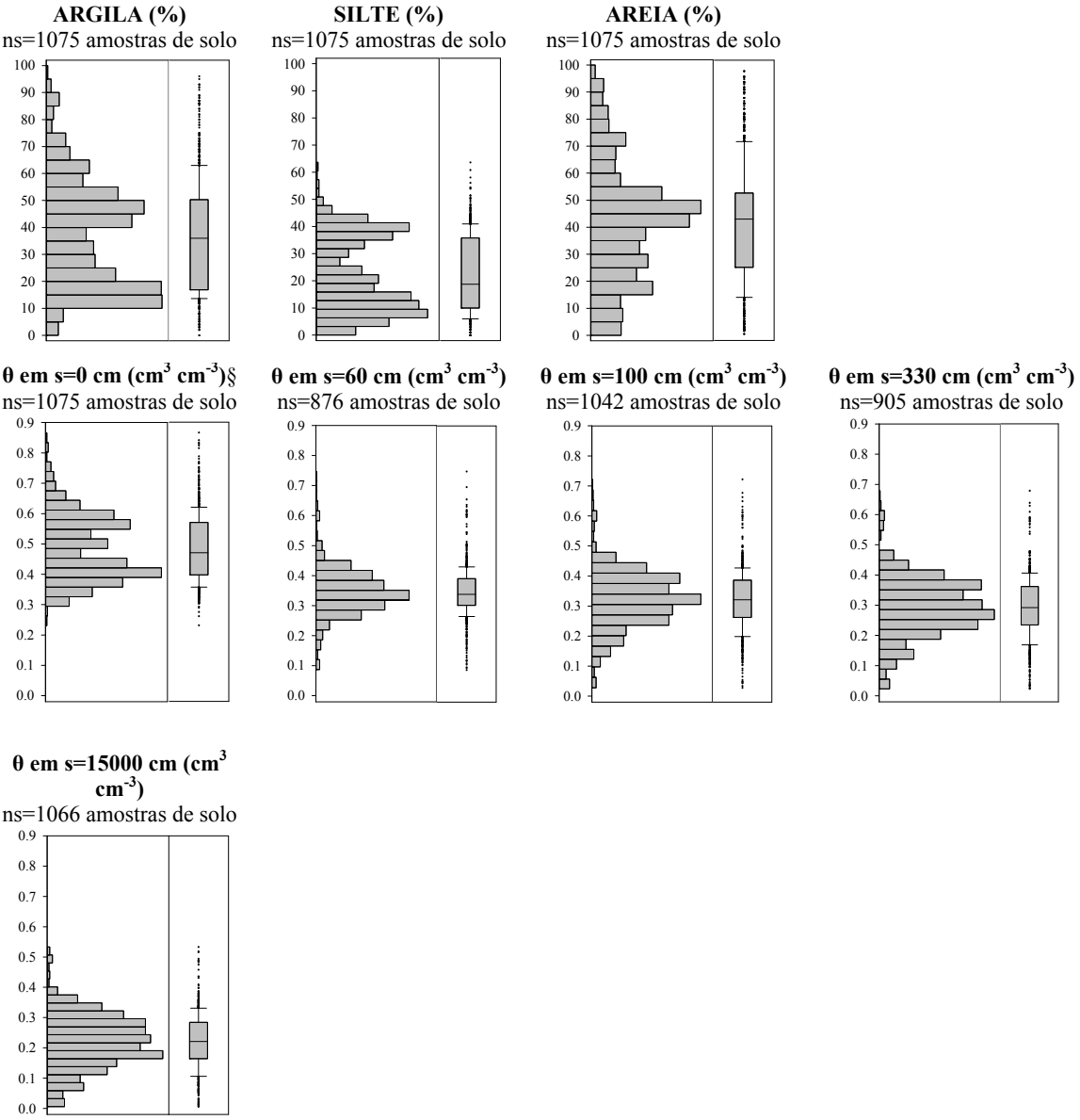


Figura 2.4 - Distribuição das propriedades físico-hídricas dos solos do HYBRAS. A linha interna no retângulo representado no diagrama de caixa indica o valor mediano, e seus extremos, os quartis de 25% e 75%. As barras extremas indicam a variabilidade fora do quartil superior e do quartil inferior (*whiskers* ou fio de bidode). Além desses limites, estão os valores extremos (*outliers*), representados, na figura, por pontos; †As percentagens de carbono orgânico foram convertidas para percentuais de matéria orgânica pelo uso do fator multiplicativo 1,724 (Embrapa, 2011) para 161 amostras; ns - número de amostras; ‡ Seis amostras não representadas contêm valores de Ks=0 cm d^{-1}; § Conteúdo de água na saturação ou porosidade total quando a primeira informação estava indisponível (289 amostras). (*continuação*)

Tabela 2.3 – Valores médios dos dados hidrofísicos do HYBRAS para várias classes texturais e grupos de solos segundo o WRB (WRB, 2015).

	Areia	Silte	Argila	BD†	OM†	θ(0 cm)	θ(60 cm)	θ(330 cm)	θ(15000 cm)	Ks‡
		%		g cm^{-3}	%			cm^3 cm^{-3}		cm d^{-1}
Areia	92,8	2,8	4,4	1,59	1,76	0,40	0,11	0,08	0,05	184
		(27)		(27)	(27)	(27)	(10)	(27)	(27)	(12)
Areia Franca	85,1	5,0	9,9	1,52	2,25	0,38	-	0,13	0,04	-
		(18)		(18)	(18)	(18)	(4)	(18)	(18)	(8)
Franco Arenoso	69,8	14,6	15,6	1,51	2,17	0,41	0,27	0,21	0,13	135
		(80)		(80)	(65)	(80)	(60)	(58)	(80)	(39)
Franca	45,8	38,8	15,4	1,60	2,31	0,41	0,33	0,27	0,19	-
		(207)		(207)	(204)	(207)	(207)	(206)	(207)	(6)
Franco Siltosa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		(2)		(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(0)
Franco Argilo Arenosa	62,1	11,6	26,2	1,52	1,76	0,42	0,30	0,22	0,16	66
		(155)		(155)	(131)	(155)	(121)	(107)	(155)	(74)
Franco Argilosa	34,8	32,6	32,6	1,23	4,60	0,52	0,39	0,35	0,27	56
		(44)		(44)	(34)	(44)	(43)	(38)	(44)	(21)
Franco Argilo Arenosa	12,2	54,6	33,3	0,97	6,69	0,61	0,44	0,39	0,29	-
		(10)		(10)	(10)	(10)	(10)	(10)	(10)	(4)
Argila Siltosa	12,6	43,5	44,0	1,17	4,11	0,57	0,41	0,37	0,29	-
		(38)		(38)	(38)	(38)	(38)	(37)	(38)	(7)
Argila Arenosa	50,0	9,7	40,3	1,42	1,74	0,47	0,33	0,28	0,20	52
		(70)		(70)	(54)	(70)	(50)	(52)	(70)	(43)
Argila	24,2	18,8	57,0	1,24	2,61	0,56	0,39	0,35	0,29	65
		(424)		(424)	(327)	(424)	(331)	(350)	(415)	(205)
Ferralsol	36,3	13,5	50,2	1,29	2,04	0,537	0,351	0,314	0,243	70,3
		(355)		(355)	(237)	(355)	(231)	(258)	(346)	(224)
Acrisol	55,4	14,6	30,0	1,50	1,95	0,422	0,298	0,212	0,175	103,5
		(209)		(209)	(164)	(209)	(185)	(154)	(209)	(101)
Nitisol	19,1	31,5	49,3	1,30	3,77	0,542	0,385	0,338	0,268	-
		(108)		(108)	(108)	(108)	(98)	(97)	(108)	(5)
Cambisol	33,4	23,4	43,2	1,16	2,81	0,561	0,391	0,366	0,245	50,7
		(69)		(69)	(67)	(69)	(55)	(65)	(69)	(46)
Gleysol	42,2	29,8	27,9	1,29	3,73	0,502	0,402	0,332	0,241	66,5
		(82)		(82)	(82)	(82)	(71)	(81)	(82)	(28)
Planosol	47,0	36,5	16,6	1,63	1,80	0,390	0,321	0,260	0,186	-
		(192)		(192)	(192)	(192)	(192)	(192)	(192)	(0)
Phaeozem	35,4	32,3	32,4	1,40	2,37	0,453	0,404	0,370	0,303	-
		(28)		(28)	(28)	(28)	(28)	(28)	(28)	(0)
Fluvisol	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		(2)		(2)	(2)	(2)	(2)	(0)	(2)	(0)
Histosol	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		(8)		(8)	(8)	(8)	(8)	(8)	(8)	(6)
Podzol	92,2	2,1	5,7	1,42	3,81	0,477	-	0,166	0,080	-
		(16)		(16)	(16)	(16)	(0)	(16)	(16)	(9)
Regosol	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		(6)		(6)	(6)	(6)	(6)	(6)	(6)	(0)
Todos solos	*41,6*	*21,9*	*36,5*	*1,4*	*2,51*	*0,484*	*0,346*	*0,293*	*0,221*	*74,8*

† BD, densidade do solo; OM, teor de matéria orgânica; ‡ Ks, condutividade hidráulica saturada, calculada como a média geométrica; a segunda linha é o número de amostras; dados com menos de 10 amostras de solos por grupo não foram representados.

O HYBRAS comporta 8793 de pares de θ-s (Tabela RAWRET) correspondentes a 1075 amostras, com maior concentração nas sucções de 60 cm (876 amostras), 100 cm (1042), 330 cm (905), 1000cm (1043) e 15000 cm (1066). Não houve grande heterogeneidade no número de pares θ-s por amostra. 483 amostras estão concentradas na superfície do solo (*topsoil*) e as demais na subsuperfície (*subsoil*) (592 amostras). A

classificação em solos de horizontes superficiais e subsuperficiais coincidiu com a apresentada no material suplementar do estudo de Tóth *et al.* (2015). Das amostras subsuperficiais, 50 foram extraídas de horizontes cuja profundidade do topo foi superior a 1 m (em apenas sete amostras, a profundidade foi acima de 1,50 m).

2.2.4 Parâmetros do modelo de VG e seus desempenhos na estimativa dos dados de retenção de água

A equação de VG (Equação 2.1) foi ajustada aos dados experimentais de retenção de água utilizando o algoritmo *GlobalSearch* da caixa de ferramenta (*toolbox*) *Global Optimization* do Programa Matlab (Matlab, 2014), obtendo-se seus quatro parâmetros (θs, θr, α, n). Apenas amostras com o número mínimo de seis pares θ-s (1063 amostras), incluindo o da umidade de saturação (ou porosidade total quando a umidade de saturação não era medida) foram consideradas no procedimento de otimização.

$$\theta(s)=\theta_r+(\theta_s-\theta_r).[1+(\alpha s)^n]^{-(1-1/n)} \quad (2.1)$$

onde θ(s) é o conteúdo de água volumétrico (cm^3cm^{-3}) na sucção s (cm). Os parâmetros θs e θr são os conteúdos de água de saturação e residual, respectivamente (cm^3cm^{-3}), α (cm^{-1}) e n (adimensional) são parâmetros de forma da curva. A otimização dos parâmetros foi sujeita às seguintes restrições: θr- [0 cm^3 cm^{-3}; 0,533 cm^3 cm^{-3}], θs- [0,1 cm^3 cm^{-3}; 0,96 cm^3 cm^{-3}], α - [0,00001 cm^{-1}; 0,99999 cm^{-1}]; n - [1,01; 15]. Os limites de α e n seguiram aqueles apresentados em Tóth *et al.* (2015). Inicialmente, o ajuste do modelo deu-se considerando valores fixos para os parâmetros iniciais (θr=0,2 cm^3 cm^{-3}, θs=0,8 cm^3 cm^{-3}, α= 0,06 cm^{-1} e n=2). Os resultados gerados para os parâmetros de VG foram, então, presumidos como o novo valor inicial dos parâmetros e o modelo de VG foi ajustado uma vez mais. Os resultados finais são apresentados na Figura 2.5.

Os valores médios de θr, θs e n foram relativamente próximos aos resultados para os solos de clima tropical de Hodnett e Tomasella (2002). Maior discrepância foi observada para as magnitudes de α, o que pode ser parcialmente justificada pelo uso de diferentes limites para os seus intervalos de ajuste, bem como pela sua mais larga faixa de variação (várias ordens de grandeza). Os valores mais elevados de α para base de dados do HYBRAS concentraram-se nas classes de textura fina, o que indica que, para esses solos, ocorre uma mudança repentina no teor de água, com alguns poros esvaziando sob pequenas sucções. Esse fato é geralmente mais típico nas areias, mas é

também usual em solos bem estruturados, como são alguns dos solos brasileiros de textura fina. Uma análise de dados mais refinada deve ser efetuada para o desenvolvimento de futuras PTFs em solos brasileiros, incluindo a condutividade hidráulica não saturada.

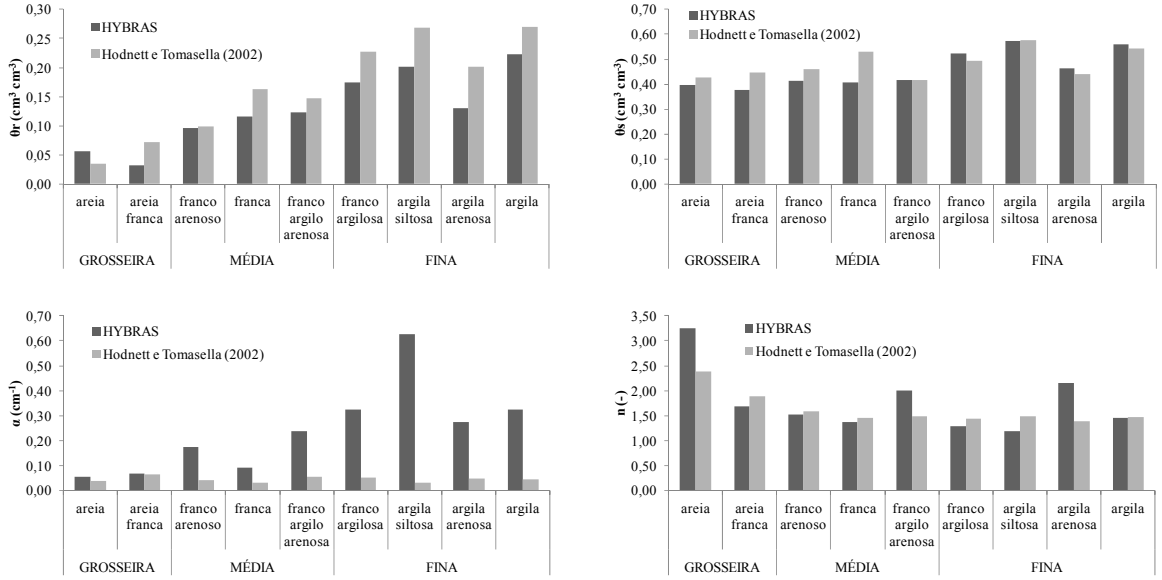


Figura 2.5 - Média dos valores dos parâmetros da equação de van Genuchten para os solos do HYBRAS (1063 amostras) e para o banco de dados de solos de clima tropical compilado em Hodnett e Tomasella (2002) nas diferentes classes texturais e nos grupos de solos de textura fina, média e grosseira, segundo Cassel *et al.* (1983).

O desempenho do modelo de VG para representar os dados de retenção foi avaliado pelas estatísticas RMSE (*root mean square error*) e ME (*mean error*), com expressões correspondentes descritas abaixo por amostra de solo (subscrito s) ou outros agrupamentos de dados de θ (subscrito rs):

$$RMSE_s = \sqrt{\frac{1}{L-4}\sum_{j=1}^{Ln}(\theta_{p_j} - \theta_{m_j})^2} \quad (2.2)$$

$$ME_s = \frac{1}{L-4}\sum_{j=1}^{Ln}(\theta_{p_j} - \theta_{m_j}) \quad (2.3)$$

$$RMSE_{rs} = \sqrt{\frac{1}{TN}\sum_{j=1}^{TN}(\theta_{p_j} - \theta_{m_j})^2} \quad (2.4)$$

$$ME_{rs} = \frac{1}{TN}\sum_{j=1}^{TN}(\theta_{p_j} - \theta_{m_j}) \quad (2.5)$$

onde Ln é o número de medições por amostra, quatro (4) representa o número de parâmetros, TN é o número total de medições de retenção de água por intervalo de sucção (ou de densidade do solo, ou por grupo de classes texturais, vide seção 2.3.2.2), θm e θp são os conteúdos de água medidos e preditos, respectivamente. O RMSE denota o erro global de predição, e o ME expressa a tendência de superestimativa (ME>0) ou de subestimativa (ME<0).

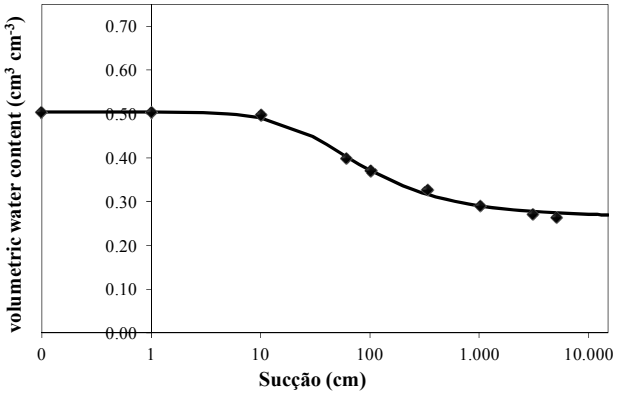
O modelo de VG mostrou-se satisfatório no ajuste dos dados de retenção do HYBRAS, com RMSEs global na ordem de 0,0107 $cm^3\ cm^{-3}$, inferior ao registrado no estudo de Tomasella *et al.* (2003) (0,013 $cm^3 cm^{-3}$) e sem tendências (MEs=0,00 $cm^3\ cm^{-3}$), com aproximadamente 80% das amostras apresentando valores de RMSEs inferiores a 0,015 $cm^3 cm^{-3}$ e 96% inferiores a 0,03 $cm^3\ cm^{-3}$. Os valores observados dos pares θ-s (8732 medições) foram estatisticamente equivalentes aos pares estimados pelo modelo de VG, com p-value =0,71 pelo teste paramétrico t-test para amostras pareadas (p-value varia de 0 a 1; quanto maior seu valor maior similaridade entre os pares de θ observados e estimados). As magnitudes de RMSErs para todos os intervalos de 3 a 15000 cm foram baixas, na ordem de 0,01 $cm^3\ cm^{-3}$, sendo os erros médios também pequenos (Tabela 2.4). Na faixa próxima à saturação, com sucção entre 1 a 3 cm, foi registrado o pior desempenho preditor (estatísticas definidas nesse intervalo de sucção devem ser vistas com cautela devido à baixa resolução de dados - Tabela 2.4). Os valores de RMSEs médios não apresentaram variação significativa entre as classes texturais, oscilando em média de 0,012 $cm^3\ cm^{-3}$.

Tabela 2.4 - RMSErs e MErs para os dados de retenção de água em diferentes faixas de sucção.

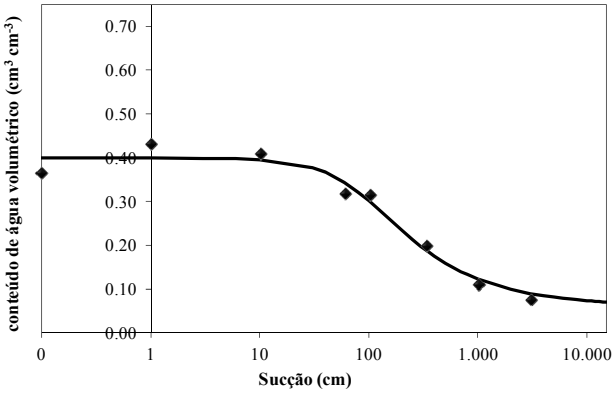
s (cm)	Número de medições	$RMSE_{rs}$ ($cm^3 cm^{-3}$)	ME_{rs} ($x10^{-2} cm^3 cm^{-3}$)
Saturação	1063	0,0106	0,0189
1-3	56	0,0304	-1,7986
3-10	116	0,0125	0,3353
10-30	551	0,0109	-0,0145
30-100	1522	0,0095	0,0741
100-320	1256	0,0084	0,2110
320-1000	1197	0,0100	-0,4004
1000-3200	1328	0,0110	-0,2504
3200-10000	549	0,0112	0,3054
10000-15000	1094	0,0087	0,3216

Em geral, os pontos de medição de retenção de água das amostras do HYBRAS mostraram-se visualmente "bem aderentes" às curvas ajustadas de VG quando os valores de RMSEs das amostras foram menores que 0,03 cm^3cm^{-3} (96% das amostras) (Figura 2.6). Nos outros casos (RMSEs>0,03 cm^3cm^{-3}), alguns solos apresentaram tendência de bimodalidade, e o modelo de VG foi menos efetivo (Figura 2.6c).

a) $RMSE_s$~0,01 cm^3 cm^{-3}



b) $RMSE_s$~0,03 cm^3 cm^{-3}



c) $RMSE_s$~0,050 cm^3 cm^{-3}

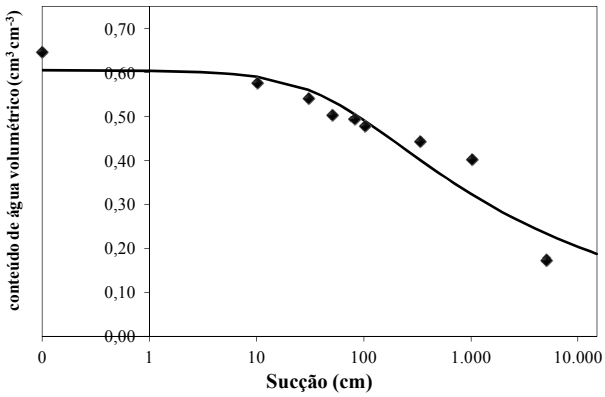


Figura 2.6 - Curvas de retenção de água ajustadas pelo modelo de VG para alguns solos do HYBRAS, com os valores da raiz quadrada do erro quadrático médio da amostra ($RMSE_S$).

2.3 HYBRAS: Estimativa de seus dados de retenção de água por meio de PTFs

2.3.1 Metodologia

2.3.1.1 Seleção de PTFs

As PTFs de Medrado e Lima (2014) (modelo completo) e Tomasella e Hodnett (1998), desenvolvidas para solos brasileiros, foram selecionadas para a estimativa dos dados de retenção de água do HYBRAS. As conhecidas PTFs de solos brasileiros de Tomasella *et al.* (2000, 2003) não foram utilizadas no contexto deste trabalho, pois o HYBRAS não contém informações de alguns de seus preditores (por exemplo, umidade equivalente). Adicionalmente, os modelos de Tóth *et al.* (2015) (modelo 21) e Schaap *et al.* (2001) (modelo H3), calibrados para solos de clima temperado, foram incluídos na avaliação. Todos os quatro modelos selecionados acima foram desenvolvidos para extensos bancos de dados representativos de grandes unidades territoriais, apesar dos dois primeiros terem sido calibrados para biomas específicos do território brasileiro (Tabela 2.5); portanto, o uso dessas PTFs é adequado para serem implementadas à base de dados deste estudo. A referência às quatro (4) PTFs acima será dada pelos nomes Savanna, Amazon, Euro e Rosetta, respectivamente (Tabela 2.5). Todas essas PTFs são paramétricas, utilizando, geralmente, uma base comum de preditores: densidade do solo, carbono orgânico (ou matéria orgânica) e percentuais de frações granulométricas, todos com as mesmas faixas limites (USDA, 1987) para teor de areia, silte e argila. As exceções a esses preditores são os modelos Rosetta, o qual não leva em consideração os dados de carbono orgânico, e o Amazon, desenvolvido apenas para as frações granulométricas (Tabela 2.5). As PTFs foram ajustadas para a equação de VG, com exceção da PTF de Tomasella e Hodnett (1998), onde foi adotada a equação de Brooks e Corey, BC (1964).

Tabela 2.5 - Lista das PTFs selecionadas e suas características.

PTFs	Domínio Geográfico	ns†	Variáveis independentes						Saída dos modelos‡
			Argila	Silte	Areia	OM/ OC†	BD†	T/S†	
PTFs de solos de clima tropical									
Savanna (modelo completo de Medrado e Lima, 2014)	Cerrado brasileiro	1092	x	x	x	x	x	-	θr, θs, α, n da equação de VG
Amazon (Tomasella e Hodnett, 1998)	Região amazônica brasileira	196-416	x	x	x	-	-	-	θr, θs, hb, B da equação de BC

Tabela 2.5 - Lista das PTFs selecionadas e suas características. (*continuação*)

PTFs	Domínio Geográfico	ns†	Variáveis independentes						Saída dos modelos‡
			Argila	Silte	Areia	OM/ OC†	BD†	T/S†	
PTFs de clima temperado									
Rosetta (modelo H3 de Schaap *et al.*, 2001)	América do Norte e Europa	2134	x	x	x	-	x	-	θr, θs, α, n da equação de VG
Euro (modelo 21 de Tóth *et al.*, 2015)	Europa	4749	x	x	x	x	x	x	θr, θs, α, n da equação de VG

†OC, teor de carbono orgânico; OM, teor de matéria orgânica; BD, densidade do solo; ns, número de amostras de solo na base de dados de calibração; T/S, distinção entre solo de horizonte superficial (*topsoil*) e subsuperficial (*subsoil*); ‡ hb, sucção correspondente ao maior tamanho de poro (pressão de entrada de ar); B, constante empírica; VG, van Genuchten; BC, Brooks e Corey; x indica presença da variável do solo e – pressupõe ausência.

2.3.1.2 Seleção da base de dados e aplicabilidade de PTFs

Selecionaram-se, inicialmente, as amostras de solos do HYBRAS que pudessem ser comuns à aplicação de todas as PTFs escolhidas. Em seguida, avaliou-se se a base de dados selecionada se enquadrava nas faixas de dados das variáveis preditoras utilizadas na calibração das diferentes PTFs. Para esse procedimento, adotou-se o índice de aplicabilidade, proposto por Tomasella e Hodnett (2004) e também implementado por Nguyen *et al.* (2015a), que foi definido como a razão entre o número de amostras para as quais uma PTF particular pode ser aplicada dentro de uma base de dados teste e o número total de amostras dessa base de dados.

2.3.1.3 Critério de avaliação

O desempenho das PTFs foi avaliado pelas Equações 2.4 e 2.5 (para facilitar a notação, daqui para frente será excluído o subscrito rs das estatísticas RMSErs e MErs). Os erros RMSE e ME foram calculados somente para o intervalo entre 10 cm e 15000 cm, dentro da faixa de sucção onde todos os quatro modelos foram desenvolvidos. Para investigar como os valores de RMSE e ME variaram com a sucção, foram também computados os correspondentes valores para sete intervalos de sucção entre 10 cm (PF 1, PF=$\log_{10}$s), 30 cm (PF 1,5), 100 cm (PF 2), 316 cm (PF 2,5), 1000 cm (PF 3), 3,160 cm (PF 3,5), 10000 cm (PF 4) e 31600 cm (PF 4.5). O RMSE também foi determinado para grupos de classes texturais e de densidade de solo, levando em consideração o grau de intemperismo dos solos brasileiros. Solos classificados como Ferralsols, Acrisols e

Nitisols segundo o WRB (WRB, 2015) foram considerados como intemperizados (W - *weathered*) e os demais como não intemperizados (NW – *non-weathered*).

2.3.2 Resultados e Discussão

2.3.2.1 Aplicabilidade das PTFs

Das 1075 amostras de solos do HYBRAS, 868 apresentaram dados dos preditores dos quatro modelos. Com base nesse montante, os índices de aplicabilidade foram calculados (Tabela 2.6). As faixas de abrangência dos preditores das PTFs brasileiras e de regiões temperadas, em geral, englobaram as faixas correspondentes dos solos selecionados no HYBRAS (índice de aplicabilidade>95%). Levando em conta os altos índices de aplicabilidade dos modelos, as 868 amostras selecionadas foram mantidas para avaliação das PTFs deste estudo.

Tabela 2.6 – Índice de aplicabilidade das PTFs selecionadas e faixas de abrangência dos atributos de solos na base de dados utilizada na sua calibração.

PTFs	Índice e aplicabilidade (%)	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	OM/OC (%)	BD (g cm^{-3})§
			Solos brasileiros			
HYBRAS (868 amostras)	-	0-96	0-63,6	0,40-97,8	0,08-11,0‡	0,63-2,00
			PTFs de solos de clima tropical			
Savanna	95	4,80-91,5	0,03-55,0	1,20-90,0	0-7,80‡	0,60-1,92
Amazon	100	<99	<90	<99	-	-
			PTFs de solos de clima temperado			
Rosetta	99	0-89	6-89	0-100	-	0,50-não especificado
Euro	99	0-91,6	0-86,8	0-100	0-52,8†	0,09-2,02

†OC, teor de carbono orgânico (convertido em valores de OM pelo fator multiplicativo 1,724); ‡OM, teor de matéria orgânica; §BD - densidade do solo.

2.3.2.2 Avaliação das PTFs selecionadas

Os menores RMSE e ME globais foram registrados para as PTFs de solos brasileiros (Tabela 2.7). A superioridade de desempenho global de PTFs de solos brasileiros em relação às PTFs de solos de clima temperado, quando aplicadas a solos brasileiros, foi também caracterizada em Tomasella *et al.* (2000), Reichert *et al.* (2009) e Medeiros *et al.* (2014). O desempenho preditor dos modelos Savanna e Amazon (RMSE na ordem de 0,065 cm^3cm^{-3} e ME aproximadamente nulo) foi similar ao das duas (2) PTFs de clima temperado quando validadas para extensas bases de dados de solos de mesma origem geográfica daquelas utilizadas em suas calibrações (Tóth *et al.*, 2015 - RMSE global de 0,064 cm^3cm^{-3}; Schaap *et al.*, 2001 - RMSE global de 0,068 cm^3cm^{-3}). Esse resultado indica o desempenho consistente das PTFs brasileiras.

No HYBRAS, as capacidades de predição global dos modelos de ambiente temperado foram muito próximas entre si (Tabela 2.7), assim como seus erros nos intervalos de sucção (Figuras 2.7 e 2.8). Essas duas PTFs apresentaram tendência média de superestimativa para intervalos de sucção entre 10 cm (PF=1) e 316 cm (PF=2,5) e de subestimativa para as faixas de sucção remanescentes (Figura 2.8). Estudos similares de avaliações de PTFs de clima temperado em ambientes tropicais mostraram RMSE globais no intervalo de 0,06 cm^3cm^{-3} a 0,20 cm^3cm^{-3}, sendo frequentes valores na faixa de 0,8 cm^3cm^{-3} a 0,10 cm^3cm^{-3} (Tomasella *et al.*, 2000; Medina *et al.*, 2002; Reichert *et al.*, 2009; Botula *et al.*, 2012; Medeiros *et al.*, 2014; Nguyen *et al.*, 2015a), sendo, portanto, consistentes com os erros aqui obtidos.

As maiores discrepâncias de desempenho entre as PTF de clima temperado e as brasileiras ocorreram em sucções muito elevadas (>3160 cm, ou seja, PF>3,5, Figuras 2.7 e 2.8). O baixo desempenho do modelo Rosetta em altas sucções foi também observado por Cornelis *et al.* (2001) e Rubio e Lorens (2004), em ambos os casos registrando tendência de subestimativa de seus resultados, o que também ocorreu neste trabalho (Figura 2.8). Uma maior proximidade de desempenho entre os modelos brasileiros e os de ambiente temperado deu-se no intervalo de sucção entre 316 cm (PF=2,5) e 1000 cm (PF=3,0). De fato, na sucção usualmente tida como a capacidade de campo (330 cm), os RMSEs dos modelos Savanna, Amazon, Euro e Rosetta foram próximos entre si, com valores médios entre 0,061 cm^3cm^{-3} e 0,070 cm^3cm^{-3}. Apenas no intervalo de 10 cm (PF=1,0) a 31,6 cm (PF=1,5), é que uma PTF brasileira, a Amazon, registrou desempenho inferior ao dos modelos de clima temperado em termos do RMSE (Figura 2.7). No entanto, seu valor médio de ME foi inferior, em valor absoluto, aos MEs das PTFs de ambiente temperado (Figura 2.8). Analisando os valores das estimativas das PTFs brasileiras, o modelo Savanna mostrou-se, em geral, menos tendencioso que o Amazon em todas as faixas de sucção analisadas (Figura 2.8), com exceção da faixa entre 10 cm (PF=1,0) e 100 cm (PF=2,0). Entretanto, nessa faixa, o RMSE do modelo Amazon superou o do Savanna (Figura 2.7), podendo-se afirmar, de forma geral, que essa última PTF foi a que melhor estimou os dados de retenção de água do HYBRAS.

Tabela 2.7–Valores globais do RMSE e ME das PTFs brasileiras e das de clima temperado no intervalo de sucção entre 10 cm e 15000 cm, e valores de RMSE para a base de dados dividida segundo o grau de intemperismo; W - solos intemperizados e NW - solos não intemperizados.

PTFs	Solos Brasileiros				Solos de regiões Temperadas			
	Savanna		Amazon		Euro		Rosetta	
Base de dados completa: 868 amostras de solo								
RMSE (cm^3cm^{-3})	0,064		0,065		0,081		0,080	
ME (cm^3cm^{-3})	-0,0007		-0,0073		-0,0132		-0,0167	
W = 484 amostras de solo, NW = 384 amostras de solo								
	W	NW	W	NW	W	NW	W	NW
RMSE (cm^3cm^{-3})	0,057	0,072	0,052	0,081	0,080	0,083	0,073	0,089

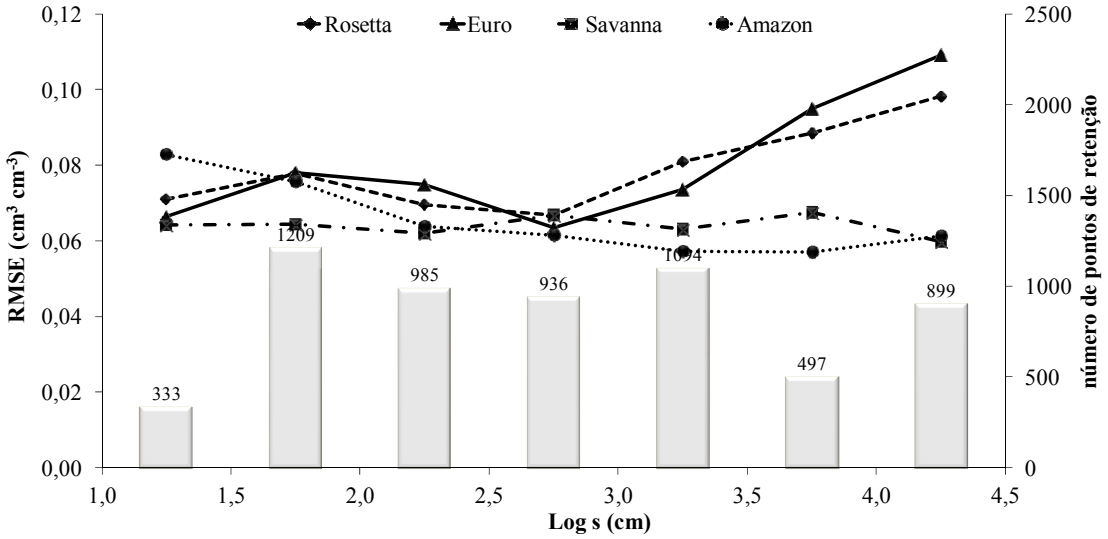


Figura 2.7 - Raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) das estimativas de retenção de água de 868 amostras do HYBRAS pelos modelos para solos brasileiros e solos de clima temperado ao longo das faixas de sucção s, acompanhado do número de pontos de medição.

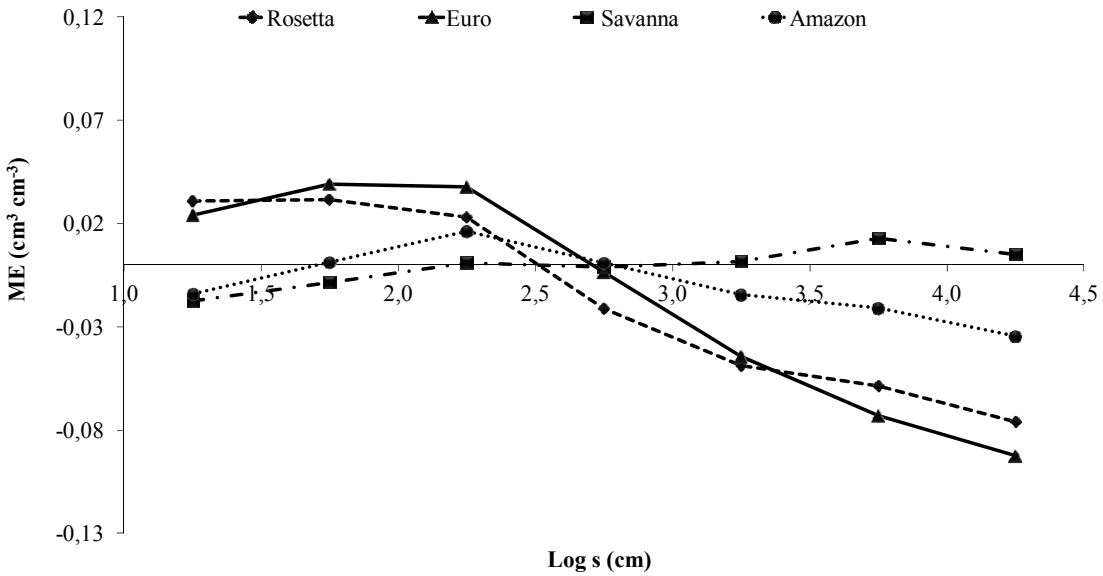


Figura 2.8 - Erro médio (ME) das estimativas de retenção de água de 868 amostras do HYBRAS pelos modelos para solos brasileiros e solos de clima temperado ao longo das faixas de sucção s.

Quando as PTFs foram avaliadas para solos intemperizados e não intemperizados, no que concerne ao emprego do índice RMSE, nota-se que as diferenças de RMSE entre os modelos brasileiros e os de ambiente temperado para os solos intemperizados foram mais marcantes do que quando calculadas levando-se em conta todos os solos (Tabela 2.7). Esse fato indica a capacidade das duas PTFs de solos brasileiros em melhor representar solos intemperizados do que de outras condições pedogenéticas. Essa constatação confirma-se quando se avaliam os solos predominantes utilizados na calibração dessas PTFs, em sua maioria Ferralsols, solos de maior expressão geográfica em ambientes intemperizados no Brasil. Por outro lado, os modelos para solos brasileiros e de clima temperado mostraram desempenhos comparáveis em solos brasileiros não intemperizados, apesar dos brasileiros terem ainda apresentado melhor qualidade de predição. Tomasella *et al.* (2000) também relataram um desempenho mais satisfatório das PTFs brasileiras em relação às PTFs de clima temperado em solos intemperizados brasileiros. No entanto, o conceito de solos intemperizados usado naquele estudo levou apenas em consideração os baixos conteúdos de silte, o que difere do conceito de solos intemperizados adotado neste estudo que adotou a perspectiva da classificação pedológica.

Os desempenhos das PTFs para solos brasileiros e de regiões temperadas foram também avaliados por grupos de classes texturais designados como finos (franco argilo

siltoso, argila siltosa, franco argiloso, argila arenosa, argila), médios (franco arenoso, franco, franco argilo arenoso, franco siltoso, silte) e grosseiros (areia, areia franca) (Cassel *et al.*, 1983) para os mesmos tipos de solos da Tabela 2.7 (intemperizados e não intemperizados). Os modelos brasileiros foram melhores preditores que os de clima temperado para os diferentes grupos texturais e de solos (W, NW), com exceção dos solos de textura grosseira, onde as PTFs de regiões temperadas mostraram tendência de serem mais precisas (Figura 2.9ab). O pior desempenho dos modelos brasileiros, nesse último caso, pode ter sido resultado da baixa presença dos solos de textura grosseira na sua calibração. De todo modo, os resultados apresentados para as classes arenosas (S - areia, LS - areia franca) devem ser vistos com cautela, dado o número não muito expressivo de amostras (43) nessas classes (Figura 2.9a,b).

A magnitude das diferenças de qualidade de predição entre as PTFs brasileiras e as de clima temperado dependeu conjuntamente da abundância de partículas finas e de diferenças nos processos de pedogênese. De fato, as diferenças de desempenho preditor entre as PTFs brasileiras e as de regiões temperadas foram bem mais marcantes para solos intemperizados de textura fina (Figura 2.9a), dos que as observadas para solos de textura média para ambos os grupos pedogenéticos (Figura 2.9a,b) ou para os solos de textura fina não intemperizados (Figura 2.9b). Também, os valores de RMSE médios das duas PTFs brasileiras do grupo de solos intemperizados de textura fina (cerca de 0,048 cm^3cm^{-3} - Figura 2.9a) foram ainda menores que os RMSE dessas mesmas PTFs para o conjunto completo de solos intemperizados (Tabela 2.7). Os fatores acima confirmam a relevância das argilas em solos de ambientes intemperizados na distinção do comportamento hidráulico entre solos de clima tropical e temperado. Essa configuração pode se dar tanto pela mineralogia diferenciada dessas argilas, como pela sua frequente ocorrência em elevados teores nos solos intemperizados, como anteriormente comentado. De acordo com Tomasella *et al.* (2000), Hodnett e Tomasella (2002), Tomasella e Hodnett (2004), entre outros, a mineralogia das argilas nos solos de ambientes intemperizados permite a formação de estruturas bem desenvolvidas e granulares e de tamanho muito pequeno, que levam à ocorrência de condutividade hidráulica similar àquela de solos de textura arenosa em baixas sucções, e microporosidade que concentra um elevado conteúdo de água em altas sucções, com comportamento hidráulico semelhante a de um solo tipicamente argiloso.

A relevância da mineralogia e do teor das argilas em solos intemperizados na caracterização da estrutura porosa fica também evidente quando o desempenho dos modelos foi avaliado por faixas de densidade do solo (Figura 2.10). No grupo dos solos intemperizados, as maiores diferenças de RMSE entre os modelos brasileiros e os de clima temperado ocorreram para valores de densidades menores ou iguais a 1,2 g cm^{-3} (Figura 2.10a), onde usualmente a fração argila predomina na matriz porosa, fato que não ocorreu para os solos não intemperizados (Figura 2.10b). O trabalho de Tomasella *et al.* (2000) sugere que diferentes intervalos de teores de silte seria um critério para distinção de funcionalidades hídricas entre solos de ambiente tropical intemperizado e temperado. Essa avaliação deve-se à hipótese de que baixos teores de silte (<10%) são indicativos de solos altamente intemperizados. Tal sugestão de Tomasella *et al.* (2000) não se confirmou no HYBRAS, pois tanto as PTFs brasileiras como as de regiões temperadas apresentaram tendência de piora de desempenho com o crescimento no teor de silte (Figura 2.11), fato que não ocorreu para as PTFs de clima temperado utilizadas por esses autores.

a) intemperizados b) não intemperizados

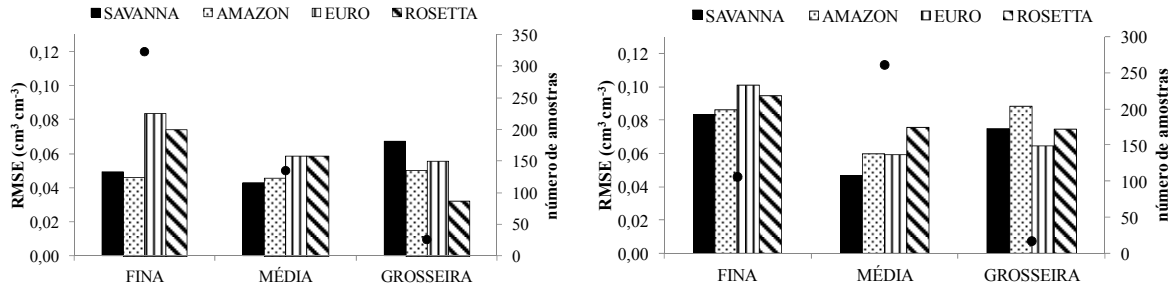


Figura 2.9 - Desempenho dos modelos brasileiros e dos modelos de clima temperado em grupos de classes texturais para solos brasileiros: a) intemperizados (484 amostras); e b) não intemperizados (384 amostras). O círculo preto representa o número de amostras.

a) intemperizados b) não intemperizados

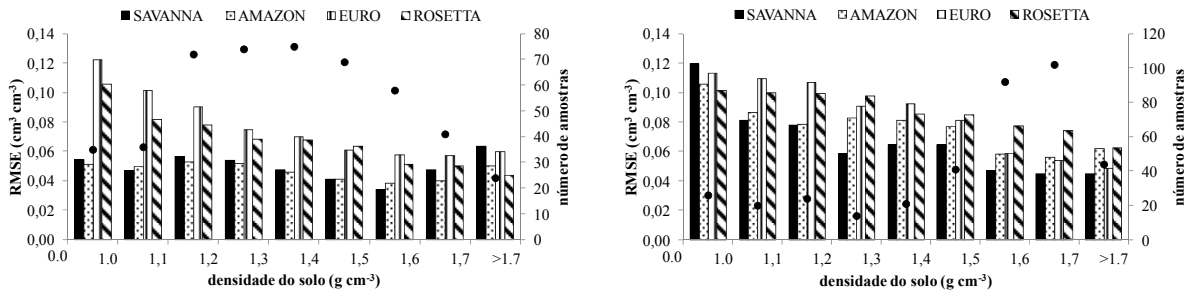


Figura 2.10 - Desempenho dos modelos brasileiros e dos modelos de clima temperado em intervalos de densidade de solo para solos brasileiros: a) intemperizados (484 amostras) e b) não intemperizados (384 amostras). O círculo preto representa o número de amostras.

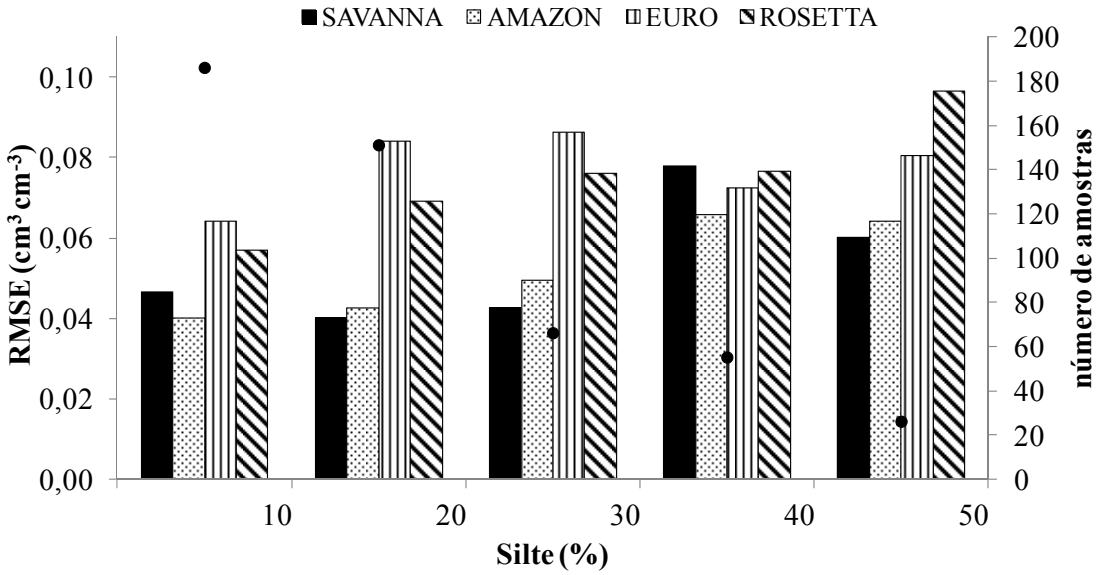


Figura 2.11 - Desempenho dos modelos brasileiros e dos modelos de clima temperado em intervalos de teor de silte para solos brasileiros intemperizados (484 amostras). O círculo preto representa o número de amostras.

2.4 Conclusões e Recomendações

A base de dados HYBRAS 1.0 é representativa de uma variedade de solos brasileiros de ambiente tropical. O banco de dados é também baseado em métodos de análise de propriedades do solo bem definidos e consistentes, contendo quantidade significativa de informações hidrofísicas em solos tropicais intemperizados, que correspondem aos pedoambientes mais comuns no Brasil. Os dados de retenção hídrica e condutividade hidráulica saturada do HYBRAS foram obtidas em laboratório e com amostras indeformadas. Boa resolução de dados de retenção hídrica foi obtida e

disponibilizada em larga faixa de sucção (de 3 cm até 15000 cm), estando esses dados associados aos usuais atributos básicos de solo. Sua estrutura apresenta tabelas interconectadas, cujas informações de interesse são facilmente acessadas por meio de tabelas de consultas padrão.

A equação de van Genuchten mostrou-se adequada para descrição dos dados de retenção hídrica no HYBRAS, em especial na faixa de sucção de 3-15000 cm, com RMSE global de 0,0107 cm^3cm^{-3} e sem tendenciosidade marcante ao longo das faixas de sucção. Todos esses fatores criam boas perspectivas para o desenvolvimento de PTFs de retenção de água com elevada acurácia, visando obter uma cobertura de dados hidrofísicos em várias escalas e aplicações, sobretudo em estudos de modelagem de escoamentos hidráulicos. Dados de Ks (425 amostras) tiveram menor representatividade no HYBRAS que os dados de retenção de água, mas ainda assim cobriram, na medida do possível, uma larga faixa de valores, fato que pode favorecer o desenvolvimento de PTFs para essa variável.

Este estudo também deu destaque à supremacia das PTFs de solos brasileiros em relação às de solos de clima temperado na predição de dados de retenção hídrica em terrenos no Brasil, com exceção dos solos de textura arenosa, onde os modelos de clima temperado se mostraram mais adequados em geral. O melhor desempenho das PTFs de solos brasileiros em relação às PTFs de ambiente temperado em solos brasileiros é também confirmado na literatura, ressaltando-se que, no presente estudo, uma base de dados mais ampla e pedologicamente diversa foi utilizada para validar as PTFs. O trabalho sugere que as maiores diferenças de comportamento hidráulico entre solos tropicais brasileiros e os de clima temperado são ditadas principalmente pela natureza mineralógica e pelo teor das argilas, que regem fortemente a organização estrutural do solo. Essa ponderação estimula que a nova geração de PTFs de retenção de água venha a ser desenvolvida agregando-se informação que leve em conta diferenças na estrutura porosa dos solos.

Algumas sugestões são propostas quanto à predição de retenção de água em solos brasileiros: 1- desenvolvimento de PTFs para solos brasileiros para dois grupos de solos, um exclusivo para solos tipicamente intemperizados, e outro para os demais solos. 2- quando não se pode aplicar as PTFs brasileiras, sugere-se o uso das PTFs de regiões temperadas empregadas neste estudo para predições de dados de retenção de água em solos brasileiros que não se enquadrem no grupo de solos intemperizados de

textura fina, com especial cuidado em predições nas sucções entre 3000 a 15000 cm, onde os modelos de clima temperado se mostraram menos satisfatórios. Complementarmente, recomenda-se uma análise de dados do HYBRAS mais refinada para o desenvolvimento de futuras PTFs em solos brasileiros, incluindo a condutividade hidráulica não saturada.

CAPÍTULO 3 – DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PARA A CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA USANDO UM BANCO DE DADOS DE SOLOS INTERNACIONAIS

3.1 Introdução

A condutividade hidráulica saturada (Ks) é fortemente influenciada pelo arranjo macroporoso do solo, sofrendo também interferência da distribuição do tamanho das partículas. Ela é uma variável chave na simulação do fluxo de água e transporte de solutos na matriz porosa (Ghanbarian *et al.*, 2017), com grande relevância para o planejamento ambiental e na solução de problemas de engenharia de água e solo (Tietje e Hennings, 1996).

A estimativa de Ks pode ser obtida em campo ou por métodos de laboratório, ambos requerendo elevados custos e trabalho intensivo. A importância e demanda por dados de Ks têm motivado o desenvolvimento de métodos indiretos para sua determinação. Funções de pedotransferências (PTFs) (Bouma, 1989) são uma das ferramentas mais populares na estimativa de Ks a partir de propriedades físicas mais facilmente medidas no campo ou laboratório.

As PTFs de Ks mais comuns são aquelas desenvolvidas em função dos dados granulométricos e densidade do solo. Cosby *et al.* (1984), Pucket *et al.* (1985), Jabro *et al.* (1992), Dane e Pucket (1994), Schaap *et al.*(2001) e Julià *et al.* (2014) são alguns dos muitos exemplos. Modelos baseados na distribuição dos tamanhos dos poros ou na curva de retenção de água, por outro lado, são menos comuns. A incorporação de informações da estrutura porosa dos solos nos modelos de Ks tem sido recomendada na literatura (O'Neils, 1949; Gonçalves *et al.*, 1997; Sobieraj *et al.*, 2001; Weynants *et al.*, 2009). A equação semi empírica de Kozeny-Carman (KC), conforme proposta por Ahuja *et al.* (1984), que leva em consideração a porosidade efetiva dos solos, é uma das tentativas populares nessa direção, sendo essa abordagem testada por Franzmeier (1991), Tomasella e Hodnett (1997), Timlin *et al.* (1999), Suleiman e Ritchie (2001), Spychalski (2007), entre outros.

Dados texturais, de densidade de solo e de teor de matéria orgânica são insuficientes para uma descrição mais acurada do complexo poroso, o que motiva a geralmente baixa acurácia e alta incerteza das predições de Ks a partir de PTFs baseadas apenas nesses parâmetros (Spychalski, *et al.*, 2007; Weynants *et al.*, 2009).

A boa capacidade de estimativa das PTFs não está somente associada ao estreito relacionamento entre os preditores e as propriedades hídricas que se querem prever, mas sofre também forte influência das bases de dados utilizadas no treinamento e teste (Schaap e Leij, 1998). Características desejáveis desses bancos de dados para efeito de desenvolvimento e validação de PTFs incluem o tamanho e diversidade da população de amostras, dentre outros aspectos (Perkins, 2011; Ghanbarian *et al.* 2017).

Raros são os modelos de Ks desenvolvidos a partir de um conjunto de dados que tenham essas características. A maioria foi gerada para um número restrito de amostras, para pequenas áreas geográficas e englobando prioritariamente solos de clima temperado. Mais recentemente, no entanto, Ghanbarian *et al.* (2017) realizaram estudo de avaliações de diferentes PTFs de Ks considerando uma notável base de dados em solos do território americano, com mais de 19000 amostras. Trabalhos similares foram desenvolvidos por Minasny e McBratney (2000), Sobieraj *et al.* (2001), Abdelbaki *et al.* (2009), Gwenzi *et al.* (2011) e Julià *et al.* (2014), mas nesses casos, foram utilizados conjuntos de dados mais limitados, restritos ou não a pequenas escalas geográficas. Segundo Ghanbarian *et al.* (2017), PTFs de Ks desenvolvidas para bases de dados mais limitadas podem gerar resultados contraditórios, como é o caso de PTFs sendo avaliadas como as melhores em alguns trabalhos, mas outras vezes mal classificadas em estudos de comparação de predições de Ks (Minasny e McBratney, 2000; Julià *et al.*, 2004).

Em solos tropicais brasileiros, há poucos registros de PTFs de Ks, como a de Tomasella e Hodnett (1997), essa também desenvolvida para um número reduzido de amostras (124) e englobando poucas regiões do Brasil. A carência desses modelos no país pode ser justificada pela deficiência da organização de informações de Ks, o que tem suscitado o uso de PTFs de ambientes temperados para estimativa dessa propriedade. As predições de Ks em solos brasileiros a partir das PTFs de regiões temperadas podem estar severamente comprometidas, em especial quando esses modelos foram desenvolvidos exclusivamente com dados de textura, já que nesses casos os mesmos não conseguem reproduzir as usualmente elevadas condutividades hidráulicas saturadas dos solos argilosos intemperizados brasileiros (Tomasella e Hodnett, 2004). Em estudos de PTFs de retenção de água em solos argilosos intemperizados brasileiros, Tomasella *et al.* (2000) e Ottoni *et al.* (2018) também confirmaram a baixa confiabilidade dos modelos de clima temperado.

Apesar da existência de várias PTFs de Ks em solos de ambiente temperado, são ainda inexistentes, a nosso conhecimento, modelos que levem em consideração uma base de dados incluindo solos de clima tropical e temperado conjuntamente. Os objetivos deste trabalho foram i) propor PTFs de Ks para uma base de dados abrangente em solos de clima tropical e temperado, levando-se em conta a textura e/ou densidade do solo, como também a porosidade efetiva ou a macroporosidade (dois termos estruturais dos solos a serem definidos no texto); ii) avaliar as PTFs desenvolvidas utilizando um banco de dados teste, fazendo comparações de suas predições com as de outras equações da literatura com características similares às dos modelos propostos.

3.2 Materiais e Métodos

3.2.1 Banco de dados de solos

3.2.1.1 Banco de dados de calibração e validação

Os bancos de dados de solos brasileiros, HYBRAS (Ottoni et al., 2018), e europeus, HYPRES – *Hydraulic PRoperties of European Soils* (Wösten *et al.*, 1999), foram selecionados para representar os solos de ambiente tropical e temperado usados neste estudo, sendo destacadas 412 e 1077 amostras, respectivamente. O critério de seleção das amostras levou em consideração a disponibilidade conjunta de informações de Ks, textura, densidade do solo (BD) e dados de retenção hídrica em ampla faixa de sucção (0-15000 cm). Foram também critérios sempre respeitados o uso de amostras indeformadas para medições dos dados de retenção de água e métodos onde a pressão e a umidade fossem diretamente mensuradas (como é o caso do método da placa porosa em câmara de pressão). Apesar de os dados de retenção de água não terem sido plenamente utilizados neste trabalho (somente o conteúdo volumétrico, θ, nas sucções de 60 cm e 330 cm, seção 3.2.2.1), fizemos sua seleção na faixa completa de sucção (0 – 15000 cm) para eventuais usos futuros de estimativa de Ks a partir dessas medições. A abrangência geográfica das amostras de solos selecionadas e sua diversidade pedológica também foram critérios respeitados.

Embora existam técnicas mais elaboradas de seleção de amostras para calibração e validação de PTFs [por exemplo: *jackknife* (Efron, 1980) e *bootstrap* (Efron e Tibshirani, 1993)], neste estudo foi adotado o método simplificado de divisão da base de dados em dois únicos conjuntos de calibração e teste, conforme descrito a seguir. 412 amostras de solos europeus foram destacadas das 1077 amostras selecionadas do HYPRES, além das 412 brasileiras, para composição da base de dados para calibração

das PTFs, totalizando 824 amostras para calibração. Essa distribuição igualitária do número de amostras visou garantir pesos iguais dos solos de diferentes origens geográficas/pedogenéticas na estimativa de Ks. O critério de seleção das amostras de calibração dos solos europeus foi aleatório, mas buscou-se manter similaridade entre as faixas de abrangência dos valores de atributos de solo das amostras selecionadas para calibração e as faixas correspondentes relativas às amostras remanescentes para teste (665=1077-412 amostras).

O conjunto de dados para teste das PTFs contou com as acima descritas, 665 amostras de solos europeus e com as mesmas 412 amostras de solos brasileiros utilizadas na calibração, totalizando 1077 solos para teste. Infelizmente, de nosso conhecimento não há outro banco de dados abrangente de Ks em solos brasileiros que respeitasse os critérios de seleção das amostras descritos neste estudo. Por esse motivo, as mesmas 412 amostras da calibração foram consideradas na validação das PTFs para os solos brasileiros. Visando dar mais sustentação ao estudo de validação em solos brasileiros dos modelos desenvolvidos neste trabalho, foi selecionado um conjunto independente de dados em solos do Cerrado brasileiro, onde tais modelos foram também testados, conforme descrito no item 3.3.1. Essa base de dados não respeitou totalmente os critérios adotados para seleção das informações de Ks deste estudo, conforme será visto adiante. Por esse motivo, o inventário de dados do Cerrado não foi incluído na base de dados teste deste trabalho. O número de amostras para teste das PTFs não apresentou a mesma proporção em solos brasileiros e europeus (412 brasileiros e 665 europeus). Assim, com base nas observações anteriores, os resultados de validação para solos europeus, em princípio, têm mais sustentação do que para solos brasileiros, mas entendemos que esse inconveniente é de baixa relevância no contexto do presente estudo.

3.2.1.2 Descrição do banco de dados

Os métodos de determinação de Ks das bases de dados de calibração e teste foram prioritariamente os dos permeâmetros de carga constante e decrescente em amostras indeformadas (~90% das medições de Ks), sendo também presentes medições pelo método de Guelph. O volume da amostra de 100 cm^3 foi frequentemente utilizado para a determinação de Ks em solos brasileiros (~60% das medições de Ks brasileiras com informação de tamanho da amostra), mas outros tamanhos de amostras foram também comuns. Os percentuais de frações granulométricas foram todos com as

mesmas faixas limites (USDA, 1987) para teores de areia, silte e argila. O método de medições da densidade do solo, quando mencionado no HYBRAS e HYPRES, foi o do anel volumétrico. A porosidade total foi calculada a partir das determinações de densidade do solo e densidade das partículas.

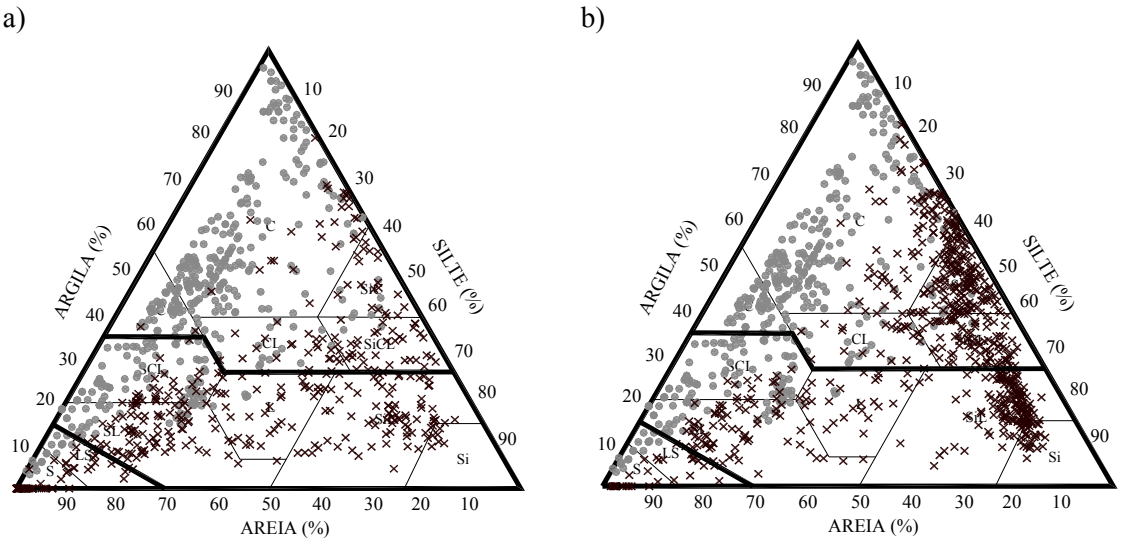
As 412 amostras de solos brasileiros provém de 11 estados das 26 unidades federativas do país, com menor expressão de dados na região Centro-Oeste. Classificados segundo o *World Reference Base for Soil Resources* (WRB) (WRB, 2015), os Ferralsols e Acrisols, solos intemperizados e dominantes no território brasileiro (~60% do território do país), predominaram em 78% das 412 amostras; as demais corresponderam aos Cambisols, Gleysols, Podzols, Nitisols e Histosols. A distribuição geográfica das amostras não se encontrava disponível na base de dados de solos europeus cedida, mas estes englobavam vários países da Europa (Wösten *et al.*, 1999). Há uma diversidade pedológica entre os 1077 solos europeus, incluindo Fluvisols, Gleysols, Luvisols, Podzols, Cambisols, Phaezoems, Leptosols, Albeluvisols e Histosols, os cinco primeiros predominantes, seja no conjunto de dados de calibração como de teste.

As bases de dados do estudo (calibração e teste) mostraram abrangência nas informações das frações granulométricas (Figura 3.1a,b). As amostras de solos brasileiros ocuparam majoritariamente o lado esquerdo do triângulo textural, onde a faixa de silte é menor que 20%, representação típica de solos intemperizados, sendo a área remanescente majoritariamente tomada pelas amostras de solos europeus. A distribuição das amostras de calibração nas diferentes classes texturais não foi homogênea entre os solos brasileiros e europeus, havendo uma maior concentração na classe argila nos solos brasileiros e nas classes franco siltoso e franco arenoso para os europeus (Tabela 3.1). Esse fato pode criar ineficiências de desempenho dos modelos propostos envolvendo solos brasileiros e europeus nas diferentes classes texturais. Na base de dados de validação, os valores médios das propriedades foram detalhados segundo sua origem, brasileira ou europeia, já que as PTFs avaliadas foram testadas separadamente a partir desse critério (Tabela 3.2).

Neste trabalho, a porosidade efetiva ($Ø_{330}$) e a macroporosidade ($Ø_{60}$) foram arbitrariamente definidas como sendo a porosidade total menos o conteúdo volumétrico às sucções de 330 cm [θ(330)] e 60 cm [θ(60)], respectivamente, sendo esses dois parâmetros de solo relacionados à curva de retenção de água. Sabe-se, no entanto, que

tais termos têm dubiedade de entendimento na literatura (Perret *et al.*, 1999; Aimrun *et al.*, 2004; Giménez, 2006)

A faixa dos valores de Ks variou em cinco ordens de magnitude para o conjunto de dados de calibração e em seis ordens de grandeza para o de teste (Tabelas 3.1 e 3.2), indicando grande abrangência nas estruturas porosas dos solos. BD, $Ø_{330}$ e $Ø_{60}$ compreenderam também uma faixa ampla de valores. Os intervalos das propriedades físico-hídricas das duas bases de dados foram, regra geral, comparáveis com às faixas de valores dos correspondentes atributos registrados em Ghanbarian *et al.* (2017) para suas 19822 amostras americanas. Todos os fatos acima indicam que os bancos de dados deste estudo apresentam larga abrangência pedológica e dos valores de suas propriedades de solo, sendo considerados, desta forma, apropriados para geração e avaliações de PTFs de Ks.



Legenda:
- solos brasileiros
- × solos europeus

C - Argila, SC - Argila Arenosa, CL - Franco Argilosa, SCL - Franco Argilo Arenosa, SL - Franco Arenoso, LS - Areia Franca, S - areia, L - Franca, SiC - Argila Siltosa, SiCL - Franco Argilo Siltosa, SiL - Franco Siltosa, Si - Silte

Figura 3.1 - Distribuição das amostras de solo das bases de dados de a) calibração e b) teste no triângulo textural. A linha mais cheia no interior do triângulo textural indica a divisão dos grupos das classes texturais em fino, médio e grosseiro, segundo a proposta de Cassel *et al.* (1983). Esses grupos estão representados nessa sequência, de cima para baixo no triângulo.

Tabela 3.1 – Valores médios das propriedades de solo da base de dados de calibração (N=824†/660‡ amostras). Classes texturais com menos de 10 amostras não foram representadas.

	ns (EU/BR)	BD§ (g cm^{-3})	Areia	Silte %	Argila	$Ø_{330}$¶ cm^3 cm^{-3}	$Ø_{60}$# cm^3 cm^{-3}	Ks‡‡ cm d^{-1}
Areia	58 (46/12)	1,54	96,2	2,32	1,48	0,291	0,211	192,8 (5,1)
Areia Franca	30 (22/8)	1,54	82,4	10,1	7,46	0,236	0,152	118,4 (4,6)
Franco Arenoso	120 (82/38)	1,57	68,2	17,5	14,4	0,191	0,132	45,0 (6,0)
Franco	45 (41/4)	1,54	40,1	40,7	19,1	0,117	0,092	27,7 (5,9)
Franco Siltoso	86 (86/0)	1,50	17,4	66,2	16,4	0,131	0,078	36,7 (4,8)
Franco Argilo Arenoso	101 (27/74)	1,55	59,8	14,7	25,5	0,165	0,115	42,5 (7,7)
Franco Argiloso	40 (22/18)	1,36	31,1	36,5	32,4	0,129	0,118	46,6 (6,1)
Franco Argilo Siltoso	43 (39/4)	1,38	10,8	56,1	33,1	0,097	0,079	57,9 (7,8)
Argila Siltosa	24 (18/6)	1,12	6,68	46,6	46,7	0,125	0,124	22,9 (12,8)
Silte	-	-	-	-	-	-	-	-
Argilo Arenosa	45 (2/43)	1,41	49,9	9,66	40,4	0,176	0,118	49,7 (6,2)
Argila	232 (27/205)	1,24	23,6	17,1	59,4	0,179	0,127	47,8 (8,1)
Todos	824 (412/412)	1,42 *0,48-1,97*	42,7 *0,40-100*	25,4 *0,00-79,7*	31,9 *0,00-96,0*	0,172 *0,003-0,458*	0,123 *0,003-0,412*	*49,8* *0,018-3890*

† número de amostras com informações de todas as variáveis, à exceção de $Ø_{60}$;‡ número de amostras com informações de $Ø_{60}$ (seção 3.2.2.1); § densidade do solo; ¶ porosidade efetiva; # macroporosidade; ‡‡ condutividade hidráulica saturada calculada pela média geométrica; segunda linha da coluna de Ks é o desvio padrão geométrico (σ_g) ($\sigma_g = 10^{\sigma}$, onde σ é o desvio padrão na escala logarítmica de base 10); linha com números em itálico indica valores mínimos e máximos.

Tabela 3.2 – Valores médios das propriedades de solo da base de dados de validação (N=1,077†/992‡), considerando os solos brasileiros e europeus. Classes texturais com menos de 10 amostras não foram representadas.

	ns	BD§ (g cm^{-3})	Areia	Silte %	Argila	$Ø_{330}$¶ cm^3 cm^{-3}	$Ø_{60}$# cm^3 cm^{-3}	Ks‡‡ cm^3 cm^{-3}
				Brasileiros				
Areia	12	1,49	93,2	1,45	5,35	0,322	0,167	184 (4,6)
Areia Franca	8	-	-	-	-	-	-	-
Franco Arenoso	38	1,47	71,7	11,6	16,7	0,245	0,172	134 (3,3)
Franco	4	-	-	-	-	-	-	-
Franco Siltoso	-	-	-	-	-	-	-	-
Franco Argilo Arenoso	74	1,50	60,7	12,9	26,1	0,191	0,130	66,1 (4,9)
Franco Argiloso	18	1,27	34,7	32,2	33,1	0,181	0,175	88,0 (3,4)

Tabela 3.2 – Valores médios das propriedades de solo da base de dados de validação (N=1,077†/992‡), considerando os solos brasileiros e europeus. Classes texturais com menos de 10 amostras não foram representadas. (*continuação*)

	ns	BD§ (g cm^{-3})	Areia	Silte %	Argila	$Ø_{330}$¶ cm^3 cm^{-3}	$Ø_{60}$# cm^3 cm^{-3}	Ks‡‡ cm^3 cm^{-3}
Franco Argilo Siltoso	4	-	-	-	-	-	-	-
Argila Siltosa	6	-	-	-	-	-	-	-
Silte	-	-	-	-	-	-	-	-
Argilo Arenosa	43	1,41	49,9	9,56	40,6	0,182	0,118	52,0 (6,0)
Argila	205	1,25	25,4	15,3	59,3	0,191	0,140	64,8 (5,9)
				Europeus				
Areia	15	1,53	94,6	4,58	0,86	0,262	0,162	124 (4,1)
Areia Franca	16	1,52	80,5	13,9	5,66	0,283	0,193	141 (3,3)
Franco Arenoso	66	1,64	67,7	19,7	12,6	0,174	0,101	29,3 (4,7)
Franco	30	1,53	41,1	39,5	19,5	0,122	0,071	18,8 (6,1)
Franco Siltoso	175	1,53	11,3	71,0	17,7	0,106	0,066	20,5 (4,6)
Franco Argilo Arenoso	11	1,66	57,6	19,02	23,4	0,087	0,059	8,25 (5,1)
Franco Argiloso	28	1,46	27,9	37,4	34,7	0,076	0,057	16,2 (5,9)
Franco Argilo Siltoso	104	1,40	10,5	55,7	33,8	0,076	0,051	19,8 (6,3)
Argila Siltosa	132	1,31	5,94	46,5	47,6	0,062	0,044	7,22 (11)
Silte	3	-	-	-	-	-	-	-
Argilo Arenosa	-	-	-	-	-	-	-	-
Argila	85	1,26	8,33	32,5	59,2	0,050	0,032	2,12 (13)
Todos	1077	1,40 *0,52-1,97*	29,5 *0,40-98,4*	34,9 *0,000-81,7*	35,7 *0,000-96,0*	0,138 *0,009-0,458*	0,090 *0,002-0,412*	26,3 *0,006-3890*

† número de amostras com informações de todas as variáveis, à exceção de $Ø_{60}$;‡ número de amostras com informações de $Ø_{60}$ (seção 3.2.2.1); § densidade do solo; ¶ porosidade efetiva; # macroporosidade; ‡‡ condutividade hidráulica saturada calculada pela média geométrica; segunda linha da coluna de Ks é o desvio padrão geométrico (σ_g) ($\sigma_g = 10^{\sigma}$, onde σ é o desvio padrão na escala logarítmica de base 10); linha com números em itálico indica valores mínimos e máximos.

3.2.2 Desenvolvimento e avaliação de funções de pedotransferências

3.2.2.1 Desenvolvimento de PTFs

A condutividade hidráulica dos solos tipicamente cresce exponencialmente com o tamanho dos poros preenchidos por água (Schjønning, 1986). Desta forma, a condutividade hidráulica saturada em amostras indeformadas de solo depende principalmente das características dos poros maiores. A porosidade efetiva (segundo a

definição na seção anterior) é uma medida relativa do volume dos grandes poros que têm diâmetros equivalentes ≥ 9 μm (Amer, 2012). Ahuja *et al.* (1984) sugeriu que a equação modificada de Kozeny-Carman poderia ser usada para estimar Ks a partir da porosidade efetiva. A relação proposta foi:

$$Ks=B\emptyset_{330}^{m} \quad (3.1)$$

onde Ks está em cm d^{-1}, $\emptyset_{330}$ (ou $\emptyset_{60}$) em cm^3 cm^{-3}, e B e m são constantes empíricas do modelo.

Os parâmetros da Equação 3.1 foram ajustados para o banco de dados de calibração deste estudo, considerando suas informações de Ks e $\emptyset_{330}$. Novos parâmetros B e m foram ajustados para a equação equivalente à Equação 3.1 considerando $\emptyset_{60}$ no lugar de $\emptyset_{330}$. $\emptyset_{60}$ foi também considerada devido à larga disponibilidade de θ(60) em levantamentos de solos no Brasil, como também para testar outro dado de retenção hídrica além do θ(330).

Uma regressão multilinear também foi usada:

$$\log_{10}Ks=a + b\ Areia + c\ Silte + d\ Argila + e\ BD \quad (3.2)$$

onde Ks está em cm d^{-1}, Areia, Silte, Argila são as frações granulométricas em %; BD, em g cm^{-3}; a, b, c, d, e são parâmetros empíricos do modelo.

Todos os parâmetros dos modelos acima foram estimados pelo método dos mínimos quadrados. A porosidade total não estava acessível para todas as amostras do estudo. Quando isso aconteceu adotaram-se os dados de conteúdo de água na saturação. Muitas amostras também não possuíam medições disponíveis na sucção exata de 330 cm. Para evitar redução do número de amostras, medições de conteúdo de água entre 300 a 350 cm foram aceitas como θ(330). Se duas ou mais medições estivessem presentes nesse intervalo de sucção, o dado com sucção mais próximo de 330 cm foi selecionado. A indisponibilidade de dados na sucção exata de 60 cm também aconteceu em alguns casos, utilizando-se, equivalentemente, o intervalo de sucção entre 50 e 80 cm para a seleção das medições de θ(60). A base de dados original foi reduzida para as medições de θ(60): 660 amostras (330 brasileiras e 330 europeias, Tabela 3.1) foram utilizadas para calibração do modelo baseado em $\emptyset_{60}$ e 992 amostras para teste dessa PTF (330 brasileiras e 662 europeias, Tabela 3.2).

3.2.2.2 PTFs publicadas na literatura

Há uma enorme quantidade de PTFs de Ks disponíveis na literatura. Neste trabalho, foram utilizados quatro critérios para seleção dos modelos que levassem em consideração as características das PTFs propostas neste estudo: 1 - modelos desenvolvidos para bases de dados acima de 350 amostras, à exceção do modelo TH (Tabela 3.3); 2 - modelos calibrados para grandes áreas territoriais e largas faixas dos valores dos atributos do solo; 3 - modelos ajustados para dados de textura e/ou BD, ou para a expressão de KC (Equação 3.1), à exceção do modelo $RO_{sscbdth330}$ (Tabela 3.3) também dependente de θ(330); 4 - modelos com índice de aplicabilidade superior ou igual a 70%. O índice de aplicabilidade de uma PTF, conforme proposto por Tomasella e Hodnett (2004) e também implementado por Nguyen *et al.* (2015a), foi determinado para verificar se uma amostra de dados está enquadrada na base de dados de calibração das diferentes PTFs. Esse índice foi definido como a razão entre o número de amostras para as quais uma PTF particular pode ser aplicada dentro de uma base de dados teste e o número total de amostras dessa base de dados.

No contexto acima, duas PTFs foram selecionadas da literatura com estimativa dos parâmetros B e m da Equação 3.1: Ahuja *et al.* (1989) e Tomasella e Hodnett (1997); a última (modelo TH) escolhida por ser uma das raras PTFs desenvolvidas para solos brasileiros, apesar de ter sido gerada para um número limitado de amostras (124), como mencionado anteriormente. Quanto às PTFs de textura e/ou de BD, foram identificadas as de Cosby *et al.*(1984), Schaap *et al.* (2001) e Julia *et al.*(2004). No trabalho de Schaap *et al.* (2001) foi desenvolvido o programa Rosetta (RO) que contempla diversas funções de pedotransferências, geradas em rede neural, para diferentes níveis de informação de variáveis preditoras, sendo, neste trabalho, selecionadas apenas três para avaliação: 1) PTF baseada somente em dados de textura (RO_{ssc}), 2) em dados de textura e densidade de solo (RO_{sscbd}), 3) em dados de textura, densidade de solo e θ(330) ($RO_{sscbdth330}$). As PTFs de Cosby *et al.* (1984) e Julià *et al.* (2001) são baseadas apenas em textura.

A descrição das sete PTFs selecionadas e das três desenvolvidas no estudo encontra-se na Tabela 3.3, com a correspondente notação de identificação. Como as variáveis $Ø_{330}$, $Ø_{60}$ e θ(330) dizem respeito à curva de retenção de água, os cinco modelos que as contêm foram aqui designados como estruturais. Os demais foram

denominados como modelos em função da textura e/ou densidade do solo (modelos textura/BD).

Tabela 3.3 - Características das PTFs de Ks e da base de dados de sua calibração.

Notação dos modelos	Referências	Equações de Ks (cm d^{-1})	ns†	Regiões	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	BD ‡ (g cm^{-3})	$Ø_{330}$ § (cm^3 cm^{-3})	Índice AP¶
				PTFs propostas:						
WM_{330}	Work Model KC, $Ø_{330}$	$Ks = 1766,2\ Ø_{330}^{1,8683}$	824	Brasil e Europa			Tabela 3.1			100%
WM_{60}	Work Model KC, $Ø_{60}$#	$Ks = 1446,6\ Ø_{60}^{1,5922}$	660				Tabela 3.1			99,8%
WMsscbd	Work Model areia, silte, argila, densidade do solo	$Ks = 10^{(2,609+0,01172\ areia\ +0,003775\ silte\ -1,062\ bd)}$ ‡‡	824				Tabela 3.1			99,5%
				PTFs da literatura:						
Ahuja	Ahuja *et al.* (1989)	$Ks = 18348\ Ø_{330}^{3,288}$	473	Sudeste dos EUA					0,15-0,40	99%
TH	Tomasella e Hodnett (1997)	$Ks = 135696\ Ø_{330}^{4,5359}$	124	Região Amazônica, Brasil					0,025-0,40	96,5%
Cosby	Cosby *et al.* (1984)	$Ks = 60,96\ 10^{(-0,60+0,126\ areia\ -\ 0,0064\ argila)}$	1448	EUA	6-92		3-58			75,4%
RO_{ssc}	Programa Rosetta: Schaap *et al.*(2001)	Entrada: areia, silte e argila	1306	EUA e Europa	0-100	UN ‡‡‡	0-89	UN ‡‡‡		99,4%
RO_{sscbd}		Entrada: areia, silte, argila, densidade do solo								
$RO_{sscbdth330}$		Entrada: areia, silte, argila densidade do solo, θ(330)								
Julia	Julià *et al.* (2004)	$Ks = 2,208\ \exp^{0,0491\ areia}$	3,172	Espanha	UN ‡‡‡					

†número de amostras de solos na base de dados de calibração; ‡ densidade do solo; § porosidade efetiva; ¶ índice de aplicabilidade calculado pelo uso da base de dados teste; # macroporosidade; ‡‡ o coeficiente d da Equação 3.2 é zero; ‡‡‡ dado indisponível.

3.2.2.3 Critério de avaliação

Os índices estatísticos RMSE (*Root Mean Square Error*) e ME (*Mean Error*) foram selecionados para avaliação do desempenho das PTFs, conforme as equações abaixo. Como Ks normalmente exibe distribuição lognormal dentro de uma base de dados, os dados de Ks foram logaritmizados (na base decimal) na determinação desses dois índices.

$$RMSE=\sqrt{\frac{1}{M}\sum_{j=1}^{M}(\log Ks_{p_j}-\log Ks_{m_j})^2} \quad (3.3)$$

$$ME=\frac{1}{M}\sum_{j=1}^{M}(\log Ks_{p_j}-\log Ks_{m_j}) \quad (3.4)$$

onde M é o número de medições, Ks_m e Ks_p são as condutividades hidráulicas medidas e preditas, respectivamente. O RMSE denota o erro global de predição e o ME expressa a tendência de superestimativa (ME>0) ou de subestimativa (ME<0). Ambos são adimensionais. O teste paramétrico t-test para amostras pareadas foi adotado para avaliar a similaridade estatística entre os valores correspondentes de logKs medido e predito (p-value varia de 0 a 1; quanto maior seu valor maior a similaridade).

A avaliação dos modelos propostos neste estudo foi realizada para os conjuntos de dados de calibração e teste, considerando as estatísticas acima discriminadas. Neste trabalho, a acurácia de uma PTF é avaliada pela comparação entre os dados medidos e estimados para a base de dados a partir da qual a PTF foi desenvolvida. A confiabilidade diz respeito à validação do modelo, quando se faz a mesma comparação usando-se uma base de dados diferente daquela utilizada para a geração das PTFs (Pachepsky e Rawls, 1999). As PTFs selecionadas da literatura tiveram seus desempenhos avaliados apenas para o conjunto de dados teste para efeito de comparação de suas confiabilidades com as dos modelos aqui desenvolvidos.

3.3 Resultados e discussão

3.3.1 Calibração e validação dos modelos propostos

A avaliação da acurácia dos três modelos desenvolvidos no estudo mostrou que a PTF WM_{330} foi a que manifestou melhores resultados, seja para o conjunto completo de amostras (Tabela 3.4) como por grupos de classes texturais da Figura 3.1 (Figura 3.2). Esse modelo foi o único a apresentar p-value acima de 0.10 (três asteriscos), tanto na avaliação global da similaridade estatística entre o valor medido e estimado de LogKs (Tabela 3.4), quanto na comparação por grupos de classes texturais (Figura 3.2). A PTF WM_{330} apresentou ainda maior acurácia do que a encontrada por Minasny e McBratney (2000) para um modelo correspondente (modelo K9) ajustado para 462 amostras do território australiano (RMSE=1.15, ME=-0.166). A acurácia de WM_{330}, por outro lado, foi ligeiramente inferior à registrada por Ahuja *et al.* (1989) para sua equação de KC, considerando nesse caso as 473 amostras de solos americanos (RMSE=0,613). Também para a PTF baseada em textura/BD (WM_{sscbd}), seus erros globais de calibração (Tabela 3.4) foram superiores aos obtidos pela PTF correspondente do Rosetta (Schaap *et al.*, 2001, seu modelo H3), esta última registrando RMSE de 0,67 para os 1306 solos do seu ajuste. Essa inferioridade de desempenho do modelo WM_{sscbd} em relação ao do Rosetta pode parcialmente ser devida ao uso de

diferentes técnicas para o desenvolvimento das PTFs. Além disso, a base de dados de Schaap *et al.* (2001) é menos contrastante em termos pedogenéticos do que a base de dados do presente estudo, o que pode favorecer o desempenho do modelo Rosetta.

Tabela 3.4 – Acurácia dos modelos propostos de Ks.

Modelos	ns†	RMSE	ME
WM_{330}	824	0,69***	0,00
WM_{60}	660	0,80***	0,00
WM_{sscbd}	824	0,80***	0,00

†número de amostras; Sem asterisco $p_{paired\ t\text{-}test} \leq 0{,}001$; * $0{,}001 < p_{paired\ t\text{-}tes\ t} \leq 0{,}05$; ** $0{,}05 < p_{paired\ t\text{-}tes\ t} \leq 0{,}10$; *** $p_{paired\ t\text{-}test} > 0{,}10$.

Os resultados de RMSE e ME desses três modelos apresentaram variações entre os grupos de classes texturais (Figura 3.2). Os solos de granulometria mais fina concentraram os maiores RMSE, seguidos dos registrados para os solos de textura média e grosseira, todos os grupos com valores menores que 1 para os três modelos. Isso é compatível com a expectativa da maior complexidade estrutural dos solos com o aumento da sua fração argila. O comportamento do crescimento das magnitudes de ME para esses três grupos, por outro lado, seguiu ordem inversa da dos valores de RMSE, com valores próximos a zero para o grupo de textura fina para as três PTFs avaliadas, e valores oscilando de -0,07 a -0,41 para os solos de textura grosseira. Entretanto, tais valores de ME foram sempre pequenos ($|ME|<0{,}07$) no modelo WM_{330} para os três grupos texturais. A Tabela 3.4 e a Figura 3.2 indicam proximidade de desempenho da calibração dos modelos WM_{60} e WM_{sscbd}, à exceção do desempenho nitidamente superior do WM_{sscbd} em relação ao WM_{60} na classe de textura grosseira, no que diz respeito ao erro ME.

Nas Figuras 3.3, 3.4 e 3.5, são ilustrados os resultados de validação dos três modelos, respectivamente, para o conjunto completo dos dados de validação (1077 amostras), para os solos brasileiros (412 amostras) e europeus (665 amostras) separadamente, e por grupos das classes texturais identificadas como finas e médias, considerando separadamente nesses grupos os solos brasileiros e europeus. Excluem-se nesse último caso (Figura 3.5) as classes de textura grosseira por apresentar número muito reduzido de amostras (31 em solos europeus e 20 em brasileiros).

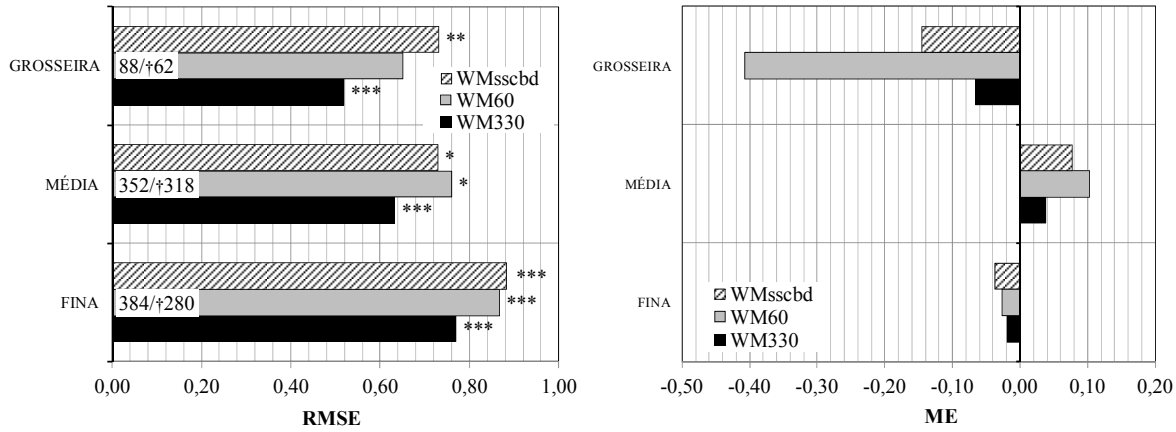


Figura 3.2 – Acurácia dos modelos propostos por grupos de classes texturais. O número de amostras de calibração é indicado em cada grupo de solos. Valores precedidos por † referem-se ao número de amostras para avaliação da acurácia do modelo WM_{60}. Sem asterisco $p_{paired\ t\text{-}test} \leq 0{,}001$; * $0{,}001 < p_{paired\ t\text{-}tes\ t} \leq 0{,}05$; ** $0{,}05 < p_{paired\ t\text{-}tes\ t} \leq 0{,}10$; *** $p_{paired\ t\text{-}test} > 0{,}10$.

Os erros globais de validação dos três modelos (Figura 3.3) foram, de modo geral, comparáveis àqueles determinados para a base de dados de calibração (Tabela 3.4), à exceção do modelo WM_{sscbd} que apresentou uma piora de desempenho. A menor confiabilidade do modelo WM_{sscbd} em relação às dos modelos WM_{330} e WM_{60} ocorreu principalmente nos solos europeus (Figura 3.4), particularmente quanto à classe textural fina (Figura 3.5a). Nesse último caso, o RMSE do modelo WM_{sscbd} foi de cerca 1,20, enquanto que os dos dois outros modelos foram de cerca de 0,85, com seus ME quase nulos.

A confiabilidade dos três modelos é bem mais próxima quando se trata de solos brasileiros (Figura 3.4), inclusive quando se faz a comparação nas classes de textura fina e média (Figuras 3.5a,b). O pior desempenho em geral do modelo WM_{sscbd}, em comparação aos dos dois outros modelos propostos, deve ser um indicativo da superioridade da capacidade preditora das variáveis estruturais $Ø_{330}$ e $Ø_{60}$, em relação à textura/BD, tendo em vista a determinação de Ks. Além disso, a distribuição não homogênea das amostras utilizadas na calibração nas classes texturais, pode ter prejudicado o desempenho da PTF baseada na textura/BD, como já mencionado antes. Uma discussão mais detalhada sobre as possíveis causas das diferenças entre os desempenhos dos modelos estruturais e de textura/BD é apresentada na próxima seção.

Apesar de comparáveis, a confiabilidade (como a acurácia) do modelo WM_{330} tende a ser superior à do modelo WM_{60}, tanto quando se particiona a base de dados teste em solos europeus e brasileiros (Figura 3.4), como quando se considera a partição em solos de textura fina e média (Figura 3.5a,b). Há também tendência de WM_{330} melhor prever o Ks em solos brasileiros do que os europeus, um resultado parcialmente esperado, já que os dados de validação referentes aos primeiros solos fazem parte da calibração desse modelo. Isso, entretanto, não se repete quanto ao modelo WM_{60} (Figura 3.4).

Visando dar mais sustentação ao estudo de validação para os solos brasileiros dos três modelos propostos neste trabalho, foi selecionado um conjunto independente de amostras de solos da região do Cerrado brasileiro (dado cedido por Luis Fernando Stone, da EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Arroz e Feijão, Goiás, Brasil, comunicação pessoal), aqui chamado de solos BS (*Brazilian Savanna*), conforme já comentado na seção 3.2.1.1. O método de determinação de Ks foi o do permeâmetro de carga constante, sendo o da centrífuga para medições de retenção de água em amostras indeformadas; a mensuração das frações granulométricas e da densidade de solo seguiu o mesmo padrão metodológico de nosso estudo. Essa base de dados contém 421 amostras solos provenientes do estado de Goiás e representativas da classe Ferralsol. As faixas de valores de seus atributos de solo, conforme descritos na Tabela 3.1, enquadram-se naquelas definidas para a base de calibração das PTFs propostas neste estudo (Tabela 3.1).

Aplicando as três PTFs propostas aos solos BS verifica-se que os erros RMSE do modelo WM_{330} sempre foram muito próximos aos da sua calibração (Tabela 3.5). No grupo de textura fina, o desempenho dos outros dois modelos (WM_{60} e WM_{sscbd}) também foi comparável com o da calibração, o que não aconteceu com o modelo WM_{60} no grupo dos solos de textura média. Os erros de estimativa para os solos de textura grosseira não foram apresentados na Tabela 3.5 por não concentrar número suficiente (13) de amostras. Portanto, particularmente quanto aos solos BS de textura fina (solos predominantes nessa base de dados e na base de dados de solos brasileiros do estudo), há uma compatibilidade dos erros de validação das três PTFs propostas em relação aos de calibração, o que reforça o indicativo da consistência dos resultados de validação dos modelos propostos para a base de dados dos solos brasileiros (412 amostras).

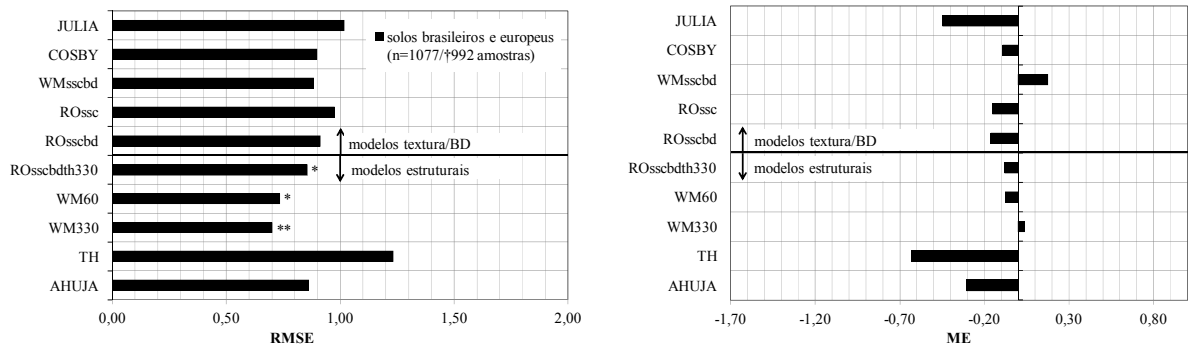


Figura 3.3 – Desempenho de validação das PTFs para a base de dados de solos completa (1,077 amostras); † número de amostras para validação do modelo WM_{60}; Sem asterisco $p_{paired\ t\text{-}test} \leq 0{,}001$; * $0{,}001 < p_{paired\ t\text{-}tes\ t} \leq 0{,}05$; ** $0{,}05 < p_{paired\ t\text{-}tes\ t} \leq 0{,}10$; *** $p_{paired\ t\text{-}test} > 0{,}10$.

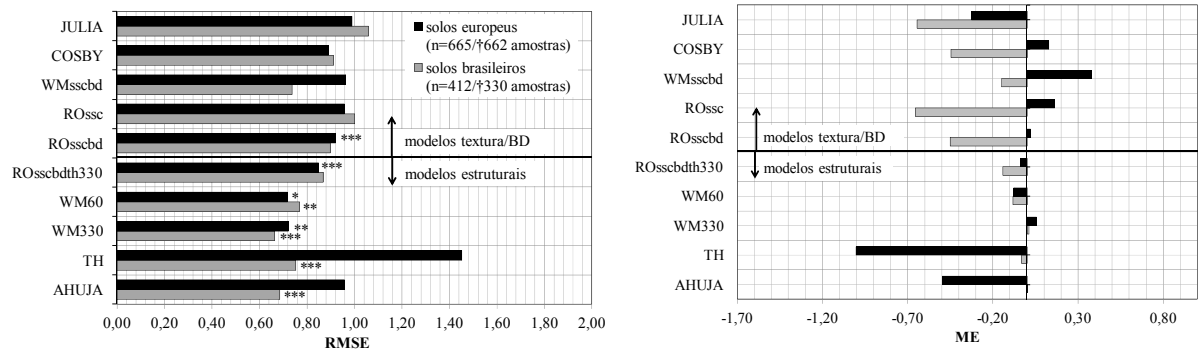


Figura 3.4 – Desempenho de validação das PTFs para solos brasileiros (412 amostras) e europeus (665 amostras); † número de amostras para validação do modelo WM_{60}; Sem asterisco $p_{paired\ t\text{-}test} \leq 0{,}001$; * $0{,}001 < p_{paired\ t\text{-}tes\ t} \leq 0{,}05$; ** $0{,}05 < p_{paired\ t\text{-}tes\ t} \leq 0{,}10$; *** $p_{paired\ t\text{-}test} > 0{,}10$.

a)

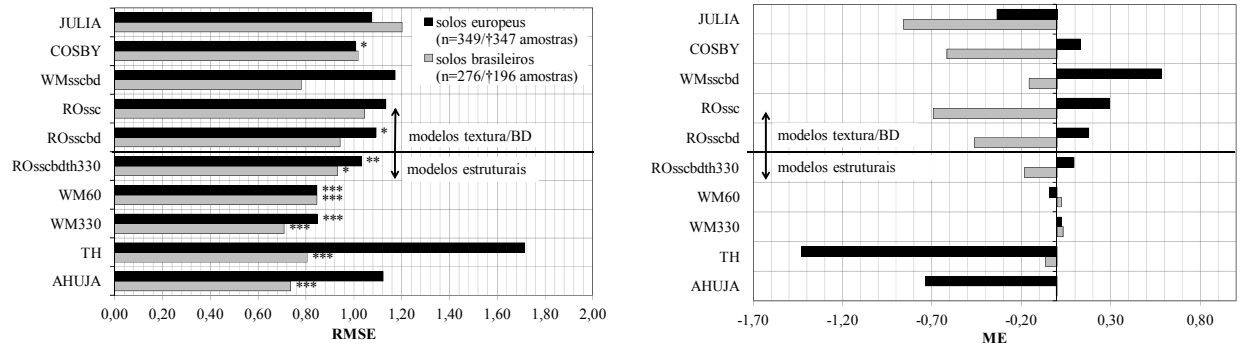


Figura 3.5 – Desempenho de validação das PTFs para solos brasileiros e europeus, levando em conta as classes texturais: a) solos de textura fina e b) solos de textura média; † número de amostras para validação modelo WM_{60}; Sem asterisco $p_{paired\ t\text{-}test} \leq 0{,}001$; * $0{,}001 < p_{paired\ t\text{-}tes\ t} \leq 0{,}05$; ** $0{,}05 < p_{paired\ t\text{-}tes\ t} \leq 0{,}10$; *** $p_{paired\ t\text{-}test} > 0{,}10$.

b)

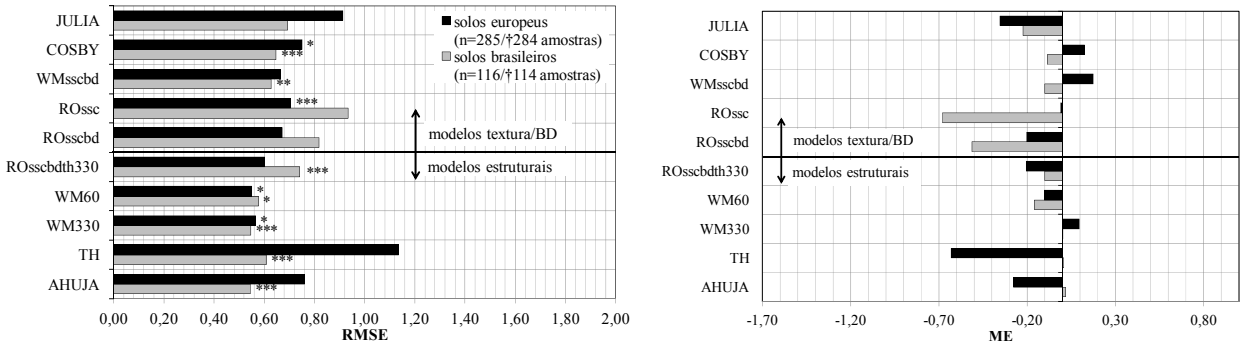


Figura 3.5 – Desempenho de validação das PTFs para solos brasileiros e europeus, levando em conta as classes texturais: a) solos de textura fina e b) solos de textura média; † número de amostras para validação modelo WM_{60}; Sem asterisco $p_{paired\ t\text{-}test} \leq 0{,}001$; * $0{,}001 < p_{paired\ t\text{-}tes\ t} \leq 0{,}05$; ** $0{,}05 < p_{paired\ t\text{-}tes\ t} \leq 0{,}10$; *** $p_{paired\ t\text{-}test} > 0{,}10$. (*continuação*).

Tabela 3.5 - Desempenho dos modelos propostos neste estudo para uma base de dados de solos independente do Cerrado brasileiro.

Modelos	RMSE
Todos os solos (421/†373 amostras)	
WM_{330}	0,75 (0,69***)
WM_{60}	0,89 (0,80***)
WM_{sscbd}	0,83* (0,80 ***)
Solos de textura fina (365/†331 amostras)	
WM_{330}	0,76** (0,77***)
WM_{60}	0,81* (0,87***)
WM_{sscbd}	0,86* (0,88***)
Solos de textura média (43/†32 amostras)	
WM_{330}	0,63 (0,63***)
WM_{60}	1,17 (0,76*)
WM_{sscbd}	0,59*** (0,73*)

†número de amostras utilizadas para validação do modelo WM_{60}. Valores de erros entre parêntesis são os obtidos na calibração dos modelos propostos. Sem asterisco $p_{paired\ t\text{-}test} \leq 0{,}001$; * $0{,}001 < p_{paired\ t\text{-}tes\ t} \leq 0{,}05$; ** $0{,}05 < p_{paired\ t\text{-}tes\ t} \leq 0{,}10$; *** $p_{paired\ t\text{-}test} > 0{,}10$.

3.3.2 Validação das PTFs da literatura e comparação dos resultados com o desempenho dos modelos propostos

A comparação de desempenho entre todas as PTFs deste estudo, levando em conta a base de dados teste (1077 amostras) (Figura 3.3), identificou os modelos WM_{330} e WM_{60} com os menores erros de estimativa (RMSE e ME), com destaque para a PTF WM_{330}. O terceiro melhor desempenho foi o da PTF $RO_{sscbdth330}$, registrando RMSE na ordem de 0,86 e ME de -0,08, resultado próximo ao de Cosby; no entanto, a capacidade

global de predição desse modelo Rosetta se mostrou mais satisfatório que a de Cosby, pois permitiu uma melhor comparação um a um entre os dados medidos e estimados de logKs (um asterisco na Figura 3.3), o que não ocorreu para a PTF de Cosby. O desempenho da PTF $RO_{sscbdth330}$ talvez fosse majorado caso no seu ajuste fossem incluídos preditores representativos do espaço macroporoso do solo, tal como $Ø_{330}$ ou $Ø_{60}$.

Apesar das relativamente boas estimativas de Ks como funções da porosidade efetiva produzidas pelo modelo WM_{330}, se comparadas às observadas nos trabalhos de Minasny e McBratney (2000) e Spychalski *et al.* (2007), os modelos equivalentes TH e Ahuja apresentaram predições globais bem mais imprecisas (Figura 3.3), em especial o TH, relativamente aos demais modelos estruturais ($RO_{sscbdth330}$, WM_{330}, WM_{60}). O baixo desempenho do modelo TH pode ser devido ao uso de alguns valores estimados de Ks e θ(330) no seu ajuste, como também ao número limitado de amostras de calibração, conforme anteriormente comentado.

Excluindo o modelo Julia (a de capacidade mais baixa), as PTFs calibradas para textura/BD tiveram suas capacidades de predições comparáveis entre si na base total de dados (Figura 3.3), com destaque para o desempenho do modelo Cosby. Segundo a Figura 3.3, tudo indica que a densidade do solo não tenha sido uma variável significativa na predição de Ks; o desempenho do modelo Rosseta desenvolvido apenas para textura (RO_{ssc}) foi pouco melhorado quando adicionados ao mesmo dados de densidade do solo (RO_{sscbd}).

Como os modelos baseados na estrutura porosa dos solos apresentaram em geral melhor desempenho que os modelos dependentes da textura/BD, visaremos testar se isso se deve à maior qualidade preditora das variáveis estruturais do solo, particularmente a porosidade efetiva ($Ø_{330}$) e macroporosidade ($Ø_{60}$), em comparação aos usuais preditores texturais e de densidade do solo. Pretendendo nesse teste explicitar a interferência das bases de dados de calibração e validação como elementos que influenciam a avaliação de desempenho das PTFs, recalibramos cada um dos três novos modelos propostos (WM_{330}, WM_{60}: funções de $Ø_{330}$ e $Ø_{60}$, respectivamente, WM_{sscbd}: função das frações granulométricas e BD) a partir das duas bases de dados: a) solos brasileiros usados na calibração original dos modelos (412 amostras); b) solos europeus usados na calibração original dos modelos (412 amostras). Os três modelos recalibrados da base a) foram então validados na base de dados b), aqui chamado de Caso 1, e vice-

versa [os três novos modelos recalibrados de b) foram validados na base de dados a), Caso 2]. Os resultados desse teste são apresentados na Figura 3.6.

Percebe-se que os modelos recalibrados WM_{330} (Casos 1 e 2) têm na calibração e validação erros muito próximos (RMSE~0.70; ME~zero), similarmente ao que foi comentado na seção anterior em relação ao modelo proposto WM_{330}. Esse mesmo fato não se repetiu com relação aos dois novos modelos WM_{sscbd}, que tiveram erros de validação, RMSE e ME, bem superiores aos de calibração. Os dois modelos recalibrados WM_{60} apresentaram desempenho equivalente na calibração e validação quanto ao RMSE (RMSE~0,80), mas não quanto ao ME; ainda assim seus ME de validação (ME~0,20) foram bem inferiores aos ME de validação dos modelos WM_{sscbd}.

Desta forma, conclui-se que, em bases de dados com grande heterogeneidade pedogenética, como a deste estudo, as propriedades estruturais $Ø_{330}$ ou $Ø_{60}$ foram preditores mais confiáveis de Ks, relativamente à textura e BD. De fato, sabe-se que as argilas intemperizadas de solos de clima tropical estruturam geralmente os solos com maior permeabilidade e distintas curvas de retenção, em relação às argilas de ambientes temperados (Tomasella e Hodnett, 2004; Ottoni et al., 2018), o que prejudica o desempenho das PTFs de Ks com preditores unicamente baseados em textura/BD.

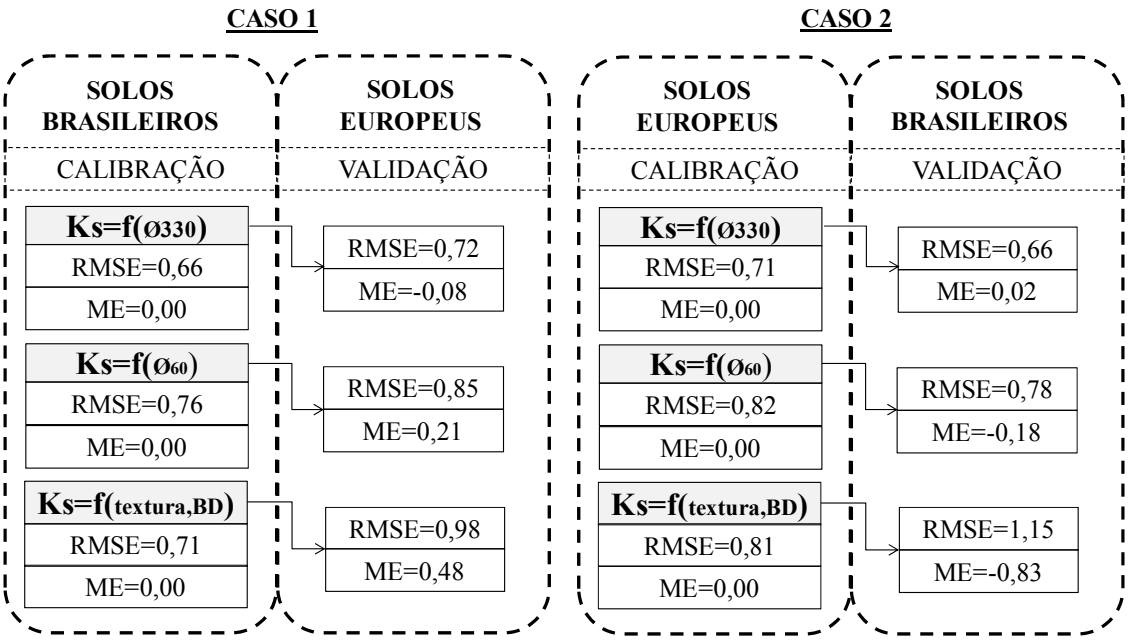


Figura 3.6 – Acurácia e confiabilidade das PTFs baseadas em textura e densidade do solo em relação às PTFs em função da porosidade efetiva ($Ø_{330}$) ou macroporosidade ($Ø_{60}$), considerando uma base de dados de calibração brasileira com uma base de dados de validação europeia (Caso 1) e vice-versa (Caso 2).

A avaliação do desempenho de todos os modelos para solos brasileiros e europeus, em separado (Figura 3.4), mostrou novamente a superioridade dos modelos WM_{330} e WM_{60}. Em termos relativos, a PTF $RO_{sscbdth330}$ também apresentou predições satisfatórias, mas com erros de estimativa em geral superiores aos dos dois primeiros. Foi muito similar, no entanto, a capacidade de predição de cada um dos três modelos acima para solos brasileiros e europeus. A tendência de superioridade de desempenho desses três modelos foi também confirmada quando os mesmos foram analisados por grupo de classes texturais (Figuras 3.5ab). Os modelos TH e Ahuja, apesar de terem propiciados erros comparáveis aos demais modelos estruturais quanto aos solos brasileiros, apresentaram piora de desempenho quando, particularmente o primeiro, foram avaliados para solos de ambiente temperado (Figuras 3.4 e 3.5), o que rebaixa suas capacidades de predição globais. O modelo TH, entretanto, apresentou inconvenientes de calibração, já aqui citados. O modelo Ahuja, apesar de calibrado para solos de regiões temperadas, como já mencionado, mostrou-se aqui mais efetivo em solos brasileiros. No caso dos solos brasileiros, seu RMSE (Figura 3.4) foi inclusive comparável com o valor de 0,613 de sua calibração para 473 amostras americanas. Não temos explicação para a inconsistência decorrente dos maiores erros de validação (RMSE e ME) do modelo Ahuja quanto aos solos europeus (Figuras 3.4 e 3.5). Isso talvez seja um indicativo da necessidade de se incluir em PTFs de Ks preditores distintos de $Ø_{330}$ e $Ø_{60}$ ou de resultados de inconsistências relacionados a medições de Ks.

Quanto aos modelos baseados em textura/BD, seus RMSEs ficaram próximos entre si, oscilando em cerca de 0,95, seja para solos brasileiros ou europeus, com exceção do modelo WM_{sscbd} para solos brasileiros que obteve RMSE=0,74 (Figura 3.4), possivelmente devido ao fato dessa validação ter sido a única feita com solos que também participaram da calibração. Por outro lado, as magnitudes de ME para essas PTFs em geral apresentaram discrepâncias expressivas entre solos brasileiros e europeus, com tendência de subestimativa para brasileiros e superestimativa para europeus (Figuras 3.4 e 3.5). Além disso, a subestimativa ou a superestimativa de cada modelo foi sempre de grandes proporções ($|ME|>0,30$, Figura 3.4). As tendenciosidades dos modelos de textura/BD foram bem mais elevados para solos brasileiros do que europeus, a menos dos da PTF WM_{sscbd} (Figura 3.4), já que a mesma foi a única calibrada para solos brasileiros nesse grupo de PTFs. Os fatos acima reforçam que o uso

de modelos de textura/BD ajustados para regiões de clima temperado devem ser evitados em predições de Ks para solos brasileiros e vice-versa. Essas diferenças de desempenho dos modelos texturais/BD entre solos brasileiros e europeus ficaram em geral mais evidentes para os solos de textura fina (Figura 3.5a), o que aponta para a importância da mineralogia das argilas na predição de Ks. Essa mesma relevância mineralógica foi citada por Ottoni *et al.* (2018) na predição da curva de retenção de água por PTFs envolvendo solos de clima tropical e temperado.

Curiosamente, a PTF WM_{sscbd}, calibrada para um número homogêneo de amostras de solos brasileiros e europeus (seção 3.2.1.1), realizou predições muito mais satisfatórias de Ks para solos brasileiros de textura fina do que para solos europeus de textura fina, o que não aconteceu de forma tão marcante com os solos de textura média. Essa diferença de desempenho é possivelmente justificada quando se verifica a distribuição dos solos brasileiros e europeus de textura fina no triângulo textural para o conjunto de dados de calibração (Figura 3.1a). Segundo esse gráfico, os solos de textura fina são prioritariamente brasileiros, o que induz à forte superestimativa de Ks em solos europeus, como verificado na Figura 3.5a. Isso acontece em função dos solos de granulometria fina de ambientes tropicais e intemperizados tenderem a ser mais permeáveis que os solos de textura fina de regiões temperadas, conforme anteriormente comentado. A tendência das PTFs baseadas em textura/BD, desenvolvidas em solos de clima tropical, superestimarem Ks em solos de ambiente temperado, e vice-versa (PTFs de clima temperados subestimarem Ks em solos de ambiente tropical), é explicitada na Figura 3.6.

Dentre os modelos baseados em textura/BD, o WM_{sscbd} foi o que apresentou desempenho mais satisfatório para solos brasileiros, como esperado, seja a nível regional (solos brasileiros e europeus, Figura 3.4), ou por grupos de classes texturais (Figura 3.5). Para os solos europeus de textura fina, a PTF de Cosby se mostrou a mais adequada, ainda que comparável com o modelo RO_{sscbd}, enquanto que para os de textura média, curiosamente, o modelo mais simplificado de Rosseta foi o que expressou melhores predições. Resultados apontando o modelo de Cosby como de boa preditibilidade são encontrados em Tietje e Hennings (1996), Minasny e McBratney (2000), Julià *et al.*(2004) e Abdelbaki *et al.*(2009).

Na Figura 3.7 são ilustradas as comparações entre as medições de Ks e as correspondentes predições obtidas pelos modelos que apresentaram melhor desempenho

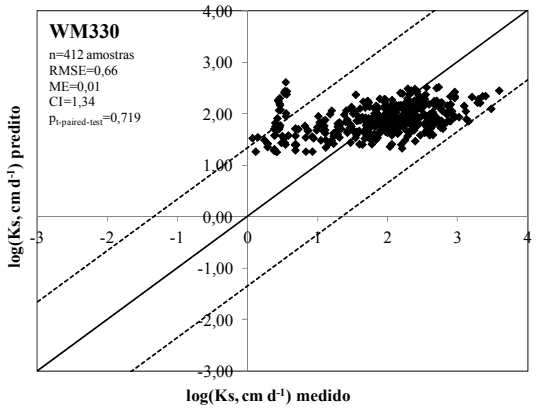
para os solos regionais, com a indicação do intervalo de confiança a 95% para valores logaritmizados. Exclui-se da Figura 3.7 a representação dos resultados dos modelos TH e Ahuja aplicados aos solos brasileiros, apesar do reconhecimento de que os mesmos nesse caso tiveram desempenho similar ao WM_{330} (modelo melhor avaliado neste estudo).

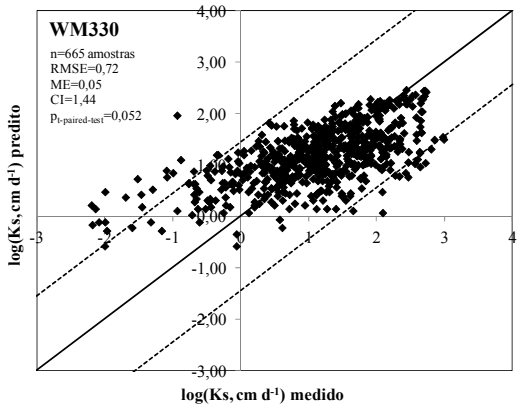
Confirma-se que os dois modelos melhor avaliados (WM_{330} e WM_{60}) tiveram capacidade de predição muito semelhantes, tanto em solos brasileiros como europeus, com RMSE~0,70, |ME| baixos (<0,08) e 95% de intervalo de confiança dos erros~1,45. Desta forma, são adequados para aplicação em bases de dados com diversidade pedológica e extensão territorial; a magnitude desses erros é comparável ao que é usualmente determinada na literatura, mas geralmente em bases de dados mais homogêneas, sob o ponto de vista pedogenético, do que a deste estudo. Ainda assim, consideramos que esses erros sejam elevados na predição de Ks, tendo em vista a escala decimal: $10^{0,70}$~5, $10^{1,45}$~28. Ou seja, levando em conta a razão dos erros na escala decimal (medido/predito ou predito/medido, o que for maior que 1,0), a razão média aproximada seria 5 e as razões extremas 28.

Em todos os casos da Figura 3.7, também há tendência de superestimativa dos baixos valores de Ks e de subestimativa dos altos valores. Uma das possíveis razões para os altos erros de estimativa e variância das predições de Ks pode ser atribuída a diversidade do tamanho de amostras utilizadas na determinação de Ks da base de dados do estudo. Anderson e Bouma (1973), Bouma *et al.* (1979), Zobeck *et al.* (1985), Lauren *et al.* (1988), Lilly e Lin (2004) e outros apontaram para a relevância do tamanho da amostra do solo na correta determinação de Ks. Adicionalmente, a indicação de novos preditores na formulação de PTFs de Ks, possivelmente relacionados à mineralogia da argila, uso do solo e fluxo nos macroporos, como também a introdução de técnicas estatísticas mais eficientes na calibração e validação dos modelos, poderá provavelmente minimizar os erros de predição das PTFs.

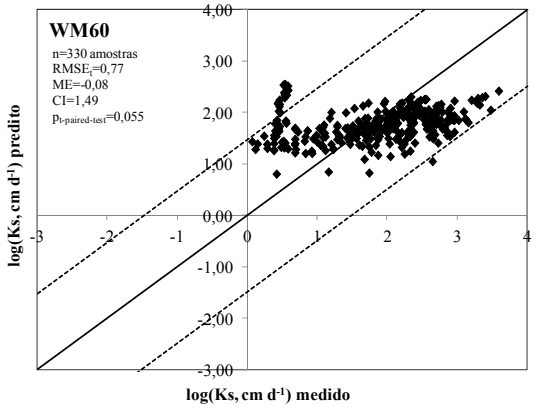
a. solos brasileiros b. solos europeus

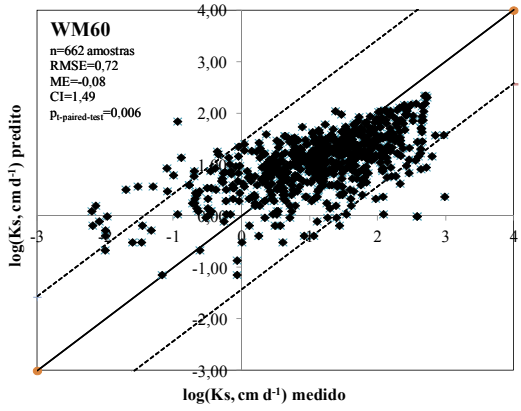
1)



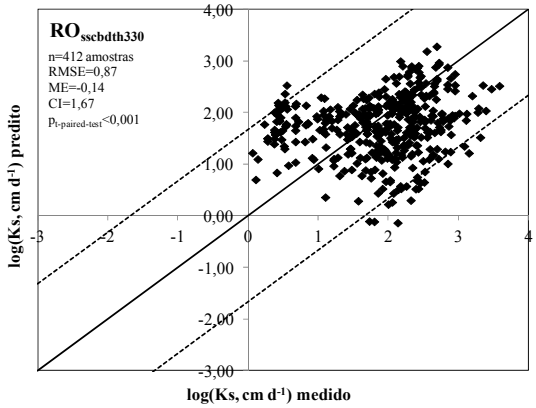


2)





3)



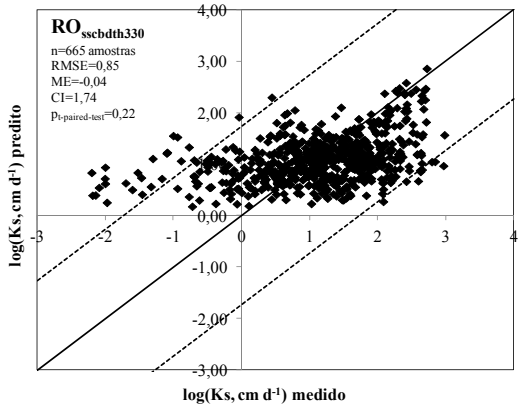


Figura 3.7 - Comparação entre os valores medidos e estimados de condutividade hidráulica saturada pelas PTFs de melhor confiabilidade em a) solos brasileiros e b) solos europeus; n – número de amostras, CI – intervalo de confiança a 95% para valores logaritmizados de Ks; linha tracejada indica os limites de CI.

a. solos brasileiros b. solos europeus

4)

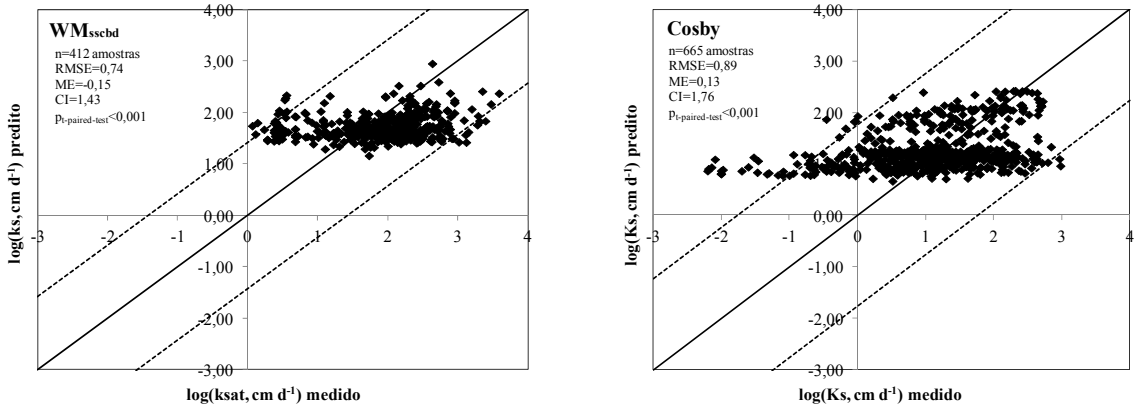


Figura 3.7 - Comparação entre os valores medidos e estimados de condutividade hidráulica saturada pelas PTFs de melhor confiabilidade em a) solos brasileiros e b) solos europeus; n – número de amostras, CI – intervalo de confiança a 95% para valores logaritmizados de Ks; linha tracejada indica os limites de CI. (*continuação*)

3.4 Conclusão

Neste estudo, foram desenvolvidas PTFs para estimativa da condutividade hidráulica saturada, Ks, levando-se em conta a textura e densidade do solo, bem como características estruturais do solo relacionadas à curva de retenção de água (porosidade efetiva e macroporosidade), para um amplo e abrangente banco de dados, incluindo amostras com pedogênese muito diversa, em ambientes de clima temperado e tropical. Peculiaridades desse inventário de dados é que ele também contempla informações de retenção de água numa faixa de ampla sucção (0-15,000 cm), que podem ser úteis no futuro desenvolvimento de PTFs. As medições de Ks foram na maioria das vezes realizadas por métodos padronizados, usando permeâmetros de carga constante e decrescente em amostras indeformadas de diferentes tamanhos. PTFs de Ks disponíveis da literatura foram também selecionadas, a maioria proveniente de solos de clima temperado e com características similares as dos modelos gerados, com propósito de comparação.

Os modelos desenvolvidos neste estudo em função unicamente da porosidade efetiva dos solos e da macroporosidade, respectivamente WM_{330} e WM_{60}, e aquele disponível na literatura, baseado em θ(330), textura e densidade do solo ($RO_{sscbdth330}$), foram os que em geral apresentaram resultados mais promissores, em ordem decrescente de qualidade preditora. Os desempenhos desses modelos (principalmente dos dois primeiros) não variaram significativamente entre os diferentes níveis de

representação do conjunto de dados teste: solos globais, regionais (brasileiros e europeus) e por grupo de classes texturais (granulometria fina e média), o que não ocorreu para as PTFs em função da textura/BD, onde em geral os valores de ME diferenciaram-se expressivamente entre solos brasileiros e temperados, em especial para os solos de textura fina. Tal diferenciação de desempenho nas classes de textura fina aponta para a relevância da mineralogia das argilas na predição de Ks. Os fatores descritos acima corroboram a importância da adoção de variáveis estruturais de solo na representação de Ks, como também evidenciam a robustez dos modelos baseados nessas variáveis quando aplicadas em diferentes escalas geográficas/pedológicas e grupos de classes texturais.

Quanto aos modelos baseados na textura/BD, sugere-se o uso de WM_{sscbd} e a tripla Cosby, RO_{ssc} ou RO_{sscbd} para estimativa de Ks em solos brasileiros e europeus, respectivamente.

Mesmo os modelos mais promissores (WM_{330} e WM_{60}) apresentaram erros de predição de Ks ainda elevados, porém comparáveis com os registrados na literatura, mas geralmente validados para bases de dados pedologicamente mais homogêneas do que a deste estudo. Isso indica a necessidade de incluir novos preditores na formulação das PTFs (principalmente aqueles relacionados à macroestrutura porosa), bem como aprimorar as técnicas estatísticas de calibração e validação das mesmas. Outra possibilidade, que deverá ser objeto de trabalho futuro, é ajustar as funções de KC propostas no estudo, considerando suas constantes m e B como dependentes das frações granulométricas areia, silte e argila, verificando-se o efeito delas na predição de Ks. Dados mais consistentes de Ks obtidos por métodos de determinação padronizados, incluindo o uso de um tamanho representativo de amostra de solo, são também necessários.

CAPITULO 4 – SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS BASEADO NA ESTRUTURA DO ESPAÇO POROSO. PARTE 1: METODOLOGIA

4.1 Considerações Gerais

É proposto um sistema de classificação dos solos baseado na estrutura de seus poros e levando em conta a curva de retenção de água. O trabalho apresenta a metodologia para desenvolvimento do sistema e procedimentos para classificação dos solos, sendo acompanhado por dois outros capítulos que pretendem avaliar o sistema para diferentes solos e localidades (Capítulo 5), e relacioná-lo a algumas características pedológicas (Capítulo 6).

4.2 Introdução

A estrutura porosa dos solos diz respeito ao formato, tamanho e arranjo dos poros no solo, e é atribuída ou não à distribuição dos elementos estruturais sólidos, sendo de natureza poligenética (Skvortsova e Utkaeva, 2008). Sua caracterização é útil ao entendimento, monitoramento e modelagem dos processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem nos solos, bem como à predição da funcionalidade e fertilidade dos mesmos (Bouma et al, 1977; Vogel, 2002; Nimmo, 2004; Nicolodi e Gianello, 2016) e caracterização dos serviços do ecossistema (Young e Crawford, 2004; Pajor et al, 2010). Sua dinâmica espacial e temporal é de elevada complexidade, promovida por agentes naturais e/ou antrópicos que condicionam relevantes aspectos pedogenéticos e de mudança da paisagem. A relação entre a heterogeneidade espacial da estrutura porosa dos solos e seu impacto na quantificação de importantes processos no solo é tema relevante de investigação (Dexter, 1988, Lin, 2012b).

A estrutura do espaço poroso dos solos tem sido caracterizada por uma variedade de métodos e níveis de detalhamento, que não se pretende aqui revisar nem citar em sua totalidade. Os métodos não invasivos com tecnologias de imagem de alta resolução (tomografia computadorizada, imagem de ressonância magnética) provêm informações precisas e quali-quantitativas na descrição da geometria dos poros e suas interconecções, que são benéficas na modelagem do fluxo e transporte nos solos (Coles *et al.*, 1998) e na investigação de suas propriedades físicas e hídricas (Rogasik *et al.*2003; Sánchez, 2003; Quinton et al, 2009). Em contraste com essa técnica sofisticada, o uso de parâmetros básicos, como a densidade do solo e porosidade total, tem sido frequentemente adotado para descrever indiretamente a estrutura do espaço

poroso (Lal, 1991; Hillel, 1998; Moncada *et al.*, 2014), sendo também útil na determinação de índices de qualidade física dos solos e na avaliação dos impactos nos mesmos em função de práticas de manejo (Cassel *et al.*, 1992 Valpassos *et al.*, 2001).

Além dessas técnicas, existem os sistemas de descrição de caráter visual e qualitativo das unidades estruturais visíveis do solo, chamadas de peds ou agregados do solo (Hodgson, 1976; Day, 1983; Santos *et al.*, 2013b; Soil Science Division Staff, 2017). Esses sistemas são baseados nas informações provenientes das campanhas de levantamento pedológico. Tais descrições incluem em geral a caracterização da forma e arranjos dessas unidades, seus tamanhos e graus de desenvolvimento. Elas são frequentemente utilizadas nas descrições dos horizontes de solo, predições de propriedades hidráulicas dos mesmos (McKenzie *et al.*, 1982; Lilly, 2000; Rawls e Pachepsky, 2002; Nguyen *et al.*, 2015b), bem como na avaliação da qualidade do solo por métodos visuais (Shepherd, 2000; Bal *el at.*, 2007; Guimarães *et al.*, 2011). Os sistemas de descrição da estrutura do solo acima mencionados também podem incluir a caracterização dos vazios que conseguem ser percebidos visualmente, descrevendo em geral seus atributos de forma (ou tipo), tamanho (diâmetro dos poros) e quantidade ou abundância (número de poros).

Outro método indireto comum para caracterização estrutural do meio poroso baseia-se em medições de propriedades de solos que apresentem íntima relação com o arranjo dos vazios, como é o caso das curvas de retenção de água (Crawford *et al.*, 1995). Dados da curva de retenção podem ser convertidos na modelação da distribuição do tamanho dos poros pela consideração da teoria clássica da capilaridade, com a vantagem de que amplas bases de dados contendo informações de retenção de água estão disponíveis mundo afora [EU-HYDI, Tóth *et al.*, 2015; UNSODA, Nemes *et al.*, 2001; IGBP-DIS, Tempel *et al.*, 1996, ROSETTA, Schaap *et al.*, 2001).

Pode-se entender a modelagem da distribuição do tamanho dos poros capilares equivalentes como uma função crescente que expressa a relação entre o volume acumulado relativo dos vazios preenchidos por ar no volume total dos poros capilares efetivos e a correspondente sucção de água (ou raio dos poros hidratados, pela fórmula de Laplace). Embora a representação da distribuição dos diâmetros dos poros baseada na teoria capilar não disponha de informações sobre a conectividade dos poros e seu arranjo espacial, ela nos dá noção sobre a estrutura do espaço poroso em termos de sua distribuição volumétrica, permitindo identificar solos com variadas distribuições de

diâmetro no seu espaço poroso (Wilson *et al.*, 1992; Ross e Smettem, 1993; Durner, 1994; Coppola, 2000) ou avaliar funções do solo (Thomasson, 1964; Armindo e Wendroth, 2016).

A curva de condutividade hidráulica não saturada é um outro elemento com forte interferência da estrutura porosa, informando sobre as distintas capacidades de transmissão de água no sistema poroso com as variações do tamanho dos poros, mas a disponibilidade de dados é ainda muito restrita.

Uma forma de concentrar informações da distribuição do tamanho dos poros baseada na teoria da capilaridade consiste em definir um número de classes de tamanho de poros e determinar para cada classe sua participação volumétrica como fração da porosidade total ou volume total do solo. Brewer (1964) sugeriu grupos detalhados de tamanho de poros, tais como macro, meso, micro, ultramicro e criptoporos. Por outro lado, Baver e Gardner (1972) propuseram três agrupamentos: macroporos (não capilares), poros capilares finos e poros capilares grosseiros. Classes mais comuns são definidas como macro, meso e microporos (Jongerius, 1957; IUPAC, 1985, Luxmoore, 1981). Outras classificações similares de tamanho de poros do solo foram reportadas em Dubinin (1979), Beven e Germann (1982), Perret *et al.* (1999) e Zdravkov *et al.* (2006), podendo-se afirmar que não existe uma terminologia bem definida para a classificação dos poros do solo (Beven e Germann, 1982; Perret *et al.*, 1999). Outras maneiras de classificar poros levam em conta o formato dos mesmos (cilíndrico, de frasco de tinteiro, de funil ou de fenda, conforme Rouquerol *et al.*, 1994), sua disponibilidade ao fluido externo (poros abertos, fechados ou cegos, de acordo com Rouquerol *et al.*, 1994) e funcionalidade (poros de aprisionamento, residuais, de armazenamento e de transmissão, de acordo com Greenland, 1977; poros rapidamente drenáveis, poros lentamente drenáveis e poros armazenadores de água, conforme Amer, 2002; poros de fluxo matricial e de fluxo de macroporo ou fluxo rápido, conforme Jarvis, 2007 e Lassabatere *et al.*, 2014), dentre outras formas de classificação.

A diversidade de técnicas para caracterização do espaço vazio dos solos, associada à carência de uma metodologia com tal propósito que seja padronizada, universalmente aceita e baseada em critérios quantitativos e precisos, prejudica o entendimento mais consistente das características e funções do sistema poroso dos diferentes tipos de solos, além de dificultar o uso dessas técnicas na quantificação dos diversos processos que ocorrem nos vazios. Visando minimizar tais inconvenientes, este

trabalho propôs um sistema de classificação dos solos baseado na estrutura do seu espaço poroso na escala da amostra de solo, tendo-se como critério de agrupamento a similaridade entre curvas de disponibilidade de ar (ou curva de teor de ar), aqui entendidas como sendo o complemento das curvas de retenção de água em relação ao conteúdo de água na saturação. Um estudo correlato foi sugerido por Williams *et al.* (1983) onde foram avaliados agrupamentos de curvas similares de retenção de água, visando examinar a importância relativa de alguns atributos de solo com respeito à distribuição do conteúdo de água em diferentes faixas de sucção. Na mesma linha, Das *et al.* (2005) propuseram critério de agrupamento de curvas similares de distribuição do tamanho dos poros estabelecendo um limite superior de 10% para o coeficiente de variação da distribuição do desvio padrão amostral das referidas curvas. No entanto, não foi objeto dos dois estudos anteriores a elaboração de um sistema de classificação dos solos tal como apresentado neste trabalho.

O sistema aqui apresentado recebe como sigla a notação SPSCS que indica as iniciais do seu nome em inglês *Soil Pore space-Structural Classification System*. Ou seja, o agrupamento permitido pelo sistema foi planejado para reunir solos com arranjos similares em seus espaços porosos, em termos do crescimento do volume de ar com o aumento de sucção de água. Sabe-se, no entanto, que a coleção dessas curvas similares não garante que a geometria e interconecções de seus poros sejam semelhantes entre si. Esse sistema foi inspirado no da classificação textural, pois ambos têm como base uma curva de distribuição: do tamanho das partículas (sistema de classificação textural); do tamanho dos poros (SPSCS). Nesse sentido, o sistema proposto definiu um triângulo de classificação estrutural, muito similar ao triângulo textural. Esse fato facilita o entendimento do SPSCS e o esclarecimento das possíveis correlações da estrutura porosa com a textura do solo. Visando o agrupamento de curvas de disponibilidade de ar, fez-se necessária sua parametrização baseada em critérios estritamente quantitativos e padronizados. A variabilidade dessas curvas nas classes de solos propostas foi também determinada, a fim de avaliar o grau de homogeneidade estrutural de cada uma das classes. As curvas de disponibilidade de ar, apesar de modeladas a partir de métodos matemáticos, representam uma entidade física que descreve, sob uma determinada ótica, a distribuição porosa dos solos.

4.3 Considerações gerais do SPSCS

No SPSCS, é feita a classificação da curva de disponibilidade de ar, determinada

na escala da amostra do solo. Dois níveis categóricos hierárquicos são propostos e buscam descrever os diferentes componentes de modelagem dessa curva: forma e amplitude. A Ordem é o nível categórico mais elevado do SPSCS, informando sobre o formato da curva, agrupando solos com semelhanças na sua curva de distribuição do tamanho dos poros. O segundo nível categórico, designado como Subordem, propõe a reunião de elementos com semelhanças no tamanho de seu espaço poroso total ativo, aqui entendido como a porosidade do solo mais relacionada aos processos hidrodinâmicos, caracterizando o fator de escala da curva de disponibilidade ar.

No SPSCS, o nível de Subordem recebe uma designação específica, a Família[3], que agrupa amostras com curvas de disponibilidade de ar semelhantes. O SPSCS propôs nove Ordens, cada uma contendo quatro Subordens, totalizando, portanto, 36 Famílias de solos. A metodologia de classificação dos solos leva em consideração a parametrização da curva de disponibilidade de ar, conforme já comentado, e a disponibilidade de informações específicas de retenção de água. A caracterização do SPSCS e seus procedimentos para classificação são detalhados nos itens que se seguem.

4.4 Representação das curvas de distribuição do tamanho dos poros e de disponibilidade de ar

A representação da curva de retenção de água é dada pela expressão de van Genuchten (1980) (VG), que relaciona o conteúdo volumétrico de água, θ ($cm^3\ cm^{-3}$) e a sucção de água s (cm):

$$W(s) = \frac{\theta(s) - \theta_r}{\Phi - \theta_r} = \left[1 + (\alpha s)^{1/(1-m)}\right]^{-m} \tag{4.1}$$

onde W ($0 \leq W \leq 1$) é o grau de saturação ativa (adimensional), $s \geq 0$, $\theta r < \theta \leq \Phi$, $0 < m < 1$, $\alpha > 0$, Φ ($cm^3\ cm^{-3}$) é o conteúdo de água na saturação (ou porosidade total quando o conteúdo de água na saturação não estiver disponível), θr ($cm^3\ cm^{-3}$) é o conteúdo de água residual, α (cm^{-1}) e m (adimensional) são parâmetros de forma de ajuste da equação de VG. Esse modelo foi selecionado devido ao seu largo uso na representação dos dados de retenção de água (Tomasella *et al.*, 2000, 2003; Vereecken *et al.*, 2010; Ottoni et al., 2018) e porque seus parâmetros podem ser utilizados para ajustar a curva de condutividade hidráulica não saturada (van Genuchten, 1980; Schaap e van Genuchten, 2006). Entretanto, a acurácia no cálculo de W tende a ser de pior qualidade

[3] O termo Família adotado aqui não tem nenhuma correspondência com o nível categórico Família dos sistemas de classificação de solos.

quando θ está na faixa muito úmida (muito próxima à saturação) ou seca (muito próxima ao conteúdo de água residual), conforme reportado na literatura (Khlosi *et al.*, 2008, Vereecken *et al.*, 2010). Desta forma, para fins classificatórios, a curva W(s) [ou A(s), conforme Equação 4.2] será apenas considerada na faixa intermediária de sucção de 30 cm a 18,000 cm. A justificativa para os limites dessa faixa será tratada na seção 4.6.1.

Para classificação de uma amostra indeformada de solos, utiliza-se a função

$$A(s) = \frac{\Phi - \theta(s)}{\Phi - \theta_r} = 1 - W(s) \qquad (4.2)$$

para representar a distribuição do tamanho dos poros em termos da fração volumétrica cumulativa de conteúdo de ar, supondo um espaço poroso total ativo (ou porosidade ativa) entre $\theta = \Phi$ (A = 0) e $\theta = \theta r$ (A = 1) (Figura 4.1). A função A(s) é aqui também chamada de grau de aeração ativa. O adjetivo "ativo" é utilizado neste trabalho para qualificar os vazios do solo onde geralmente os principais processos hidrodinâmicos ocorrem. O termo porosidade efetiva também é muito utilizado para expressar esse conceito de porosidade ativa, Φ-θr. No entanto, a expressão porosidade efetiva possui outras definições (Ahuja *et al.*, 1984; Minasny e McBratney, 2000). Por isso, para evitar dubiedade de interpretação, seu uso foi restringido neste trabalho.

A curva de distribuição do tamanho dos poros tem valor igual a zero para o maior raio dos poros hidratados (correspondente à sucção de entrada de ar) e aumenta até o limite de 1,0 no conteúdo de água residual, a partir do incremento da sucção e diminuição do tamanho dos poros ativos preenchidos com água (Figura 4.1). A construção dessa curva é muito similar à da curva de distribuição do tamanho das partículas, sendo assim possível desenvolver um sistema de classificação de solos similar ao da classificação textural, conforme anteriormente comentado, a seguir apresentado.

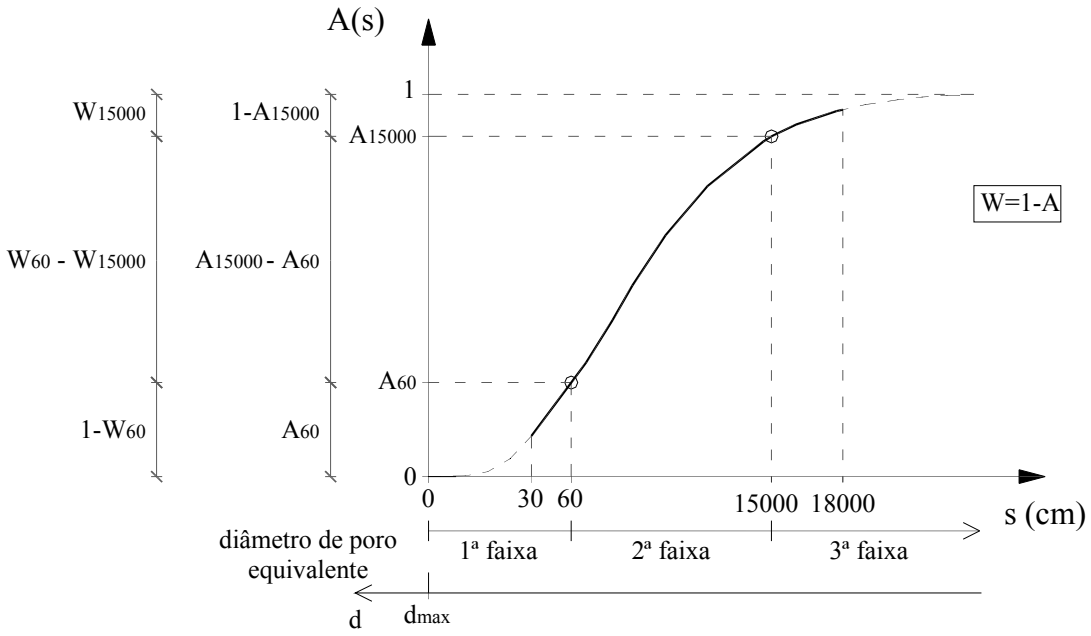


Figura 4.1 – Curva esquemática da distribuição do tamanho dos poros; A(s), representada por três classes de tamanho de poros correspondentes às seguintes faixas de sucção: 0-60cm, 60-15000 cm, maior que 15000 cm; W(s) é o grau de saturação ativa; dmax é diâmetro máximo de poro equivalente; valores de sucção s na escala logarítmica. Para fins classificatórios, A(s) é caracterizada apenas na faixa intermediária de sucção 30 cm $\leq s \leq$ 18000 cm.

A partir das Equações 4.1 e 4.2, a curva de disponibilidade de ar, $A_a(s)$, é definida e calculada como:

$$A_a(s) = \Phi - \theta(s) = A(s).(\Phi - \theta r) = \{1 - \left[1 + (\alpha s)^{1/(1\ m)}\right]^{-m}\}(\Phi - \theta_r) \qquad (4.3)$$

4.5 Definição das Ordens, Subordens e Famílias estruturais de solo

Com o propósito da classificação de solos, a curva A(s) foi arbitrariamente dividida em três frações de tamanho dos poros (Figura 4.1): $1\text{-}A_{15000}$; $A_{15000}\text{-}A_{60}$ e A_{60}, que, num paralelo com a classificação textural, correspondem às frações argila, silte e areia, respectivamente, conforme melhor elucidado abaixo. Essas três frações podem ser escritas em termos de W (W=1-A): W_{15000}, $W_{60}\text{-}W_{15000}$ e $1\text{-}W_{60}$, respectivamente.

A fração (ou percentagem) A_{60} é aqui definida como o macroespaço ativo do solo, representando a fração de espaço ativo ocupada por ar quando a água é retirada dos poros de maiores dimensões. A sucção de 60 cm é arbitrariamente usada para definir o macroespaço ativo, já que medições de conteúdo de água nessa sucção são

comuns e algumas vezes referenciadas como a microporosidade do solo (Klein e Libardi, 2002; Embrapa, 2011; Stolf *et al.*, 2011). No entanto, enfatizamos que nenhuma sucção padrão foi ainda plenamente estabelecida para definir microporosidade ou macroporosidade. W_{15000} inclui os poros pequenos que armazenam água de difícil extração pela zona radicular (correspondente ao ponto de murcha), sendo aqui designada como microespaço ativo. A última fração, W_{60}-W_{15000}, definida como o mesoespaço ativo, representa a faixa remanescente dos vazios do solo, correspondente aos poros de tamanho intermediário em relação aos dos poros das duas outras frações.

Essas três frações de tamanho dos poros (A_{60}=1-W_{60}, W_{15000} e W_{60}-W_{15000}) somam 1 (Figura 4.1). Isso permite a representação de uma amostra de solos num diagrama ternário, aqui chamado de triângulo estrutural (Figura 4.2), cujos lados contêm as escalas de representação das três classes de tamanho dos poros, de 0 a 1 (ou 0 a 100%). A inclinação indicada do número nas escalas de cada eixo do triângulo estrutural mostra a direção que deve ser seguida para a plotagem de uma amostra de solos no triângulo, como é feito no triângulo textural. Para facilitar a escrita da nomenclatura, os nomes das três classes foram abreviados como macroespaço, mesoespaço e microespaço (como uma fração ou percentagem), tanto na representação dessas classes no triângulo quanto nas referências ao longo desse manuscrito.

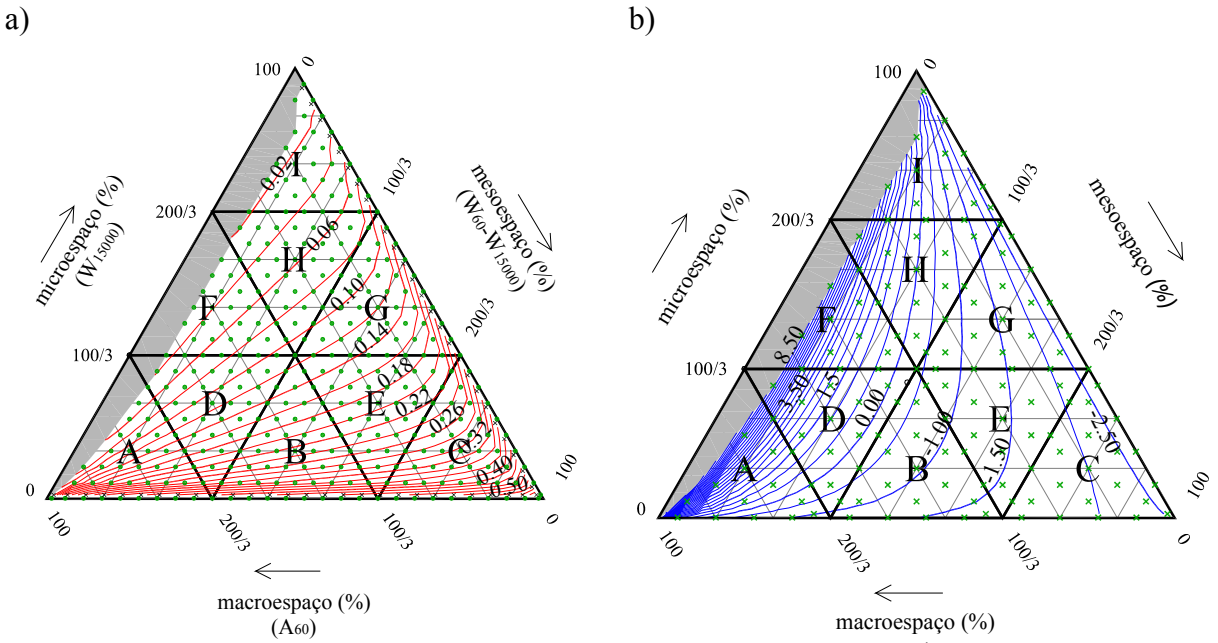


Figura 4.2 – Triângulo estrutural com isolinhas de a) m e b) $\log_{10}\alpha$ (cm^{-1}), e as áreas de abrangência das diferentes faixas de valores de c) m e d) $\log_{10}\alpha$.

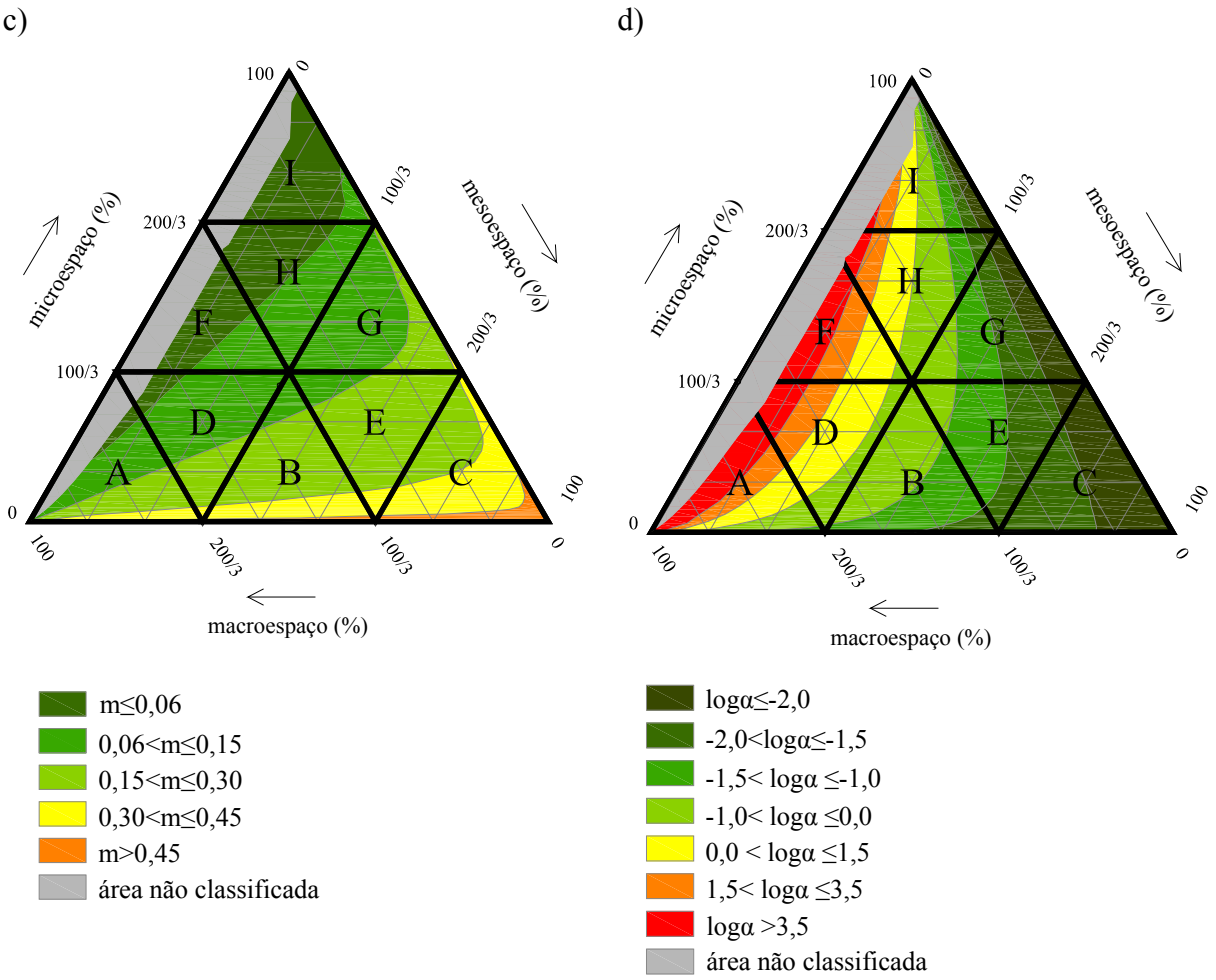


Figura 4.2 – Triângulo estrutural com isolinhas de a) m e b) $\log_{10}\alpha$ (cm^{-1}), e as áreas de abrangência das diferentes faixas de valores de c) m e d) $\log_{10}\alpha$. (*continuação*)

A fração A_{60}, de uma certa forma, pode ser interpretada como sendo uma medida da capacidade de aeração dos solos, que é usualmente alta em solos arenosos. Os microespaços (fração W_{15000}), da mesma forma, tendem a ser de valores altos em solos argilosos, já que esses geralmente apresentam larga afinidade por água. Finalmente, a fração W_{60}-W_{15000}, tem a tendência de ser elevada em materiais siltosos, que são solos com reconhecida capacidade de reter água disponível para uso vegetal (Petersen *et al.*, 1968, Hollis *et al.*, 1977, Thomasson, 1978), que é usualmente e arbitrariamente considerada como a diferença entre os conteúdos de água na capacidade de campo e ponto de murcha. Portanto, para manter equivalência de significado entre as classificações textural e estrutural, o posicionamento dos eixos das classes de tamanho de poros (macro, meso e microespaço) nos lados do triângulo estrutural foi o mesmo daquele considerado para as classes equivalentes de tamanho de partículas (areia, silte e argila, respectivamente) nos lados do triângulo textural. Ainda para manter essa

equivalência, a notação escolhida para descrever o macroespaço será A_{60}, o mesoespaço, W_{60}-W_{15000}, e o microespaço, W_{15000} (Figura 4.2a).

Pelas Equações 4.1 e 4.2, a curva A(s) depende apenas dos parâmetros m e α. A caracterização estrutural do solo pelas suas três frações de tamanho de poros torna possível o cálculo de m e α, e, portanto, de A(s), conforme mostrado abaixo.

Da Equação 4.1:

$$\left(W_{60}^{-1/m}-1\right)^{1-m}=(60/15000)\left(W_{15000}^{-1/m}-1\right)^{1-m} \quad (4.4)$$

A Equação 4.4 permite o cálculo unívoco de m se W_{60} e W_{15000} são conhecidos. Para isso foi desenvolvido script em Visual Basic, com interface com as planilhas da Microsft Excel®, que faz a iteração dos valores de m até ocorrer a identidade da Equação 4.4. Depois que m é determinado, o parâmetro α pode ser calculado pela Equação 4.1 utilizando o valor conhecido de W_{60} (ou W_{15000}). Assim, o par (W_{60}, W_{15000}) determina o par (m, α), e vice-versa. Isso permite a representação das isolinhas dos valores de m e α no triângulo estrutural, conforme mostrado nas Figuras 4.2ab. A área em cinza nas duas figuras, junto ao eixo do microespaço, indica a impossibilidade dos parâmetros m ($0<m<1$) e α ($\alpha>0$). Próximo dessa região, os valores de m tendem a zero e os de α a infinito, representando, portanto, solos muito diferenciados. As isolinhas de m e α foram definidas considerando a malha de pontos da Figura 4.2a. Nessa figura, registra-se um adensamento de pontos junto aos eixos do macro e do mesoespaço. Isso foi feito para poder incorporar nessa região as maiores variações dos valores de m. Nas Figuras 4.2cd são caracterizadas as áreas de abrangência de diferentes faixas de valores de m e logα.

A fração unitária A=1, correspondente ao espaço poroso total ativo do solo, Φ-θr, é dividida em três faixas de valores: 0-1/3 (baixo); 1/3-2/3 (moderado); 2/3-1 (alto), conforme mostradas na Figura 4.2. As possíveis combinações entre as três frações do tamanho dos poros (microespaço, mesoespaço e macroespaço) e as três faixas acima permitem a definição de nove grupos de solos, onde espera-se, pelas considerações acima, que curvas similares de A(s) se agrupem. Esses grupos de solo definem as nove Ordens do SPSCS, cada grupo representado por um triângulo equilátero indicado no triângulo estrutural e tendo como notação as letras maiúsculas de A a I (Figura 4.2). Para cada uma das Ordens foi proposto um nome que descrevesse o tamanho de poros predominante. Por exemplo, a Ordem A, que possui valores altos da fração A para o

macroespaço ($A_{60}\geq 2/3$) e baixos para o microespaço ($W_{15000}<1/3$) e mesoespaço (W_{60}-$W_{15000}<1/3$), foi chamada de altamente macroespaçosa, enquanto que a Ordem G, que apresenta valores moderados da fração A no mesoespaço ($1/3\leq W_{60}$-$W_{15000}<2/3$) e microspaço ($1/3\leq W_{15000}<2/3$) e baixos no macroespaço ($0<A_{60}<1/3$), foi designada como meso-microespaçosa. Nesse último exemplo, por simplificação de nomenclatura, a qualificação do valor moderado da fração A nos mesoespaço e microespaço fica oculta na caracterização do nome da Ordem. Na Tabela 4.1 são apresentados os nomes das nove Ordens do sistema e a correspondente descrição das escalas das faixas de valores da fração A para as classes microespaço, mesoespaço e macroespaço.

Tabela 4.1 – Descrição dos nomes das nove Ordens estruturais de solo e escala correspondente de valores participando das classes de tamanho de poros.

Notações das Ordens	Nome das Ordens	Escala de valores participando das classes de tamanho de poros
A	solos altamente macroespaçosos	alto macro, baixos meso e micro
C	solos altamente mesoespaçosos	alto meso, baixos macro e micro
I	solos altamente microespaçosos	alto micro, baixos macro e meso
D	solos macroespaçosos	moderado macro, baixos meso e micro
E	solos mesoespaçosos	moderado meso, baixos macro e micro
H	solos microespaçosos	moderado micro, baixos macro e meso
B	solos macro-mesoespaçosos	moderados macro e meso, baixo micro
F	solos macro-microespaçosos	moderados macro e micro, baixo meso
G	solos meso-microespaçosos	moderados meso e micro, baixo macro

Pela Figura 4.2, observa-se que:

a) O trecho inferior direito do triângulo (Ordem C) concentra solos com altos valores de m ($m>0,24$) e baixos de α ($\log\alpha<-1,75$, aproximadamente), representando curvas A(s) com alta variação entre $\theta(60)$ e $\theta(15000)$ e baixa variação entre a saturação e $\theta(60)$;

b) O trecho superior do triângulo (Ordem I) concentra solos com baixos valores de m ($m<0,08$ aproximadamente) e tomando qualquer valor de α, representando curvas A(s) com alta variação entre $\theta(15000)$ e θr e baixa variação entre $\theta(60)$ e $\theta(15000)$;

c) O trecho inferior esquerdo do triângulo (Ordem A) concentra solos com valores relativamente altos de α ($\log\alpha>-0,50$ aproximadamente) e tomando qualquer valor de m, representando curvas A(s) com alta variação entre a saturação e $\theta(60)$ e baixa variação entre $\theta(60)$ e $\theta(15000)$.

d) As demais Ordens representam solos com comportamentos intermediários da

curva A(s), em relação às curvas de A, C e I.

Para a perfeita definição das Famílias estruturais (Equação 4.3) é também necessário agrupar amostras de solos em faixas de valores da porosidade ativa, Φ-θr. Quatro faixas são propostas, caracterizando o nível de Subordem do sistema de classificação. Um solo é considerado de Subordem i (de 1 a 3) quando:

$$0{,}20\ (i-1) < (\Phi-\theta r) \leq 0{,}20\ i \qquad (4.5)$$

A Subordem 4 corresponde à faixa de porosidade ativa superior a 0,60 $cm^3\ cm^{-3}$. As Subordens de 1 a 4 foram respectivamente designadas como as de porosidade ativa baixa, moderada, alta e muito alta. Para notação da Família estrutural é proposto a sigla Xi, onde X é a Ordem (de A a I) e o número arábico inteiro i (de 1 a 4) é a Subordem. Se por exemplo, uma amostra for classificada na Ordem A e Subordem 3, terá como notação de sua Família a sigla A3, recebendo como descrição o nome de *solo altamente macroespaçoso com porosidade ativa alta*. A Ordem X agrupa pares (m, α) que fazem com que os correspondentes valores das três frações de tamanho dos poros preconizadas pelo sistema sejam similares, enquanto que a Subordem i agrupa valores similares de (Φ-θr). Assim, um solo pode ser graficamente representado num espaço tridimensional como um ponto com altura (Φ-θr) acima daquele onde o solo é plotado no triângulo estrutural. Na Tabela 4.2, apresenta-se um resumo das características das Ordens e Subordens no SPSCS, descrevendo-se os agrupamentos das 36 Famílias de solos.

Tabela 4.2 – Resumo das características das Ordens e Subordens no SPSCS.

Espaço poroso dominante	Notação			Faixas de valores	
	Família	Ordem	Subordem	Ordem	Subordem
DOMINAÇÃO MACRO (macro alta ou moderada)	A1	A	1	$2/3 \leq A_{60} < 1$ $0 < W_{60}-W_{15000} < 1/3$ $0 < W_{15000} < 1/3$	$0 < (\Phi-\theta r) \leq 0{,}20$
	A2		2		$0{,}20 < (\Phi-\theta r) \leq 0{,}40$
	A3		3		$0{,}40 < (\Phi-\theta r) \leq 0{,}60$
	A4		4		$(\Phi-\theta r) > 0{,}60$
	D1	D	1	$1/3 \leq A_{60} < 2/3$ $0 < W_{60}-W_{15000} < 1/3$ $0 < W_{15000} < 1/3$	$0 < (\Phi-\theta r) \leq 0{,}20$
	D2		2		$0{,}20 < (\Phi-\theta r) \leq 0{,}40$
	D3		3		$0{,}40 < (\Phi-\theta r) \leq 0{,}60$
	D4		4		$(\Phi-\theta r) > 0{,}60$
DOMINAÇÃO MACRO-MESO (ambos macro e meso moderadas)	B1	B	1	$1/3 \leq A_{60} < 2/3$ $1/3 \leq W_{60}-W_{15000} < 2/3$ $0 < W_{15000} < 1/3$	$0 < (\Phi-\theta r) \leq 0{,}20$
	B2		2		$0{,}20 < (\Phi-\theta r) \leq 0{,}40$
	B3		3		$0{,}40 < (\Phi-\theta r) \leq 0{,}60$
	B4		4		$(\Phi-\theta r) > 0{,}60$
DOMINAÇÃO MESO (meso alta ou moderadra)	C1	C	1	$0 < A_{60} < 1/3$ $2/3 \leq W_{60}-W_{15000} < 1$ $0 < W_{15000} < 1/3$	$0 < (\Phi-\theta r) \leq 0{,}20$
	C2		2		$0{,}20 < (\Phi-\theta r) \leq 0{,}40$
	C3		3		$0{,}40 < (\Phi-\theta r) \leq 0{,}60$
	C4		4		$(\Phi-\theta r) > 0{,}60$
	E1	E	1	$0 < A_{60} < 1/3$ $1/3 \leq W_{60}-W15000 < 2/3$ $0 < W_{15000} < 1/3$	$0 < (\Phi-\theta r) \leq 0{,}20$
	E2		2		$0{,}20 < (\Phi-\theta r) \leq 0{,}40$
	E3		3		$0{,}40 < (\Phi-\theta r) \leq 0{,}60$
	E4		4		$(\Phi-\theta r) > 0{,}60$

Tabela 4.2 – Resumo das características das Ordens e Subordens no SPSCS.
(*continuação*)

Espaço poroso dominante	Notação			Faixas de valores	
	Família	Ordem	Subordem	Ordem	Subordem
DOMINAÇÃO MESO-MICRO (ambos meso e micro moderadas)	G1	G	1	$0<A_{60}<1/3$ $1/3\leq W_{60}-W_{15000}<2/3$ $1/3\leq W_{15000}<2/3$	$0<(\Phi-\theta r)\leq 0,20$
	G2		2		$0,20<(\Phi-\theta r)\leq 0,40$
	G3		3		$0,40<(\Phi-\theta r)\leq 0,60$
	G4		4		$(\Phi-\theta r)>0,60$
DOMINAÇÃO MICRO (micro alta ou moderada)	I1	I	1	$0<A_{60}<1/3$ $0<W_{60}-W_{15000}<1/3$ $2/3\leq W_{15000}<1$	$0<(\Phi-\theta r)\leq 0,20$
	I2		2		$0,20<(\Phi-\theta r)\leq 0,40$
	I3		3		$0,40<(\Phi-\theta r)\leq 0,60$
	I4		4		$(\Phi-\theta r)>0,60$
	H1	H	1	$0<A_{60}<1/3$ $0<W_{60}-W15000<1/3$ $1/3\leq W_{15000}<2/3$	$0<(\Phi-\theta r)\leq 0,20$
	H2		2		$0,20<(\Phi-\theta r)\leq 0,40$
	H3		3		$0,40<(\Phi-\theta r)\leq 0,60$
	H4		4		$(\Phi-\theta r)>0,60$
DOMINAÇÃO MACRO-MICRO (ambos macro e micro moderadas)	F1	F	1	$1/3\leq A_{60}<2/3$ $0<W_{60}-W_{15000}<1/3$ $1/3\leq W_{15000}<2/3$	$0<(\Phi-\theta r)\leq 0,20$
	F2		2		$0,20<(\Phi-\theta r)\leq 0,40$
	F3		3		$0,40<(\Phi-\theta r)\leq 0,60$
	F4		4		$(\Phi-\theta r)>0,60$

4.6 Procedimento para classificação de solos

4.6.1 Protocolo para parametrização da equação de VG

Para permitir um protocolo padronizado de parametrização da equação de VG e determinar a função $A_a(s)$ (Equação 4.3) adequadamente ao longo da faixa completa de sucção de interesse (30 cm $\leq s \leq$ 18000 cm), os três (3) parâmetros de ajuste (θr, m e α) são calculados usando, correspondentemente, apenas três (3) pontos experimentais da curva de retenção bem distribuídos ao longo da faixa de sucção acima, chamados (s_j, θ_j), j=1, 2, 3, medidos em amostras indeformadas e por meio de métodos de laboratório onde a sucção e conteúdo de água sejam diretamente medidos (como é a caso do método da mesa de tensão ou da placa porosa em câmara de pressão). O parâmetro Φ é considerado conhecido e igual ao conteúdo de água na saturação, ou a porosidade total quando da indisponibilidade do primeiro, conforme já mencionado. O protocolo segue o seguinte procedimento:

- s_1 é a sucção mais próxima de 60 cm, na faixa de 30 cm $\leq s \leq$80 cm; s_2 é a sucção mais próxima de 330 cm, na faixa de 250 cm $\leq s \leq$ 500 cm; s_3 a sucção mais próxima de 15000 cm, na faixa de 9000 cm $\leq s \leq$ 18000 cm. Se a amostra não tiver informações de retenção de água em uma dessas três faixas de sucção, ela não poderá ser classificada;
- Os parâmetros θr, m e α são determinados numa única tríade de valores pelo método não linear dos mínimos quadrados usando o programa

RETC (van Genuchten *et al.*, 1991). Os valores otimizados desses parâmetros pelo RETC podem depender dos seus valores iniciais requeridos pelo programa. Para eliminar essa dependência, foi proposto o seguinte procedimento padrão para definição dos valores iniciais (índice i):

- ✓ $\theta r_i = \theta_3 - 0.01$
- ✓ $\Phi = \theta(s=0)$ ou Porosidade Total quando $\theta(s=0)$ não for disponível, sendo Porosidade Total =1-[densidade do solo /densidade das partículas]
- ✓ $m_i = 0{,}5$
- ✓ $\alpha_i = \frac{\left[\left(\frac{\theta_2 - \theta r_i}{\Phi - \theta r_i}\right)^{-1/m_i} - 1\right]^{(1-m_i)}}{s_2}$, segundo a Equação 4.1

- Os valores dos parâmetros θr, m e α devem estar restritos aos seguintes intervalos: $\theta r \geq 0$, $0 < m < 1$ e $\alpha > 0$.

De acordo com esse protocolo, prevê-se que a predição de retenção de água pelo modelo VG nas sucções de 60, 330 e 15000 cm seja precisa, levando em conta a proximidade dessas três sucções com s_1, s_2 e s_3, respectivamente, bem como a adequação do modelo VG. Portanto, espera-se que essa predição precisa de θ_{60}, θ_{330} e θ_{15000}, e baseada num protocolo rígido de cálculo, garanta uma estimativa acurada e reproduzível das três frações de tamanho dos poros do triângulo estrutural, bem como da porosidade ativa, Φ-θr, que são os elementos que possibilitam a classificação estrutural da amostra.

A validação da adequação do uso do protocolo acima para a acurada representação da curva de retenção de água ao longo da faixa completa de sucção de interesse (30 cm≤s≤18000 cm) é demonstrada no Capítulo 5 deste trabalho.

4.6.2 Adequação da equação de VG para estimar os dados de retenção de água

Certos solos podem apresentar peculiaridades na distribuição do seu espaço poroso, como aqueles com características de porosidade dual ou multidual (Durner, 1994; Carducci *et al.*, 2011), quando a equação de VG pode não ser adequada para descrever essa distribuição, comprometendo o SPSCS. Visando discriminar o grau de qualidade da classificação dos solos segundo o sistema, foram propostos três grupos de

solos, cada um retratando diferentes níveis de acurácia de predição da curva de retenção. Esses grupos foram arbitrariamente designados como de solos genuínos, adotados e rejeitados, em relação ao SPSCS (em ordem decrescente de qualidade de ajuste de VG), sendo definidos para valores limites de dois tipos de erro de predição na amostra: 1) o erro máximo absoluto de estimativa dos três pontos experimentais θ_1, θ_2, θ_3, designado como ERRORMAX=max$|\theta_{i,estimado}-\theta_{i,\ medido}|_{i=1,\ 2,\ 3}$; 2) raiz quadrada do erro quadrático médio das estimativas dos dados de retenção de água na faixa de sucção entre 30 a 18000 cm, chamado de $RMSE_{30\text{-}18000}$, descrita pela Equação 4.6.

$$RMSE_{30-18000} = \sqrt{\frac{1}{N-3}\sum_{j=1}^{N}\left(\theta_{j,estimado} - \theta_{j,medido}\right)^2} \qquad (4.6)$$

onde N (N>3) é o número de medições de retenção de água nas sucções de índice j no intervalo de sucção de 30-18000 cm, e 3 é o número de parâmetros otimizados (θr, α, m).

Amostras com erros ERRORMAX altos não devem ser classificadas, pelo fato do modelo VG ter baixa qualidade de representação no conjunto dos três dados experimentais (θ_1, θ_2, θ_3) utilizados para calibração das curvas $\theta(s)$. Isso deverá acarretar imprecisa predição de θ_{60} e/ou θ_{15000} e, portanto, de W_{60} e/ou W_{15000} que são os elementos-chave para a classificação do solo. Por outro lado, o SPSCS em solos com ERRORMAX baixos também pode gerar funções $\theta(s)$ de baixa qualidade preditora quando $\theta(s)$ não for capaz de descrever adequadamente as demais medições de retenção de água na faixa de sucção entre 30 a 18000 cm. Nesse caso, a classificação é também inadequada, pois é baseada numa parametrização que não representa globalmente a realidade estrutural do solo. Nesses dois cenários, ERRORMAX ou/e $RMSE_{30\text{-}18000}$ altos, os solos são caracterizados como rejeitados e não classificáveis, segundo o SPSCS. No extremo oposto estão os solos genuínos, cuja curva $\theta(s)$ modelada deve ter seguramente forte proximidade com as medições de retenção de água nos três pontos θ_1, θ_2, θ_3 (e portanto, por construção, em θ_{60}, θ_{330} e θ_{15000}), mas também bem representado globalmente os demais dados experimentais disponíveis. Nessa situação, espera-se que as curvas $\theta(s)$ geradas pelo SPSCS representem adequadamente a realidade estrutural do espaço poroso ao longo dos intervalos de sucção monitorados. O terceiro grupo, dos solos adotados, representam amostras cujas modelagens das curvas $\theta(s)$ apresentam qualidade preditora intermediária entre aquela dos solos rejeitados e genuínos. A

caracterização dos solos genuínos, adotados e rejeitados quanto ao SPSCS segue, portanto, os seguintes critérios:

1. Solos genuínos
   a. ERRORMAX≤0,02cm³/cm³, e
   b. $RMSE_{30\text{-}18000}$≤0,035cm³/cm³;
2. Solos rejeitados
   a. ERRORMAX>0,04cm³/cm³, ou
   b. $RMSE_{30\text{-}18000}$> 0,07cm³/cm³;
3. Solos adotados
   a. amostras não classificadas como solos genuínos e rejeitados.

As faixas acima de valores de ERRORMAX e $RMSE_{30\text{-}18000}$ foram arbitradas por meio de um estudo de comparação de predições de um grande número (em torno de 1600) de curvas de retenção de água usando o protocolo da seção 4.6.1. Esse estudo é apresentado no Capítulo 5 deste trabalho.

As amostras que apresentarem apenas três medições de retenção de água, além de Φ, estão impossibilitadas de terem seus valores de $RSME_{30\text{-}18000}$ calculados (Equação 4.6), mesmo que as medições correspondam às sucções s_1, s_2 e s_3. Estritamente para esse último caso específico, admite-se a flexibilização de que a amostra de solo seja caracterizada como genuína, adotada ou rejeitada levando em consideração apenas as seguintes restrições de ERRORMAX: ERRORMAX≤0,02cm³/cm³, 0,02<ERRORMAX≤0,04cm³/cm³, ERRORMAX>0,04cm³/cm³, respectivamente. A validade dessa simplificação nesse caso específico também é avaliada no Capítulo 5.

Na seção 4.9 deste trabalho é apresentado um procedimento passo-a-passo para a classificação de uma amostra de solo segundo o SPSCS.

4.7 Avaliação de curvas-tipo de distribuição do tamanho dos poros por Ordem de solo

O traçado das diferentes possibilidades de curvas A(s) por Ordem de solo foi realizado para a malha de pontos da Figura 4.2b, que apresenta menor adensamento de pontos do que aquele utilizado para a construção das isolinhas de α e m (Figura 4.2a). Essa redução do número de elementos para análise de traçado teve por objetivo permitir melhor visualização gráfica das curvas A(s) numa Ordem estrutural. As curvas modeladas para a malha de pontos do triângulo estrutural são denominadas curvas-tipo de A(s) e os pontos dessa malha representam os diversos solos-tipo possíveis. Essas

curvas foram calculadas para os solos-tipo a partir dos seus pares W_{60} e W_{15000} da malha da Figura 4.2b, utilizando as Equações 4.4 e 4.1 para determinar os parâmetros m e α correspondentes, conforme delineado na seção 4.5. A Figura 4.3 mostra a configuração das curvas-tipo de A(s) para cada uma das nove Ordens do SPSCS, incluindo a curva representativa do baricentro do triângulo correspondente da Ordem (curva em vermelho) e as extremas (curva com linha cheia e pontos). A curva baricêntrica pode ser entendida como a curva A(s) característica ou de referência da Ordem. As funções A(s) extremas expressam o limite máximo e mínimo de variação dessas curvas dentro de uma Ordem estrutural. A plotagem das curvas-tipo de A(s) foi realizada apenas na faixa de sucção entre 60 a 15000 cm, em vez do intervalo de sucção completo do SPSCS (30 a 18000 cm), o que vai permitir a visualização gráfica imediata das três frações de tamanhos dos poros (A_{60}, A_{15000}-A_{60}, 1-A_{15000}) que definem a Ordem do solo e a curva A(s).

O conjunto de gráficos da Figura 4.3a reproduz, segundo a ótica e a metodologia do SPSCS, toda sequência possível de curvas de distribuição do tamanho dos poros de representação da estrutura do espaço poroso. Chama-se a atenção para o fato de que todas as curvas da Figura 4.3 convergem para zero quando a sucção tender a zero e para um (1) quando a sucção tende a infinito. Segundo o SPSCS, as curvas também não devem ser representadas nas faixas de sucção úmida (0 cm<s<30 cm) e muito seca (s>18000 cm), pois sua representação nesses intervalos não é necessariamente acurada, segundo a equação de VG, conforme já anunciado e melhor esclarecido no Capítulo 5.

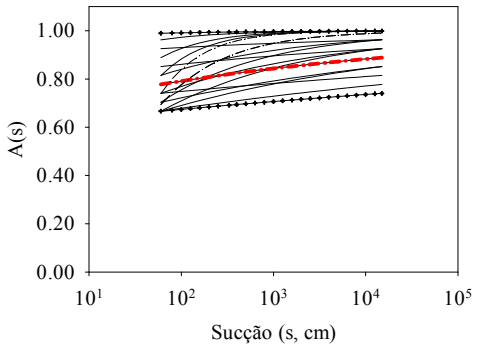
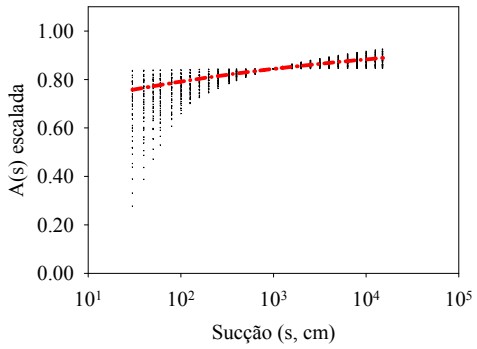
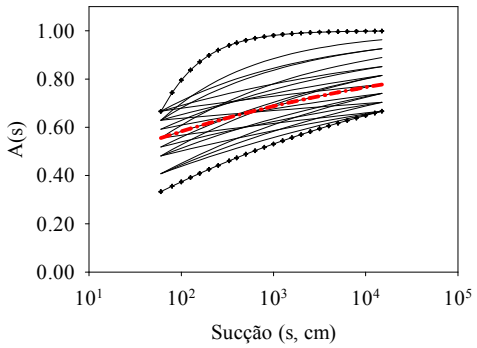
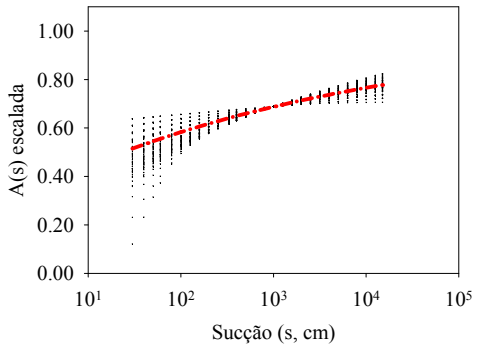
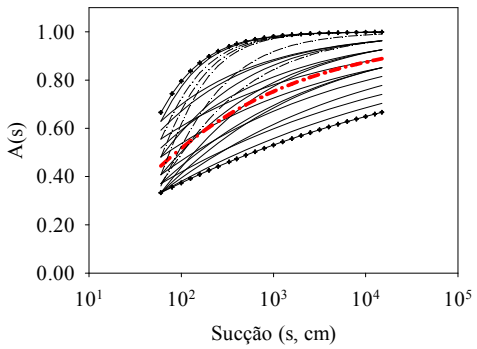
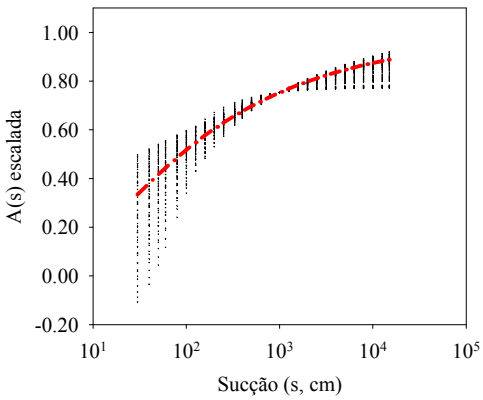
Ordens	a) Curvas-tipo de A(s)	b) Curvas-tipo de A(s) escaladas	SDI_{Ordem}	No
A			0,036	40
D			0,030	52
B			0,051	55

Figura 4.3 – a) Curvas-tipo de A(s) das Ordens de solos no intervalo de sucção de 60 a 15000 cm, com as correspondentes curvas baricêntricas e extremas, representadas para a malha da Figura 4.2b. Os solos-tipo de menor similaridade com a curva baricêntrica (solos com SDIA>0,075) são representados por uma linha ponto-tracejada; b) Valores das curvas-tipo A(s) escaladas à curva baricêntrica da Ordem. Essas curvas-tipo escaladas são representadas para a malha de pontos da Figura 4.2a, com os valores do índice de dispersão de forma SDI da Ordem (Equação 4.9) e número (No) de solos-tipo modelados em uma Ordem de solo; valores de sucção s na escala logarítmica.

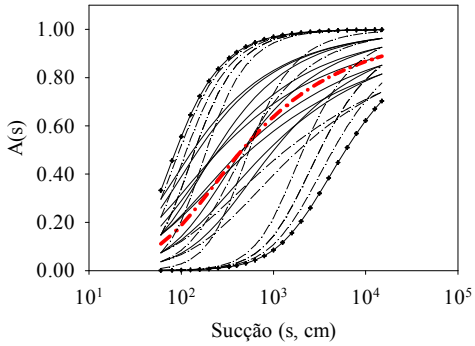
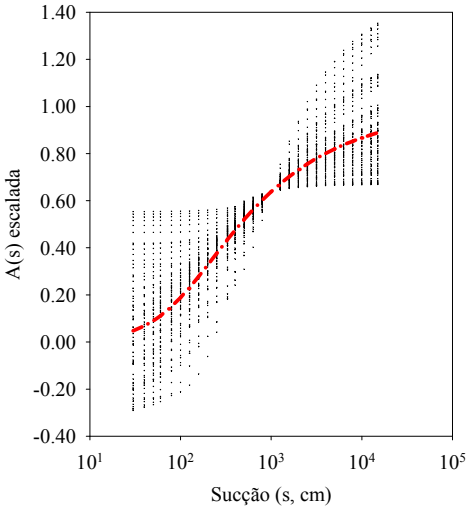
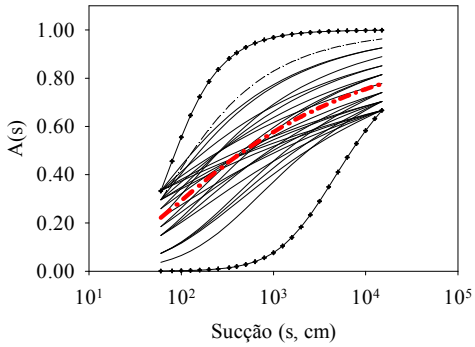
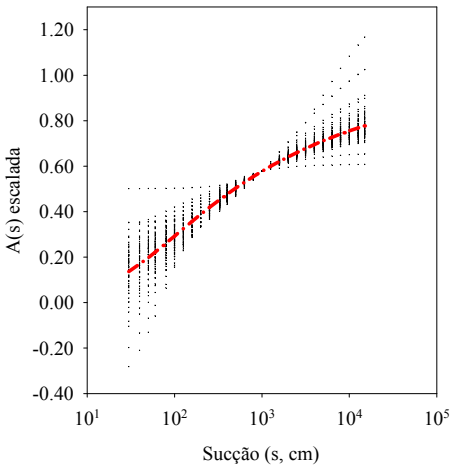
Ordens	a) Curvas-tipo de A(s)	b) Curvas-tipo de A(s) escaladas	SDI_{Ordem}	No
C			0,11	56
E			0,044	55

Figura 4.3 – a) Curvas-tipo de A(s) das Ordens de solos no intervalo de sucção de 60 a 15000 cm, com as correspondentes curvas baricêntricas e extremas, representadas para a malha da Figura 4.2b. Os solos-tipo de menor similaridade com a curva baricêntrica (solos com SDIA>0,075) são representados por uma linha ponto-tracejada; b) Valores das curvas-tipo A(s) escaladas à curva baricêntrica da Ordem. Essas curvas-tipo escaladas são representadas para a malha de pontos da Figura 4.2a, com os valores do índice de dispersão de forma SDI da Ordem (Equação 4.9) e número (No) de solos-tipo modelados em uma Ordem de solo; valores de sucção s na escala logarítmica. (*continuação*)

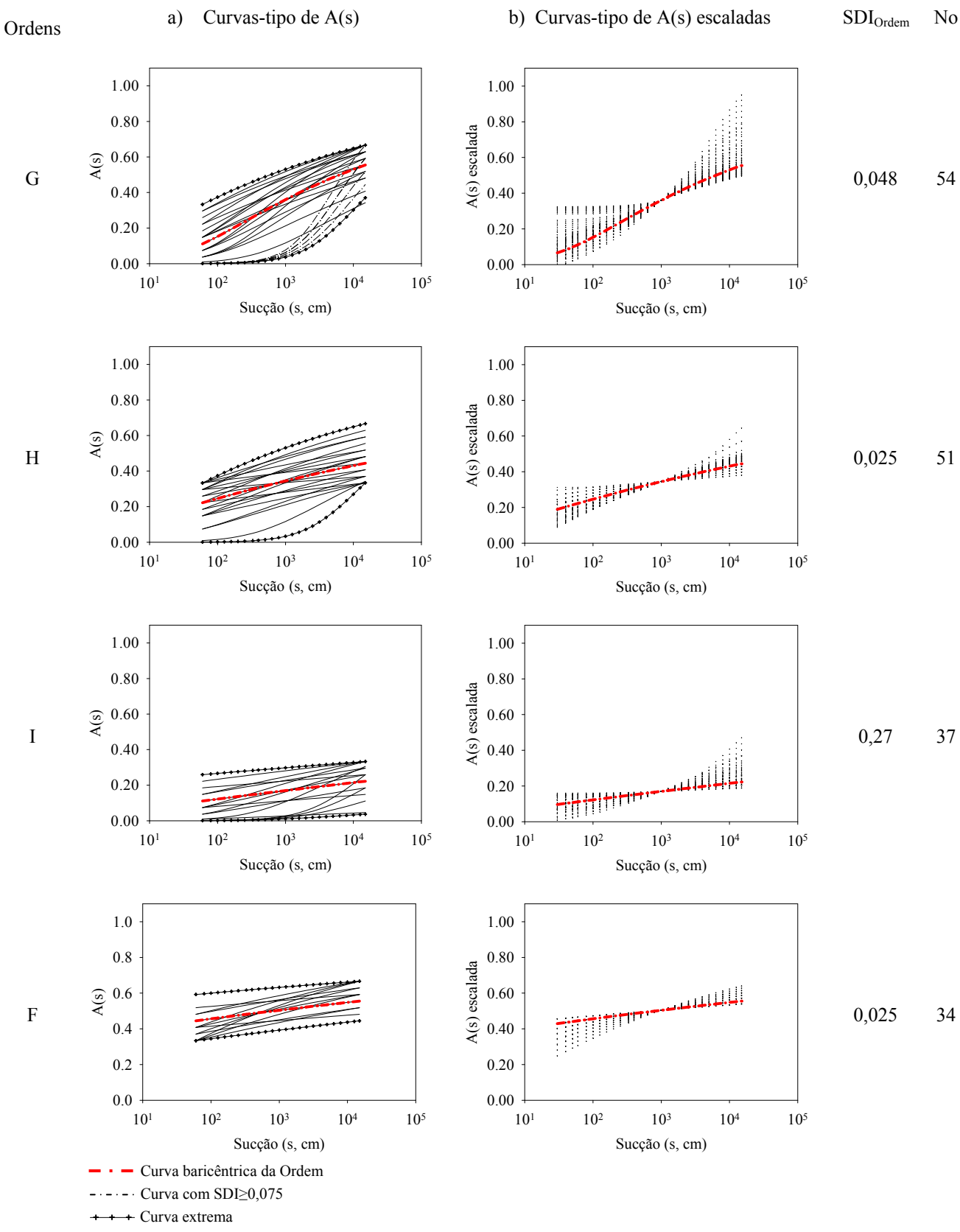


Figura 4.3 – a) Curvas-tipo de A(s) das Ordens de solos no intervalo de sucção de 60 a 15000 cm, com as correspondentes curvas baricêntricas e extremas, representadas para a malha da Figura 4.2b. Os solos-tipo de menor similaridade com a curva baricêntrica

(solos com SDIA>0,075) são representados por uma linha ponto-tracejada; b) Valores das curvas-tipo A(s) escaladas à curva baricêntrica da Ordem. Essas curvas-tipo escaladas são representadas para a malha de pontos da Figura 4.2a, com os valores do índice de dispersão de forma SDI da Ordem (Equação 4.9) e número (No) de solos-tipo modelados em uma Ordem de solo; valores de sucção s na escala logarítmica (*continuação*)

As curvas-tipo de A(s) por Ordem de solo foram escaladas a sua curva baricêntrica adotando a Equação 4.7, visando avaliar a similaridade de forma ("paralelismo" das curvas) dessas curvas nas Ordens. Nesse caso, para tornar mais acurada essa avaliação, foi adotada uma amostra mais abrangente das curvas-tipo, considerando a malha mais detalhada da Figura 4.2a.

$$A_{escalada,j}(s_p)=A_j(s_p)-[A_j(s=1000\ cm)-A_b(s=1000\ cm)] \quad (4.7)$$

A Equação 4.7 calcula a função A(s) escalada do solo-tipo j em 28 sucções de índice p=1 (pF=1,5), p=2 (pF=1,6), ..., p=28 (pF=4,2). O índice j define a posição do elemento-tipo na malha, e o b refere-se à curva baricêntrica da Ordem. As curvas $A_j(s_p)$ de cada Ordem são subtraídas de um fator constante de escala $[A_j(s=1000\ cm)-A_b(s=1000\ cm)]$ para permitir sua colapsação à curva baricêntrica correspondente no ponto de sucção 1000 cm. Assim, se uma curva-tipo A(s) for muito similar ("paralela") à curva baricêntrica da Ordem, haverá forte tendência de sobreposição da sua curva escalada com a curva baricêntrica. Escolheu-se arbitrariamente a sucção de 1000 cm para representar o ponto onde todas as curvas escaladas se colapsariam, já que esse valor permite que o intervalo de sucção de interesse (30-18000 cm) seja dividido, na escala logarítmica, em duas partes iguais, aproximadamente. Na Figura 4.3b, são apresentados os valores escalados de A(s) nos 28 pontos de sucção acima considerados para todos os solos-tipo das nove Ordens (Figura 4.2a).

A similaridade entre cada curva A(s) escalada e o elemento característico (baricêntrico) da Ordem é avaliada pelo índice de dispersão de forma da curva A(s) (SDIA-*shape dispersion index of A curve*), determinado a partir do desvio quadrático médio entre os valores da curva escalada e os da baricêntrica (Equação 4.8).

$$SDIA_j = \sqrt{\frac{1}{28}\sum_{p=1}^{28}\left[A_{escalada,j}(s_p) - A_b(s_p)\right]^2} \quad (4.8)$$

onde o índice j define o solo-tipo, p a sucção e b o solo baricêntrico. Segundo essa expressão, é possível determinar o valor de SDIA para cada ponto da malha da Figura 4.2a e, por conseguinte, a configuração de diferentes faixas de seus valores no triângulo estrutural (Figura 4.4).

O valor médio global de SDIA para uma Ordem de solo (Figura 4.4), chamado SDI_{Ordem}, é determinado segundo a expressão:

$$SDI_{Ordem} = \frac{\sum_{j=1}^{No} SDIA_j}{No} \tag{4.9}$$

onde No é o número de pontos da malha da Figura 4.2a abrangido pelo triângulo correspondente da Ordem, excluindo os pontos marcados por x e incluindo os pontos pertencentes aos seus lados. A exclusão dos pontos marcados por x é para evitar tendenciosidade no cálculo de SDI_{Ordem} por conta do adensamento de pontos junto ao eixo de macro e mesoespaço. Na Figura 4.3b, são indicados os valores de SDI_{Ordem} e No.

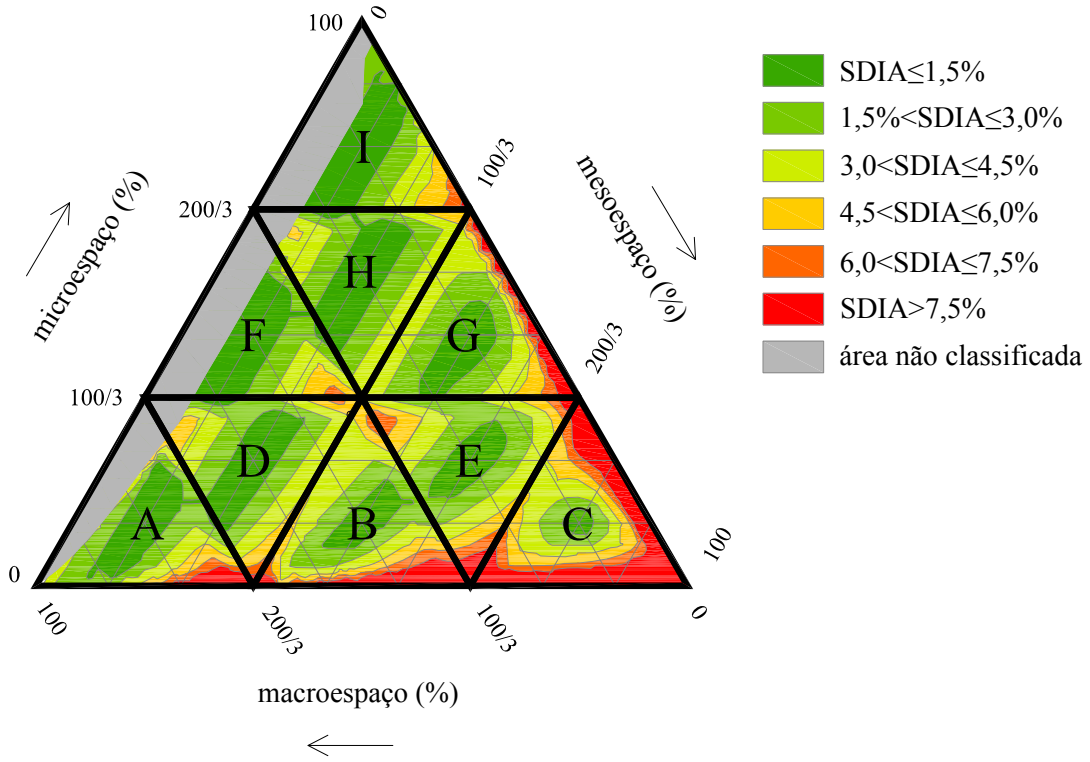


Figura 4.4 - Faixa de valores do índice de dispersão de forma da curva A(s) (em %) no triângulo estrutural.

As Ordens H, I e F foram as que concentraram os menores valores de SDI_{Ordem},

com magnitudes oscilando na ordem de 0,026 (Figura 4.3b). Um SDI_{Ordem}=0 indicaria que todas as curvas A(s) da Ordem seriam "paralelas" entre si, uma situação homogênea perfeita, ainda que não crível. A Ordem C, por outro lado, foi a que registrou maior dispersão de forma, com SDI_{Ordem} igual a 0,11. Essa mais elevada dispersão na Ordem C deve-se principalmente ao fato dessa Ordem representar os solos de mais altos valores da escala do mesoespaço (W_{60}-W_{15000}=A_{15000}-A_{60}≥2/3), ou seja, a Ordem que apresenta as maiores variações de A(s) dentro da faixa de sucção utilizada no cálculo de SDIA (pF=1,5 s~32 cm até pF=4,2, s~16000 cm). Segundo a Figura 4.4, C também é a Ordem do triângulo estrutural mais ocupada por solos com SDIA altos (SDIA>0,075), ou seja, solos com formatos de curvas A(s) apresentando tendência mais adversa de não "paralelismo" com a curva de referência da Ordem. Intermediariamente, as classes altamente macroespaçosa (Ordem A) e macroespaçosa (Ordem D) apresentaram SDI_{Ordem} próximos a 0,033 (Figura 4.3b), seguidas das três Ordens mais próximas de C no triângulo estrutural, que são B, E e G, essas últimas apresentando SDI_{Ordem} próximos a 0,048. Utilizando uma técnica de escalagem da curva A(s) mais sofisticada do que a do nosso estudo, Das *et al.* (2005) determinaram os erros RMSEs (equivalentes aos SDI_{Ordem}) entre os valores experimentais escalados das suas curvas A(s) em relação aos valores da sua curva A(s) de referência, para sete agrupamentos de solos, correspondentes a sete classes texturais. O número total de solos daquele estudo foi de 247. O RMSE mínimo entre os sete grupos de solos foi de 0,049, aproximadamente da mesma magnitude que os SDI das Ordem B, E ou G. Nosso estudo, entretanto, considerou uma completa abrangência de solos levando em conta todos os solos-tipo das Ordens, em contraste com a menor abrangência da base de dados de Das *et al.* (2005).

A Figura 4.4 mostra que as magnitudes dos SDIA nas Ordens estruturais abrangeram majoritariamente valores menores que 0,075, com exceção da Ordem C. Solos com SDIA>0,075 foram destacados na Figura 4.3a mostrando a maior dissimilaridade do formato de suas curvas A(s) em comparação ao da curva baricêntrica correspondente. Esses elementos estão representados no triângulo estrutural apenas em áreas muito próximas aos eixos da macroespaço (frações de microespaço muito baixas) e mesoespaço (frações de macroespaço muito baixas) (Figura 4.4), onde também, coincidentemente, em geral são elevadas as variações do parâmetro de forma m no triângulo (Figura 4.2a). Uma maneira de minimizar a variabilidade de forma das curvas

A(s) nas Ordens de solo seria separar aquelas áreas do triângulo estrutural onde os SDIA foram altos (ex: SDIA>0,075), atribuindo a essas áreas novas Ordens de solos. Esse fato, entretanto, traria o inconveniente de aumentar o número de Famílias estruturais preconizadas pelo sistema. Solos-tipo com SDIA≤0,075 (linhas cheias na Figura 4.3a) apresentaram em geral nível de similaridade com a curva baricêntrica considerado como satisfatório no contexto do SPSCS.

4.8 Avaliação de curvas-tipo de disponibilidade de ar por Família de solo

As curvas-tipo de $A_a(s)$ das 36 Famílias de solos do sistema são apresentadas na Figura 4.5, no intervalo de sucção de 60 a 15000 cm. Essas curvas, segundo a Equação 4.3, foram construídas considerando as curvas-tipo de A(s) (Figura 4.3a) multiplicadas pelo valor mediano da faixa de (Φ-θr) representativa de cada Subordem de solo, sendo esse valor de 0.1, 0,3, 0,5 e 0,7 $cm^3\ cm^{-3}$, respectivamente, para as Subordens de 1 a 4. A curva $A_a(s)$ baricêntrica da Família (Figura 4.5) é o resultado do produto da curva A(s) baricêntrica da Ordem pelo valor mediano da faixa de (Φ-θr) da Subordem, sendo a primeira curva o elemento característico ou de referência da Família. Os elementos extremos das Famílias são também representados na Figura 4.5, essas obtidas pelo produto da curva extrema da Ordem correspondente pelos valores extremos da faixa (Φ-θr) da Subordem, sendo considerados como valores extremos: 0,05 e 0,20 $cm^3\ cm^{-3}$ (Subordem 1); 0,20 e 0,40 $cm^3\ cm^{-3}$ (Subordem 2); 0,40 e 0,60 $cm^3\ cm^{-3}$ (Subordem 3); 0,60 e 0,80 $cm^3\ cm^{-3}$ (Subordem 4). O conjunto de curvas-tipo das Famílias ilustrado na Figura 4.5 reproduz, segundo a ótica e metodologia do SPSCS, toda sequência possível da estrutura porosa dos solos no intervalo de sucção de 60 cm a 15000 cm, podendo ser entendido como um mapa global da representação das variações dessa estrutura naquela faixa de tamanho dos poros. Chama-se a atenção para o fato das curvas de disponibilidade de ar da Figura 4.5 não terem sido consideradas no intervalo de sucção de 0-60 cm. Isso se deve aos mesmos motivos pelos quais as curvas A(s) também não foram representadas nesse intervalo.

As curvas $A_a(s)$ das 36 Famílias em geral têm estruturas analíticas matemáticas distintas, pois são baseadas em valores diferentes do quarteto de parâmetros de VG (Φ, m, α, θr). Entretanto, em valores muito baixos de porosidade ativa, Φ-θr (Famílias de Subordem 1) ou em faixas de variação muito baixas de conteúdo de água em ambas as frações do macroespaço e mesoespaço (Famílias I1, I2 e I3), nota-se na Figura 4.5 que, por efeito de "compactação", as curvas baricêntricas das Famílias acima tornam-se

muito parecidas entre si. São curvas que quase não variam nas frações do macroespaço e mesoespaço. Isso não se repete nas curvas de referência das outras Famílias, que são nitidamente distintas entre si, o que não quer dizer que não possa haver certo grau de coincidência entre curvas $A_a(s)$ de Famílias próximas.

Visando avaliar a similaridade ("paralelismo") das curvas-tipo de $A_a(s)$ em cada Família foi utilizada, no que diz respeito à Ordem, metodologia idêntica à adotada na seção 4.7. Quanto à Subordem, com o propósito de tornar mais acurada a avaliação foi implementada uma sequência (de índice k) mais detalhada de valores crescentes de porosidade ativa para os solos-tipo de cada Subordem. Nesse caso, as faixas de (Φ-θr) das Subordens 1 a 4 foram subdivididas em quatro intervalos de igual valor, com exceção da Subordem 1, onde apenas três foram considerados, assumindo-se as seguintes magnitudes de porosidade ativa (em $cm^3\ cm^{-3}$) para representar os solos-tipo das quatro Subordens: Subordem 1: 0,05 (k=1), 0,10 (k=2), 0,15 (k=3), 0,20 (k=4); Subordem 2: 0,20 (k=1), 0,25 (k=2), 0,30 (k=3), 0,35 (k=4), 0,40 (k=5); Subordem 3: 0,40 (k=1), 0,45 (k=2), 0,50 (k=3), 0,55 (k=4), 0,60 (k=5); Subordem 4: 0,60 (k=1), 0,65 (k=2), 0,70 (k=3), 0,75 (k=4), 0,80 (k=5). As curvas-tipo $A_a(s)$ das Famílias de solo, modeladas pela Equação 4.3 e consideradas segundo procedimento acima, foram escaladas a sua curva baricêntrica (descrita no segundo parágrafo anterior) mediante uso da Equação 4.10 nas mesmas sucções s_p (p=1, 2, ..., 28) onde as curvas-tipo A(s) foram determinadas.

$$A_{a_{escalada,j,k}}(s_p)=A_{a_{j,k}}(s_p)-[\ A_{a_{j,k}}(s=1000cm)-A_{a_b}(s=1000cm)] \tag{4.10}$$

onde o j indica a posição do elemento-tipo da Ordem correspondente no triângulo estrutural (segundo a malha da Figura 4.2a), k define a magnitude de (Φ-θr) na Subordem e b refere-se a curva baricêntrica da Família.

A similaridade entre cada curva $A_a(s)$ escalada e o elemento baricêntrico da Família é avaliada pelo índice de dispersão de forma da curva $A_a(s)$ ($SDIA_a$-*shape dispersion index of A_a curve*), determinado a partir do desvio quadrático médio entre os 28 valores da curva escalada e os da baricêntrica (Equação 4.11).

$$SDIA_{a\,j,k} = \sqrt{\frac{1}{28}\sum_{p=1}^{28}\left(A_{a_{escalada,j,k}}(s_p) - A_{a_b}(s_p)\right)^2} \tag{4.11}$$

O valor médio global de $SDIA_a$ para uma Família de solo, designado como

$SDI_{Família}$, é determinado segundo a expressão:

$$SDI_{Familia} = \frac{1}{No}\sum_{j=1}^{No}\frac{1}{Ns}\sum_{k=1}^{Ns}SDIA_{a\,j,k} \tag{4.12}$$

onde Ns (4 ou 5) é o número de valores de porosidade ativa considerado na definição dos solos-tipo da Subordem e No é como descrito na definição do SDI_{Ordem}.

A Figura 4.6 mostra os valores das curvas-tipo $A_a(s)$ escaladas e os correspondentes valores de $SDI_{Familia}$. A maioria das Famílias (30) registrou valores de $SDI_{Família}$ menores ou iguais que 0,028 $cm^3\ cm^{-3}$. A maior dispersão de forma das curvas $A_a(s)$ foi observada para as Famílias C3 e C4, com valores de $SDI_{Familia}$ acima de 0,059 $cm^3\ cm^{-3}$. Era esperada essa menor similaridade entre os elementos das Famílias C3 e C4, não só porque o SDI global de sua Ordem C ter sido o de mais larga magnitude em relação a das demais Ordens, mas também pelo fato da maior porosidade ativa das Subordens 3 e 4 fazer incrementar a amplitude das suas curvas $A_a(s)$, o que tende a agravar à dispersão de forma em relação à curva baricêntrica.

As Famílias C2, B4, E4 e G4 concentraram elementos com dispersão de forma intermediária, com $SDI_{Familia}$ entre 0,033 e 0,040 $cm^3\ cm^{-3}$, quase todas na Subordem de mais elevado nível (nível 4).

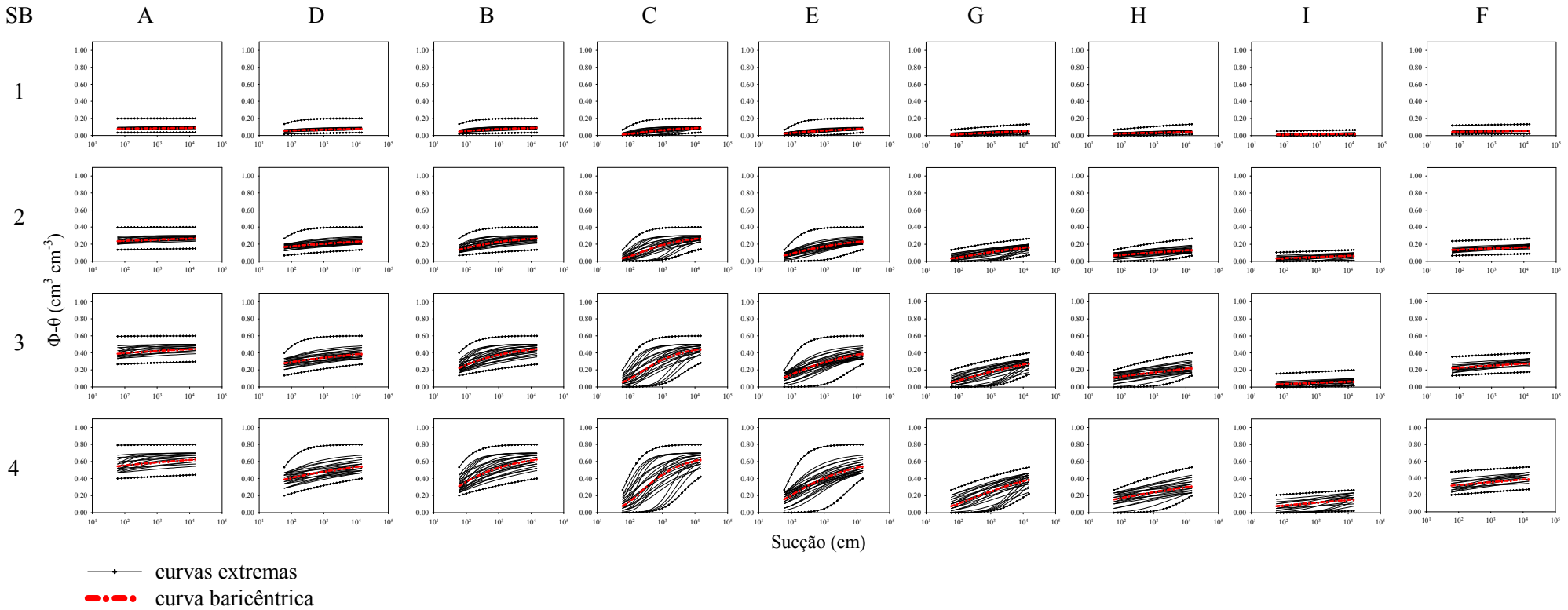


Figura 4.5 - Curvas-tipo de disponibilidade de ar das 36 Famílias estruturais no intervalo de sucção de 60 a 15000cm. Os solos extremos e os baricêntricos das Famílias são também representados; valores de sucção na escala logarítmica.

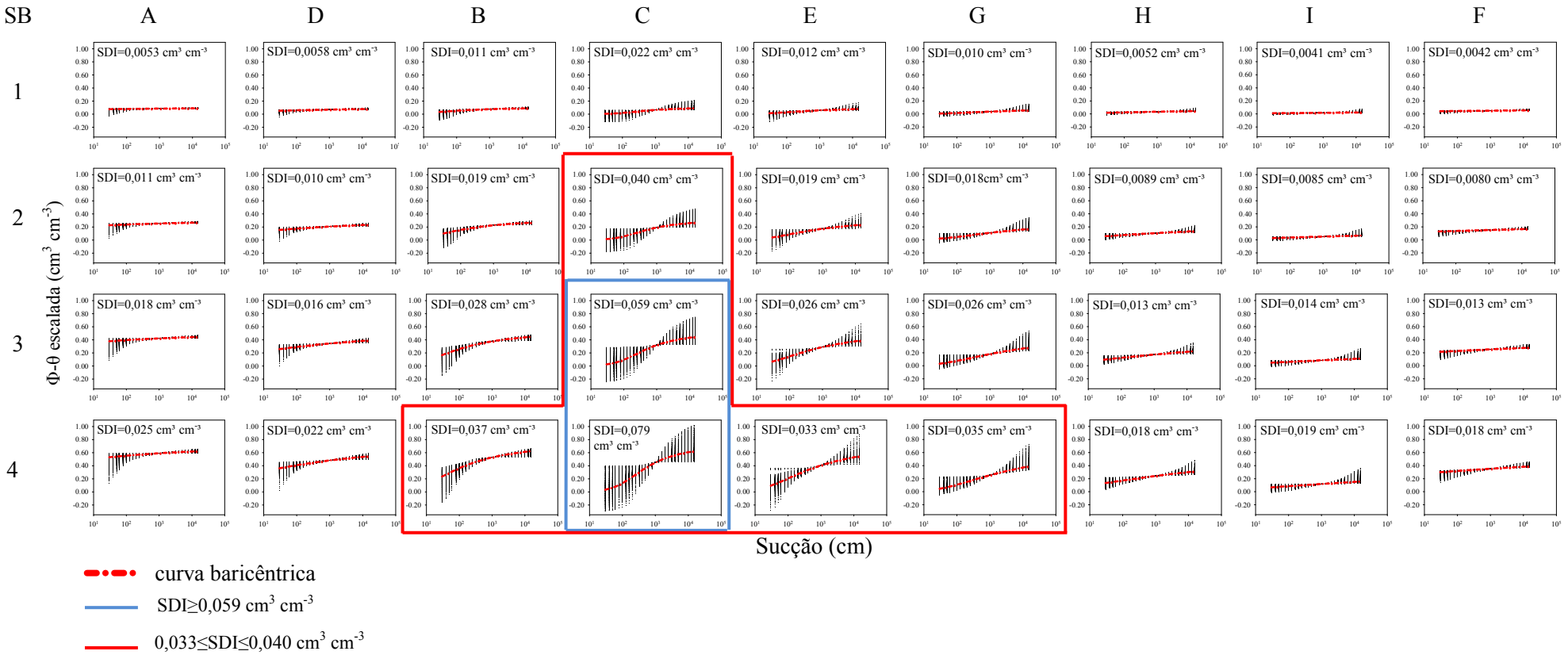


Figura 4.6 - Valores das curvas-tipo de disponibilidade de ar escaladas nas 36 Famílias estruturais no intervalo de sucção de 30 a 15000 cm, com a representação das curvas baricêntricas. São também representados os índices de dispersão de forma das Famílias ($SDI_{Familia}$); valores de sucção na escala logarítmica.

Em cada ponto, de índice j fixo, na malha do triângulo estrutural dos solos de uma dada Subordem (Figuras 4.2a e 4.7), foi determinado, pela Equação 4.13, o valor $SDIA_{aj}$ médio da Subordem ($\overline{SDIA_{a_j}}$), tendo em vista os solos-tipo correspondentes na Família:

$$\overline{SDIA_{a_j}} = \frac{1}{Ns}\sum_{k=1}^{Ns} SDIA_{a_{j,k}} \qquad (4.13)$$

A representação da distribuição desses valores de $\overline{SDIA_{a_j}}$ nos triângulos estruturais das quatro Subordens é mostrada na Figura 4.7. Observa-se a larga predominância de $\overline{SDIA_{a_j}}$<0,03 cm^3 cm^{-3} nas Famílias e a pequena presença de $\overline{SDIA_{a_j}}$ com valores mais elevados ($\overline{SDIA_{a_j}}$>0,045 cm^3 cm^{-3}), concentrados especialmente nas Famílias C3 e C4, consistentemente com o já anteriormente destacado. A larga predominância de solos com $\overline{SDIA_{a_j}}$<0,03 cm^3 cm^{-3} implica a tendência da maioria das curvas $A_a(s)$ escaladas nas Famílias de diferir em média das respectivas curvas baricêntricas em no máximo 0,03 cm^3 cm^{-3}, o que é um indicativo da similaridade ("paralelismo") entre as curvas de disponibilidade de ar dentro das Famílias. Essa faixa de 0-0,03 cm^3 cm^{-3}, curiosamente, é reportada na literatura como sendo de baixo erro na predição da curva de retenção de água (Vereecken *et al.*, 2010; Botula *et al.*, 2012). À exceção das Famílias C3 e C4, as demais Famílias contiveram em geral curvas $A_a(s)$ com nível de similaridade em relação à curva baricêntrica considerado como satisfatório (Figura 4.5) no contexto do SPSCS.

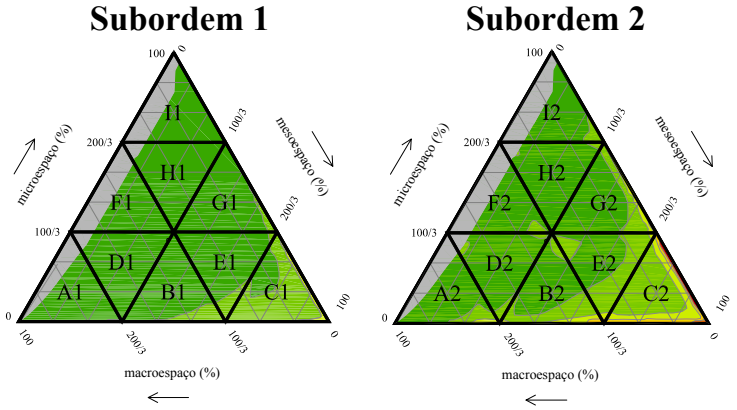
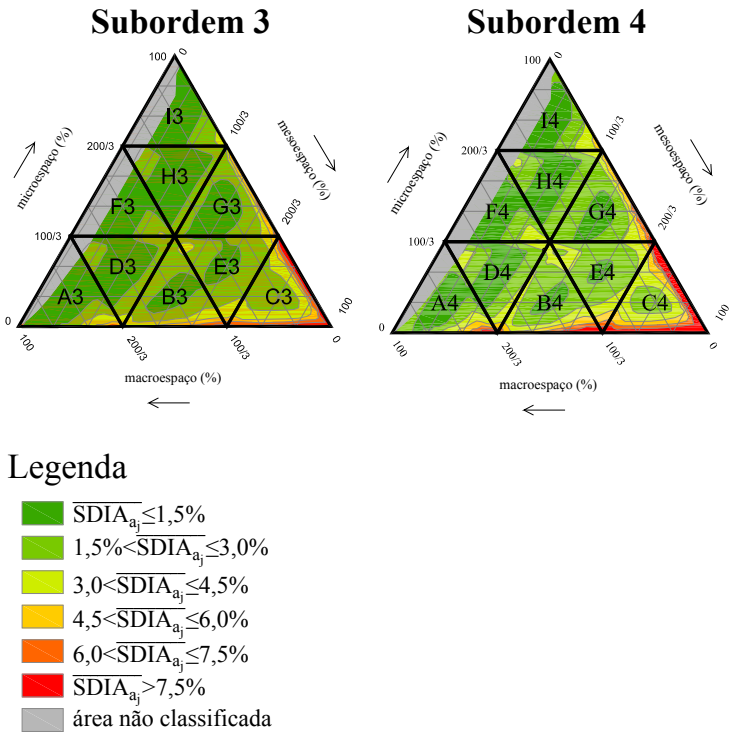


Figura 4.7 - Faixas de valores do índice de dispersão de forma da curva de disponibilidade de ar (em %) no triângulo estrutural, para as 36 Famílias de solo.



Legenda

- $\overline{SDIA_{a_j}} \leq 1,5\%$
- $1,5\% < \overline{SDIA_{a_j}} \leq 3,0\%$
- $3,0 < \overline{SDIA_{a_j}} \leq 4,5\%$
- $4,5 < \overline{SDIA_{a_j}} \leq 6,0\%$
- $6,0 < \overline{SDIA_{a_j}} \leq 7,5\%$
- $\overline{SDIA_{a_j}} > 7,5\%$
- área não classificada

Figura 4.7 - Faixas de valores do índice de dispersão de forma da curva de disponibilidade de ar (em %) no triângulo estrutural, para as 36 Famílias de solo. (*continuação*)

4.9 Procedimentos para classificação de uma amostra de solo em Famílias estruturais

1 – Selecionar as medições de θ_1, θ_2, θ_3 e definir o valor experimental de Φ (conteúdo de água de saturação medida em laboratório ou porosidade total quando o primeiro não estiver disponível);

2 – Para permitir o cálculo do $RMSE_{30\text{-}18000}$, é desejável a disponibilidade de outros dados experimentais θ-s, preferencialmente se estiverem fora das faixas preconizadas de sucção para seleção de θ_1, θ_2 e θ_3 (seção 4.6.1) e bem distribuídos ao longa da faixa de sucção de 30 a 18000 cm;

3 – As medições referidas nos procedimentos anteriores devem ser em amostras indeformadas e realizadas em laboratório, usando métodos onde a sucção e conteúdo de água sejam medidos diretamente (como é o caso da placa porosa em câmara de pressão e mesa de tensão);

4 – Calcular os três (3) parâmetros de VG (α, m, θr) usando o programa RETC, considerando o procedimento padrão de definição dos valores dos parâmetros iniciais e as restrições impostas a α, m e θr (seção 4.6.1), e assumindo Φ como parâmetro

conhecido;

5 – Calcular ERRORMAX e $RMSE_{30\text{-}18000}$, e caracterizar a amostra, segundo o SPSCS, como genuína, adotada ou rejeitada (seção 4.6.2). Se a amostra for caracterizada como rejeitada, ela não poderá ser classificada. Se apenas três medições experimentais de θ(s) estiverem disponíveis nas faixas de sucção estabelecidas para s_1, s_2 e s_3, sua caracterização nos grupos dos genuíno, adotado e rejeitado será realizada apenas para ERRORMAX (Seção 4.6.2);

6 – Baseado nos valores otimizados de (α, m, θr) (passo 2), calcular as três frações de tamanho dos poros usando as Equações 4.1 e 4.2 e plotar essas três frações no triângulo estrutural para definir a Ordem X da amostra;

7 – Definir a Subordem i (de 1 a 4) da amostra baseado no valor de (Φ- θr) (Equação 4.5);

8 – Determinar a Família Xi da amostra.

4.10 Conclusões e Recomendações

No contexto do SPSCS, os solos são classificados em classes estruturais denominadas Famílias, que agrupam indivíduos com curvas de disponibilidade de ar semelhantes. Essas curvas são usualmente mensuradas e espelham uma natureza hidráulica dos solos, sendo caracterizadas, no sistema, como os elementos representativos da estrutura do espaço poroso dos solos, mesmo sabendo-se de sua limitação na representação mais precisa da geometria e interconecções de poros. As Famílias estruturais são consequência da conjugação de grupos de curvas de distribuição acumulada do tamanho dos poros [A(s)] com agrupamentos de porosidades ativas (Φ-θr). Para tanto, o SPSCS previu dois níveis categóricos, Ordens e Subordens, que agrupam curvas A(s) e valores de (Φ-θr) semelhantes, respectivamente.

Curvas de A(s) semelhantes foram representadas em nove grupos de solos (A a I), as Ordens. Esses nove grupos foram representados num diagrama ternário, aqui chamado de triângulo estrutural, cujos lados contêm as escalas, de 0 a 1, de representação de três classes de tamanho dos poros: microespaço, mesoespaço e macroespaço. O sistema foi baseado no da classificação textural, em função da similaridade de construção entre a curva A(s) e a curva de distribuição de tamanho de partículas. Visando o agrupamento de curvas A(s) semelhantes, fez-se necessária sua parametrização, adotando-se, nesse caso, a equação de van Genuchten (VG). No

contexto do SPSCS, a curva A(s) foi parametrizada e representada no intervalo de sucção entre 30 cm a 18000 cm, onde é mais reconhecida a adequação do modelo de VG na predição de dados de retenção de água. A parametrização da equação de VG seguiu protocolo padronizado, viabilizando a determinação única dos seus três parâmetros: α, m e θr. O valor Φ (conteúdo de água na saturação ou porosidade total quando o primeiro não estiver disponível) foi considerado como sendo um parâmetro físico conhecido. Curvas-tipo A(s) por Ordem de solo foram representadas e escaladas visando avaliar a similaridade ("paralelismo") desses elementos com a curva A(s) do solo baricêntrico ou representativo da Ordem. A similaridade das curvas A(s) de uma Ordem ao seu elemento baricêntrico foi avaliada pelo índice de dispersão de forma da Ordem (SDI_{Ordem}), a partir do cálculo do desvio quadrático médio entre as curvas A(s) escaladas e a curva baricêntrica. Desse exercício, constatou-se que as curvas-tipo A(s) por Ordem de solo apresentaram em geral razoável similaridade, com exceções mais frequentes abrangendo os solos da Ordem C, onde a dispersão de forma foi mais pronunciada. Constatou-se, em geral, que os solos mais diferenciados de uma Ordem foram representados em regiões muito próximas aos eixos de macroespaço e mesoespaço do triângulo estrutural, onde também foram elevadas as variações dos valores do parâmetro de forma m da equação de VG.

O SPSCS também propôs quatro (4) faixas de valores de porosidade ativa para representar os quatro (4) níveis do segundo nível categórico do sistema, a Subordem (1 a 4). A conjugação das curvas-tipo de A(s) das Ordens de solo com os valores medianos de cada uma dessas quatro faixas de valores de porosidade ativa possibilitou a construção das curvas-tipo de disponibilidade de ar [$A_a(s)$] nas 36 Famílias de solo. O espectro dessas curvas representativas $A_a(s)$ nas diferentes Famílias estruturais (Figura 4.5), de certa forma, é um mapa global de representação das possíveis estruturas do espaço poroso dos solos no intervalo de tamanho de poros compreendido entre as sucções de 60 e 15000 cm, levando em conta as premissas do SPSCS. As curvas-tipo $A_a(s)$ por Família de solo foram escaladas com respeito à sua curva $A_a(s)$ baricêntrica para avaliação das similaridades ("paralelismo") entre essas curvas dentro da Família. Essa avaliação foi feita pelo cálculo do índice de dispersão de forma da Família ($SDI_{Família}$). Valores de $SDI_{Familia}$ inferiores a 0,03 $cm^3\ cm^{-3}$ predominaram (30 em 36) no conjunto das Famílias estruturais. Dessa forma, considerou-se satisfatório, em geral, o nível de similaridade entre as curvas de disponibilidade de ar dentro de uma Família

estrutural, como pode ser verificado na Figura 4.5. As menores similaridades ocorreram nas Famílias C3 e C4 ($SDI_{Familia}$>0,059 cm^3 cm^{-3}), principalmente devido a maiores dispersões de forma da curva $A_a(s)$ envolvendo alguns de seus solos-tipo (Figura 4.7), geralmente aqueles com valores das frações de macroespaço e microespaço muito próximos a zero, ocupando áreas do triângulo estrutural onde as variações do parâmetro m são muito altas, como já referido.

Os elementos agrupados por Família de solo, que são as curvas de disponibilidade de ar, são entidades físicas que independem de modelação matemática. Entretanto, sua metodologia de agrupamento em classes estruturais requer um modelo matemático (modelo VG) e procedimento de parametrização. Caso os dados de retenção de água da amostra não atendam ao modelo VG e/ou seu protocolo de parametrização, sua classificação será prejudicada. Visando caracterizar o grau de representatividade das curvas de disponibilidade de ar preconizadas pelo sistema, foram propostos três (3) grupos de solos associados à classificação: solos genuínos, adotados e rejeitados, cada um relacionado a um grau de acurácia de predição do modelo de VG. Solos genuínos são os de amostras onde a curva $A_a(s)$ modelada apresenta forte aderência aos dados experimentais no intervalo de 30-18000 cm; solos rejeitados, indicam, por outro lado, elementos onde o modelo VG foi inadequado e que, portanto, não podem ser classificados; solos adotados são os de amostras onde o modelo VG se aplica com menor acurácia em relação aos solos genuínos, mas que ainda podem ser classificados.

O SPSCS é um método discreto de classificação, e, por esse motivo, é possível que haja certo grau de sobreposição entre curvas $A_a(s)$ de Famílias próximas. O SPSCS por ser baseado em metodologia analítica e quantitativa, pode ser uma ferramenta útil no desenvolvimento de funções de pedotransferência de propriedades hidráulicas que levem em consideração informações relacionadas à estrutura do solo. Seu uso pode também ser relevante em estudos para estabelecer relações entre a estrutura porosa do solo e sua funcionalidade hídrica, classes pedológicas e propriedades físico-químicas, o que deve ajudar na ampliação do conhecimento dos processos hidráulicos e pedológicos. Esse estudo de estabelecimento de relações será parcialmente tratado no Capítulo 6. Recomenda-se, no futuro, que as classes propostas pelo sistema possam também ser avaliadas quanto a geometria dos vazios, a partir de estudos de correlação envolvendo outros métodos de caracterização da estrutura porosa. Apontam-se como outras sugestões deste trabalho a validação das faixas de sucção s_1, s_2 e s_3 do protocolo

de parametrização da curva A(s) adotado pelo sistema e refinamento do procedimento proposto de otimização dos parâmetros de VG visando a obtenção de ajustes mais aderentes a realidade física envolvendo a retenção de água no solo A continuação deste trabalho, Capítulo 5, fará a aplicação e validação da metodologia do SPSCS levando em conta um extenso banco internacional de dados de solo.

CAPITULO 5 –SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS BASEADO NA ESTRUTURA DO ESPAÇO POROSO. PARTE 2: APLICAÇÃO A UM BANCO DE DADOS DE SOLOS INTERNACIONAIS

5.1 Introdução

No Capítulo 4, foi apresentado um sistema de classificação da estrutura porosa dos solos, baseado no agrupamento de curvas similares de disponibilidade de ar [curva $A_a(s)$] determinadas na escala da amostra do solo, onde $A_a(s)$ é entendida como sendo o complemento da curva de retenção de água, $\theta(s)$, em relação ao conteúdo de água na saturação, Φ. Esse sistema foi representado pela sigla SPSCS (*Soil Pore space-Structural Classification System*) e apresenta as Famílias estruturais como a classe de solo que reúnem solos com curvas $A_a(s)$ semelhantes. Dois níveis categóricos são indicados no contexto do SPSCS, as Ordens e Subordens. O SPSCS foi fundamentado no sistema de classificação textural, sendo concebido um triângulo análogo ao textural, chamado triângulo estrutural, onde as amostras são agrupadas segundo curvas similares de distribuição do tamanho de poros, definindo as Ordens de solo. A Subordem representa a reunião de solos de semelhante espaço poroso ativo, termo proposto no Capítulo 4 para expressar a diferença entre Φ e o conteúdo de água residual, θr. Nove Ordens e quatro Subordens foram sugeridas, originando, portanto, 36 Famílias estruturais possíveis. O presente trabalho buscou aplicar a metodologia do SPSCS a um amplo banco de dados internacionais de solo, visando estabelecer as Ordens e Famílias do sistema para solos de diferentes territórios e condições pedogenéticas. O trabalho também objetivou validar o protocolo de classificação e verificar a similaridade dentro das Famílias das curvas geradas de disponibilidade de ar em relação às curvas-tipo preconizadas no Capítulo 4.

5.2 Enquadramento do banco de dados ao SPSCS

Os bancos de dados de solos brasileiros, HYBRAS (Ottoni et al., 2018), e europeus, HYPRES (Wösten *et al.*, 1999), foram selecionados para avaliar o SPSCS, o primeiro representativo de ambientes tropicais e subtropicais e o segundo de clima temperado. Além da sua abrangência pedogenética, a base de dados deste trabalho contempla solos com ampla faixa de variação de atributos físicos e hídricos, conforme delineada nas duas referências acima e parcialmente detalhada nos Capítulos 2 e 3. Desses inventários, destacaram-se 1056 e 2087 amostras de solos brasileiros e europeus, respectivamente, totalizando 3143 solos para avaliação do SPSCS. O critério de seleção

dessas amostras levou em consideração a disponibilidade de medições em pelo menos quatro pontos da curva de retenção numa faixa de larga sucção (0-15000 cm), contendo, obrigatoriamente, os quatro pontos experimentais previstos pelo sistema para classificação de solos (Φ, θ_1, θ_2, θ_3, seção 4.5.1 do Capítulo 4). 1499 amostras de solos do HYPRES abrangeram apenas essas quatro medições de retenção. Esse conjunto de dados foi designado como de solos europeus especiais, sendo particularizado do restante dos dados europeus como indicação de sua limitação para aplicação plena da metodologia do SPSCS, que requer a disponibilidade de no mínimo cinco pontos experimentais de retenção de água. Os restantes 588 (2087-1499) solos europeus e a totalidade dos solos brasileiros são de amostras que contêm, além de Φ, θ_1, θ_2, θ_3, pelo menos mais uma medição do valor de θ fora das faixas de sucção previstas para s_1, s_2 e s_3. Foram também critérios sempre respeitados na seleção de amostras o uso de amostras indeformadas para medições dos dados de retenção de água utilizando métodos onde a pressão e a umidade fossem diretamente mensuradas (como é o caso dos métodos da mesa de tensão e da placa porosa em câmara de pressão). Além dos dados da curva de retenção, acima descritos, a base de dados do estudo dispõe de informações sobre condutividade hidráulica saturada, conteúdo de matéria orgânica, textura e densidade do solo, sendo as duas últimas variáveis as únicas que foram determinadas para todos os solos do banco de dados.

Na Tabela 5.1, é apresentada a distribuição das amostras selecionadas segundo sua origem e representação nos grupos dos solos genuínos, adotados e rejeitados. De acordo com a metodologia do SPSCS, esses três grupos buscam expressar, em ordem decrescente, os diferentes níveis de qualidade de ajuste dos dados experimentais de retenção de água das amostras à equação de van Genuchten (VG, van Genuchten, 1980), que é a equação utilizada pelo SPSCS para classificar os solos e representar suas curvas de retenção de água e disponibilidade de ar.

A maioria das amostras no estudo foi caracterizada no grupo dos genuínos (88%), sendo, apenas, 1% no grupo dos rejeitados, correspondentes às amostras que não podem ser classificadas. A distribuição dos erros ERRORMAX e $RSME_{30\text{-}18000}$ (Figura 5.1), dois indicadores estatísticos previstos pelo sistema para caracterização dos solos em um desses três grupos acima (seção 4.6.2 do Capítulo 4), mostrou, no caso dos solos genuínos, que os erros máximos de predição dos seus três pontos experimentais, θ_1, θ_2, θ_3 (ERRORMAX), foram prioritariamente inferiores a 0,01 cm^3 cm^{-3} (78,3% das

amostras), enquanto que os erros de estimativa das medições de retenção hídrica no intervalo de sucção entre 30 a 18000 cm ($RMSE_{30\text{-}18000}$) foram majoritariamente na faixa de 0 a 0,02 $cm^3\ cm^{-3}$ (86,2% amostras). Esses baixos erros evidenciam em geral boa aderência à equação de VG dos dados de retenção de água nos solos genuínos, levando em conta que a literatura considera que é de boa qualidade o ajuste aos dados experimentais de retenção quando os valores de RMSE são inferiores a 0,03 $cm^3\ cm^{-3}$ (Vereecken *et al.*, 2010; Botula *et al.*, 2012).

Os solos adotados, apesar de, em geral, apresentarem pior desempenho em relação aos genuínos, também evidenciaram resultados preditivos relativamente satisfatórios, tendo em vista a intenção de apenas diferenciar os elementos desse grupo com respeito aos solos genuínos e rejeitados. Aproximadamente 85% das amostras adotadas registraram ERRORMAX menor que 0,03 $cm^3\ cm^{-3}$ e $RMSE_{30\text{-}18000}$ menor que 0,05 $cm^3\ cm^{-3}$, com 46,6% dos valores de RMSE inferiores a 0,035 $cm^3\ cm^{-3}$ (Figura 5.1). Esses fatos confirmam o pior desempenho preditor dos solos adotados em relação aos genuínos.

Nota-se que a barra de valores da distribuição dos erros $RMSE_{30\text{-}18000}$ da Figura 5.1 foi discriminada para os correspondentes valores de ERRORMAX segundo dois intervalos, ERRORMAX$\leq$0,02 $cm^3\ cm^{-3}$ e ERRORMAX>0,02 $cm^3\ cm^{-3}$, permitindo verificar a associação da distribuição dos valores desses dois indicadores (ERRORMAX e $RMSE_{30\text{-}18000}$) na base de dados. Percebe-se que os solos adotados de maiores erros $RMSE_{30\text{-}18000}$ (entre 0,05 e 0,07 $cm^3\ cm^{-3}$) tiveram majoritariamente baixos ERRORMAX (inferiores a 0,02 $cm^3\ cm^{-3}$), ou seja, estimaram θ_1, θ_2 e θ_3 com boa precisão. Leve-se em consideração (seção 4.6.2 do Capítulo 4) que os valores de $RMSE_{30\text{-}18000}$ só poderão ser determinados em amostras que apresentarem pelo menos cinco pontos experimentais da curva de retenção. Por esse motivo, o número de amostras para ERRORMAX e $RMSE_{30\text{-}18000}$ da Figura 5.1 é diferente. Complementando a avaliação da adequabilidade dos grupos de solos genuínos, adotados e rejeitados de discriminar diferentes níveis de qualidade de ajuste da equação de VG, na seção 5.3.2 deste Capítulo foram apresentados para visualização gráfica comparativa exemplos de curvas de retenção de água nesses três grupos, com seus dados experimentais, em amostras do banco de dados abrangendo Famílias nas nove Ordens estruturais.

Tabela 5.1 - Distribuição na base de dados do estudo dos grupos dos solos genuínos, adotados e rejeitados, e correspondentes percentuais dessa distribuição em relação ao total das amostras.

	Genuíno	Adotado	Rejeitado	Total
Solos brasileiros	991 (31,5%)	56 (1,8%)	9 (0,3%)	***1056 (33,6%)***
Solos europeus	406 (12,9%)	163 (5,2%)	19 (0,6%)	***588 (18,7%)***
Solos europeus especiais	1359 (43,2%)	137 (4,4%)	3 (0,1%)	***1499 (47,7%)***
Total	***2756 (87,7%)***	***356 (11,3%)***	***31 (1%)***	***3143 (100%)***

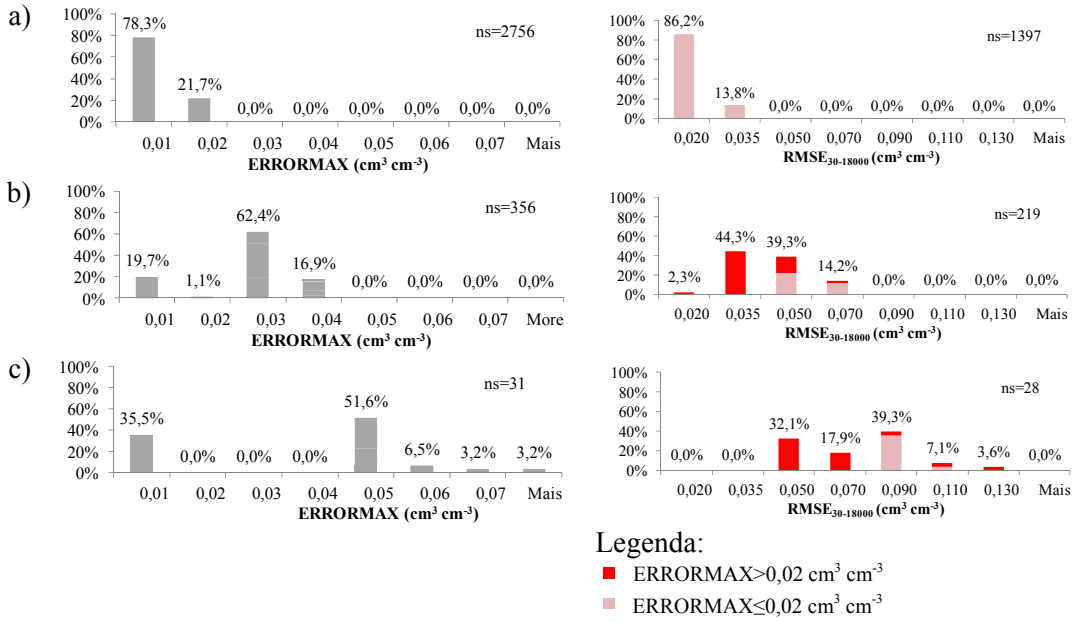


Figura 5.1 – Distribuição do percentual das amostras na base de dados do estudo para diferentes faixas de seus valores de ERRORMAX e $RMSE_{30\text{-}18000}$ no grupo dos a) genuínos, b) adotados e c) rejeitados; ns – número de amostras. O número de amostras para ERRORMAX e $RMSE_{30\text{-}18000}$ é diferente pois o indicador $RMSE_{30\text{-}18000}$ não pode ser caracterizado para os 1499 solos europeus especiais.

A distribuição dos dados de retenção de água dos solos genuínos nas três faixas de sucção que definem θ_1, θ_2, θ_3 mostrou que 95% dos dados com sucções na faixa de s_1 (30-80cm) apresentaram sucções variando de 50 a 60 cm. Na faixa de s_2 (250-500 cm), 87% das medições foram para sucções entre 300 a 330 cm, e no intervalo de s_3 (9000-18000 cm) 99% dos dados foram para a sucção de 15000 cm. Esse resultado confirma, nos solos genuínos, a proximidade dos valores selecionados de θ_1, θ_2, θ_3 aos valores reais de θ_{60}, θ_{330}, θ_{15000}, respectivamente. Com base nesse resultado e levando em conta que, por definição, os erros de predição de θ_1, θ_2, θ_3 são muito baixos nos solos

genuínos, as três (3) frações do tamanho dos poros calculadas pelo SPSCS (A_{60}, W_{60}-W_{15000} e W_{15000}) para esse grupo foram necessariamente determinadas com baixa imprecisão no banco de dados. A proximidade dos valores selecionados de θ_1, θ_2, θ_3 aos valores reais de θ_{60}, θ_{330}, θ_{15000} também se repetiu no grupo dos adotados, o que leva a concluir que suas três frações de tamanho de poros acima também foram calculadas com acurácia aceitável, ainda que, em geral, inferior à correspondente acurácia obtida para os solos genuínos.

A identificação das amostras de solos genuínos no triângulo estrutural nas nove Ordens e 36 Famílias do SPSCS é apresentada na Figura 5.2 segundo sua origem em termos de ambiente pedogenético (brasileira ou europeia). Essa avaliação foi efetuada somente para os solos genuínos, não só por serem os mais numerosos, mas também por corresponderem às amostras cujas curvas de disponibilidade de ar ajustadas segundo o SPSCS são mais representativas da estrutura porosa. Na Figura 5.3, ilustra-se a distribuição do número dessas amostras nas nove Ordens estruturais e para as quatro correspondentes Subordens. A distribuição percentual das amostras por Família em relação ao total de amostras para o grupo dos genuínos (2756) é também indicada nessa figura.

De acordo com as Figuras 5.2 e 5.3, as 36 Famílias foram representadas, com exceção das Famílias A4, C4 e F1. As Ordens e Subordens com maior concentração de amostras foram as B (654), G (605) e H (473) e as Subordens 2 (1435) e 3 (1076), sendo a Ordem F e Subordem 4 as classes de menor expressão de dados. Os solos brasileiros foram majoritariamente representados nas Ordens B e D, em especial, na Família B2, sendo caracterizados, portanto, por estruturas com moderados valores de macroespaço ($1/3 \leq A_{60} < 2/3$). Em contrapartida, os solos europeus, reuniram-se prioritariamente nas Ordens G e H, onde os volumes microespaçosos é que são de moderadas proporções ($1/3 \leq W_{15000} < 2/3$). As classes de microespaço alto ($W_{15000} > 2/3$), de Ordem I, também são dominadas pelos solos europeus. Solos brasileiros microespaçosos (Ordem H) e europeus macro-mesoespaçosos (Ordem B) foram também bem representados na base de dados. Foi quase ausente a presença de solos em regiões do triângulo estrutural onde são muito baixos os valores do mesoespaço (W_{60}-$W_{15000} < 1/9$). Esses solos correspondem a valores muito baixos do parâmetro m da equação de VG ($m < 0{,}04$) ou muito altos do parâmetro α ($\log\alpha > 3{,}5$) (ou seja, na região próxima do espaço cinza do triângulo da Figura 4.2 do Capítulo 4).

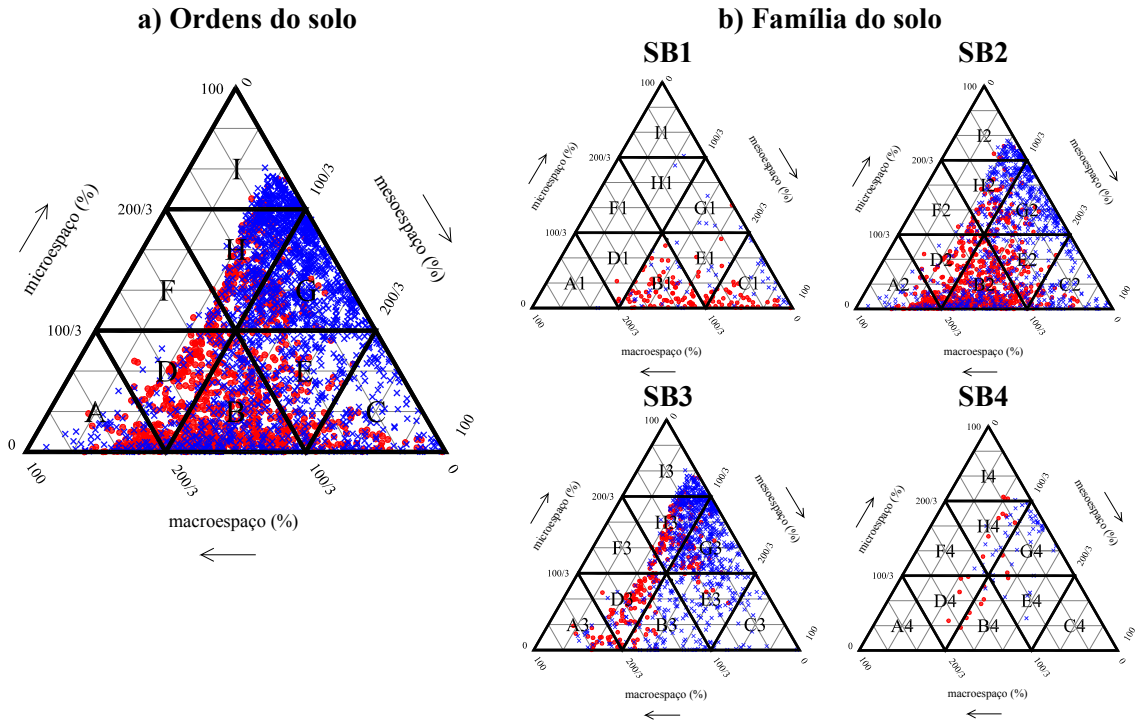
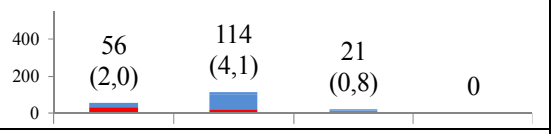


Figura 5.2 – Distribuição das amostras dos solos genuínos no triângulo estrutural nas a) Ordens e b) Famílias do solo, segundo sua origem em termos de ambiente pedogenético; SB1 - Subordem 1, SB2 - Subordem 2, SB3 - Subordem 3, SB4 - Subordem 4.

Ordem do solo	ns	BR	EU	Subordens do solo			
				1	**2**	**3**	**4**
A	158	93	65	1 (0,04)	122 (4,4)	35 (1,3)	0
D	212	154	58	4 (0,1)	103 (3,7)	101 (3,7)	4 (0,1)
B	654	386	268	85 (3,1)	466 (17)	96 (3,5)	7 (0.3)

Figura 5.3 – Distribuição do número de amostras de solos genuínos nas Ordens e Famílias estruturais segundo sua origem em termos de ambiente pedogenético. Valor entre parêntesis indica o valor percentual do número de amostras genuínas de uma Família em relação ao total de amostras de solos genuínos (2756); ns - número de amostras; BR - solos brasileiros; EU – solos europeus.

Ordem do solo	ns	BR	EU	Subordens do solo			
				1	**2**	**3**	**4**
C	191	54	137	56 (2,0)	114 (4,1)	21 (0,8)	0
E	249	82	167	18 (0,7)	140 (5,1)	85 (3,1)	6 (0,2)
G	605	72	533	6 (0,2)	259 (9,4)	313 (11)	27 (1,0)
H	473	116	357	1 (0,04)	138 (5,0)	311 (11)	23 (0,8)
I	176	13	163	1 (0,04)	72 (2,6)	99 (3,6)	4 (0,2)
F	38	21	17	0	21 (0,8)	15 (0,5)	2 (0,1)
Total	2756	991	1765	172	1435	1076	69



■ solos brasileiros ■ solos europeus

Figura 5.3 – Distribuição do número de amostras de solos genuínos nas Ordens e Famílias estruturais segundo sua origem em termos de ambiente pedogenético. Valor entre parêntesis indica o valor percentual do número de amostras genuínas de uma Família em relação ao total de amostras de solos genuínos (2756); ns - número de amostras; BR - solos brasileiros; EU – solos europeus. (*continuação*)

5.3 Validação do protocolo de classificação

O protocolo de classificação do SPSCS engloba a descrição dos critérios metodológicos para ajuste dos parâmetros da equação de VG (α, m e θr) e para caracterização das amostras nos três grupos representativos dos diferentes níveis de adequação do modelo VG (solos genuínos, adotados e rejeitados). A validação desse protocolo é realizada nos itens a seguir.

5.3.1 Parametrização do modelo de van Genuchten

O protocolo de parametrização da equação de VG prevê, como já referido, o uso

de apenas três pontos experimentais de retenção de água, próximos às sucções de 60, 330 e 15000 cm (θ_1, θ_2, θ_3), presumindo o conteúdo de água na saturação ou a porosidade total (quando o primeiro não estiver disponível) como um parâmetro (Φ) conhecido por amostra de solo. A partir desses quatro pontos de medição da curva de retenção, os três parâmetros de VG (α, m e θr) são preditos em uma única solução, utilizando método de otimização padronizado, conforme descrito na seção 4.6.1. Isso vai permitir a determinação da curva de retenção de água na amostra na faixa de sucção preconizada pelo sistema e sua classificação segundo o SPSCS.

Nesta seção, pretende-se validar a metodologia acima na base de dados do estudo, ou seja, demonstrar que a curva de retenção de água é determinada com acurácia aceitável ao longo da faixa de sucção de interesse (30-18000 cm). Com esse enfoque, foram selecionadas aquelas amostras que apresentaram um número mínimo de seis pontos da curva de retenção, incluindo os quatro pontos obrigatórios do sistema, parametrizando-se a equação de VG pelos dois procedimentos seguintes: Caso 1 - ajuste para otimizar os três parâmetros α, m e θr, considerando o parâmetro Φ pré-determinado e unicamente as medições de θ_1, θ_2, θ_3; Caso 2 – ajuste para otimizar os quatro parâmetros α, m, θr e θs, considerando todas as medições de retenção de água disponíveis, incluindo a de Φ; nesse caso, o parâmetro θs, que representa o conteúdo de água na saturação, é um a ser otimizado, não sendo necessariamente igual ao valor medido de Φ. O Caso 1 reflete a condição mais simples de parametrização de VG preconizada pelo SPSCS e o Caso 2 a mais usual e completa. Os desempenhos preditivos desses dois casos serão comparados a seguir.

1565 amostras de solos brasileiros e europeus foram selecionadas para o estudo, dispondo-se do total de 11941 pares θ-s no intervalo de sucção 0 cm a 15000 cm. Na Figura 5.4 é apresentada a distribuição desses dados em diferentes faixas de sucção, demonstrando haver em geral menor número de medições, por intervalo, na faixa mais úmida (0-30 cm) e dados razoavelmente bem distribuídos nas demais faixas. O desempenho dos modelos de parametrização de VG (Casos 1 e 2) foi avaliado pelas estatísticas RMSE (raiz quadrada do erro quadrático médio) e ME (erro médio), com expressões correspondentes descritas abaixo por amostra de solo (índice s) e intervalo de sucção (índice rs):

$$RMSE_s=\sqrt{\frac{1}{L\text{-}p}\sum_{j=1}^{Ln}\left(\theta_{p_j}-\theta_{m_j}\right)^2} \qquad (5.1)$$

$$RMSE_{rs}=\sqrt{\frac{1}{TN}\sum_{j=1}^{TN}(\theta_{p_j}-\theta_{m_j})^2} \quad (5.2)$$

$$ME_{rs}=\frac{1}{TN}\sum_{j=1}^{TN}(\theta_{p_j}-\theta_{m_j}) \quad (5.3)$$

onde Ln é o número de medições por amostra, TN é o número total de medições por intervalo de sucção, θm e θp são os conteúdos de água medidos e preditos, respectivamente, e p (3 ou 4) o número de parâmetros da equação de VG. O indicador RMSE denota o erro médio global de predição e o ME expressa a tendência de superestimativa (ME>0) ou de subestimativa (ME<0). O teste paramétrico t-test para amostras pareadas foi adotado para avaliar a similaridade estatística entre os valores correspondentes de θ medido e predito (p-value varia de 0 a 1; quanto maior seu valor, maior a similaridade).

De acordo com a Figura 5.4, os erros de estimativa dos Casos 1 e 2 foram próximos entre si ao longo da faixa de sucção entre 30 cm (PF~1.5) e 15000 cm (PF~4.2), com tendência de superioridade de desempenho para o Caso 2, ambos registrando baixos erros de predição. Nesse intervalo de sucção, os RMSErs foram de 0,011 $cm^3\ cm^{-3}$ para o Caso 2 e de 0,014 $cm^3\ cm^{-3}$ para o modelo mais simples, Caso 1 (Tabela 5.2). Segundo a Figura 5.5, os dois casos também apresentaram MErs quase nulos ao longo daquela faixa e com pares (θ_p, θ_m) estatisticamente semelhantes (p-value>0,11) (Tabela 5.2). Essas avaliações mostram que, ao longo da faixa 30-15000 cm de sucção, as predições dos Casos 1 e 2 são acuradas e não tendenciosas.

Por outro lado, ao longo da faixa de sucção mais úmida (0 cm, PF=1 a 30 cm, PF 1,5), os erros RMSErs para o modelo do Caso 2 foram muito inferiores que aos do Caso 1, com a exceção óbvia da estimativa na sucção 0 cm, onde o RMSEs do Caso 1 é necessariamente nulo. Os valores de RMSErs dos Casos 1 e 2 nesse intervalo de sucção úmida foram de 0,039 e 0,010 $cm^3\ cm^{-3}$, respectivamente (Tabela 5.2). O melhor desempenho do Caso 2 na faixa mais úmida deve-se, em especial, ao fato desse modelo ter incorporado na otimização dos seus parâmetros medições de retenção de água nesse intervalo, o que não ocorreu para o Caso 1, onde o dado de retenção mais próximo da saturação foi na sucção s_1 (próximo à sucção de 60 cm, segundo a metodologia do SPSCS). De fato, a Figura 5.6 mostra que as maiores dispersões na comparação dos valores de RMSEs correspondentes dos Casos 1 e 2 (pontos fora do intervalo das linhas

tracejadas) ocorreram de forma mais frequente para aquelas amostras com disponibilidade de dados no intervalo de 0 cm<s<30 cm, identificadas com marcador vermelho. Portanto, estima-se que se a otimização do Caso 1 incluísse mais um conteúdo de água no intervalo de sucção de 0-30 cm (por exemplo, a 15 cm), além de θ_1, θ_2 e θ_3, a qualidade do seu ajuste seria mais próxima daquela obtida segundo o ajuste do Caso 2, considerando a faixa completa de sucção 0-15000 cm.

Na Figura 5.7, comparam-se os pares de valores estimados de retenção de água pelos modelos dos Casos 1 e 2, discriminando os pares cujas sucções foram superiores e inferiores a 30 cm. Os dados com sucções superiores a 30 cm concentraram-se, em geral, de forma mais adensada à reta 1:1 (p-value=0,51) do que os dados com sucções inferiores a 30 cm (p-value=0,011). As evidências acima apontam que os desempenhos das predições dos Casos 1 e 2 foram, via de regra, semelhantes no intervalo de sucção entre 30 cm a 15000 cm, além de considerados satisfatórios (RMSErs<0,014 cm^3 cm^{-3} e MErs~0). Esses fatos reforçam a validade do uso dos quatro pontos experimentais (Φ, θ_1, θ_2, θ_3) e do protocolo de parametrização adotado pelo SPSCS na representação da curva de retenção de água, promovendo ajuste acurado e não tendencioso da equação de VG ao longo desse intervalo de sucção, que é praticamente o intervalo adotado pelo SPSCS para modelação da curva de disponibilidade de ar.

A comparação dos valores dos parâmetros correspondentes de VG definidos para os modelos dos Casos 1 e 2 mostra grande dispersão, com exceção do parâmetro Φ ou θs (Figura 5.8). Esse fato implica que o uso de diferentes procedimentos de parametrização da equação de VG pode afetar significativamente as predições dos parâmetros. O resultado, reforça, portanto, a importância da incorporação de um protocolo sistematizado de parametrização da equação de VG no contexto do SPSCS, tendo em vista a necessidade do sistema reproduzir uma única classificação e curva de disponibilidade de ar possível para a amostra.

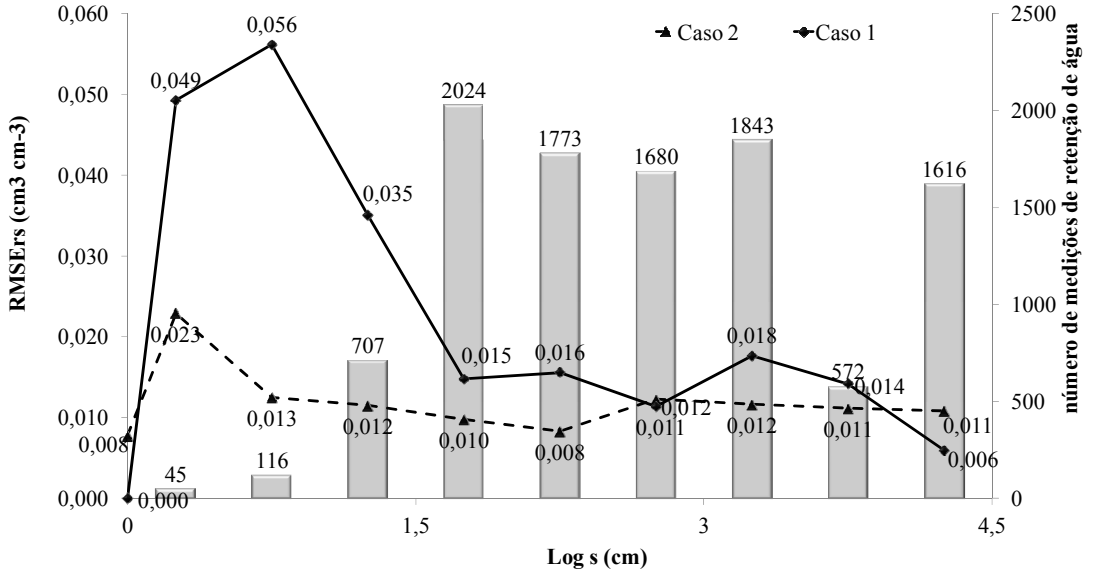


Figura 5.4 – Distribuição dos valores de RMSErs dos Casos 1 e 2 em diferentes faixas de sucção nas 1565 amostras de solos do estudo com medições de retenção de água em pelo menos seis pontos de sucção. A distribuição do número de medições nesses intervalos de sucção é também representada.

Tabela 5.2 – Indicadores de desempenho dos modelos de parametrização da equação de VG, Casos 1 e 2; N – número de dados de retenção de água.

Intervalo de sucção (s)	Indicadores	Caso 1	Caso 2
Completo (0-15000cm) N=10376 (Caso 1)* N=11941 (Caso 2)	RMSErs (cm^3 cm^{-3})	0,017	0,010
	**p-value	0,1544	0,5282
30 cm ≤s≤15000 cm N=9508	RMSErs (cm^3 cm^{-3})	0,014	0,011
	**p-value	0,4456	0,1052
s<30 cm N=868 (Caso 1)* N=2433 (Caso 2)	RMSErs (cm^3 cm^{-3})	0,039	0,010
	**p-value	0,002	0,2045

*Excluíram-se os dados de conteúdo de água na saturação na determinação do RMSErs do Caso 1, já que Φ [Φ=θ(s=0)] é parâmetro da equação de VG de valor conhecido neste caso; ** p-value para o t-teste pareado (valores de retenção de água medidos e calculados).

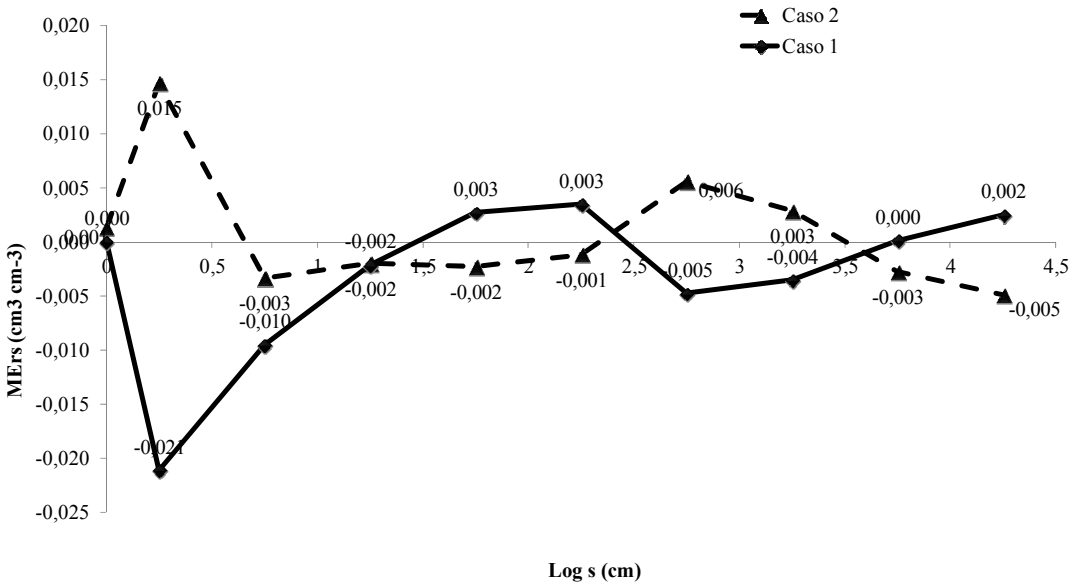


Figura 5.5 – Distribuição dos valores de MErs dos Casos 1 e 2 em diferentes faixas de sucção nas 1565 amostras de solos do estudo com medições de retenção de água em pelo menos seis pontos de sucção.

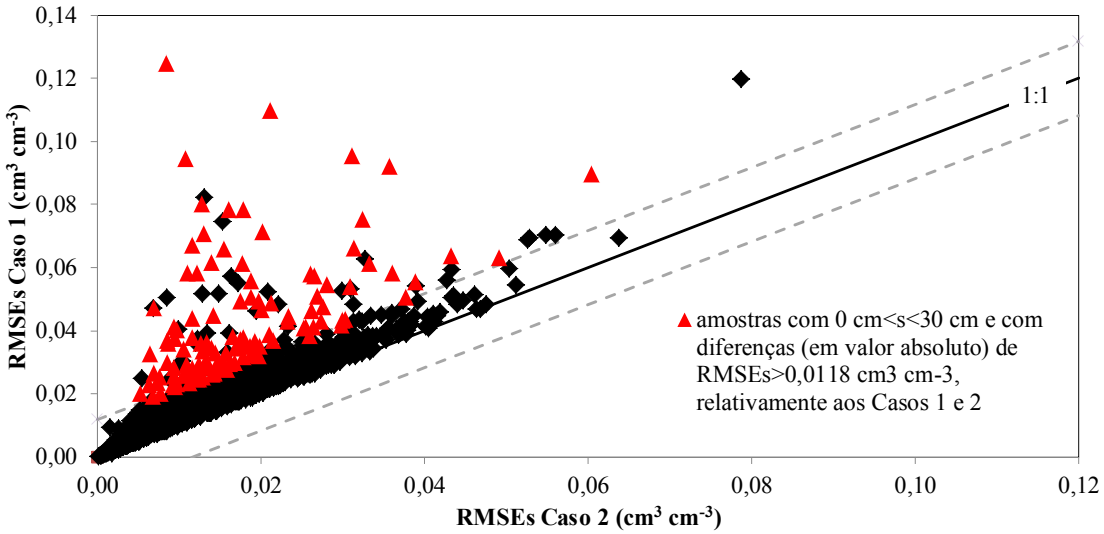


Figura 5.6 – Comparação dos valores de RMSEs entre os Casos 1 e 2, com identificação das amostras de solos com disponibilidade de medições de retenção de água no intervalo de sucção de 0 a 30 cm e com diferenças de RMSEs referentes a esses dois Casos, com valores superiores, em valor absoluto, a 0,0118 cm^3 cm^{-3}, que é o percentil de 90% (linha tracejada) da distribuição acumulada de probabilidade dessas diferenças.

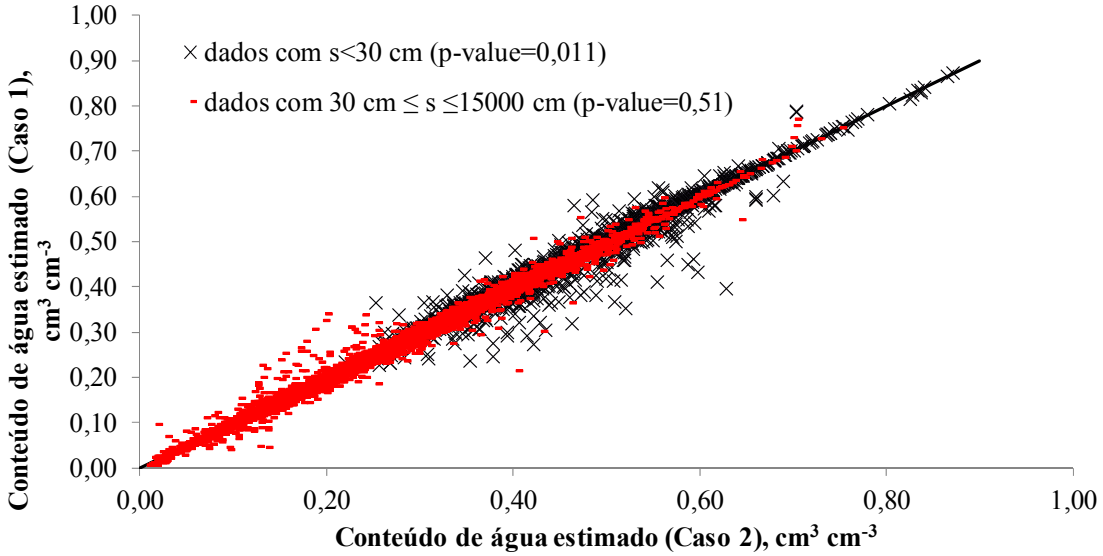


Figura 5.7 – Comparação dos valores do conteúdo de água estimados pelos Casos 1 e 2 nas 1565 amostras de solos do estudo com medições de retenção de água em pelo menos seis pontos de sucção.

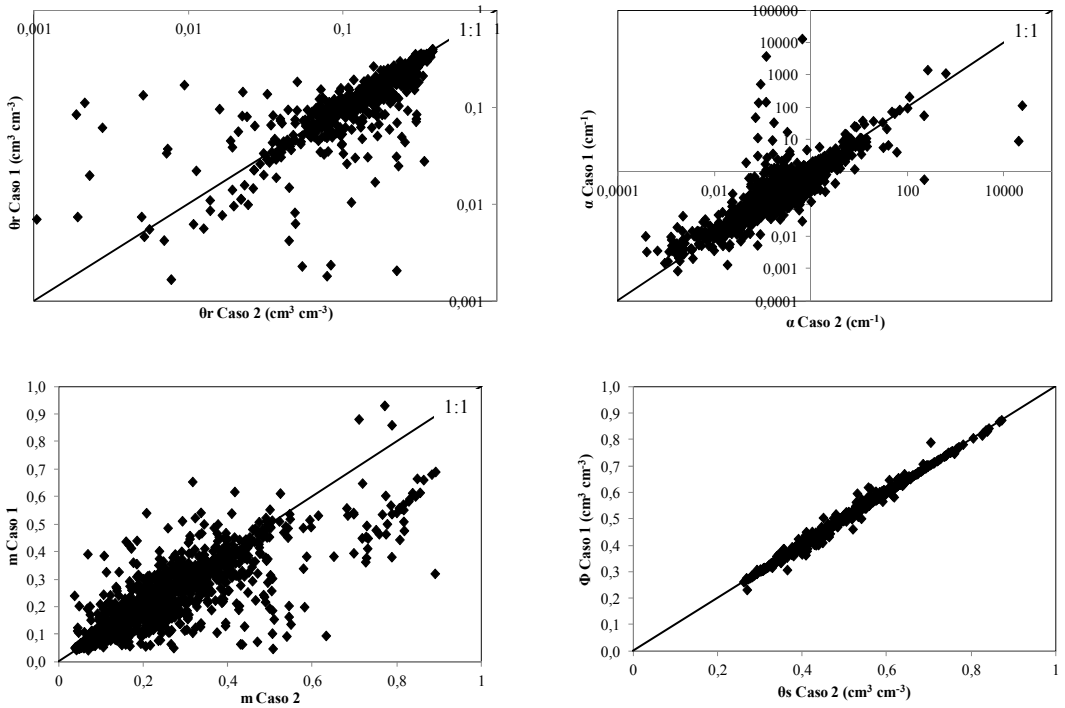


Figura 5.8 – Comparação dos valores dos parâmetros de VG entre os Casos 1 e 2 nas 1565 amostras de solos do estudo com medições de retenção de água em pelo menos seis pontos de sucção.

5.3.2 Caracterização dos solos quanto a qualidade do ajuste do modelo VG

Visando averiguar se os limites estabelecidos de ERRORMAX e $RMSE_{30\text{-}18000}$ para definir os grupos dos genuínos, adotados e rejeitados são adequados para discriminar solos com os desempenhos distintos de ajuste da equação de VG (bom, intermediário e inadequado, respectivamente) previstos para esses grupos, foram selecionadas algumas amostras de solos da base de dados do estudo representadas em cada um desses três grupos. Para essa seleção, determinaram-se, inicialmente, os erros ERRORMAX e $RMSE_{30\text{-}18000}$ médios de todas as amostras por Família segundo os três grupos de solos. Em seguida, escolheu-se uma amostra para cada Família e grupo de solo cuja soma de seu ERRORMAX e $RMSE_{30\text{-}18000}$ se aproximasse mais da soma do ERRORMAX e $RMSE_{30\text{-}18000}$ médios representativos daquela Família e grupo de solo. Os dados experimentais de retenção de água dessas amostras selecionadas foram, então, avaliados quanto a sua aderência à curva de retenção modelada pelo SPSCS.

A Figura 5.9 mostra, como ilustração, a representação gráfica das curvas de retenção para essas amostras, juntamente com suas medições, correspondentes a nove Famílias arbitrariamente escolhidas, uma para cada Ordem de solo. Nem todas as Famílias escolhidas na ilustração contêm solos adotados e rejeitados. Confirmou-se que as curvas de retenção reunidas no grupo dos genuínos apresentaram grande aderência aos seus dados experimentais, seja para os três conteúdos de água utilizados na otimização de VG, como nos demais pontos disponíveis. Resultado similar ocorreu para os solos adotados, porém fica graficamente evidente em geral a pior qualidade de ajuste das suas curvas de retenção, em relação às curvas dos solos genuínos.

Já para os solos rejeitados, as medições indicaram tendência de piora de ajuste em relação ao dos solos adotados, que parece ser por motivos de erros de medição ou inadequabilidade da equação de VG. As tendências de qualidade de ajuste apresentadas pelos exemplos das nove Famílias representadas na Figura 5.9 repetiram-se nas demais Famílias. Dessa avaliação, conclui-se que as faixas de valores de ERRORMAX e $RMSE_{30\text{-}18000}$ utilizadas para caracterizar os grupos dos genuínos, adotados e rejeitados, apesar de definidas arbitrariamente, agruparam, de forma adequada, os solos nos diferentes níveis de qualidade de predição da curva de retenção previstos para esses grupos.

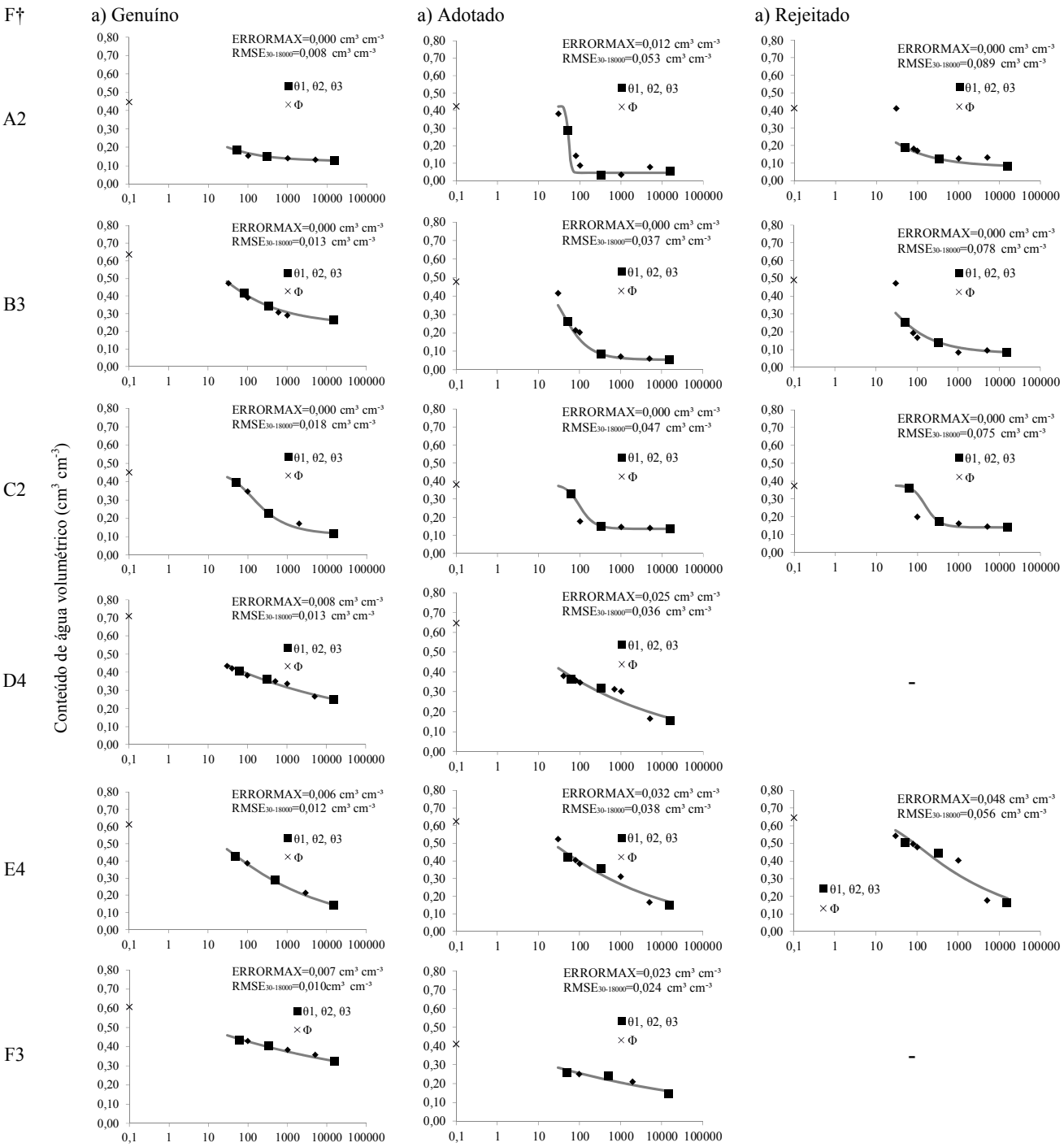


Figura 5.9 - Exemplos de curvas de retenção de água calculados pelo SPSCS no intervalo de sucção de 30 a 15000 cm, e as correspondentes medições na base de dados do estudo, nos grupos dos a) genuinos, b) adotados e c) rejeitados. Apesar de indicadas, as curvas dos solos rejeitados não podem ser associadas a Famílias estruturais, segundo o SPSCS; † F - Famílias; valores de sucção na escala logarítmica.

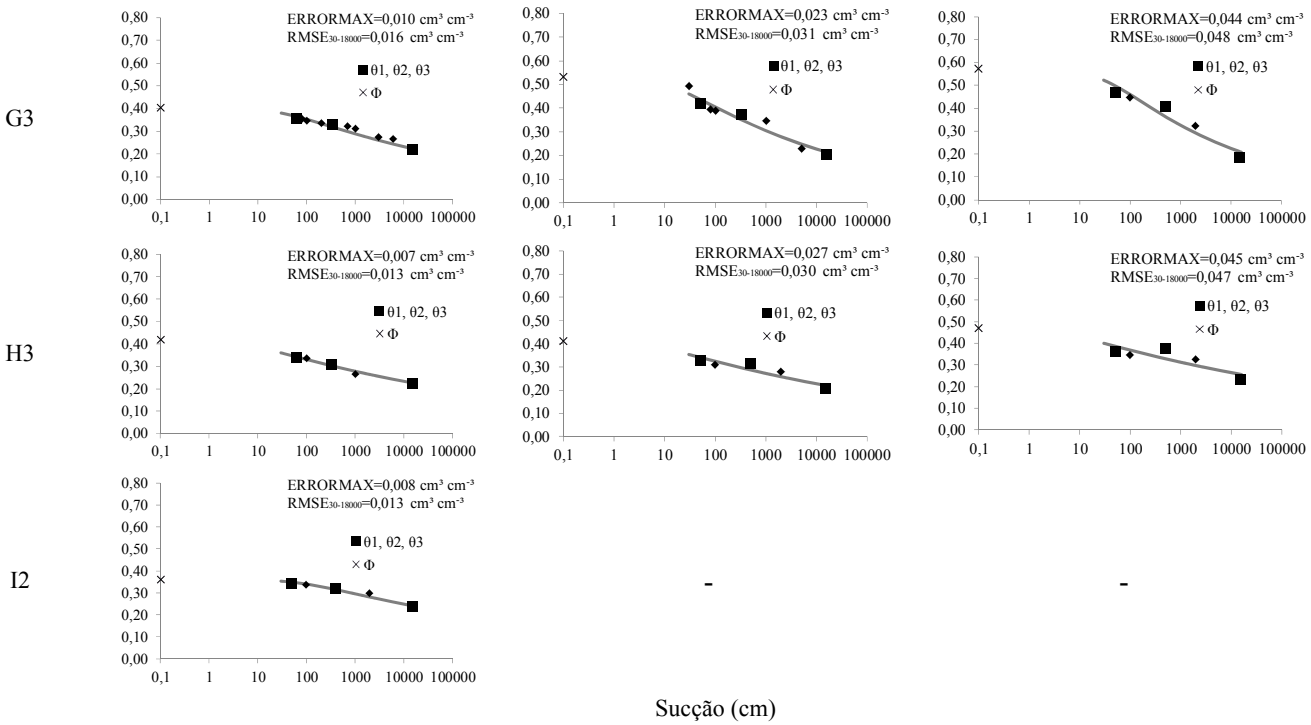


Figura 5.9 - Exemplos de curvas de retenção de água calculados pelo SPSCS no intervalo de sucção de 30 a 15000 cm, e as correspondentes medições na base de dados do estudo, nos grupos dos a) genuinos, b) adotados e c) rejeitados. Apesar de indicadas, as curvas dos solos rejeitados não podem ser associadas a Famílias estruturais, segundo o SPSCS; † F - Famílias; valores de sucção na escala logarítmica. (*continuação*)

Nos casos em que só há quatro medições de retenção de água na amostra (Φ, θ_1, θ_2, θ_3), não é possível determinar o indicador $RMSE_{30\text{-}18000}$. Nesses casos, a caracterização nos grupos genuínos, adotados e rejeitados é realizada segundo apenas os intervalos de valores de ERRORMAX, sendo eles, respectivamente: ERRORMAX≤0,02 cm^3 cm^{-3}; 0,02 cm^3 cm^{-3}<ERRORMAX≤0,04 cm^3 cm^{-3} e ERRORMAX>0,04 cm^3 cm^{-3} (seção 4.6.2). Para validar a adequação dessa simplificação, avaliou-se o percentual de acertos do critério simplificado, considerando como acerto o caso da coincidência de classificação quando se utiliza esse critério e o critério completo do SPSCS. Com esse objetivo, 1644 amostras do banco de dados do estudo foram selecionadas, onde ambos os critérios puderam ser aplicados. Nessas amostras, pelo menos cinco medições de retenção de água encontravam-se disponíveis, incluindo Φ, θ_1, θ_2, θ_3. A distribuição dessas amostras nos três grupos de solos pelo critério simplificado e seu percentual de acertos nesses grupos encontram-se registrados na Tabela 5.3, mostrando haver alta concordância entre as classificações pelo critério simplificado e completo. Esse fato justifica, portanto, o uso do critério simplificado para

os casos de insuficiência de dados de retenção de água.

Tabela 5.3 – Percentual de acertos do critério simplificado para representação das amostras em solos genuínos, adotados e rejeitados, tendo como referência o critério completo do SPSCS.

	Número de amostras de solo			Total de amostras
	Genuínos	Adotados	Rejeitados	
Critério simplificado para caracterização de amostras nos grupos de solo	1482	145	17	1644
Percentual de acertos quando se adota o critério completo	94%	100%	100%	-

5.4 Verificação das curvas estruturais

No Capítulo 4 deste trabalho, foram apresentadas as curvas-tipo das Ordens e Famílias estruturais, que são as curvas dos solos representativos desses grupos (solos-tipo). As curvas de disponibilidade de ar [$A_a(s)$] ajustadas para a base de dados de solos do estudo encontram-se representadas por Família de solo na Figura 5.10, juntamente com as respectivas curvas-tipo, curvas-tipo baricêntricas e curvas-tipo extremas (seção 4.8 do Capítulo 4). Registram-se apenas as curvas $A_a(s)$ dos solos genuínos, já que são representações mais autênticas da estrutura do espaço poroso segundo a metodologia do SPSCS. Nem todos os solos genuínos da base de dados do estudo foram representados na Figura 5.10; escolheram-se aleatoriamente aqueles que representassem mais homogeneamente a distribuição das amostras no triângulo estrutural, levando-se também em consideração sua representatividade pedogenética (Figura 5.11). Essa redução de número de elementos plotados na Figura 5.10 foi feita visando facilitar a visualização das curvas $A_a(s)$ por Família estrutural e comparação com as curvas-tipo.

De acordo com a Figura 5.10, as curvas $A_a(s)$ das amostras nas Famílias apresentaram visualmente grande coincidência com as correspondentes curvas-tipo. A sobreposição não foi plena em função dos solos genuínos não apresentarem exatamente o mesmo posicionamento dos solos-tipo no triângulo estrutural (malha da Figura 4.2b do Capítulo 4), além do valor de porosidade ativa dos primeiros não ser necessariamente igual do da porosidade ativa do solo-tipo (valor mediano da faixa de porosidade ativa representativa da Subordem). A similaridade entre as curvas $A_a(s)$ dos solos selecionados e as curvas-tipo por Família estrutural confirma que a metodologia do sistema foi corretamente aplicada aos solos da base de dados do estudo. Como o

objetivo final do SPSCS é agrupar curvas similares de disponibilidade de ar, não foram apresentadas as curvas de distribuição de tamanho de poros das amostras selecionadas.

5.5 Conclusão

O SPSCS foi implementado com sucesso a uma numerosa e diversa base de dados de solos. Todas as Ordens e Famílias estruturais foram representadas, com exceção de três Famílias (A4, C4 e F1), com maior concentração de amostras nas Ordens B, G e H e Subordens 2 e 3, levando em consideração as amostras caracterizadas como genuínas, grupo de solos de maior expressão na base de dados e que melhor representaram a estrutura porosa segundo o SPSCS. Poucos solos fizeram-se presentes na região do triângulo estrutural onde os valores do mesoespaço foram muito baixos, inferiores a 1/9, indicando, portanto, uma raridade desses solos.

O protocolo de classificação do SPSCS foi testado na base de dados do estudo mostrando-se também apropriado. No que se refere à parametrização do modelo VG, verificou-se que os quatro pontos experimentais de retenção hídrica previstos pelo sistema (Φ, θ_1, θ_2, θ_3) foram adequados ao ajuste da curva de retenção de água com acurácia relativamente homogênea e sem tendenciosidade ao longo da faixa de sucção de 30 cm a 15000 cm. Mostrou-se, também, que distintas parametrizações da equação de VG e o uso de variados tamanhos e distribuições de amostragens dos pares (s, θ) na amostra interferem nos valores dos parâmetros, o que reforça a importância da padronização na parametrização da equação de VG, visando a perfeita reprodutibilidade da classificação estrutural. A metodologia para caracterização de amostras nos grupos de solos genuínos, adotados e rejeitados foi também eficaz na base de dados do estudo.

Demostrou-se correta a aplicação da metodologia do SPSCS aos solos inventariados no trabalho, com tendência de similaridade e sobreposição das curvas de disponibilidade de ar por Família de solo, relativamente às correspondentes curvas-tipos.

Todos os fatores anunciados acima ilustram a potencialidade de aplicação do SPSCS para solos com diversidade estrutural e pedogenética. No próximo capítulo, são exploradas algumas relações do SPSCS com as características do solo.

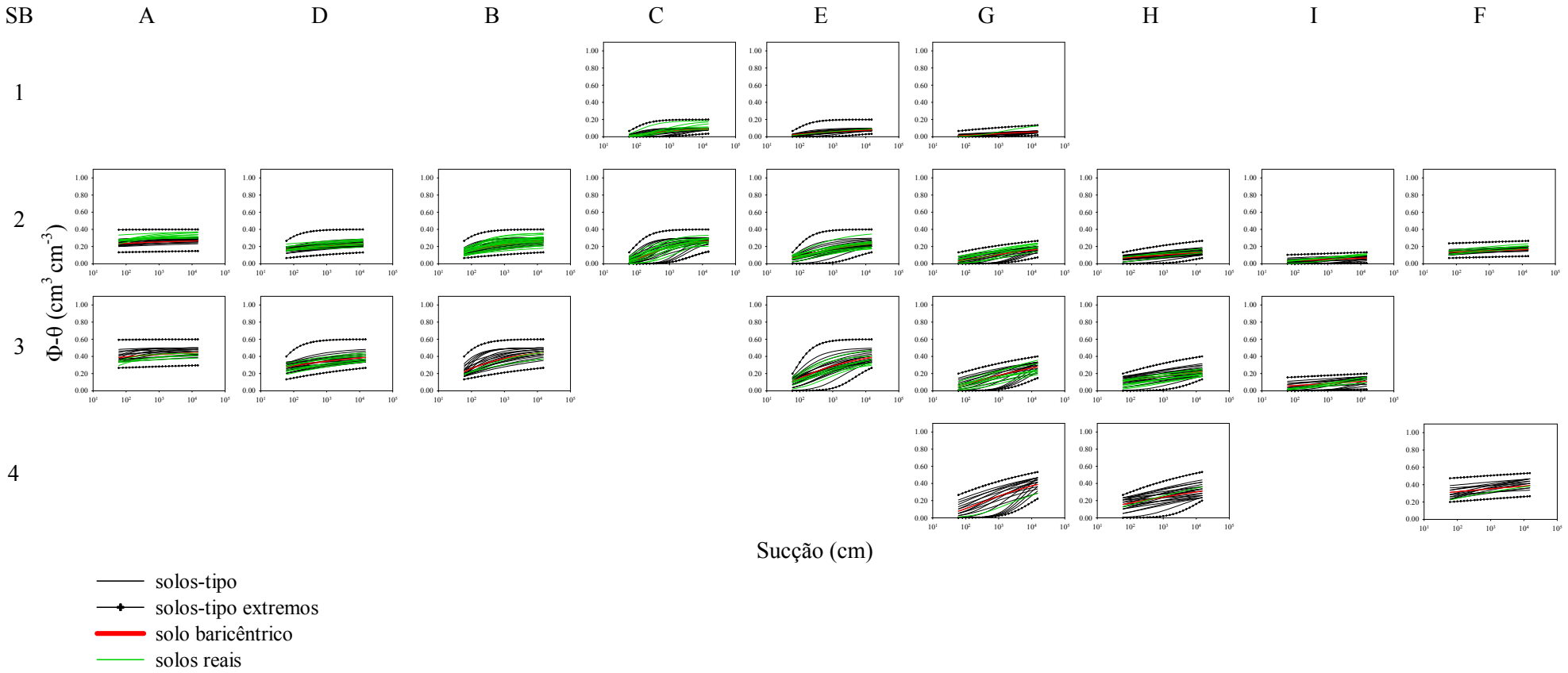


Figura 5.10 – Curvas de disponibilidade de ar por Família estrutural de amostras selecionadas na base de dados do estudo e correspondentes curvas-tipo, curvas-tipo baricêntricas e extremas; valores de sucção na escala logarítmica.

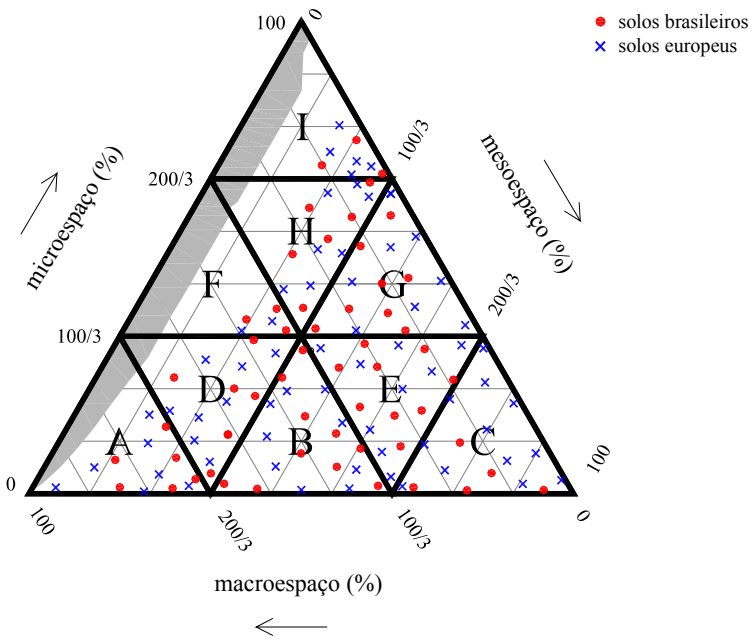


Figura 5.11 – Amostras de solos genuinos brasileiros e europeus selecionadas para avaliação das curvas de disponibilidade de ar.

CAPITULO 6 – SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS BASEADO NA ESTRUTURA DO ESPAÇO POROSO. PARTE 3: RELAÇÕES COM CARACTERÍSTICAS DO SOLO

6.1 Introdução

O intricado sistema poroso dos solos tem papel fundamental na determinação de quase todas as suas funções, seja no suporte da vida de plantas e organismos, na moderação da qualidade ambiental (Bronick e Lal, 2005), como nos processos de fluxo e transporte, armazenamento de água e aeração na zona vadosa. Esse sistema poroso é também peça chave na mitigação climática (Levine *et al.*, 1996), para a fertilidade das plantas e na determinação das parcelas de partição da chuva na superfície dos terrenos.

As unidades estruturais sólidas (agregados ou peds) da matriz do solo são descritas visual e qualitativamente em campanhas de levantamentos pedológicos. Numa explicação geral e simplificada, os agregados usualmente são descritos pela sua forma (laminar, prismática, blocos angulares, blocos subangulares, granular e grumosa), tamanho (muito pequena, pequena, média, grande e muito grande) e grau de desenvolvimento (sem unidades estruturais – grãos simples e maciça; com unidades estruturais – fraca, moderada ou forte), conforme citado no Capítulo 4. Os sistemas de descrição dessas unidades sólidas mais comumente citados na literatura são os Britânico (Hodgson, 1976), Canadense (Day, 1983), *World Reference Base for Soil Resources* (WRB) (WRB, 2015) e Americano (Soil Science Division Staff, 2017), cada um apresentando certas especificidades nas descrições dos peds. Geralmente também faz parte desses sistemas a descrição do formato, do tamanho e da quantidade dos poros visíveis, conforme também mencionado no Capítulo 4. No sistema americano, por exemplo, as classes de formato de poros são caracterizadas como vesicular, tubular, tubular dendrítico e irregular; as de tamanho dos poros como muito fino, fino, médio, grosso e muito grosso; e as de quantidade como pouca, comum e muita. A continuidade vertical dos poros também é representada nesse sistema. No Brasil, é sugerida uma descrição mais simplificada dos poros no campo levando apenas em consideração o seu tamanho médio e a quantidade (Ribeiro *et al*,.2012, Santos *et al.*, 2013b).

Apesar dos muitos estudos disponíveis na literatura sobre a micromorfologia dos solos (Bullock *et al.*, 1985; Juhász *et al.*, 2007; Oliveira Júnior *et al.*, 2017), é incomum encontrar descrições detalhadas do espaço poroso em estudos de perfis de solos, sendo

mais frequente a representação dos elementos estruturais sólidos. As descrições e análises micromorfológicas buscam principalmente relacionar os elementos estruturais sólidos e o espaço poroso à pedogênese, sendo menos comuns o uso da micromorfolgia na caracterização físico hídrica da amostra. Nas descrições de campo, a caracterização das unidades sólidas e porosas dos solos é baseada em critérios e terminologias que nem sempre são homogêneos e não consegue representar todas as possibilidades de variações estruturais do solo, já que é fundamentada apenas na avaliação visual da macroestrutura. Todos esses inconvenientes, além de outros citados no Capítulo 4, motivaram o desenvolvimento do sistema de classificação dos solos baseado na sua estrutura porosa, o SPSCS.

O conhecimento da estrutura porosa do solo pode ser esclarecido por estudos de relações entre esse atributo e outras características do solo, como sua funcionalidade hídrica e propriedades físicas. Trabalhos que lançam luz sobre esse assunto são frequentemente voltados ao desenvolvimento de funções de pedotransferência (PTFs) de propriedades do solo (Bouma, 1989). Nesse caso, as variáveis morfológicas estruturais oriundas das campanhas de levantamentos pedológicos podem ser utilizadas como preditores na estimativa de propriedades hidráulicas, como a curva de retenção de água e a condutividade hidráulica saturada (Ks) (Pachepsky e Rawls, 2003; Pachepsky *et al.*, 2006; Nguyen *et al.*, 2015b).

Em tempos mais pretéritos, O'Neals (1949) utilizou dados morfológicos do solo para predição da permeabilidade (equivalente a Ks) em terrenos americanos, lançando evidências da correlação entre classes estruturais do solo e permeabilidade. Destacou, por exemplo, que estruturas prismáticas com forte grau de desenvolvimento se enquadraram em classes de permeabilidade muito baixas e baixas em solos de textura franco siltosa. Griffiths *et al.* (1999) e Lilly (2000) chegaram a evidências similares na Nova Zelândia e Escócia, respectivamente. No estabelecimento de diretrizes para estimativa de classes de Ks em solos canadenses, McKenzie *et al.* (1982) observaram que solos argilosos com bom desenvolvimento estrutural e com muitos bioporos apresentaram maiores valores de Ks que alguns solos arenosos da região; o mesmo foi verificado por Coen e Wang (1989). Destacaram também que horizontes com baixo Ks tiveram geralmente estrutura maciça, compactada, com textura argilosa e com muito pouco ou nenhum macroporo.

Williams *et al.* (1983) agruparam curvas de retenção de água similares de solos

australianos. Com essa ferramenta, eles avaliaram a importância relativa da textura e estrutura do solo, conforme descrições efetuadas em levantamentos pedológicos, bem como do teor da matéria orgânica e mineralogia da argila, com respeito à distribuição do conteúdo de água em diferentes faixas de sucção. Rawls e Pachepsky (2002), estudando relações entre consistência, estrutura e conteúdo de água nas sucções de 330 cm e 15000 cm para o banco de dados do NRCS/USDA/EUA (*National Soil Characterization Database*), afirmaram que solos de consistência não plástica com forte grau de desenvolvimento estrutural retiveram mais água na sucção a 330 cm do que solos com grau de desenvolvimento de estrutura inferior. Levine *et al.* (1996) assinalaram valores médios de argila, silte e carbono orgânico em solos americanos para três classes de estrutura (granular, em blocos e maciça).

Relações entre estrutura e propriedades do solo foram também registradas por Nguyen *et al.* (2015b) que mostraram que solos de clima tropical no delta do rio Mekong e horizontes de textura média e grossa, com ausência de unidades estruturais, apresentaram valores significativamente baixos de conteúdo de carbono orgânico e alta densidade do solo. Outros trabalhos correlacionaram classes pedológicas com a descrição morfológica da estrutura e atributos do solo. Tawornpruek *et al.*(2005), por exemplo, apontaram que os Oxisols do seu estudo apresentaram estruturas em blocos (angular, semi-angular e subangular), variando em profundidade para estrutura granular, com muita e comum abundância de poros, em horizontes de textura argilosa, bem drenados e baixa capacidade de armazenamento de água, além de baixa densidade ($<1{,}36$ g cm^{-3}). Resultado similar em Oxisols também pode ser encontrado em Klamt e van Reeuwijk (2000). Em alguns Neossolos Regolíticos no Brasil, Almeida *et al.* (2015) descreveram perfis contendo horizontes superficiais com estrutura de grãos simples e subsuperficiais em blocos subangulares, apresentando poros complexos, textura arenosa, e em geral baixa capacidade de armazenamento de água.

Cabe destacar que o objetivo aqui é apenas ilustrar algumas das relações envolvendo os sistemas de descrição da estrutura dos solos utilizados nos levantamentos pedológicos e os atributos do solo. Muitos outros trabalhos podem ser citados, tais como King e Franzmeier (1981), Wang *et al.* (1985), Abbaspour e Moon (1992), Holden (2001), Lilly (2000), Cooper e Vidal-Torrado (2005), Pachepsky *et al.* (2006) e outros. São também comuns estudos que fazem associações entre propriedades físico-hídricas do solo e atributos micromorfológicos (Souza *et al.*, 2006; Juhász et al., 2007; Cooper *et*

al., 2012).

Em síntese, com base nas abordagens destacadas acima, constatou-se a carência de: i) uma metodologia que descrevesse a estrutura do solo de forma objetiva, analítica, padronizada e homogênea; ii) uma caracterização dos poros do solo e não apenas das suas unidades estruturais sólidas; iii) uma caracterização estrutural mais ampla do espaço poroso além da macroestrutura do solo.

Neste capítulo, serão estabelecidas algumas relações entre o SPSCS e a funcionalidade hídrica e outros atributos do solo como textura, densidade, teor de matéria orgânica, bem como outras características do solo. Uma análise comparativa dessas relações entre diferentes solos da base de dados será também feita, ainda que de forma preliminar. Não se pretende, neste Capítulo, abordar exaustivamente o assunto, mas o objetivo foi principalmente de mostrar as potencialidades do SPSCS como uma ferramenta de entendimento hidropedológico. Espera-se que estudos posteriores, mais detalhados, permitam aprofundar esse entendimento e contribuir para o aperfeiçoamento do SPSCS.

6.2 Relações com a funcionalidade hídrica

A funcionalidade hídrica do solo será avaliada por meio da capacidade de armazenamento de ar e de água nos solos e da capacidade de transmissão de água em condições de saturação. Nos itens a seguir contextualiza-se o SPSCS quanto a essas funções, buscando esclarecer as relações entre a estrutura porosa dos solos e a funcionalidade hídrica. Na primeira subseção do presente tópico, são apresentados os procedimentos para a determinação analítica das capacidades de ar e água e da condutividade hidráulica saturada dos solos-tipo das Famílias do SPSCS. A definição dos solos-tipos das Famílias foi efetuada no Capítulo 4. Na subseção 6.2.2., procede-se a validação do SPSCS no que diz respeito a essas funções hídricas, levando-se em consideração um conjunto de dados de solos amplo e diverso.

6.2.1 Previsão da funcionalidade hídrica dos solos-tipo do SPSCS

O conceito tradicionalmente adotado para se determinar a capacidade de água disponível (w) é o intervalo entre os conteúdos volumétricos de água na capacidade de campo (FC) e ponto de murcha (WP), sendo muito comum o uso das sucções de 330 cm e 15000 cm para representar esses limites, respectivamente (Kirkham, 2014). No entanto, não há um consenso sobre as sucções mais adequadas para representar a FC e WP, além de ser polêmico o uso de uma sucção fixada para definir esses dois termos,

em especial, a FC, já que essa propriedade é fundamentada em processos dinâmicos no perfil do solo (Ottoni *et al.*, 2014, De Jong van Lier, 2017). É também controverso o conceito de capacidade de água como variável do solo, usualmente aplicado para se estabelecer um valor prático de referência, visando avaliar o potencial de atendimento das necessidades hídricas das plantas (De Jong van Lier, 2017). Reconhece-se que a demanda hídrica vegetal não é apenas condicionada pelas condições de retenção de água no solo, mas também pela espécie vegetal e condições atmosféricas, o que torna, portanto, a determinação da capacidade de água um processo bem mais complexo que o simples estabelecimento de um conteúdo de água contido entre duas sucções pré-estabelecidas. A par dessas limitações e considerando a necessidade prática de se estabelecer um procedimento analítico para fins de avaliação pedológica funcional da capacidade hídrica dos solos, é presumido neste trabalho a concepção tradicional inicialmente mencionada. Entende-se a capacidade de ar (*a*) como sendo a diferença entre o conteúdo de água na saturação (Φ) e a capacidade de campo, esta última aqui entendida como o conteúdo de água retido na sucção de 330 cm (θ_{330}).

Quanto ao SPSCS, seus valores experimentais de θ_2 e θ_3 (Capítulo 4) aproximam-se, por construção, dos valores de θ_{330} e θ_{15000} (conteúdo de água volumétrico na sucção 15000 cm), além do fato de Φ ser um dado experimental requerido pelo sistema. Desta forma, classificando-se uma amostra de solo pelo SPSCS, espera-se que seja possível estimar com razoável acurácia as capacidades de ar e água, como será visto nesta subseção e na próxima.

Dos resultados dos parâmetros α e m da equação VG, referentes aos solos-tipos das nove Ordens do SPSCS (malha da Figura 4.2a e seção 4.7), e dos valores medianos de (Φ-θr) (porosidade ativa) das quatro Subordens do sistema associados aos solos-tipo das Famílias (seção 4.8), determinaram-se os valores de capacidades de ar (*a*) e água (*w*) dos solos-tipo das Famílias estruturais. Foram adotadas as seguintes expressões derivadas da Equação 4.3:

$$a_{ji} = (\Phi - \theta_{330})_{ji} = [A_j(s=330\text{ cm})]\ (\Phi - \theta r)_i \quad (6.1)$$

$$w_{ji}=(\theta_{330} - \theta_{15000})_{ji}=[A_j(s=15000\text{ cm})-A_j(s=330\text{ cm})]\ (\Phi - \theta r)_i \quad (6.2)$$

$$A_j(s) = \left\{1 - \left[1 + (\alpha_j s)^{\frac{1}{1-m_j}}\right]^{-m_j}\right\} \quad (6.3)$$

onde $A_j(s)$ indica o valor da curva distribuição dos tamanhos dos poros na sucção s e

posição j do elemento-tipo no triângulo estrutural (segundo a malha da Figura 4.2a), e $(\Phi\text{-}\theta r)_i$ define o valor mediano da porosidade ativa na Subordem i (i=1 a 4), que é, respectivamente: 0,1, 0,3, 0,5 e 0,7 $cm^3\ cm^{-3}$.

Visando simplificar a avaliação dos resultados de funcionalidade hídrica, as amostras de solos foram agrupadas em três classes de capacidades de ar e água (classes *aw*). Para tanto foram definidas três classes (baixa, moderada e alta) de capacidade de ar (classes *a*) e três classes (baixa, moderada e alta) de capacidade de água (classes *w*). Utilizaram-se os seguintes limites para as classes *a* e *w*, segundo Ottoni Filho (2003): baixa ($a < 0{,}10\ cm^3\ cm^{-3}$), moderada ($0{,}10\ cm^3\ cm^{-3} \leq a \leq 0{,}20\ cm^3\ cm^{-3}$) e alta ($a > 0{,}20\ cm^3\ cm^{-3}$)/baixa ($w < 0{,}06\ cm^3\ cm^{-3}$), moderada ($0{,}06\ cm^3\ cm^{-3} \leq w \leq 0{,}12\ cm^3 cm^{-3}$) e alta ($w > 0{,}12\ cm^3\ cm^{-3}$). Com isto, foram definidos três grupos de capacidades de ar e água (classes *aw*) (Tabela 6.1): *solos sem restrição de ar e água*, *solos com restrição de água* e *solos com restrição de ar* (solos com restrição de ar e água foram arbitrariamente considerados na classe com restrição de ar). Na Figura 6.1a, é apresentado o enquadramento dos solos-tipo das Famílias segundo essas três classes *aw*.

Tabela 6.1 – Classes simplificadas de capacidades de ar e água (classes *aw*).

Classificação em termos das capacidades de ar e água (*aw*)	Capacidade de ar (*w*)	Capacidade de água (*w*)
Solos sem restrição de ar e água	alta	alta
	alta	moderada
	moderada	alta
	moderada	moderada
Solos com restrição de água	alta	baixa
	moderada	baixa
Solos com restrição de ar	baixa	alta
	baixa	moderada
	baixa	baixa

A condutividade hidráulica saturada (cm d^{-1}) dos solos-tipos das Famílias estruturais foi determinada pela expressão $Ks = 1766{,}2\ Ø_{330}^{1{,}8683}$, onde $Ø_{330}$ ($cm^3\ cm^{-3}$) é a porosidade efetiva, representada pela diferença entre a porosidade total (ou conteúdo de água na saturação, se a primeira não for disponível) e θ_{330}. Essa equação foi

desenvolvida no Capítulo 3, com a notação WM_{330}, apresentando acurácia e confiabilidade mais adequadas em relação às demais pedofunções de Ks avaliadas naquele estudo. Os valores de $Ø_{330}$ para os solos-tipo das Famílias foram determinados por meio das Equações 6.1 e 6.3. Três classes de permeabilidade foram propostas, segundo o *Natural Resources Conservation Service (NRCS)*[4]: lenta ($Ks \leq 12{,}2$ cm d^{-1}), moderada ($12{,}2$ cm $d^{-1} < Ks \leq 122$ cm d^{-1}) e rápida ($Ks > 122$ cm d^{-1}). O enquadramento das classes de permeabilidade nas Famílias de solo são apresentados na Figura 6.1b.

Não se espera que as classes de Ks mostradas na Figura 6.1b sejam uma representação precisa do comportamento dinâmico das Famílias. Isso porque, principalmente, reconhece-se a deficiência do modelo WM_{330} (e das pedofunções corriqueiras de Ks) em incorporar adequadamente a estrutura dos vazios por onde os fluxos saturados acontecem, principalmente os fluxos macroporosos, usualmente predominantes em condições de saturação). Além disso, o modelo incorpora outras incertezas relativas ao seu ajuste e a determinação experimental de Ks, restrições essas já comentadas no Capítulo 3. E mais, o SPSCS é ineficiente no detalhamento da macroestrutura dos vazios (próxima à sucção de saturação), já que sua base de classificação, a curva de disponibilidade de ar, é, em geral, caracterizada com confiabilidade pelo sistema apenas na zona intermediária de sucção (30 a 18000 cm). A proposta de apresentar os resultados das classes de Ks para as Famílias estruturais foi dar uma ideia, ainda que aproximada, do comportamento dinâmico desses agrupamentos de solos do SPSCS, ajudando a esclarecer de forma mais abrangente a relação entre a funcionalidade hidrodinâmica e a estrutura do solo.

Pela Figura 6.1, pode-se inferir que solos-tipo com porosidade ativas superiores a 0,40 cm^3 cm^{-3}, que correspondem aos solos das Subordens 3 e 4, não apresentaram restrições significativas nas suas funções hídricas. Observaram-se algumas exceções, em especial nos solos das Ordens I e G, com limitações em ar e na condutividade hidráulica (Ks lenta), possivelmente solos de baixa drenabilidade, e nos da Ordem A, com baixa capacidade de água e rápida condutividade hidráulica, possivelmente solos de alta drenabilidade. Provavelmente, são raros os solos de D3, F3, H3, D4, F4 e D4 com restrição em água (Figura 6.1a), devido à sua proximidade com a área não classificável do triângulo (área em cinza), como constatado no Capítulo 4. Em

[4] Informação disponível em https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/office/ssr10/tr/?cid=nrcs144p2_074846

contrapartida, os solos-tipo das Famílias de Subordem 1 (porosidade ativa < 0,2 cm^3 cm^{-3}) sempre apresentaram baixa capacidade de ar e, com algumas exceções (nas Famílias A1, B1, D1 e C1), lenta permeabilidade. Os solos da Subordem 2 mostraram funções hídricas variadas, abrangendo muitos solos com restrição em ar e em água, e também lenta permeabilidade, mas incluindo solos sem restrições em suas funções hídricas em B2, E2, G2 e C2. As primeiras evidências reforçam, portanto, a importância das Subordens estruturais dos solos na inferência de suas funcionalidades hídricas. Essa inferência também é possível para as Ordens estruturais.

Na prática, pode-se dizer que os solos-tipos com dominação da fração mesoespaço, particularmente os de Ordens B, E e C, exceto na Subordem 1 e alguns de seus solos da Subordem 2, não mostraram restrições nas funcionalidades hídricas estudadas. Solos altamente microespaçosos, de Ordem I, apresentaram, em geral, restrições em ar e, principalmente nas Subordens 1 e 2, também lenta permeabilidade. Ou seja, devem constituir, com frequência, estruturas porosas com baixa drenabilidade. Por outro lado, solos altamente macroespaçosos, de Ordem A, tiveram em geral baixa capacidade de água e moderados a altos valores de Ks, ou seja, devem caracterizar estruturas com alta drenabilidade.

As relações apresentadas entre o SPSCS e a funcionalidade hídrica representam tendências e não englobam todas as possíveis variações funcionais hídricas estudadas, quando se leva em conta os solos reais das Famílias estruturais. Isso porque as porosidades ativas presumidas dos solos-tipo nas Equações 6.1 e 6.2 foram restringidas apenas ao valor mediano de (Φ-θr) representativo da Subordem. A aferição da classificação hídrica funcional do SPSCS para condições de amostras reais do solo é apresentada na próxima subseção, considerando um amplo banco de dados de solos internacionais.

6.2.2 Validação do SPSCS quanto à funcionalidade hídrica

Um banco de dados de solos internacionais, englobando número expressivo de amostras de solos (3143) de diferentes pedoambientes, foi selecionado, neste estudo, com propósito da validação do SPSCS quanto às funções hídricas. Esse inventário de dados inclui informações de retenção volumétrica de água para faixa ampla de sucção (0-15000 cm), conteúdo volumétrico de água na saturação (Φ) e/ou porosidade total (TP), densidade do solo e frações granulométricas, além de medições de condutividade hidráulica saturada e conteúdo de matéria orgânica. As duas últimas variáveis acham-se

disponíveis apenas para uma parcela desse inventário. A descrição desse banco de dados foi feita nos Capítulos 2, 3 e 5. A classificação da estrutura porosa dessas amostras de solos pelo SPSCS foi apresentada no Capítulo 5, com seu enquadramento nas Famílias estruturais e grupos de solos (genuínos, adotados e rejeitados). Apenas amostras de solos classificáveis pelo sistema foram selecionadas para o presente estudo de validação, excluindo-se, portanto, os solos do grupo dos rejeitados. Mediante esse referencial escolhido, foram considerados os dados de 3112 solos para avaliação..

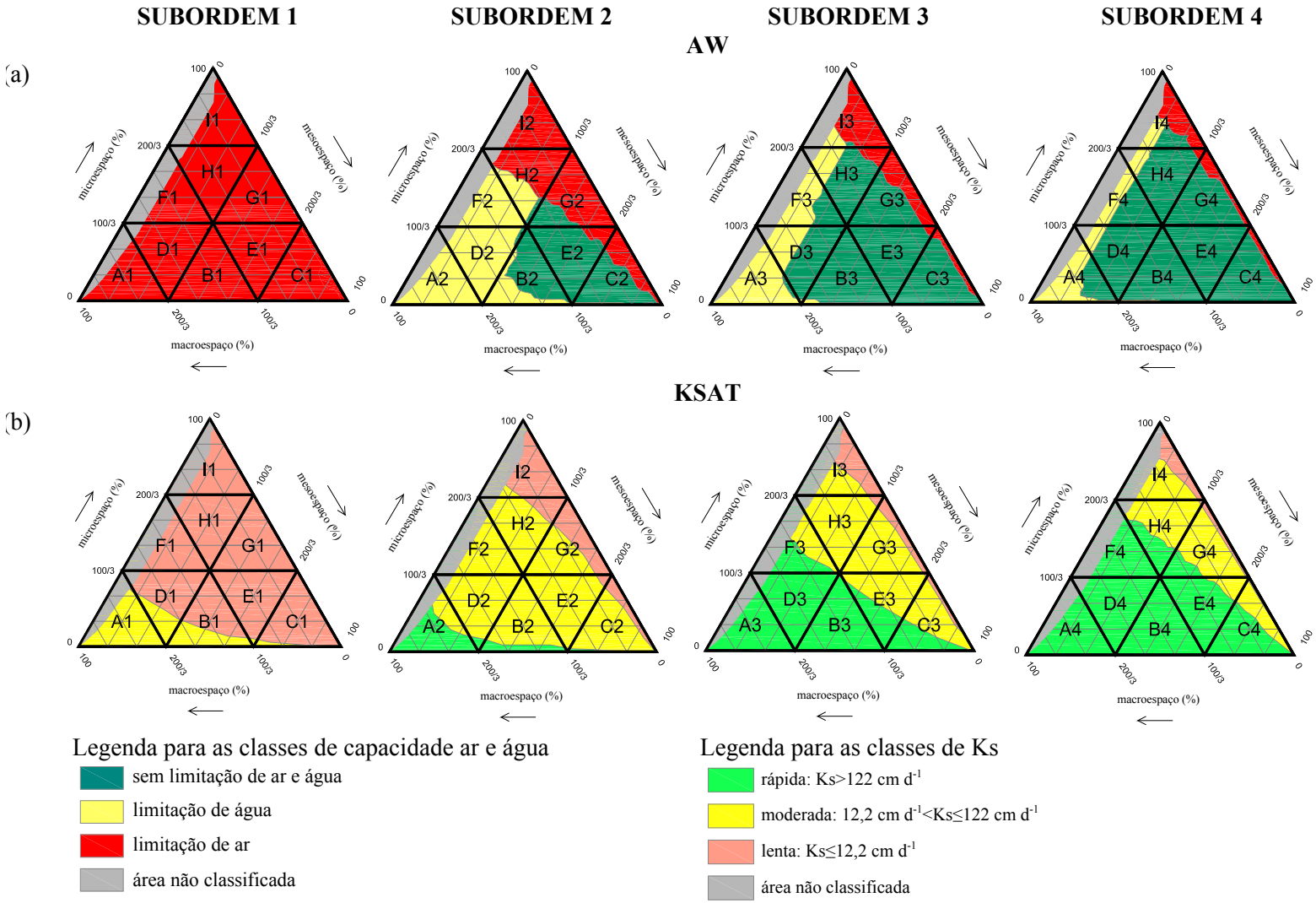


Figura 6.1 - Enquadramento das classes de a) capacidades de ar e água; b) permeabilidade (Ks) dos solos-tipo das Famílias estruturais, segundo o SPSCS.

Para validação do SPSCS, no que diz respeito às classes *aw*, foram selecionadas aquelas amostras contendo medições nas sucções muito próximas a 330 cm (θ_{330}) e 15000 cm (θ_{15000}), no intervalo de 300-350 cm e 15000-16000 cm, respectivamente, resultando num banco com 929 amostras. Com base nessas medidas muito próximas de θ_{330} e θ_{15000}, e nos valores de Φ, determinaram-se as classes reais *aw* das amostras, segundo a definição de *a* e *w* considerada na seção anterior. Esses resultados foram comparados com as classes *aw* correspondentes, preditas pelo SPSCS, a partir dos parâmetros Φ, α, m e θr determinados pelo seu protocolo, utilizando-se as Equações 6.1, 6.2 e 6.3. O percentual global de acerto entre as classes *aw* obtidas por medição e predição para as 929 amostras, bem como o percentual de acerto para as amostras contidas em cada Família estrutural com no mínimo 10 solos, foram então determinados. Esses percentuais consistem na relação entre o número de acertos e o número total de amostras na avaliação. Globalmente (para as 929 amostras), o grau de coincidência das classes *aw* foi muito alto (97,5%) e com cerca de 85% de chance do percentual de acerto por Família ser de 95% ou mais, conforme destacado na Figura 6.2. Esses resultados evidenciam, portanto, a alta confiabilidade do SPSCS na caracterização das classes de capacidades de ar e água.

Para validação do SPSCS quanto às classes de Ks, fez-se nova seleção dentro da base de dados do estudo (3112 amostras), considerando as amostras que contivessem dados de Ks. Nesse contexto, a base de dados original foi reduzida para 1615 amostras. As predições das classes de Ks pelo sistema foram realizadas pela pedofunção WM_{330}, conforme descrito na subseção anterior. Nesse caso, a variável independente de WM_{330}, $Ø_{330}$, foi estimada pelo valor medido de PT (ou pelo conteúdo de água na saturação, Φ, caso PT não fosse disponível) subtraído da predição de θ_{330} feita a partir dos parâmetros Φ, α, m e θr preconizados para a amostra, segundo o protocolo do SPSCS. Entretanto, a base de dados de calibração de WM_{330} (Capítulo 2) está contida no conjunto acima de 1615 amostras, e foi excluída do estudo de validação das classes de Ks. Com o procedimento adotado, foram considerados dados de 812 amostras.

Como anteriormente, determinou-se o percentual de acerto entre as classes de Ks obtidas por mensuração e predição para o conjunto de 812 amostras e por Família estrutural com no mínimo 10 elementos. O resultado mostrou que, globalmente, 57% das amostras tiveram coincidência de classes de Ks, com cerca de 80% de chance do percentual de acerto por Família ser de mais de 50% (Figura 6.2). Em outras palavras,

em cerca de 80% das Famílias, há mais chance da classe predita coincidir com a classe real de Ks do que não coincidir. Embora a confiabilidade de predição das classes de Ks tenha sido inferior à observada para as classes de *aw*, estudos similares (McKeague *et al.*, 1982) consideraram que um percentual de cerca de 50% ou mais de acerto é um valor relativamente aceitável na estimativa de classes de Ks. Isto porque Ks é uma propriedade do solo com baixa representatividade quando estimada por pedofunções, como já comentado na subseção anterior e mais detalhadamente discutido no Capítulo 3. Portanto, entende-se que o SPSCS foi capaz de prever com aceitável confiabilidade as classes de Ks na base de dados considerada.

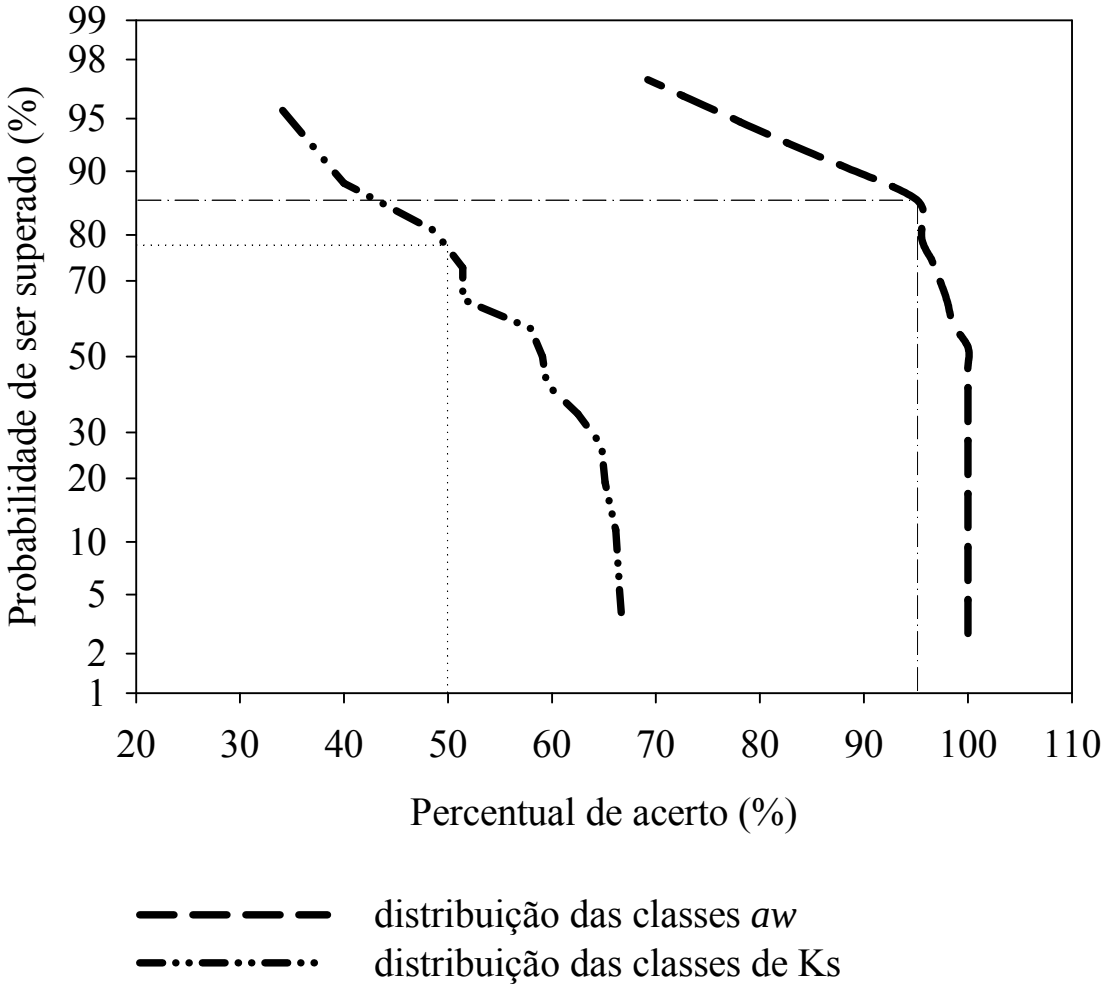


Figura 6.2 - Distribuição do percentual de acerto das classes *aw* e de Ks nas Famílias estruturais contendo dez ou mais solos para as amostras das bases de dados consideradas no estudo.

6.3 Relações com diferentes solos

Na presente seção, objetiva-se avaliar as relações do SPSCS com diferentes

solos, mais especificamente para as Ordens estruturais do sistema e três grupos de solos provenientes de distintas condições climáticas e de materiais de origem. Os efeitos de algumas propriedades básicas do solo nessas relações, especialmente a textura, são também analisados. No final, é realizada uma avaliação simplificada do SPSCS para perfis de solos intemperizados típicos de regiões tropicais. A avaliação , nesta seção, será conduzida de forma simplificada e não abrangente, pois sua motivação é de principalmente mostrar a potencialidade do SPSCS como ferramenta hidropedológica.

6.3.1 Descrição da base de dados

Três bases de dados foram aqui selecionadas. A primeira compreende as classes Ferralsols, Acrisols e Nitisols, segundo o sistema de classificação de solos do WRB (WRB, 2015), representando solos brasileiros intemperizados. O segundo grupo engloba solos do território europeu e engloba perfis com menor grau de intemperismo. Esses dois inventários foram extraídos da base de dados de solos internacionais detalhada no Capítulo 5 e terão como notação as siglas WBR (*Weathered Brazilian Soils*) e TEU (*Temperate European Soils*), respectivamente. Naquele estudo, todas as amostras foram enquadradas nas classes estruturais previstas pelo SPSCS, contendo o banco de dados informações de algumas propriedades básicas do solo, mencionadas no início da seção 6.2.2. Nesta seção, apenas as amostras genuínas foram destacadas para composição de WBR e TEU. Esse critério de seleção foi adotado, pois buscou-se avaliar somente aquelas situações nas quais as curvas de retenção de água ajustadas segundo o SPSCS eram mais representativas da estrutura porosa dos solos.

A terceira base de dados refere-se a solos provenientes de material de origem vulcânica recente, compilados dos estudos de Pochet *et al.* (2007) e Dörner *et al.* (2010). A esse último banco foi dada a notação VUL (*vulcanic soils*). Os solos no estudo de Dörner *et al.* (2010), provenientes de regiões vulcânicas chilenas, foram enquadrados nas Famílias estruturais. segundo o protocolo do SPSCS, constituindo 16 amostras genuínas e 5 adotadas. Em Pochet *et al.* (2007), os dados experimentais de retenção de água das nove amostras estudadas, provenientes da Ilha Tongatapu, no Reino de Tonga, no Pacífico Sul, não se encontravam disponíveis; foram apresentados apenas os valores otimizados dos parâmetros de VG dessas amostras. Visando, no entanto, dar mais robustez à avaliação desses solos de origem vulcânica recente, procedeu-se à classificação estrutural das amostras de Pochet *et al.* (2007), mesmo que não seguindo estritamente o protocolo do SPSCS. Foram usados os valores estimados

de θ_{60}, θ_{330} e θ_{15000} a partir dos parâmetros de VG. Nesse caso não foi possível representar essas amostras nos grupos dos genuínos, adotados e rejeitados, pela indisponibilidade de dados de retenção de água. Tanto em Pochet *et al.* (2007) como em Dörner *et al.* (2010) constam também informações de atributos do solo.

Na Figura 6.3, é ilustrada a distribuição das amostras dos solos vulcânicos recentes nas Famílias estruturais, evidenciando a predominância das classes de Ordem E, C e G, numa sequência decrescente de quantidade de amostras, e das Subordens 2 e 3. Apenas as 16 amostras genuínas de Dörner *et al.* (2010) foram apresentadas nessa Figura, estando nela incluídas todas as nove amostras de Pochet *et al.* (2007).

As amostras das bases WBR, TEU e VUL referem-se a diferentes horizontes de solos, mas nem sempre a informação sobre esses horizontes era disponibilizada. A seleção exclusiva de amostras de horizontes diagnósticos reduziria demasiadamente a base de dados para o presente estudo. Na Tabela 6.2, resume-se o quantitativo de amostras nos três grupos pedogenéticos citados e mencionam-se as classes pedológicas contidas nesses grupos.

Ordem do solo	ns†	Subordem do solo			
		1	**2**	**3**	**4**
B	3	0	3	0	0
C	7	0	5	2	0
E	10	0	2	7	1
G	5	0	0	1	4
Total	25		10	10	5

Figura 6.3 - Distribuição do banco de dados de solos vulcânicos recentes nas Famílias estruturais; †ns - número de amostras.

Tabela 6.2 - Características dos bancos de dados de solos utilizados no estudo.

Notação da base de dados	Descrição	Número de amostras	Classes pedológicas segundo WRB (WRB, 2015)
WBR	Solos brasileiros intemperizados	638	Ferralsols, Acrisols e Nitisols
TEU	Solos europeus temperados	1744	Luvisols, Cambisols, Gleysols, Fluvisols, Phaeozems, Leptosols, Podzols, Arenosols, Anthrosols, Histosols, Regosols, Albeluvisols
VUL	Solos vulcânicos recentes	25	Andosols, Phaeozems
	Total	2407	

6.3.2 Relações das Ordens estruturais com textura para diferentes solos

Na Figura 6.4, é apresentada a distribuição dos solos WBR, TEU e VUL no triângulo estrutural para os três grupos de classes texturais definidos no Capítulo 2, grosseira (T1), média (T2) e fina (T3). Na Figura 6.5, é ilustrado, por Ordem estrutural, o histograma da distribuição percentual das bases WBR, TEU e VUL, em relação ao montante total de solos avaliados nesta seção (2407 amostras), levando em conta os três referidos grupos de classes texturais, como também, mais detalhadamente, as 12 doze classes texturais segundo o triângulo de textura do USDA (USDA, 1987).

De acordo com a Figura 6.5, percebe-se que os solos de textura fina de WBR, especialmente os argilosos, foram dominados por estruturas com predomínio da fração macroespaço, particularmente as das Ordens A, D e B. Nessas Ordens também se concentraram os solos com altos teores de areia (areias e areias francas) das regiões temperadas europeias (TEU). Esse retrato estrutural peculiar "híbrido" de solos argilosos intemperizados, similar ao de solos arenosos, é tema discutido na literatura dos solos intemperizados de clima tropical (Guedez e Langohr, 1978; Embrechts e Sys, 1988; Tomasella *et al.*, 2000, Tomasella e Hodnett, 2004), sendo também abordado o papel da mineralogia das argilas na estrutura e no comportamento físico-hídrico desses solos (Resende et al., 1987; Ferreira *et al.*, 1999; Pedrotti *et al.*, 2003; Marques *et al.*, 2010).

Contraditoriamente a esses solos argilosos intemperizados macroespaçosos, há também solos argilosos intemperizados com estruturas microespaçosas da Ordem H (a maioria deles nas classes Ferralsols e Nitisols), onde a dominação é do microespaço e os problemas de drenabilidade tendem a ser mais frequentes. Esses solos argilosos

brasileiros assemelham-se estruturalmente aos numerosos solos de textura fina T3 de Ordem H das regiões temperadas europeias (Figuras 6.4 e 6.5). Portanto, nem sempre o comportamento "híbrido" acima é incorporado aos solos intemperizados de textura fina, apesar de, claramente, ser o caso mais frequente no banco de dados do estudo. A distinção entre os solos argilosos intemperizados macroespaçosos e microespaçosos é assunto que foge ao escopo desta tese.. Marques *et al.* (2010), por exemplo, avaliando a evolução química, físico-hídrica e a mineralogia de Latossolos no baixo Amazonas, associam a quantidade de água armazenada e disponível nos solos argilosos estudados à variação topográfica.

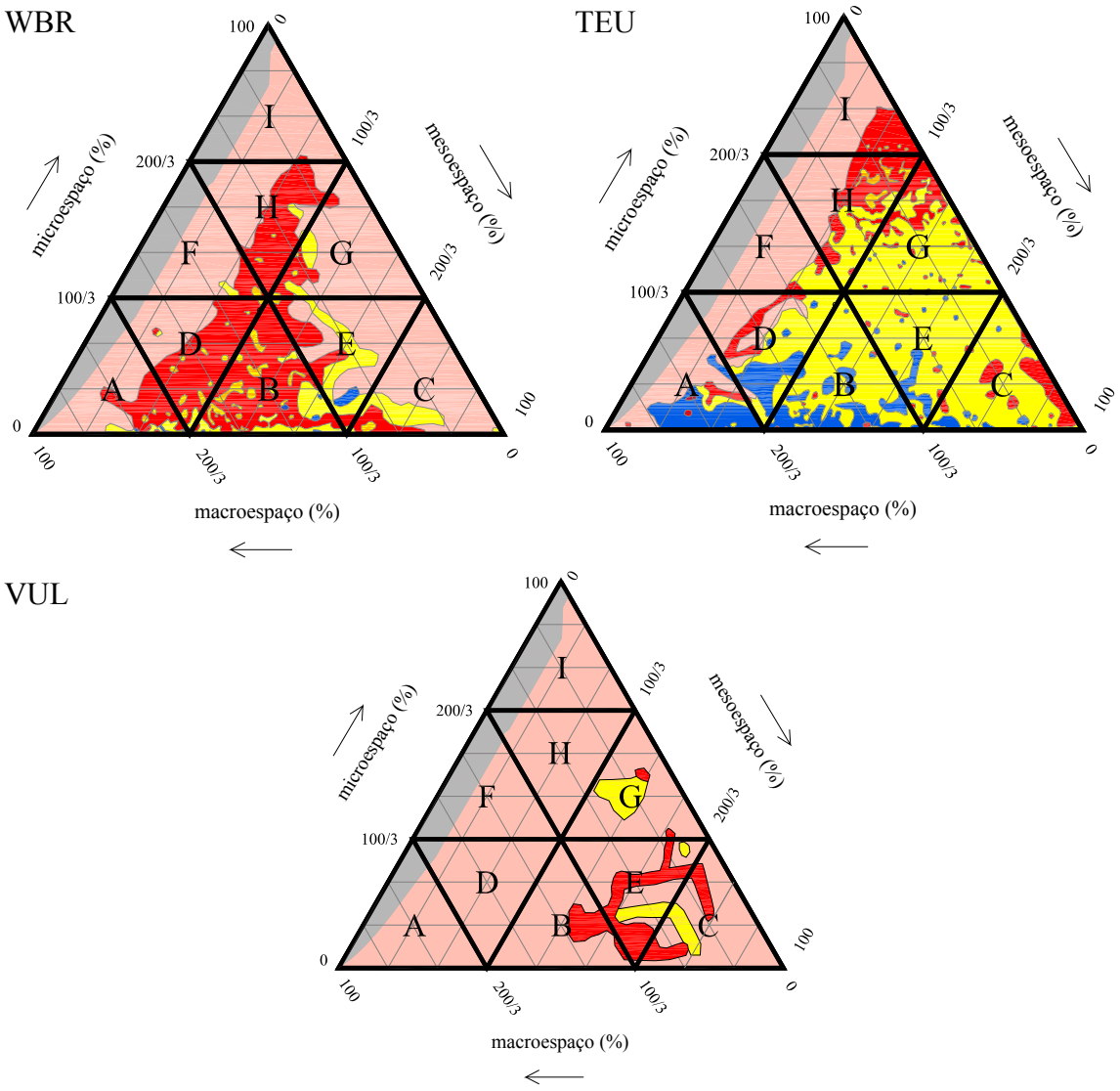
Apesar de muito pouco frequente, solos de textura fina (T3) temperados se fizeram também presentes nas classes macroespaçosas A, D, B, ou seja, apresentaram o mesmo comportamento "híbrido" dos solos intemperizados de textura fina. Pequena presença de solos de textura fina europeus e brasileiros foi também verificada nas Ordens C e E, de dominação mesoespaçosa. Mas, aonde os solos europeus de textura fina se fizeram largamente presentes foi nas Ordens estruturais I, H e G, de predomínio microespaçoso, o que seria uma tendência esperada. Se forem de Ordem I, com grandes chances devem induzir problemas de aeração e baixa drenabilidade no perfil, como constado na subseção 6.2.1.

Como esperado e indicado nas Figuras 6.4 e 6.5, os solos arenosos (T1) se concentraram nas estruturas de predominância macroespaçosa, A, D e B, com poucas exceções, especialmente nas Ordens C e E, provavelmente devido ao maior teor de matéria orgânica (OM). De fato, a média de OM para os solos arenosos WBR e TEU nas classes C e E foi de 2,9%, versus 1,7% registrada para esses mesmos solos nas classes A, D e B. Os solos arenosos contidos na Ordem A provavelmente constituem-se em estruturas porosas de alta drenabilidade e baixa capacidade hídrica, como constatado na subseção 6.2.1

Os solos de textura média (T2) em WBR se concentraram nas Ordens A, D e B, como indicado na Figura 6.5, o que em geral aconteceu com os solos desse banco de dados. Os solos de textura média europeus agruparam-se especialmente na Ordem H e em todas as Ordens onde a fração mesoespaço é de moderado a alto valor (acima de 1/3), ou seja, nas Ordens C, E, G e B.

Os solos vulcânicos da base VUL de textura fina (T3) situaram-se nas Ordens de predominância mesoespaçosa, C, E e B, nas Subordens 2 e 3, como já referido.

Observando-se as Figuras 6.1 e 6.4, espera-se que, na maioria dos casos, tais solos vulcânicos de textura fina não devam apresentar severas limitações nas capacidades de ar e água, nem de permeabilidade, como sugerido por Dörner *et al.* (2010) e Pochet *et al.* (2007). Tudo isso confirma um comportamento estrutural diferenciado, tanto em relação aos solos europeus de textura fina quanto aos brasileiros de textura fina. Como a base de dados VUL é pouco numerosa, recomenda-se cautela na generalização dos resultados acima.



Legenda:

- solos de textura fina (franco argilo siltoso, argila siltosa, franco argiloso, argila, argila arenosa)
- solos de textura média (franco arenoso, franco, franco argilo arenoso, franco siltoso, silte)
- solos de textura grosseira (areia, areia franca)
- área sem amostra de solo
- área não classificada

Figura 6.4 - Distribuição dos solos brasileiros intemperizados (WBR), europeus

temperados (TEU) e vulcânicos recentes (VUL) no triângulo estrutural, segundo os grupos de classes texturais grosseira (T1), média (T2) e fina (T3).

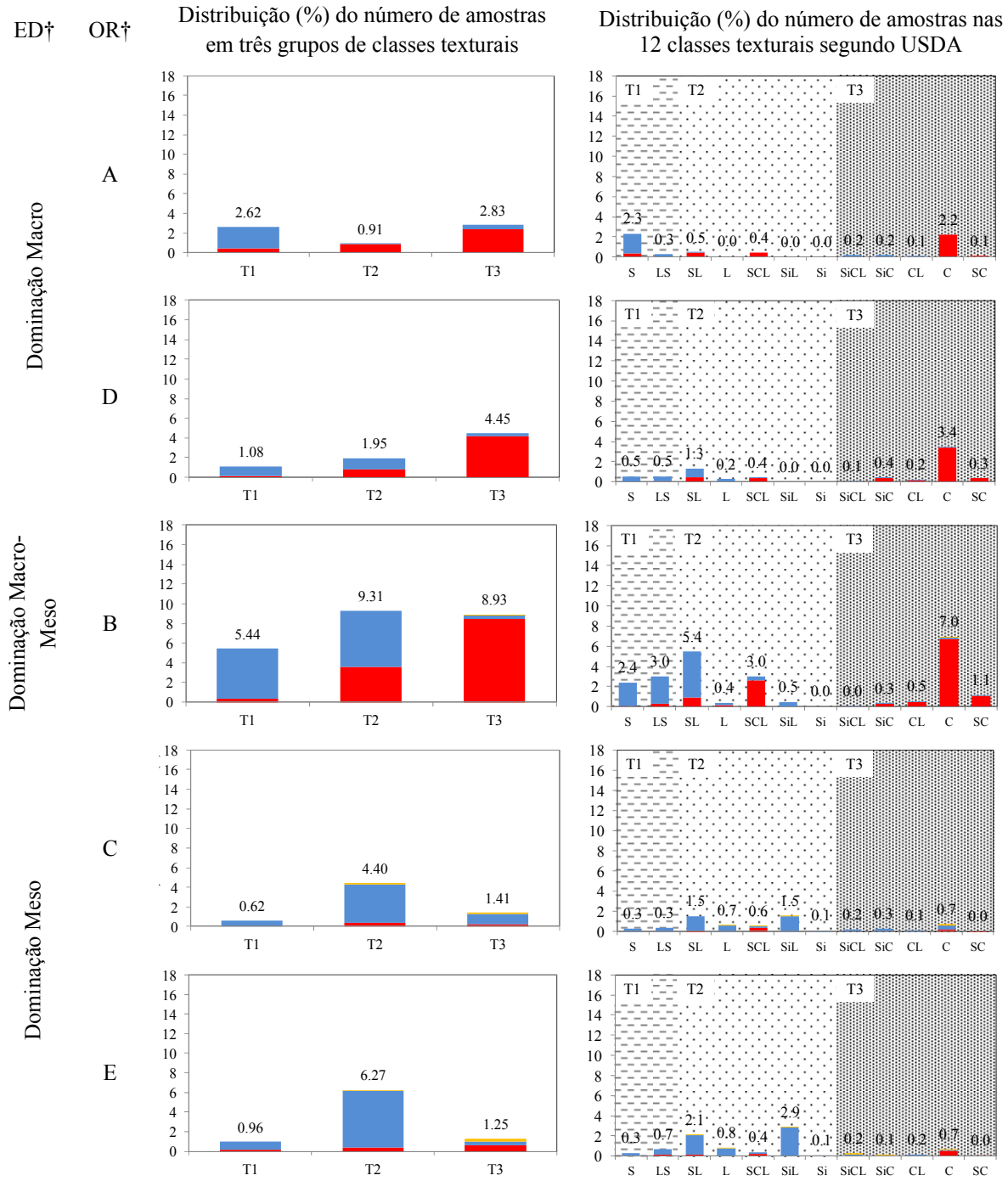


Figura 6.5 - Distribuição percentual dos solos brasileiros intemperizados (WBR), europeus temperados (TEU) e vulcânicos recentes (VUL) por Ordem estrutural, em relação ao montante total das amostras avaliadas, levando em conta os grupos de classes texturais grosseira (T1), média (T2) e fina (T3) e as 12 classes texturais segundo USDA. S - areia; LS - areia franca; SL - franco arenoso; L - franco; SCL - franco argilo arenoso; SiL - franco siltoso; Si - silte; SiCL - franco argilo siltoso; SiC - argila siltosa; CL - franco argiloso; C - argila; SC - argila arenosa; † ED - Espaço poroso dominante; OR - Ordem de solo.

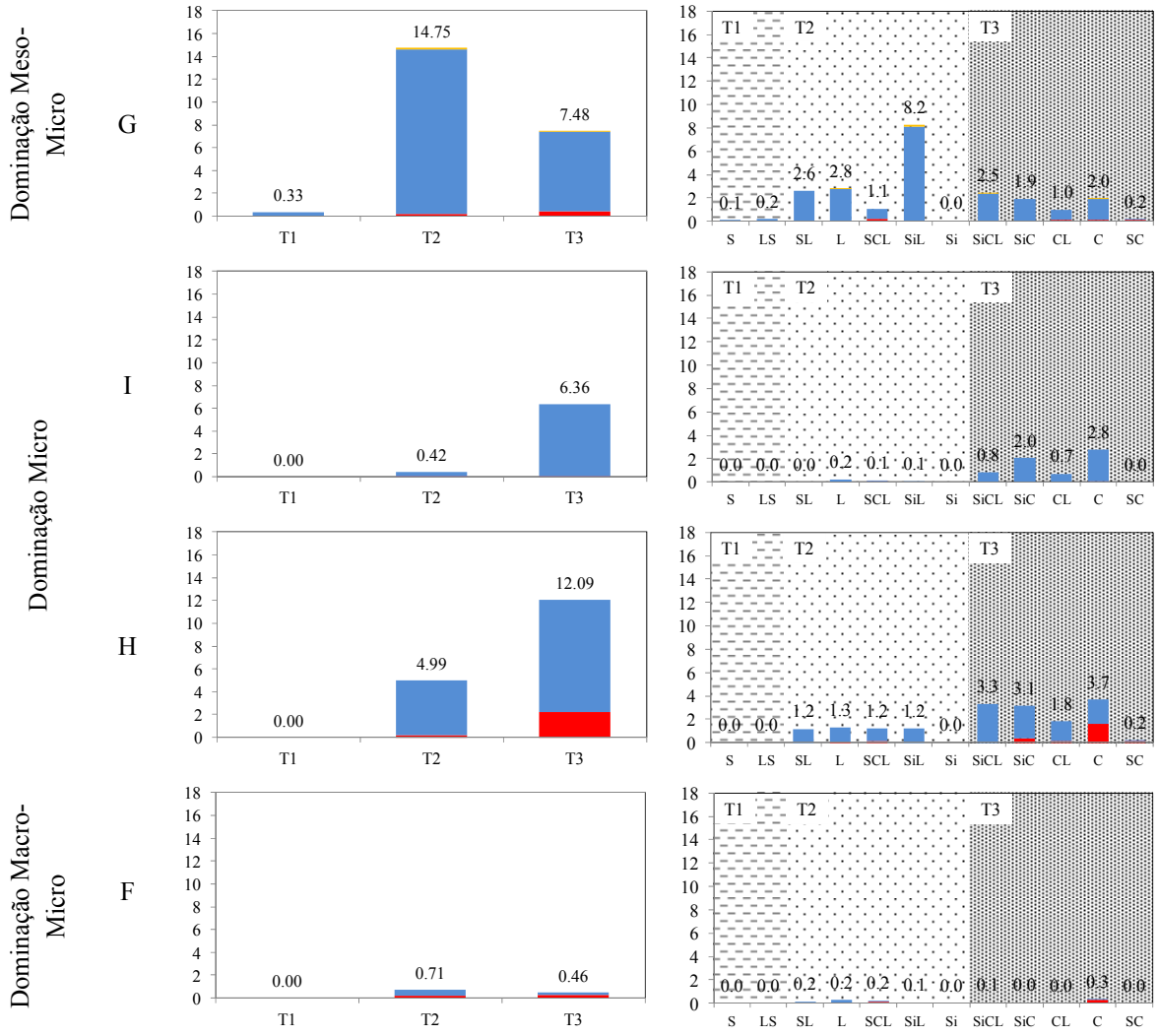


Figura 6.5 - Distribuição percentual dos solos brasileiros intemperizados (WBR), europeus temperados (TEU) e vulcânicos recentes (VUL) por Ordem estrutural, em relação ao montante total das amostras avaliadas, levando em conta os grupos de classes texturais grosseira (T1), média (T2) e fina (T3) e as 12 classes texturais segundo USDA. S - areia; LS - areia franca; SL - franco arenoso; L - franco; SCL - franco argilo arenoso; SiL - franco siltoso; Si - silte; SiCL - franco argilo siltoso; SiC - argila siltosa; CL - franco argiloso; C - argila; SC - argila arenosa; † ED - Espaço poroso dominante; OR - Ordem de solo. (*continuação*)

Serão discutidos, a seguir, alguns exemplos das relações entre o SPSCS e textura para diferentes solos. Assim, foram selecionados quatro estudos de casos, cada um representando uma condição específica envolvendo similaridade ou dissimilaridade

estrutural, textural e/ou de classe pedológica. Dois solos foram destacados da base de dados WBR, TEU ou VUL para compor cada estudo de caso. As curvas de disponibilidade de ar dos oito solos são apresentadas na Figura 6.6, com a indicação dos correspondentes horizontes, Ordens estruturais, classes pedológicas e texturais, bem como das classes de permeabilidade (classes Ks) e de capacidades de ar e água (classes aw, Tabela 6.1). As classes de densidade solo (classes BD) e de conteúdo de matéria orgânica (classes OM) foram também indicadas. Para BD e OM foram arbitrariamente presumidas três classes (baixa, média e alta), apresentando os seguinte intervalos de valores: baixa ($BD \leq 1$ g cm^{-3}), moderada (1 g $cm^{-3} < BD \leq 1{,}5$ g cm^{-3}) e alta ($BD > 1{,}5$ g cm^{-3})/baixa ($OM \leq 1{,}5\%$), moderada ($1{,}5\% < OM \leq 2{,}5\%$) e alta ($OM > 2{,}5\%$). Na Tabela 6.3 estão resumidos os quatro estudos de casos. Esses solos foram identificados no triângulo estrutural (Figura 6.7) com a notação apresentada na Tabela 6.3.

Os dois primeiros casos (Ex1 e Ex2) evidenciam solos com texturas e classes pedológicas bem distintas, mas contendo estruturas porosas, segundo o SPSCS, muito semelhantes, representadas pela proximidade e similaridade de formato das suas curvas de disponibilidade de ar. O Ex1 ilustra o caso "híbrido" já citado, de semelhança estrutural entre solos argilosos intemperizados e arenosos de ambiente temperado, apresentando boa drenabilidade e deficiência em água para esses dois solos (Ks, *a* e *w* na Tabela 6.3), o que é esperado por serem ambos dominados por estruturas macroespaçosas (Ordem D). Nesse exemplo, a mineralogia da argila de solos intemperizados (Ex1a) pode ter sido um dos motivos que contribuiu para a formação estrutural similar a de solos arenosos (Ex1b), como já comentado.

O Ex2 tem similaridade com o Ex1, pois se trata de um horizonte B espódico arenoso de clima temperado (Ex2a) com comportamento estrutural semelhante a um solo superficial com textura fina de origem vulcânica recente (Ex2b), ambos representados pela Ordem E3. A diferença para o Ex1 é que no Ex2 o par de solos não apresentou nenhuma restrição nas suas funcionalidades hidricas. Outra diferença de Ex2 para Ex1 são as Ordens estruturais bem diversas dos dois exemplos (Ordens E e D, respectivamente). Além disso, todos os horizontes avaliados no Ex1 foram subsuperficiais, o que não ocorreu para o solo Ex2a. A capacidade hídrica do solo E3, Podzol arenoso (w=14%), deve estar relacionada, pelo menos parcialmente, ao seu maior teor de matéria orgânica (3,6%). Já os Andosols de textura fina, geralmente, não exibem restrições em condutividade hidráulica e retenção de água (Fontes *et al.*, 2004;

Dörner *et al.*, 2010), como usualmente predito para solos da Família E3 (seção 6.2.1). Essas duas características hídricas dos Andosols devem ter sido proporcionadas pelos maiores teores de matéria orgânica e de argila, com mineralogia influenciada pela origem vulcânica recente, e agregação peculiar formando peds muito estáveis (Lepsch, 2011). O teor médio de matéria orgânica registrado para os solos chilenos da VUL (16 amostras) foi de aproximadamente 18%, confirmando os valores altos dessa variável nos Andosols estudados, o que deve ter contribuído para a excelente funcionalidade hídrica do Andosol de Ex3.

Os outros dois estudos de casos, Ex3 e Ex4, ilustram solos com estruturas porosas distintas (curvas de disponibilidade de ar diferenciadas), mas texturas semelhantes. O Ex3 representa dois Ferralsols argilosos e o Ex4 dois solos de ambiente temperado, com textura franco argilosa e classes pedológicas diferentes (Gleysol e Cambisol). O Ex3 registra uma situação também já mencionada nesta seção, referente às argilas de solos intemperizados, que ora se comportam estruturalmente como areias, representada pelo solo Ex3a, com alta drenabilidade e restrições de água, ora como solos tipicamente argilosos de clima temperado na Família H2, solo Ex3b, com baixos valores de Ks. No Ex4 o Gleysol apresentou severas restrições de permeabilidade e aeração (Tabela 6.3), comuns em solos de Ordem I2 (seção 6.2.1), que não aconteceu com o Cambisol.

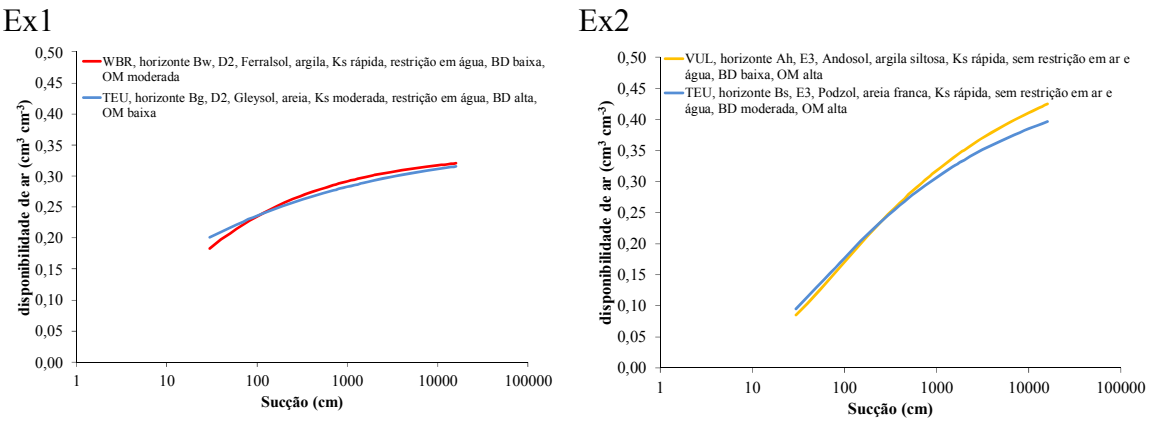
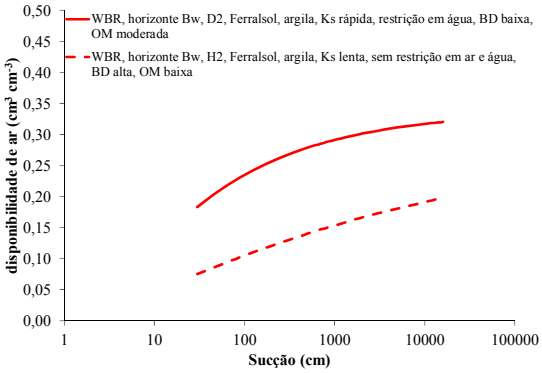


Figura 6.6 - Comparação de estruturas porosas (representadas pela curva de disponibilidade de ar) para quatro estudos de casos dos bancos de dados de solos brasileiros intemperizados (WBR), europeus temperados (TEU) e vulcânicos recentes (VUL); valores de sucção na escala logarítmica.

Ex3



Ex4

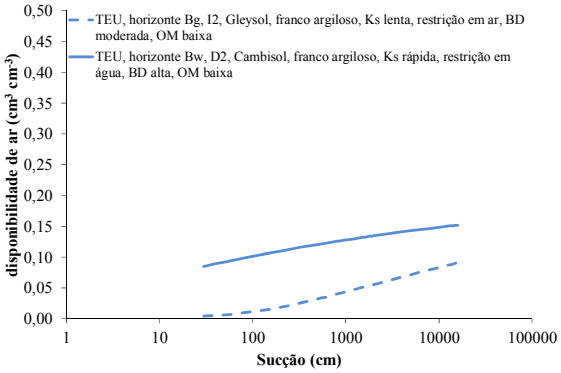


Figura 6.6 - Comparação de estruturas porosas (representadas pela curva de disponibilidade de ar) para quatro estudos de casos dos bancos de dados de solos brasileiros intemperizados (WBR), europeus temperados (TEU) e vulcânicos recentes (VUL); valores de sucção na escala logarítmica. (*continuação*)

Tabela 6.3 - Características dos solos dos quatro estudos de casos para avaliação das relações entre SPSCS e atributos do solo.

Notação	Banco dados	Horizonte/ (profundidade)	Família	textura	Classe de Solos (WRB, 2015)	Ks¶ (cm/d)	*a*§	*w*§	BD†† (g/cm³)	OM†† (%)
Ex1a†	WBR	Bw‡ (49-65 cm)	D2	argila	Ferralsol	228	0,27	0,05	0,97	1,6
Ex1b	TEU	Bg‡ (30-55 cm)	D2	areia	Gleysol	71	0,26	0,05	1,69	0,19
Ex2a	TEU	Bs‡ (-)‡‡	E3	areia franca	Podzol	443	0,25	0,14	1,13	3,59
Ex2b	VUL	Ah‡ (-)‡‡	E3	argila siltosa	Andosol	2950	0,25	0,17	0,51	28,27
Ex3a†	WBR	Bw‡ (49-65 cm)	D2	argila	Ferralsol	228	0,27	0,05	0,97	1,6
Ex3b	WBR	Bw‡ (58-96 cm)	H2	argila	Ferralsol	2,47	0,13	0,07	1.51	0,48
Ex4a	TEU	Bg‡ (60-80 cm)	I2	franco argiloso	Gleysol	1,57	0,03	0,06	1,48	0,34
Ex4b	TEU	Bi‡ (25-30 cm)	D2	franco argiloso	Cambisol	704	0,12	0,04	1,60	0,79

†exemplos repetidos; ‡Bw - Horizonte B, alterado pelo intemperismo, evidenciado por contraste na cor ou estrutura; Bg - Horizonte B com cor acinzentada, fortemente influenciado pelo excesso de água; Bs - Horizonte com acumulação iluvial de material amorfo, principalmente alumínio e ferro combinados com baixos conteúdos de matéria orgânica iluvial; Ah – Horizonte A enriquecido com matéria orgânica; Bi - Horizonte pouco desenvolvido e/ou parcialmente intemperizado; ¶ valor medido de Ks -

condutividade hidráulica saturada; §calculado pelo SPSCS, *a* - capacidade de ar, *w* - capacidade de água; †† BD - densidade do solo, OM - teor de matéria orgânica; ‡‡ dado de profundidade duvidoso.

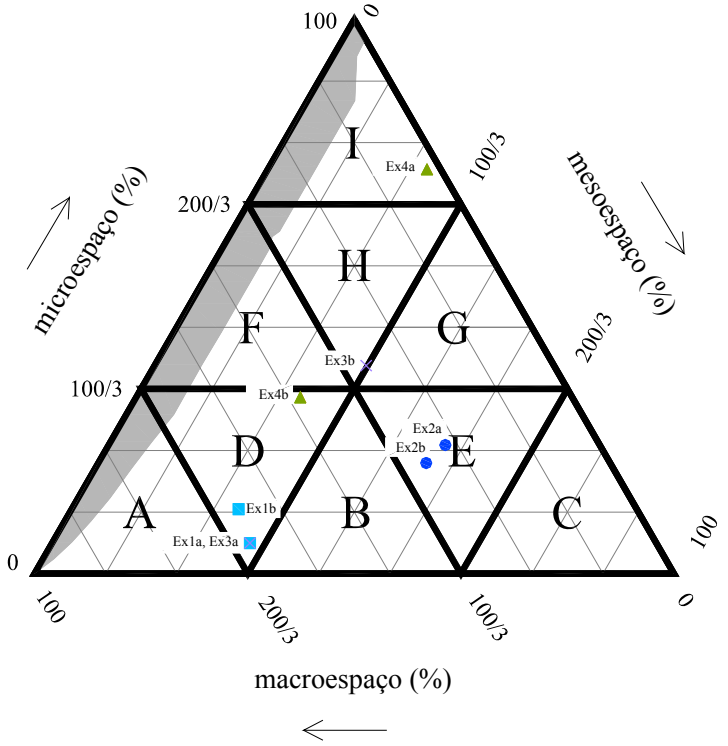


Figura 6.7 - Localização das amostras de solos dos quatro estudos de casos (Ex1, Ex2, Ex3 e Ex4) para avaliação das relações entre SPSCS, pedogênese e atributos do solo.

6.3.3 Relações com perfis de Ferralsols

Os Ferralsols são definidos como solos intemperizados com perfis de pequena diferenciação morfológica entre os horizontes e, em geral, com agregados granulares fortemente desenvolvidos, por vezes denominados como pseudo-areias ou "pó de café" em função do tamanho pequeno e muito pequeno, podendo apresentar agregados subangulares fracamente desenvolvidos (Lepsch, 2010). Os perfis são em geral profundos ou muito profundos, com textura que deve ser média ou mais argilosa, em geral de consistência muito friável e alta porosidade. Seus agregados estáveis tendem à formação de um espaço poroso muito permeável, mesmo quando de textura muito argilosa (Lepsch, 2010, 2011), e em geral possuem baixa capacidade de água para as plantas (Alleoni e Camargo, 1994; Pochet *et al.*, 2007). Os Ferralsols são equivalentes aos Latossolos do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS, Santos *et al.*, 2013a), e aos Oxisols do *Soil Taxonomy* (Soil Survey Staff, 1999). Diversos trabalhos descrevem as características morfológicas, fisicas, químicas e hidráulicas desses solos

(Macedo e Bryant, 1987; Alleoni e Camargo, 1994; van den Berg *et al.*, 1997; Klamt e van Reeuwijk, 2000, Tawornpruek *et al.*, 2005; Reatto *et al.*, 2007). Apesar disso, tais solos carecem ainda de maior disponibilidade de informações e maior detalhamento sobre a estrutura dos seus poros.

Com o propósito de indicar o potencial do SPSCS em ampliar o entendimento a respeito desse último tópico, foram selecionados perfis de Ferralsols na base de dados de solos internacionais descrita no Capítulo 5 e avaliada sua classificação estrutural segundo o SPSCS, apenas para os perfis cujos horizontes Bw fossem em amostras genuínas. Não foram considerados perfis que contivessem informações de apenas um horizonte Bw. As informações dos horizontes A foram excluídas da avaliação por poderem estar influenciadas pelo manejo e cultivo. Por esses critérios, 24 perfis foram selecionados e analisados, mas apenas três, FE1, FE2 e FE3, serão aqui detalhados quanto ao seu comportamento estrutural e hídrico em profundidade. O perfil FE1 representa o caso típico esperado para um Ferralsol, pois será aqui demonstrado que o mesmo exibe uma estrutura porosa homogênea (segundo o SPSCS) ao longo do perfil. O solo FE2, por outro lado, apresenta estrutura bem variada entre seus horizontes. Um caso intermediário a esses dois será ilustrado em FE3. Características dos horizontes Bw dos três perfis, bem como suas classificações textural e estrutural encontram-se descritas na Tabela 6.4.

Na Figura 6.8a, são destacadas, no triângulo estrutural, as amostras dos três solos citados acima, acompanhadas de números que identificam a profundidade das mesmas (Tabela 6.4). As curvas de disponibilidade de ar calculadas pelo SPSCS nas diferentes profundidades são ilustradas nas Figuras 6.8b. Um grupo predominante dos 24 Ferralsols selecionados concentraram-se nas Famílias B2 e D2, registrando capacidade de ar (*a*) geralmente variando de moderada a alta, e capacidade de água (*w*) de moderada a baixa, como preconizado pela Figura 6.1. Um caso típico desse comportamento estrutural-hídrico dos Ferralsols foi o exemplo FE1, com classificação D2 para o horizonte Bw1 e B2 para os demais, e com curvas de disponibilidade de ar muito próximas entre si (Figura 6.8b1). Essa mesma homogeneidade das curvas de disponibilidade de ar ao longo da profundidade aparece em 15 dos 24 Ferralsols selecionados. A permeabilidade de FE1 variou de moderada a alta em profundidade, sempre com baixa capacidade de água, apresentando maior macroespaço e permeabilidade no horizonte Bw mais superficial (Figura 6.8a e Tabela 6.4).

Caso diferente foi o perfil FE2, com estrutura porosa bem variada em profundidade: na Família H2 para o horizonte Bw mais superficial, seguida das classes B2 e C2 para os horizontes subadjacentes. Ou seja, mais superficialmente esse perfil apresentou estrutura dominada pelo microespaço (Ordem H), seguida em profundidade por uma estrutura de dominação híbrida macro-mesoespaçosa (Ordem B), de transição para uma estrutura do horizonte mais profundo (120-160 cm) com predomínio mesoespaçoso (Ordem C). De fato, suas curvas de disponibilidade de ar apresentaram formatos peculiares e valores diferenciados entre si (Figura 6.8b2). Em comparação ao FE1 e FE3, FE2 foi o que registrou maior variação dos teores da fração argila em profundidade, o que pode ser uma das justificativas da variação mais relevante da sua estrutura no perfil. É interessante notar que o horizonte Bw1 do FE2, apesar de ser o menos argiloso, foi que apresentou a menor condutividade hidráulica (Tabela 6.4), o que é compatível com a permeabilidade prevista de sua estrutura microespaçosa (seção 6.2.1). Apesar de variada a estrutura porosa de FE2, sua funcionalidade hídrica foi em geral homogênea no perfil, à exceção do valor bem menor de Ks do horizonte Bw1, em relação ao Bw2 e Bw3.

Similarmente ao exemplo FE1, o perfil FE3 representou também um Ferralsol relativamente homogêneo estruturalmente, com curvas de disponibilidade de ar de seus horizontes similares entre si, mas não tão semelhantes quanto às curvas de FE1, apresentando tendência de redução do macroespaço e aumento do microespaço em profundidade (Figuras 6.8a,b3). O FE3 é um solo predominantemente do tipo B1, com baixa porosidade ativa, deficiência de água e algumas vezes de ar (para horizontes mais profundos), registrando também permeabilidade muito baixa em todo perfil, tendo provavelmente limitações para o manejo e produção agrícolas do ponto de vista físico-hídrico.

Dada a grande variedade de Ferralsols, recomenda-se um estudo mais aprofundado quanto sua estrutura porosa e representação segundo o SPSCS, visando avaliar possíveis tendências e relações envolvendo as classes estruturais previstas pelo sistema e diferentes Ferralsols.

Tabela 6.4 - Características dos perfis de Ferralsols selecionados para avaliação do SPSCS.

Notação	horizonte	PT†	PB†	Cidade	Estado (Brasil)	SiBCS¶¶	WRB	Família SPSCS	Textura	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	BD‡ (g cm^{-3})	OM‡ (%)	Ks§ (cm d^{-1})	*w*¶ (cm^3 cm^{-3})	*a*¶ (cm^3 cm^{-3})
FE1	Bw1	49	65	Parauapebas	Pará	Latossolo Vermelho Escuro álico A moderado	Ferralsol	D2	argila	3,0	4,0	93,0	0,97	1,6	228,0	0,05	0,27
FE1	Bw2	65	132					B2	argila	3,0	4,0	93,0	1,02	0,965	122,0	0,06	0,25
FE1	Bw3	132	190					B2	argila	2,0	5,0	93,0	1,00	0,672	120,0	0,06	0,26
FE2	Bw1	38	72	Cruz das Almas	Bahia	Latossolo Amarelo distrófico típico A moderado, álico	Ferralsol	H2	argila arenosa	52,3	7,2	40,5	1,56	0,3	20,4	0,07	0,13
FE2	Bw2	72	120					B2	argila	42,4	10,9	46,7	1,42	0,3	120,0	0,07	0,17
FE2	Bw3	120	160					C2	argila	33,8	7,3	58,9	1,38	0,3	110,0	0,06	0,15
FE3	Bw1	27	54	Paragominas	Pará	Latossolo Amarelo álico A moderado	Ferralsol	B1	argila	2,0	9,0	89,0	1,16	1,28	4,8	0,03	0,15
FE3	Bw2	54	102					B1	argila	2,0	9,0	89,0	1,22	0,69	0,0‡‡	0,04	0,12
FE3	Bw3	102	158					B1	argila	2,0	11,0	87,0	1,31	0,483	0,0‡‡	0,04	0,09
FE3	Bw4	158	235					G2	argila	4,0	18,0	78,0	1,30	0,431		0,05	0,08

†PT - profundidade do topo; PB - profundidade da base; ¶¶ - A descrição pedológica dos perfis é a mesma apresentada no trabalho de origem, o qual considerou o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) vigente na época da realização do estudo; ‡ BD - densidade do solo; OM - teor de matéria orgânica; § Ks - condutividade hidráulica saturada, valor medido ¶ calculado pelo SPSCS; *a* - capacidade de ar; *w* - capacidade de água; ‡‡valor nulo de Ks, possivelmente significando permeabilidade muito baixa.

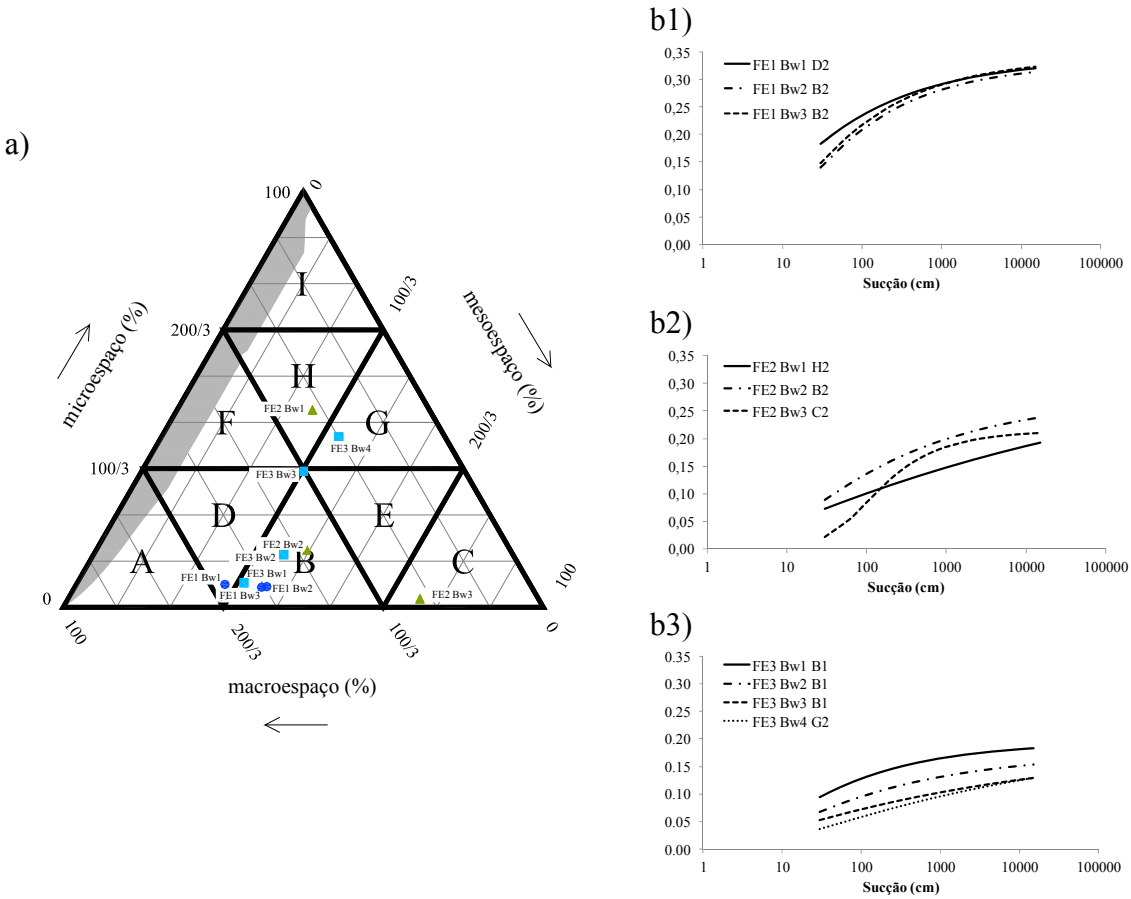


Figura 6.8 - a) três exemplos de perfis de Ferralsols, FE1, FE2 e FE3, no triângulo estrutural; curvas de disponibilidade de ar em várias profundidades dos perfis b1) FE1; b2) FE2 e b3) FE3; valores de sucção na escala logarítmica.

6.4 Relações com a densidade do solo e teor de matéria orgânica

A densidade do solo (BD) e teor de matéria orgânica (OM) são atributos pedológicos reconhecidamente ligados à estrutura dos vazios. O primeiro, por ser diretamente relacionado à porosidade, o segundo, por sua atuação como agente agregador das partículas. Em vista disso, e por sua alta frequência de determinação, essas variáveis são muito utilizadas na estimativa de retenção de água pelas funções de pedotransferências (Schaap *et al.*, 2001, Saxton e Rawls, 2006). Elas são também largamente empregadas como indicadores de qualidade física dos solos e na avaliação dos impactos nos mesmos em função de práticas de manejo, conforme parcialmente já referido no Capítulo 4.

Visando ampliar o entendimento das relações entre essas duas variáveis e a estrutura porosa dos solos nas suas diferentes escalas de representação, foi estabelecido um estudo de relacionamento entre o SPSCS, BD e OM para um amplo e diverso conjunto de dados. Com esse propósito, foram selecionadas amostras genuínas do banco

de dados de solos internacionais descrito no Capítulo 5, com informações das duas variáveis em 2756 e 2539 amostras, respectivamente.

Para as amostras agrupadas em cada uma das nove Ordens e quatro Subordens do sistema foram elaborados histogramas da distribuição percentual dos valores de BD e OM (Figuras 6.9 e 6.10). Os histogramas de BD e OM nas Subordens foram efetuados apenas para as amostras reunidas nos quatro agrupamentos de porosidade ativa previstos pelo sistema, sem levar em consideração a sua classificação estrutural no nível categórico superior (Ordem), o que aumentaria demasiadamente o número de histrogramas a serem avaliados. Para elaboração desses histogramas, levou-se em conta o número total de amostras contidas em cada uma das Ordens e Subordens do sistema. As semelhanças e diferenças desses histogramas entre as Ordens ou Subordens, separadamente, foram avaliadas visualmente, tanto para BD como OM. Semelhanças desses histogramas entre as Ordens ou Subordens indicariam que não há um agrupamento específico de valores de BD ou OM influenciando essas classes estruturais.

Não se observou uma distribuição muito discrepante dos valores de BD ou OM entre as nove Ordens, havendo uma razoável semelhança entre os plotes nas diferentes Ordens do sistema (Figura 6.9). As maiores diferenças envolveram as Ordens A e D, com relação a BD, e D e F, com relação a OM. Dessa análise simplificada se infere que, a princípio, não há fortes indicativos de que a BD e OM sejam muito relevantes na representação das Ordens.

No nível de Subordem (Figura 6.10), por outro lado, apesar de ainda razoavelmente semelhantes entre si, os histogramas dessas duas variáveis nas Subordens 1, 2 e 3 mostraram diferenças evidentes com relação às distribuições dos valores de BD e OM na Subordem 4. Esse resultado preliminar indica que as Subordens estruturais podem de uma certa forma ser parcialmente inferidas por essas duas variáveis do solo. Esse fato pôde ser melhor esclarecido quando se estabeleceu correlações entre BD, OM e a porosidade ativa, Φ-θr, que é o parâmetro estrutural representativo da Subordem. Na Tabela 6.5 são ilustrados os módulos dos coeficientes de correlações para os pares de dados: porosidade ativa x BD; porosidade ativa x OM; porosidade ativa x f(BD,OM), onde f(BD,OM) é a função bilinear de regressão de Φ-θr a partir dos dados de BD e OM. Foi aqui utilizado o coeficiente de correlação de Spearman (estatística não paramétrica), pois os valores de BD e OM na base de dados do estudo não seguiram

uma distribuição normal pelo teste de Shapiro-Wilk (Shapiro e Wilk, 1965). Segundo a Tabela 6.5, todas as correlações foram significativas a nível de 5%. Percebe-se que a BD foi a variável que mais se correlacionou com a porosidade ativa, com |r|=0.54, que é um valor interpretado como representando boa qualidade de correlação, segundo Cohen (1988). Um insignificante incremento de correlação foi obtido com a inclusão da OM acompanhando BD (Tabela 6.5). Esses fatos confirmam, portanto, o potencial do uso da BD como estimador da Subordem, potencial esse superior ao apresentado pela OM.

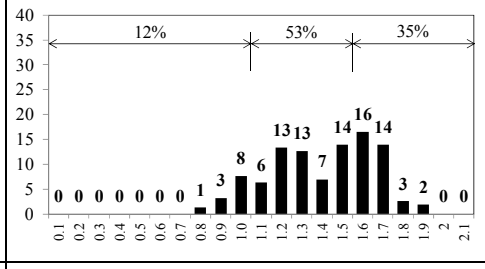
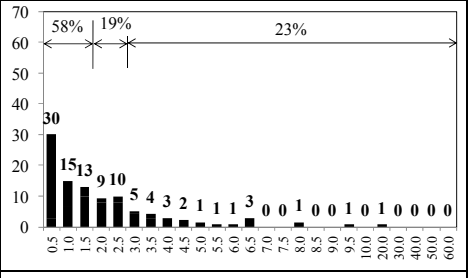
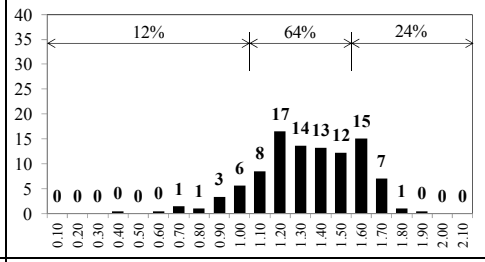
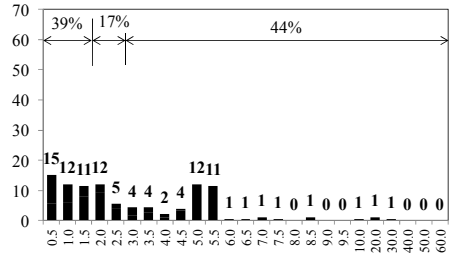
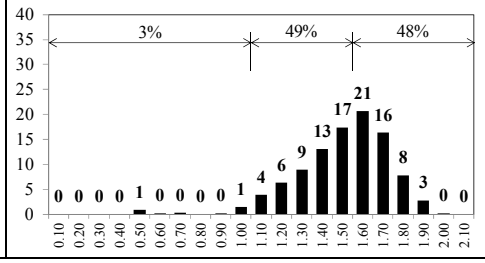
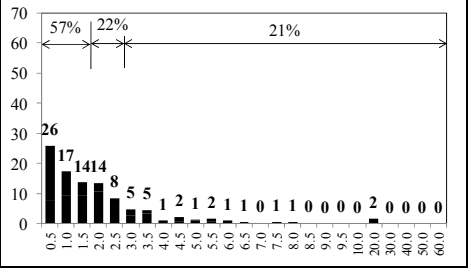
OR†	N_{BD}/ N_{OM} †	a) Histograma de distribuição percentual dos valores de densidade do solo	b) Histograma de distribuição percentual dos valores de teor de matéria orgânica
A	158/ 140		
D	212/ 184		
B	654/ 555		

Figura 6.9 - Histograma da distribuição percentual nas Ordens estruturais dos valores de a) densidade do solo e b) teor de matéria orgânica para a base de dados do estudo, com o destaque para os percentuais totais nas classes baixas, moderadas e altas arbitradas para esses atributos do solo (segundo a seção 6.3.2). † OR - Ordem de solo; N_{BD} - número de amostras com valores de densidade do solo (BD); N_{OM} - número de amostras com valores de teor de matéria orgânica (OM).

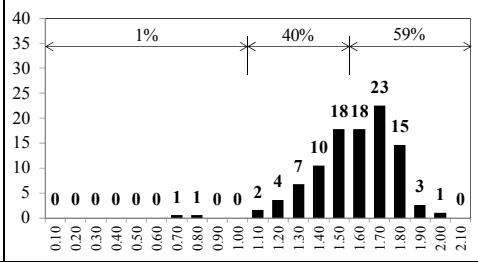
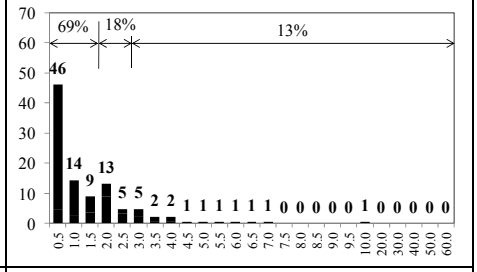
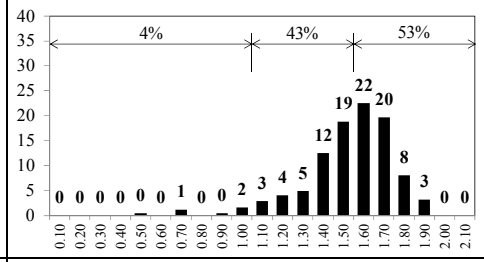
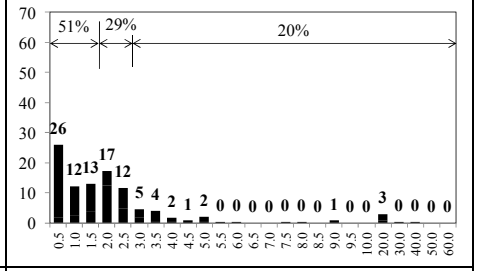
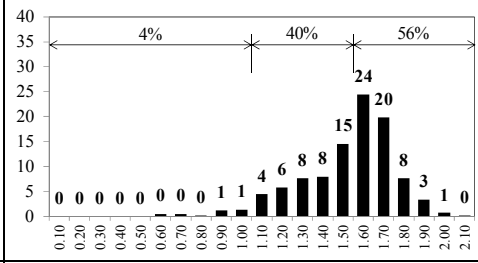
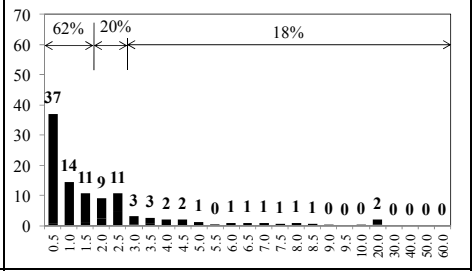
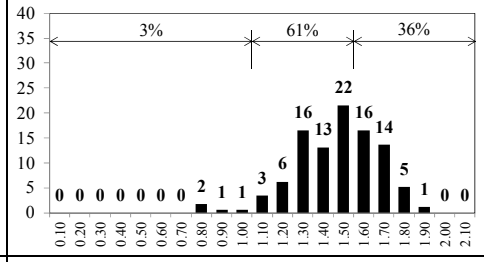
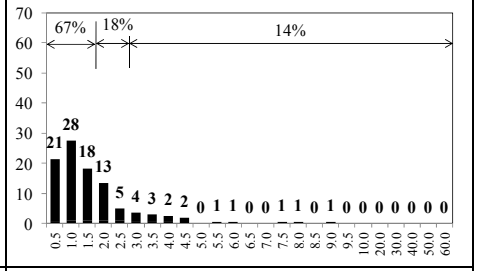
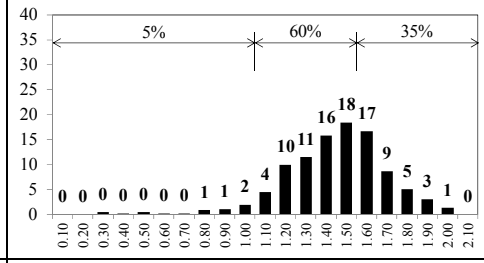
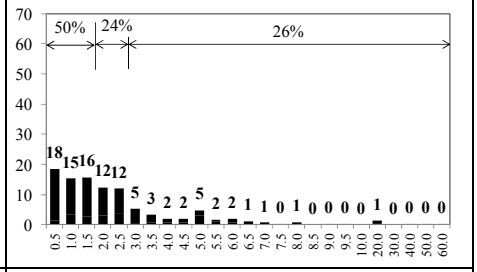
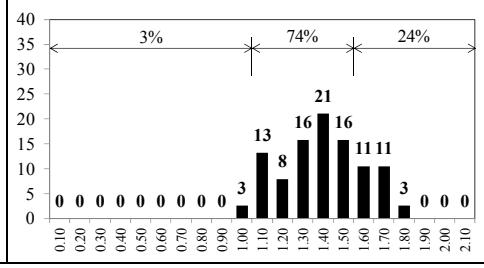
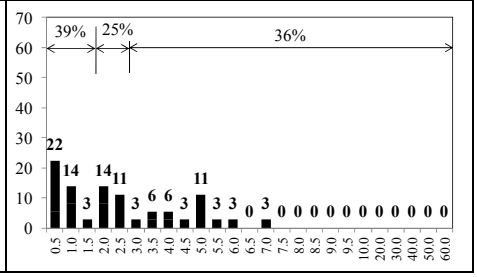
OR†	N_{BD}/ N_{OM} †	a) Histograma de distribuição percentual dos valores de densidade do solo	b) Histograma de distribuição percentual dos valores de teor de matéria orgânica
C	191/ 189		
E	249/ 238		
G	605/ 590		
I	176/ 163		
H	473/ 444		
F	38/ 36		

Figura 6.9 - Histograma da distribuição percentual nas Ordens estruturais dos valores de a) densidade do solo e b) teor de matéria orgânica para a base de dados do estudo, com

o destaque para os percentuais totais nas classes baixas, moderadas e altas arbitradas para esses atributos do solo (segundo a seção 6.3.2). † OR - Ordem de solo; N_{BD} - número de amostras com valores de densidade do solo (BD); N_{OM} - número de amostras com valores de teor de matéria orgânica (OM). (*continuação*)

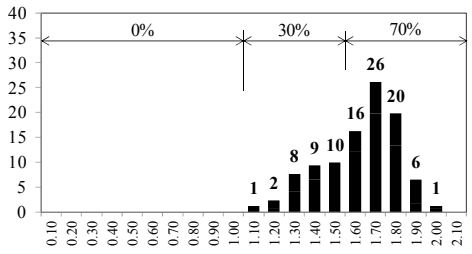
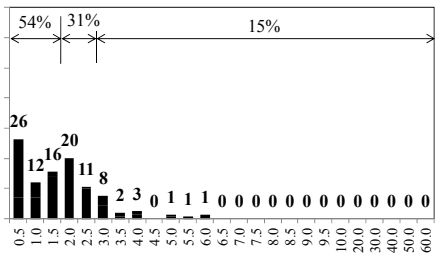
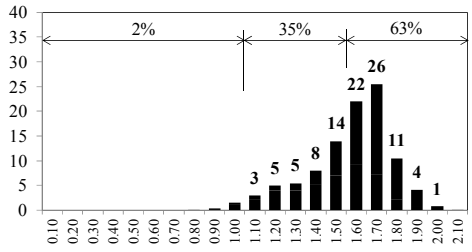
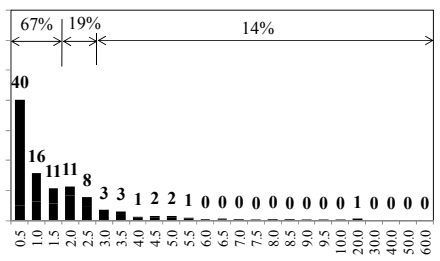
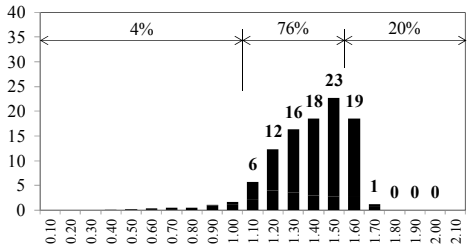
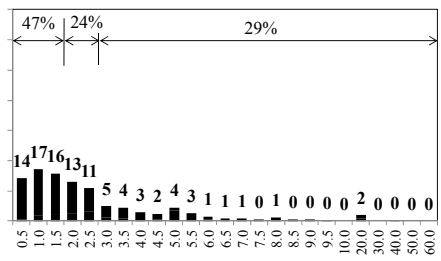
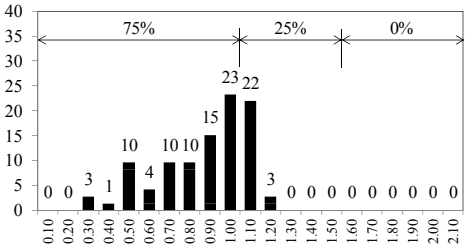
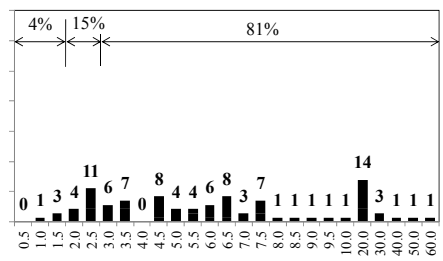
SB†	N_{BD}/ N_{OM}†	Histograma de distribuição percentual dos valores de densidade do solo	Histograma de distribuição percentual dos valores de teor de matéria orgânica
1	172/ 159		
2	1435/ 1296		
3	1076/ 1012		
4	73/ 72		

Figura 6.10 - Histograma da distribuição percentual nas Subordens estruturais dos valores de a) densidade do solo e b) teor de matéria orgânica para a base de dados do estudo, com o destaque para os percentuais totais nas classes baixas, moderadas e altas arbitradas para esses atributos do solo (segundo a seção 6.3.2). † SB - Subordem; N_{BD} - número de amostras com valores de densidade do solo (BD); N_{OM} - número de amostras com valores de teor de matéria orgânica (OM).

Tabela 6.5 - Módulo dos coeficientes de correlação de Spearman entre a porosidade ativa e outros atributos do solo, com os valores p de significância da correlação.

Pares	|r|	p
Porosidade ativa x BD	0,538	<0,05
Porosidade ativa x OM	0,336	<0,05
Porosidade ativa x f(BD, OM)	0,551	<0,05

Visando estabelecer uma abordagem prática para estimativa das Subordens por meio de valores de BD e OM, foram definidos, para três faixas de valores desses atributos, os percentuais correspondentes ao número de amostras nas quatro Subordens do sistema, em relação ao número total de amostras contidas em cada uma dessas faixas. Essas faixas de valores de BD e OM foram definidas arbitrariamente com base nos histogramas da Figura 6.10. Os resultados são apresentados na Figura 6.11.

De acordo com a Figura 6.11a, observa-se que a maioria das amostras (80%) com valores de BD $\leq$ 1,0 g cm^{-3} foi alocada nas Subordens 3 e 4, o que poderia ser esperado, pois solos com baixos valores de BD são altamente porosos e, portanto, com maiores chances de sua porosidade ativa (segundo o SPSCS) ser também elevada. Esse é o caso dos solos das Subordens 3 e 4, com porosidades ativas superiores a 0,40 cm^3 cm^{-3}. Nessa faixa de valores de BD não se observaram solos na Subordem 1, com porosidades ativas muito baixas, inferiores a 0,20 cm^3 cm^{-3} (Figura 6.11a).

De acordo com a seção 6.2.1, que descreve a funcionalidade hídrica do SPSCS, pode-se confirmar, portanto, que há uma tendência de que solos com baixas densidades (BD $\leq$ 1 g cm^{-3}) não apresentem graves limitações nas capacidades de ar e água, nem de permeabilidade, o que é uma inferência prática importante já que essas funcionalidades são mais de difícil caracterização. Em contrapartida, solos com BD mais elevados, superiores a 1,5 g cm^{-3}, tiveram 83% dos seus casos abrangidos pelas Subordens de porosidades ativas mais inferiores (< 0,40 cm^3 cm^{-3}) (Subordens 1 e 2), confirmando também a relação já conhecida de que quanto maior a magnitude de BD, menor é a porosidade total do solo, e portanto, com mais tendência de apresentar baixa porosidade ativa. Nesses casos de solos da Subordem 1 e 2, pela análise contida na seção 6.2.1, em solos fora das Ordens B, E e C (Figura 6.1) é grande a possibilidade de restrições em algumas das funcionalidades hídricas estudadas. Portanto, à exceção dessas três Ordens, é provável que solos com densidade superior a 1,5 g cm^{-3} apresentem restrições nas suas

capacidades de ar e água ou/e em sua permeabilidade, conforme também destacado por Guimarães *et al*. (2013). Para valores intermediários a esses dois casos extremos dos valores de BD, ou seja, para 1 g cm^{-3} < BD ≤ 1,5 g cm^{-3}, observou-se maior predominância das Subordens 2 e 3 (95% dos casos, 59% na Subordem 3 e 36% na Subordem 2), que tendem a incorporar solos com funções hídricas bastante variadas, conforme seção 6.2.1. Desta forma, torna-se difícil enumerar tendências sobre as funcionalidades hídricas dos solos para esse caso intermediário.

No que se refere a OM, a tendência de predominância das Subordens nas suas diferentes faixas de valores foi em sentido inverso da observada para as faixas de valores de BD (Figura 6.11b). Para muito baixas magnitudes de OM (OM ≤ 0,5%), confirmou-se a predominância das Subordens 1 e 2 em cerca de 80% dos solos, como ocorreu nos solos com BD>1,5 g cm^{-3}. Por outro lado, para OM superiores a 6%, as Subordens 3 e 4 foram as mais frequentes, também abrangendo cerca de 80% desses solos, o que indica, em geral, grande chance de os mesmos não apresentarem restrição severa nas funcionalidades hídricas estudadas (seção 6.2.1), como também inferido para os solos com valores de BD ≤ 1 g cm^{-3}.

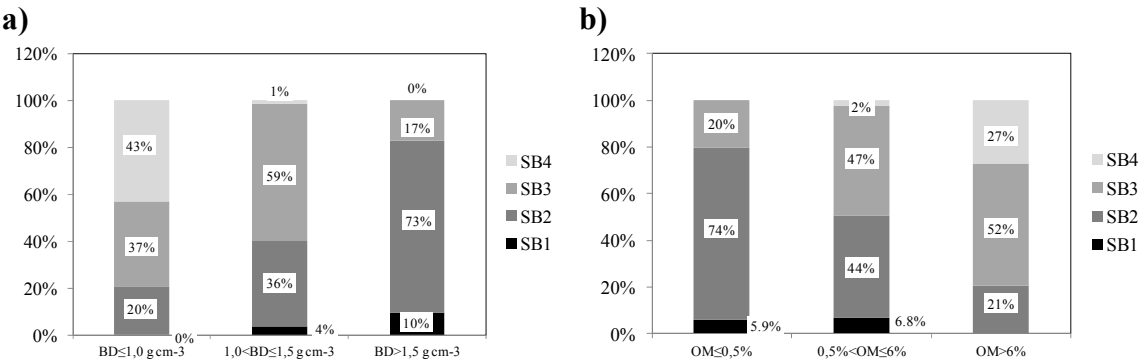


Figura 6.11 - Distribuição percentual dos dados de a) densidade do solo (BD) e b) teor de matéria orgânica (OM) da base de dados do estudo nas quatro Subordens, levando-se em conta três faixas de valores de densidade do solo e teor de matéria orgânica. O percentual estabelecido em cada Subordem foi definido para o montante total de amostras contidas em cada uma das referidas faixas. SB1 - Subordem 1; SB2 - Subordem 2; SB3 - Subordem 3; SB4 - Subordem 4.

6.5 Conclusão

Relações entre o SPSCS e atributos e outras características do solo foram discutidas neste Capítulo, com ênfase nos aspectos de funcionalidade hídrica, textura para diferentes solos, densidade do solo e matéria orgânica. Uma ampla e diversa base

de dados de solos internacionais foi utilizada nesse propósito. Desse estudo foi possível estabelecer inferências significativas envolvendo o sistema proposto e algumas características do solo, além de permitir suscitar temas pedológicos relevantes sobre o comportamento estrutural em diferentes perfis de Ferralsols, ou envolvendo diferentes solos com similaridade ou dissimilaridades texturais/estruturais e/ou de classe pedológica. Todos esses resultados evidenciam a potencialidade do SPSCS como uma ferramenta de entendimento hidropedológico, que pode também lançar luz sobre novas frentes no desenvolvimento de funções de pedotransferências de propriedades hidráulicas que levem em consideração a estrutura porosa dos solos.

CAPITULO 7 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O objetivo central desta tese foi investigar e propor novo tratamento da avaliação da estrutura dos solos com base nos vazios. Diante desse novo referencial, buscou-se, num primeiro momento, ilustrar a importância da caracterização de variáveis representativas da estrutura porosa dos solos na estimativa de propriedades hidráulicas.

O estudo desenvolveu uma pesquisa preliminar de comparação de desempenho da predição de retenção de água e condutividade hidráulica saturada (Ks) em solos de ambiente tropical e temperado, pelo uso de funções de pedotransferência (PTFs). Desse exercício, confirmou-se a importância de se incorporar informações sobre a estrutura do solo nessas predições.

No contexto deste trabalho, foi também desenvolvido um amplo banco de dados físico-hídricos em solos brasileiros, denominado HYBRAS, incluindo, entre outras informações, a discriminação dos métodos de determinação das propriedades do solo. Ainda nessa linha de pesquisa, foram desenvolvidas algumas PTFs de Ks, levando em consideração uma numerosa base de dados de solos internacionais compilada nesta tese. A pedofunção proposta, que teve como preditor a porosidade efetiva, entendida como a porosidade total menos o conteúdo de água na sucção de 330 cm, foi a que apresentou melhor desempenho em comparação a outras PTFs de Ks aqui desenvolvidas ou propostas pela literatura. Essa pedofunção foi utilizada na previsão da funcionalidade hídrica pelo SPSCS.

Pelo sistema de classificação estrutural dos solos proposto nesta tese, o SPSCS, os solos foram reunidos e classificados em Famílias estruturais, que buscaram agrupar amostras com curvas de disponibilidade de ar [$A_a(s)$] semelhantes, onde s é a sucção. Essas curvas são o complemento da curva de retenção de água em relação ao conteúdo de água na saturação (Φ). As Famílias foram consequência da conjugação de grupos de curvas semelhantes de distribuição acumulada dos tamanhos dos poros [A(s)], representados pelas Ordens estruturais, com agrupamentos de porosidades ativas (Φ-θr) próximas, caracterizados pela Subordens, onde θr é a umidade residual prevista pelo SPSCS.

O SPSCS concebeu um triângulo estrutural muito similar em conceito ao triângulo textural, onde nove Ordens são previstas (de A a I) e cujos lados contêm as escalas, de 0 a 1, de representação de três classes de tamanho dos poros: microespaço,

mesoespaço e macroespaço. Foi também previsto um método protocolado para parametrização da curva A(s) utilizando a equação de van Genuchten (VG). Desse protocolo, determinaram-se, de forma padronizada, os parâmetros α, m e θr da equação de VG, supondo-se conhecido o conteúdo de água na saturação. A curva A(s) foi representada no intervalo de sucção entre 30 cm a 18000 cm, onde é mais seguramente reconhecida a adequação do modelo de VG na predição de dados de retenção de água. O SPSCS também propôs quatro faixas de valores de porosidade ativa para representar as quatro Subordens previstas (de 1 a 4). Das nove Ordens e quatro Subordens estruturais, foi possível consolidar as 36 Famílias de solo.

Visando avaliar o grau de similaridade das curvas de disponibilidade de ar em cada Família, foi construída uma ampla e bem distribuída variedade de curvas $A_a(s)$ nessas Famílias, chamadas de curvas-tipo $A_a(s)$. A partir desse procedimento, constatou-se que, em geral, o nível de similaridade entre as curvas-tipo dentro das Famílias foi satisfatório.

Como a metodologia do sistema foi baseada no modelo de VG que nem sempre é capaz de reproduzir satisfatoriamente os dados experimentais de retenção de água, o SPSCS previu três grupos de amostras de solos: genuínos, adotados e rejeitados, que informam o grau de acurácia de predição do modelo de VG. Curvas modeladas de $A_a(s)$ com forte aderência aos dados experimentais indicam que as amostras correspondentes foram de solos genuínos; solos rejeitados, por outro lado, foram aqueles diante dos quais o modelo mostrou-se inadequado e que, portanto, não podem ser classificados; solos adotados corresponderam às amostras onde o modelo de VG se aplicou com menor acurácia em relação aos solos genuínos, mas que ainda podem ser classificados.

O estudo compilou uma ampla base de dados de solos de diferentes texturas e pedoambientes, aí incluindo o HYBRAS, com 3143 amostras, a partir da qual foi possível avaliar e validar a metodologia do SPSCS. Constatou-se que todas as Ordens e a maioria das Famílias foram representadas por esse conjunto de dados. O protocolo de classificação do SPSCS também se mostrou apropriado a esses dados. Todos esses fatores ilustram a potencialidade de aplicação do SPSCS para solos com diversidade estrutural e pedogenética.

Com vistas a explorar o potencial do SPSCS como ferramenta investigativa, foram estabelecidas, de forma introdutória, relações entre o sistema e a funcionalidade hídrica e outras características do solo, levando em conta solos brasileiros de ambiente tropical e europeus de clima temperado da base de dados do estudo, bem como poucos

exemplares de solos de origem vulcânica recente identificados na literatura. Algumas inferências envolvendo o sistema proposto e essas características foram estabelecidas. Exemplos dessas inferências, entre outras, foram para os solos-tipo altamente microespaçosos da Ordem I, que registraram, em geral, restrição em ar e tendência de baixa a moderada permeabilidade (Ks), ou para os altamente macroespaçosos, da Ordem A, que tiveram, em geral, baixa capacidade de água e tendência de alta a moderada permeabilidade. Outra ilustração refere-se aos solos-tipo com porosidades ativas superiores a 0,40 cm^3 cm^{-3}, que corresponderam aos elementos das Subordem 3 e 4. Esses não apresentaram geralmente restrições significativas nas suas funções hídricas, à exceção principalmente das Ordens A e I, mas também da G (em menor escala).

Das relações com densidade do solo e matéria orgânica, foi possível constatar algumas tendências, principalmente no nível de Subordem do sistema. Solos com baixa densidade ($\leq$1 g cm^{-3}) ou alto teor de matéria orgânica (>6%), por exemplo, foram dominados pelas Subordens 3 e 4, que, conforme descrito acima, não tiveram geralmente graves limitações nas suas funcionalidades hídricas.

O SPSCS também mostrou-se apto para confirmar tendências esperadas de comportamento estrutural com relação à textura do solo. Foram os casos dos numerosos solos de textura fina das regiões temperadas europeias que se reuniram nas classes de estrutura com dominação microespaçosa, Ordens I, H e G, ou dos solos arenosos que se concentraram nas estruturas de predominância macroespaçosa, Ordens A, D e B.

Por outro lado, pelo SPSCS, foi possível também constatar relações menos esperadas, como, por exemplo, os numerosos casos de solos intemperizados de textura argilosa de ambiente tropical se comportando estruturalmente como solos arenosos nas classes A, D e B. Adicionalmente, em casos mais raros, também apresentando estrutura típica dos solos argilosos de Ordem H. Diversas outras ilustrações de relações entre o SPSCS e características dos solos foram citadas no estudo, todas reforçando a potencialidade do SPSCS como ferramenta de esclarecimento hidropedológico, que pode também lançar luz sobre novas frentes no desenvolvimento de funções de pedotransferências de propriedades hidráulicas que levem em consideração a estrutura porosa dos solos.

As classes propostas pelo SPSCS podem ser avaliadas, quanto à geometria dos vazios, a partir de estudos de correlação envolvendo outros métodos de caracterização da estrutura porosa. Sugere-se, também, a aplicação do SPSCS para uma variedade de

solos maior do que a aqui apresentada e um estudo mais aprofundado das relações entre o SPSCS e classes pedológicas.

Apontam-se como outras sugestões deste trabalho a validação das faixas de sucção s1, s2 e s3 do protocolo de parametrização da curva A(s) adotado pelo sistema e refinamento do procedimento proposto de otimização dos parâmetros de VG visando a obtenção de ajustes mais aderentes a realidade física envolvendo a retenção de água no solo.

Complementarmente, propõe-se extensão do SPSCS para representação de solos com curvas de disponibilidade de ar com comportamento de porosidade multidual. Uma investigação mais apurada das relações entre o SPSCS e características do solos, incluindo também informações mineralógicas, uso do solo, posição no relevo, bem como outros aspectos, é também recomendada. O uso do SPSCS na confecção de mapas estruturais e das funções hídricas dos solos é tema também passível de exploração. O sistema também pode contribuir para a avaliação da aptidão agrícola das terras e da aptidão de terras para irrigação.

Espera-se, enfim, que o trabalho estimule sobretudo a reflexão para análise de processos de escoamento no meio poroso que operam em diferentes escalas a partir da nova concepção de classificação estrutural proposta para os vazios do solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abbaspour, K.C. e Moon, D.E., 1992, *Relationships between conventional field information and some soil properties measured in the laboratory*, Geoderma, 5(1-2): 119-140.

Abdelbaki, A.M., Youssef, M.A., Naguib, E.M.F., Kiwan, M.E., El-giddawy, E.I., 2009, *Evaluation of pedotransfer functions for predicting saturated hydraulic conductivity for U.S. soils*, ASABE, Reno, Nevada, doi: 10.13031/2013.27309

Aguiar, M.I., 2008, *Qualidade física do solo em sistemas agroflorestais. Master Dissertation*. Programa de pós-graduação em solos e nutrição de plantas. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, Brasil.

Ahuja, L.R., Cassel, D.K., Bruce, R.R., Barnes, B.B., 1989, *Evaluation of spatial distribution of hydraulic conductivity using effective porosity data*, Soil Sci. 148, 404-411, doi: 10.1097/00010694-198912000-00002.

Ahuja, L.R., Naney, J.W., Green, R.E., Nielsen, D.R., 1984, *Macroporosity to characterize spatial variability of hydraulic conductivity and effects of land management*, Soil Sci. Soc. Am. J. 49, 699-702, doi: 10.2136/sssaj1984.03615995004800040001x

Aimrun,W., Amin, M.S.M., Eltaib, S.M., 2004, *Effective porosity of paddy soils as an estimation of its saturated hydraulic conductivity,* Geoderma. 121(3-4), 197-203, http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.11.010.

Alleoni, L.R.F. e Camargo, O.A., 1994, *Atributos físicos de latossolos ácricos do norte paulista. Scientia Agricola*, 51(2), 321-326, https://dx.doi.org/10.1590/S0103-90161994000200019.

Almeida, A. Van Der L. de, Corrêa, M.M., Lima, J.R.S., Souza, E.S., Santoro, K.R., Antonino, A.C.D., 2015, *Atributos Físicos, Macro e Micromorfológicos de Neossolos Regolíticos no Agreste Meridional de Pernambuco*, R. Bras. Ci. Solo 39(5), 1235-1246, https://dx.doi.org/10.1590/01000683rbcs20140757.

Amer, A. M., 2012, *Water flow and conductivity into capillary and non-capillary pores of soils*, Journal of soil science and plant nutrition, 12(1), 99-112. https://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162012000100009.

Anderson, J.L. e Bouma, J., 1973, *Relationships between saturated hydraulic conductivity and morphometric data of an Argillic horizon*, Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 37, 408-412, doi:10.2136/sssaj1973.03615995003700030029x

Andrade, C.L.T., 1987, *Balanço de água de um Latossolo Vermelho-escuro álico, cultivado com milho (ZeamaysL.), sob irrigação por aspersão*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, Brasil.

Araujo Junior, C.F., Dias Junior, M.S., Guimarães, P.T.G., Alcântara, E.N., 2011, *Sistema poroso e capacidade de retenção de água em Latossolo submetido a diferentes manejos de plantas invasoras em uma lavoura cafeeira*, Planta Daninha,Viçosa, Minas Gerais, 29(3):499-513.

Armindo, R.A. e Wendroth, O., 2016, *Physical Soil Structure Evaluation based on Hydraulic Energy Functions*, Soil Sci. Soc. of Am. J., 80(5): 1167-1180.

Assad, M.L.L., Sans, L.M.A., Assad, E.D., 2001, *Relação entre água retida e conteúdo de areia total em solos brasileiros*, Revista Brasileira de Agrometeorologia, 9(3): 588-596.

Azevedo, J.A., 1976, *Relações físico-hídricas em solos de terraço e de meia encosta de Viçosa (MG),* Dissetação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, Brasil.

Ball, B.C., Batey, T., Munkholm, L.J., 2007, *Field assessment of soil structural quality – a development of the Peerlkamp test*. Soil use and Management, 23(4): 329-337, doi: 10.1111/j.1473-2743.2007.00102.x.

Barcelos, A.A., 1996, *Infiltração de água em um Latossolo, sob chuva de alta intensidade, em diferentes sistemas de manejo,* Dissertação de Mestrado, Programa de pós-graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

Barros, A.H.C. e De Jong van Lier, Q., 2014, *Pedotransfer functions for Brazilian soils*. In: Teixeira, W.G., M.B.Ceddia, M.V.Ottoni, G.K. Donnagema (eds.). Application of Soil Physics in Environmental Analyses: Measuring, Modelling and Data Integration, 1st edn. Springer, p 131-162.

Barros, A.H.C., De Jong van Lier, Q, Maia, A.H.M., Scarpare, F.V., 2013, *Pedotransfer functions to estimate water retention parameters of soils in northeastern Brazil*. R. Bras. Ci. Solo, 37: 379-391, doi: 10.1590/S0100-06832013000200009.

Batjes, N.H., 1996, *Development of a world data set of soil water retention properties using pedotransfer rules*, Geoderma, 71: 31-52, doi: 10.1016/0016-7061(95)00089-5.

Baver, L.D., Gardner, W.R., 1972, *Soil physics*, 4th ed. John Wiley & Sons, New York.

Benedetti, M.M., Sparovek, G., Cooper, M., Curi, N., Carvalho Filho, A., 2008, *Coverage and potential use of a soil profile database in Brazil*, R. Bras. Ci. Solo, 32: 2591-2600, doi: 10.1590/S0100-06832008000600036.

Beven, K., e Germann, P., 1982, *Macropores and water flow in soils*, Water Resour. Res., 18(5), 1311–1325, doi:10.1029/WR018i005p01311.

Bhering, S.B., 2007, *Influência do manejo do solo e da dinâmica da água no sistema de produção do tomate de mesa: subsídios a sustentabilidade agrícola do Noroeste Fluminense*, Tese de Doutorado, Programa de Pós Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

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

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)*, Agric. Water Manage, 111: 1–10. doi:10.1016/j.agwat.2012.04.006.

Botula, Y.D., Van Ranst, E., Cornelis, W.M., 2014, *Pedotransfer functions to predict water retention for soils of the humid tropics: a review*, Rev. Bras. Ciênc. Solo, 38(3): 679-698, http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832014000300001.

Bouma, J., 1989, *Using soil survey data for quantitative land evaluation,* Adv. Soil Sci., 9:177-213.

Bouma, J., Jongerius, A., Boersma, O., Jager, A., Schoonderbeek, D., 1977, *The Function of Different Types of Macropores During Saturated Flow through Four Swelling Soil Horizons*, Soil Sci. Soc. Am. J., 41:945-950. doi:10.2136/sssaj1977.03615995004100050028x.

Bouma, J., Jongerius, A., Schoonderbeek, D., 1979, *Calculation of saturated hydraulic conductivity of some pedal clay soils using micromorphometric data*, Soil Sci. Soc. Am. J., 43, 261-264, doi:10.2136/sssaj1979.03615995004300020002x.

Brewer, R., 1964, *Fabric and mineral analysis of soils*, Wiley, New York.

Bronick, C.J. e Lal, R., 2005, *Soil structure and management: A review,* Geoderma, 124:3-22.

Brooks, R.H. e Corey, A.T., 1964, *Hydraulic Properties of Porous Media*, Hydrol. Pap.No. 3, Colorado State Univ., Ft. Collins.

Bullock, P., Fedoroff, N., Jongerius, A., Stoops, G., Tursina, T., 1985, *Handbook for soil thin section description*, Wolverhampton: Waine Research Publications, 153p.

Carducci, C.E., Oliveira, G.C., Severiano, E.C., Zeviani, W.M., 2011, *Modeling the water retention curve in Oxisols using the Double Van Genuchten Equation*, R. Bras. Ci. Solo, 35:77-86, doi: 10.1590/S0100-06832011000100007.

Cassel, D.K., Raczkowski, C.W., Denton, H.P, 1992, *Tillage effects on corn production and soil physical conditions*. Soil Sci. Soc. Am. J., 59:1436-1443.

Cassel, D.K., Ratliff, L.F., Ritchie, J.T., 1983, *Models for estimating in-situ potential extractable water using soil physical and chemical properties,* Soil Sci. Soc. Am. J., 47: 764-769, doi:10.2136/sssaj1983.03615995004700040031x.

Cintra, F.L.D. e Libardi, P.L., 1998, *Physical characterization of a soil class of the "Tabuleiro Costeiro" ecosystem*, Sci. Agric. Piracicaba, 55(3):367-378, doi: 10.1590/S0103-90161998000300004.

Coelho, M.R., Fidalgo, E.C.C., Araujo, F.O., dos Santos, H.G., Santos, M.L.M., Pérez, D.V., Moreira, F.M.S., 2005a, *Solos das Áreas-Piloto do Projeto ProjetoBios Brasil, Benjamin Constant, AM*, Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 67, Embrapa.

Coelho, M.R., Fidalgo, E.C.C., Araujo, F.O., dos Santos, H.G., Santos, M.L.M., Pérez, D.V., Moreira, F.M.S., 2005b, *Levantamento Pedológico de uma Área-Piloto Relacionada ao Projeto BiosBrasil, Benjamin Constant, AM: Janela 6*, Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 68, Embrapa.

Coen, G. M. e Wang, C., 1989, *Estimating vertical saturated hydraulic conductivity from soil morphology in alberta*, Canadian Journal of Soil Science, 69:1-16, https://doi.org/10.4141/cjss89-001.

Cohen, J., 1998, *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*, Second Edition. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.

Coles, M. E., Hazlett, R. D., Muegge, E. L., Jones, K. W., Andrews, B., Dowd, B., Siddons, P., Peskin, A., Spanne, P., Soll, W., 1998, *Developments in synchrotron X-ray microtomography with applications to flow in porous media*. SPE Reservoir Evaluation and Engineering, 1, 288-296.

Cooper, M. e Vidal-Torrado, P., 2005, *Caracterização morfológica, micromorfológica e físico-hídrica de solos com horizonte B nítico*, Rev. Bras. de Ciência do Solo, 29(4), 581-595, https://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832005000400011.

Cooper, M., Medeiros, J.C., Rosa, J.D., Soria, J. E., Toma, R.S., 2013, *Soil functioning in a toposequence under rainforest in São Paulo, Brazil*, R. Bras. Ci. Solo, 37:392-399.

Coppola, A., 2000, *Unimodal and bimodal description of hydraulic properties for aggregated soils*, Soil Sci. Soc. Am. J., 64, 1252 – 1262.

Cornelis, W.M., Ronsyn, J., Meirvenne, M.V., Hartmann, R., 2001, *Evaluation of Pedotransfer Functions for Predicting the Soil Moisture Retention Curve*, Soil Sci. Soc. Am. J., 65:638–648, doi: 10.2136/sssaj2001.653638x.

Cosby, B.J., Hornberger, G.M., Clapp, R.B., Ginn, T.R., 1984, *A statistical exploration of soil moisture characteristics to the physical properties of soils*, Water Resour Res., 20, 682–90, doi: 10.1029/WR020i006p00682.

Costa, A. da, Albuquerque, J.A., Almeida, J.A. de, Costa, A. da, Luciano, R.V., 2013, *Pedotransfer functions to estimate retention and availability of water in soils of the state of Santa Catarina, Brazil*, R. Bras. Ci. Solo, 37:889-910, doi: 10.1590/S0100-06832013000400007.

Costa, A.C.S. e Libardi, P.L., 1999, *Caracterização físico-hídrica de um perfil de Terra Roxa Latossólica pelo método do perfil instantâneo*, R. Bras. Ci. Solo, 23(3): 669-678, doi: http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06831999000300021.

Costa, A.C.S., 1986, *Balanço hídrico das culturas de feijão (Phaseolusvulgaris, L.) e milho (Zeamays, L.) em condições de campo*, Dissertação de Mestrado, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, São Paulo, Brasil.

Costa, A.E.M. da, 1993, *Quantificação de atributos físico de solos de várzea, relacionados com a disponibilidade de água, o espaço aéreo e a consistência do solo*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil.

Crawford, J.W., Matsui, N. Young, I.M., 1995, *The relation between the moisture-release curve and the structure of soil*, European Journal of Soil Science, 46: 369–375, doi:10.1111/j.1365-2389.1995.tb01333.x.

Dane, J.H. e Puckett, W., 1994, *Field soil hydraulic properties based on physical and mineralogical information,* In: van Genuchten M.Th *et al.* (Eds). Proceedings of the international workshop on indirect methods for estimating the hydraulic properties of unsaturated soils, Riverside (CA), University of California, pp. 389–403.

Das, B. S., Haws, N. W., Rao, P. S. C., 2005, *Defining Geometric Similarity in Soils*, Vadose Zone J., 4:264-270, doi:10.2136/vzj2004.0113.

Day, J.H. ed., 1983, *Manual for describing soils in the field*. LRRI 82-52. Agr. Can. Ottawa.

De Jong van Lier, Q., 2017, *Field capacity, a valid upper limit of crop available water?* Agricultural Water Management, 193, 214–220.

Dexter, A. R., 1988, *Advances in Characterization of Soil Structure,* Soil & Tillage Research, Amsterdam, Elservier Science Publishers B.V., 11,199-238.

Dooge, J.C.I., 1997, Scale problems in hydrology, In: Reflections on Hydrology , American Geophysical Union, pp.84-145.

Dörner, J., Dec, D., Peng, X., Horn, R., 2010, *Effect of land use change on the dynamic behaviour of structural properties of an Andisol in southern Chile under saturated and unsaturated hydraulic conditions*, Geoderma, 159(1-2): 189-197.

Dubinin, M.M., 1979, *Micropore structures of charcoal adsorbents. 1. A general characterization of micro- and supermicropores in the fissure model*, Proc. Acad. Sci USSR, 8:1691–1696.

Durner, W., 1994. *Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure*. Water Resour. Res., 30:211–233.

Efron, B. e Tibshirani, R.J., 1992, *An Introduction to the Bootstrap. Monographs on Statistics and Applied Probability*, Chapman and Hall, New York/USA.

Efron, B., 1980, *The Jackksnife, the Bootstrap, and other resampling plans*, Technical Report no. 163, Stanford University, California/USA.

Embrapa/FAO, 1991, *Caracterização físico hídrica dos principais solos da Amazônia legal: I Estado do Pará*, Relatório técnico, Acordo EMBRAPA/SNLCS-FAO, Belém, Brasil.

Embrechts, J., Sys, K., 1988, *Characteristics of pseudo-silts of a soil catena in a humid tropical area (South-Cameroon)*. Pédologie XXXVIII, 51–65.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa, 2011, *Manual de métodos de análise de solo*, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, Rio de Janeiro.

Entekhabi, D., Asrar, G.R., Betts, A.K., Beven, K.J., Bras, R.L., Duffy, C.J., Dunne, T., Koster, R.D., Lettenmaier, D.P., McLaughlin, D.B., Shuttleworth, W.J., Van Genuchten, M.Th., Wei, M-Y, Wood, E.F., 1999, An agenda for land surface hydrology research and a call for the second international decade, Bulletin of the American Meteorological Society, 80(10):2043-2058.

European Commission, 2009, *LUCAS 2009 (Land Use / Cover Area Frame Survey)*, Technical reference, document C-3:Land use and Land Cover:Nomenclature (version of 20/03/2009), Eurostat.

Ferreira, I.C.M., 2007, *Associação entre solos e remanescentes de vegetação nativa em Campinas, SP*, Dissertação de Mestrado, Pós-graduação do Instituto Agronômico de Campinas - IAC, Campinas, São Paulo, Brasil.

Ferreira, M. M., Fernandes, B., Curi, N., 1999, *Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos da região sudeste do Brasil*, R. Bras. Ci. Solo, 23:515-524, http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06831999000300004.

Ferreira, M.M., 2010, *Caracterização Física do Solo*. In: Física do Solo. ed: Quirijn de Jong vam Lier, Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 298p.

Fidalski, J. e 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, Santa Maria, 37(5): 45-89, http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782007000500015.

Fiorin, T.T., 2008, *Estimativa da infiltração de água no solo a partir de pedofunções*, PhD thesis, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil.

Fontes, J.C., Gonçalves, M.C., Pereira, L.S., 2004, *Andosols of Terceira, Azores: measurement and significance of soil hydraulic properties*, Catena, 56: 145-154, doi:10.1016/j.catena.2003.10.008.

Franzmeier, D.P., 1991, *Estimation of hydraulic conductivity from effective porosity data for some Indiana soils*, Soil Sci. Soc. Am. J. 55, 1801-1803, doi: 10.2136/sssaj1991.03615995005500060050x.

Ghanbarian, B., Taslimitehrani, V., Pachepsky, Ya., 2017, *Accuracy of sample dimension-dependent pedotransfer functions in estimation of soil saturated hydraulic conductivity*, Catena, 149, 374–380. http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2016.10.015.

Giménez, D., 2006, *Macroporosity*, In: Lal, R. (Eds.). Encyclopedia of Soil Science, 2nd edn., Taylor & Francis, pp. 1042-1044.

Gonçalves, M.C., Pereira, L.S., Leij, F.J., 1997, *Pedo-transfer functions for estimating unsaturated hydraulic properties of Portuguese soils*, European Journal of Soil Science, 48, 387–400, doi: 10.1111/j.1365-2389.1997.tb00205.x

Greenland, D.J., 1977, *Soil damage by intense arable cultivation: temporary or permanent?* Phil. Trans. Roy Soc. London, B, 281:193-208.

Grego, C.R., Coelho, R.M., Vieira, S.R., 2011, *Critérios morfológicos e taxonômicos de Latossolo e Nitossolo validados por propriedades físicas mensuráveis analisadas em parte pela geoestatística*, R. Bras. Ci. Solo, 35:337-350, doi: http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832011000200005.

Griffiths, E., Webb, T. H., Watt, J. P. C., Singleton, P. L., 1999, *Development of soil morphological descriptors to improve field estimation of hydraulic conductivity*, Australian Journal of Soil Research, 37(5):971-982.

Guedez, J.E., Langohr, R., 1978, *Some characteristics of pseudo-silt in a soil toposequence of the Ilanos orientales*. Pédologie XXVII, 118–131, (Venezuela).

Guimarães, R.M.L., Ball, B.C., Tormena, C.A., 2011, *Improvements in the visual evaluation of soil structure*. Soil Use and Management, 27(3): 395–403, doi: 10.1111/j.1475-2743.2011.00354.x.

Guimarães, R.M.L., Tormena, C.A., Blainski, E., Fidalski, J., 2013, *Intervalo Hídrico Ótimo para avaliação da degradação física do solo*, R. Bras. Ci. Solo, 37:1512-1521.

Gwenzi, W., Hinza, C., Holmesc, K., Phillipse, I.R., Mullinsa, I.J., 2011, *Field-scale spatial variability of saturated hydraulic conductivity on a recently constructed*

artificial ecosystem, Geoderma, 166 (1), 43-56, http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.06.010

Hillel, D., 1998, Environmental Soil Physics. Fundamentals, Applications, and Environmental Considerations, 1st Edition, Academic Press, USA.

Hodgson, J.M. ed., 1976, *Soil survey field handbook*, Tech. Monograph No. 5, Soil Survey of England and Wales. Harpenden.

Hodnett, M.G. e Tomasella, J., 2002, *Marked differences between van Genuchten soil water retention parameters for temperate and tropical soils: a new water retention pedotransfer function developed for tropical soils*, Geoderma, 108: 155-180, doi: 10.1016/S0016-7061(02)00105-2.

Holden, N. M., 2001, *Description and classification of soil structure using distance transform data. European Journal of Soil Science*, 52: 529–545, doi:10.1046/j.1365-2389.2001.00403.x.

Hollis, J.M., Jones, R.J.A., Palmer, R.C., 1977, *The effects of organic matter and particle size on the water retention properties of soil soils in the West Midlands of England*, Geoderma, 17(3):225-238.

IUPAC - International Union of Pure and Applied Chemistry, 1985, *Reporting Physisorption data for gas solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity*, Pure & Applied Chemistry, 57: 603-619.

Jabro, J.D., 1992, *Estimation of saturated hydraulic conductivity of soils from particle size distribution and bulk density data*, Trans ASAE, 35(2), 557–60, doi: 10.13031/2013.28633.

Jarvis, N. J., 2007, *A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: principles, controlling factors and consequences for water quality*, European Journal of Soil Science, 58: 523–546. doi:10.1111/j.1365-2389.2007.00915.x.

Jarvis, N.J., Hollis, J.M., Nicholls, P.H., Mayr, T., Evans, S.P., 1997, *MACRO_DB: a decision-support tool for assessing pesticide fate and mobility in soils*, Environ. Model. Softw., 12 (2–3), 251–265.

Jongerius, A., 1957, *Morphologic investigation of the soil structure*, Meded. Stricht. Bodemkartering. Bodem Stud., Wageningen, the Netherlands.

Juhász, C.E.P., Cooper, M., Cursi, P.R., Ketzer, A.O. e Toma, R.S., 2007, *Savanna woodland soil micromorphology related to water retention*, Scientia Agricola, 64(4), 344-354. https://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162007000400005.

Julià, M.F., Monreal, T. E., Jiménez, A.S.C., Meléndez, E.G., 2004, *Constructing a saturated hydraulic conductivity map of Spain using pedotransfer functions and spatial prediction*, Geoderma, 123, 257–277.

Khlosi, M., Wim, M.C., Ahmed, D., Martinus, T., Donald, G., 2008, *Performance Evaluation of Models That Describe the Soil Water Retention Curve between Saturation and Oven Dryness*, Vadose Zone Journal, 7: 87-96, http://dx.doi.org/10.2136/vzj2007.0099.

King, J. J. and Franzmeier, D. P., 1981, *Estimation of saturated hydraulic conductivity from soil morphological and genetic information*, Soil Sci.Soc. Am. J., 45: 1153-1156.

Kirkham, M.B., 2014, *Field Capacity, Wilting Point, Available Water, and the Nonlimiting Water Range, Principles of Soil and Plant Water Relations (chapter 10)*, In: Principles of Soil and Plant Water Relations, 2nd Edition, Academic Press, p: 153–170, https://doi.org/10.1016/B978-0-12-420022-7.00010-0.

Klamt, E. e van Reeuwijk, L. P., 2000, *Evaluation of morphological, physical and chemical characteristics of Ferralsols and related soils*, Rev. Bras. de Ciência do Solo, 24(3), 573-587, https://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832000000300011.

Klein, V.A. e Libardi, P. L., 2002, D*ensidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo.* R. Bras. Ci. Solo, 26:857-867.

Lal, R., 1991, *Soil Structure and Sustainability*, Journal of Sustainable Agriculture, 1(4): 67-92, http://dx.doi.org/10.1300/J064v01n04_06.

Lassabatere, L., Yilmaz, D., Peyrard, X., Peyneau, P. E., Lenoir, T, Šimůnek, J., Jaramillo, R. A., 2014, *New Analytical Model for Cumulative Infiltration into Dual-Permeability Soils*, Vadose Zone Journal, 13(12): 1-15, DOI: 10.2136/vzj2013.10.0181.

Lauren, J.G., Wagenet, R.J., Bouma, J., Wosten, J.H.M., 1988, *Variability of saturated hydraulic conductivity in a Glossaquic Hapludalf with macropores*, Soil Science, 145(1), 20-27.

Leal, F.G., 2011, *Classificação e mapeamento físico-hídricos de solos do Assentamento Agrícola Sebastião Lan II, Silva Jardim - RJ*, Dissertação de Mestrado, Programa de pós-graduação em Engenharia Civil da COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

Leão, T.P., 2016, *Particle size distribution of Oxisols in Brazil*, Geoderma Regional, 7: 216-222, doi: 10.1016/j.geodrs.2016.04.003.

Lepsch, I.F., 2010, Formação e conservação dos solos, 2.ed., Oficina de Textos, São Paulo.

Lepsch, I.F., 2011, 19 liçoes de pedologia, Oficina de Textos, São Paulo.

Levine, E.R., Kimes, D.S., Sigillito, V.G., 1996, *Classifying soil structure using neural networks*, In Ecological Modelling, 92(1): 101-108, https://doi.org/10.1016/0304-3800(95)00199-9.

Lilly, A. e Lin, H., 2004, *Using soil morphological attributes and soil structure in pedotransfer functions*, Developments in Soil Science, 30, 115-141, http://dx.doi.org/10.1016/S0166-2481(04)30007-3.

Lilly, A., 2000, *The relationship between field-saturated hydraulic conductivity and soil structure: development of class pedotransfer functions*, Soil Use and Management, 16: 56–60. doi:10.1111/j.1475-2743.2000.tb00174.x.

Lin, H.S., 2003, Hydropedology: bridging disciplines, scales, and data, Vadose Zone Journal 2 :1-11.

Lin, H.S., 2012a, *Hydropedology: Addressing Fundamentals and Building Bridges to Understand Complex Pedologic and Hydrologic Interactions*, In: Lin, H.S. (eds), Hydropedology: Synergistic Integration of Soil Science and Hydrology, Academic Press, The Netherlands.

Lin, H.S., 2012b, *Understanding Soil Architecture and Its Functional Manifestation across Scales*, In: Lin, H.S. (eds), Hydropedology: Synergistic Integration of Soil Science and Hydrology, Academic Press, The Netherlands.

Lumbreiras, J.F., 1996, *Regime hídrico do solo sob cobertura de floresta e de eucalipto na pré-amazônia maranhense*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

Luxmoore, R. J., 1981, *Micro-, meso-, and macroporosity of soil*, Soil Sci. Soc. Am. J., 45:671-672.

Macedo, J., Bryant, R.B., 1987, *Morphology, mineralogy, and genesis of a hydrosequence of oxisols in Brazil*, Soil Sci. Soc. of Am. J., 51: 690–698.

Macedo, J.R., 1991, *Determinação de retenção hídrica por correlação múltipla e de variabilidade espacial em solos podzólicos de Seropédica/RJ*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

Manyame, C., Morgan, C.L., Heilman, J.L., Fatondji, D., Gerard, B., Payne, W.A., 2007, *Modeling hydraulic properties of sandy soils of Niger using pedotransfer functions*, Geoderma, 141: 407–415, doi: 10.1016/j.geoderma.2007.07.006.

Marques, J.D.O., Teixeira, W.G., Reis, A.M., Junior, O.F.C., Batista, S.M., Afonso, M.A.C.B., 2010, *Atributos químicos, físico-hídricos e mineralogia da fração argila em solos do Baixo Amazonas: Serra de Parintins*, Acta Amazonica, 40(1):1-12, doi: 10.1590/S0044-59672010000100001.

Matlab, 2014, *Matlab and Statistics Toolbox Release 2014b*, The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, United States.

McKeague, J. A., Wang C., Topp, G. C., 1982, *Estimating Saturated Hydraulic Conductivity from Soil Morphology,* Soil Sci. Soc. Am. J., 46:1239-1244. doi:10.2136/sssaj1982.03615995004600060024x.

Medeiros, J.C., Cooper, M., Rosa, J.D., Grimaldi, M., Coquet, Y., 2014, *Assessment of pedotransfer functions for estimating soil water retention curves for the amazon region*, R. Bras. Ci. Solo, 38: 730-743, doi: 10.1590/S0100-06832014000300005.

Medina, H., Tarawally, M., del Valle, A., Ruiz, M.E., 2002, *Estimating soil water retention curve in rhodic Ferralsols from basic soil data*, Geoderma, 108: 277–285, doi: 10.1016/S0016-7061(02)00135-0.

Medrado, E. 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, doi: 10.1016/j.geodrs.2014.08.003.

Mello, C.R. de., Oliveira, G.C. de, Ferreira, D.F., Lima, J.M. de, Lopes, D., 2005, *Modelos para determinação dos parâmetros da equação de van Genuchten para um Cambissolo*, Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 9(1):23-29

Minasny, B. e Hartemink, A.E., 2011, *Predicting soil properties in the tropics*, Earth Science Reviews, 106: 52–62, doi: 10.1016/j.earscirev.2011.01.005.

Minasny, B., e McBratney, A.B., 2000, *Evaluation and development of hydraulic conductivity Pedotransfer functions for Australian soil*, Aust. J. Soil Res., 38, 905–26, http://dx.doi.org/10.1071/SR99110.

Moncada M. P., Gabriels D., Lobo D., Rey J. C., Cornelis, W. M., 2014, *Visual field assessment of soil structural quality in tropical soils*, Soil and Tillage Research, 139: 8-18, https://doi.org/10.1016/j.still.2014.01.002.

Moreira, J.A.A. e Silva, C.J.C.G., 1987, *Características de retenção de água de um solo Podzólico Vermelho-Amarelo de Goiana, Pernambuco*, Pesq. Agropec. Bras., 22(4):411–418.

Nacif, P.G.S., 1994, *Efeitos da Subsolagem em propriedades físico-hídricas de um Latossolo Amarelo álico coeso, representativo do Recôncavo Baiano*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, Brasil.

Nacif, P.G.S., Rezende, J.O., Fontes, L.E.F., Costa, L.M. da, Costa, O.V., 2008, *Efeitos da subsolagem em propriedades físico-hídricas de um Latossolo Amarelo distrocoeso do estado da Bahia*, Magistra, Cruz das Almas-BA, 20(2): 186-192.

Nebel, A.L.C., Timm, L.C., Cornelis, W., Gabriels, D., Reichardt, K., Aquino, L.S., Pauletto, E.A., Reinert, D.J., 2010, *Pedotransfer functions related to spatial variability of water retention attributes for lowlands soils*, R.Bras.Ci.Solo, 34:669-680, doi: 10.1590/S0100-06832010000300008.

Nemes, A., Schaap, M.G., Leij, F.J., Wösten, J.H.M., 2001, *Description of the unsaturated soil hydraulic database UNSODA version 2.0*, Journal of Hydrology, 251(34): 151–162.10.1016/S0022-1694(01)00465-6.

Neuwald, O., 2005, *Atributos físico e hídricos do solo e produtividade da soja em sistema integrado lavoura-pecuária, em Nitossolo Háplico sob diferentes sistemas de manejo*, Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Agronomia, Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), Lages, Santa Catarina, Brasil.

Nguyen, P., Pue, J. D., Le, V. K., Cornelis, W., 2015b, *Impact of regression methods on improved effects of soil structure on soil water retention estimates*, Journal of Hydrology, 525: 598-606, https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.04.014.

Nguyen, P.M., Khoa, V.L., Botula, Y.D., Cornelis, W.M., 2015a, *Evaluation of soil water retention pedotransfer functions for Vietnamese Mekong Delta soils*, Agricultural Water Management, 158, 126–138, doi: 10.1016/j.agwat.2015.04.011

Nicolodi, M., e Gianello, C., 2016, *Reflexão sobre a Fertilidade. Além das condições químicas do solo,* Boletim Informativo da SBCS, 42(3): 40-47.

Nimmo, J.R., 2004, *Porosity and Pore Size Distribution*, in Hillel, D. (ed.), Encyclopedia of Soils in the Environment, London, Elsevier, v. 3, pp. 295-303.

O'Neal, A.M., 1949, *Some characteristics significant in evaluating permeability*, Soil Science, 67, 403-409.

Oliveira Junior, J.C. de, Chiapini, M., do Nascimento, A.F., Couto, E.G., Beirigo, R.M., Vidal-Torrado, P., 2017, Genesis and Classification of Sodic Soils in the Northern Pantanal. R. Bras. Ci. Solo, 41:e0170015. https://dx.doi.org/10.1590/18069657rbcs20170015

Oliveira, L.B., 1968, *Considerações sobre a composição granulométrica de solos do nordeste*, Pesq. Agropec. Bras., 3: 189–195.

Ottoni Filho, T.B., 2003, *Uma classificação físico-hídrica dos solos*, R. Bras.Ci. Solo, 27:211-222.

Ottoni, M.V, Ottoni Filho, T.B., Lopes-Assad, M.L.R.C., Rotunno Filho, O.C., 2018, *HYdrophysical database for BRAzilianSoils (HYBRAS) and its use in validating Temperate and Brazilian pedotransfer functions*, (aceito em 20/08/2017 pela revista *Vadose Zone Journal*).

Ottoni, M.V., Assad, M.L.L., Pachepsky, Ya., Rotunno Filho, O.C., 2014, *A Hydrophysical Database to Develop Pedotransfer Functions for Brazilian Soils: Challenges and Perspectives*, In: Teixeira, W.G., M.B. Ceddia, M.V. Ottoni, G.K. Donnagema (eds.), Application of Soil Physics in Environmental Analyses: Measuring, Modelling and Data Integration, 1st edn, Springer, p 467-494.

Pachepsky, Y.a. e Rawls, W.J., 2003, *Soil structure and pedotransfer functions. European Journal of Soil Science*, 54: 443–452, doi:10.1046/j.1365-2389.2003.00485.x

Pachepsky, Ya e Rawls, W.J., 1999, *Accuracy and Reliability of Pedotransfer Functions as Affected by Grouping Soils*, Soil Sci. Soc. Am. J., 63, 1748–1757.

Pachepsky, Ya., Rawls, W.J., Lin, H.S., 2006, *Hydropedology and pedotransfer functions*, Geoderma, 131(3-4): 308-316, https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.03.012.

Pajor, R., Falconer, R., Hapca, S., and Otten, W., 2010, *Modelling and quantifying the effect of heterogeneity in soil physical conditions on fungal growth*, Biogeosciences, 7:3731-3740, https://doi.org/10.5194/bg-7-3731-2010.

Parfitt, J.M., 2009, *Impacto da sistematização sobre atributos físicos, químicos e biológicos em solos de várzea*, Tese de Doutorado, Programa de pós-graduação em Agronomia, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil.

Patil, N.G. e Singh, S.K., 2016, *Pedotransfer Functions for Estimating Soil Hydraulic Properties: A Review*, Pedosphere26 (4): 417–430, doi: 10.1016/S1002-0160(15)60054-6.

Pedrotti, A., Ferreira, M. M., Curi, N., Silva, M. L. N., Lima, J. M., Carvalho, R., 2003, *Relação entre atributos físicos, mineralogia da fração argila e formas de alumínio no solo*, R. Bras. Ci. Solo, 27(1), 01-09. https://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832003000100001.

Perkins, K.S., 2011, *Measurement and Modeling of Unsaturated Hydraulic Conductivity (chapter 21)*, In: Elango, L. (Ed.). Hydraulic Conductivity - Issues, Determination and Applications, InTech., pp. 419-433, doi: 10.5772/20017.

Perret, J, Prasher, S.O., Kantzas, A., Langford, C., 1999, *Three-Dimensional Quantification of Macropore Networks in Undisturbed Soil Cores*, Soil Sci. Soc. Am. J., 63, 1530-1543, doi:10.2136/sssaj1999.6361530x.

Petersen, G.W., Cunningham, R.L., Matelski, R.P.M., 1968, *Moisture characteristics of Pennylvania soil. I. Moisture retention as related to texture*, Soil Sc. Soc. Am. Proceeding, Madison, 32(2):271-275;

Pochet, G., Van der Velde, M., Vanclooster, M., Delvaux, B., 2007, *Hydric properties of high charge, halloysitic clay soils from the tropical South Pacific region*, Geoderma 138: 96–109.

Puckett, W.E., Dane, J.H., Hajek, B.F., 1985, *Physical and mineralogical data to determine soil hydraulic properties*, Soil Sci. Soc. Am. J., 49, 831–836, doi: 10.2136/sssaj1985.03615995004900040008x.

Quinton, W.L., Elliot, T., Price, J.S., Rezanezhad, F., Heck, R., 2009, *Measuring physical and hydraulic properties of peat from X-ray tomography*, Geoderma, 153:269–277.

Rawls, W. J. e Pachepsky, Ya. A., 2002, *Soil Consistence and Structure as Predictors of Water Retention*, Soil Sci. Soc. Am. J. 66:1115-1126, doi:10.2136/sssaj2002.1115.

Rawls, W.J., 2004, *Pedotransfer functions for the United States*, In: Ya Pachepsky and W.J. Rawls (eds.), Development of Pedotransfer Functions in Soil Hydrology. Elsevier, Vol 30, p 437-447, https://doi.org/10.1016/S0166-2481(04)30023-1.

Reatto A., Bruand, A., Silva, E. M., Martins, E. S., Brossard, M., 2007, *Hydraulic properties of the diagnostic horizon of Latosols of a regional toposequence across the Brazilian Central Plateau*, Geoderma, 139 (1-2), 51-59.

Reichert, J.M., Albuquerque, J.A., Kaiser, D.R., Reinert, D.J., Urach, F.L., Carlesso, R., 2009, *Estimation of water retention under availability in soils of Rio Grande do Sul*, R. Bras. Ci. Solo, 33: 1547-1560, doi: 10.1590/S0100-06832009000600004.

Resende, M., Bahia Filho, A.F.C., Braga, J.M., 1987, *Mineralogia da argila de Latossolos estimada por alocação do teor total de óxidos do ataque sufúrico*, R. Bras. Ci. Solo, 11:17-23.

Ribeiro, M.R., Oliveira, L.B. de, Araújo Filho, J.C. de, 2012, *Caracterização morfológica do solo* (Capítulo III), In: Ker, J.C., Curi, N., Schaefer, C. E., Torrado, P.V., (eds). Pedologia: fundamentos, 1a edição, Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.

Rogasik, H., Onasch, I., Brunotte, J., Jegou, D., Wendroth, O., 2003, *Assessment of soil structure using X-ray computed tomography*, Geological Society, London, Special Publications, 215:151-165, https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2003.215.01.14.

Rojas, C.A.L., 1998, *Alterações físico-hídricas de um Podzólico em função do manejo de solo*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

Ross, P. J., e Smettem, K. R. J., 1993, *Describing Soil Hydraulic Properties with Sums of Simple Functions*, Soil Sci. Soc. Am. J. 57:26-29. doi:10.2136/sssaj1993.03615995005700010006x.

Rouquerol, J., Avnir, D., Fairbridge, C.W., Everett, D.H., Haynes, J.H., Pernicone, N., Ramsay, J.D.F., Sing, K.S.W, Unger, K.K., 1994, *Recommendations for the characterization of porous solids (technical report)*, Pure Appl. Chem., 66: 1739-1758.

Rubio, C. e P. Llorens, 2004, *Comparing different pedotransfer functions for silty loam soils in a Mediterranean mountain catchment*, In: Aagaard, P., Bedbur, E., Bidoglio, G., Candela, L., Nuetzmann, G., Trevisan, M., Vanclooster, M., and Viotti, P.(eds.), Saturated and unsaturated zone: integration of process knowledge into effective models, Rome, 480p.

Sánchez, M. A., 2003, *Quantification of soil physical properties by using X-ray computerized tomography (CT) and standard laboratory (STD) methods*, Retrospective Theses and Dissertations. Paper 248.

Santos, H.G. dos, Jacomine, P.K.T., Anjos, L.H.C. dos, Oliveira, V.A. de, Lumbreras, J.F., Coelho, M.R., Almeida, J.A. de, Cunha, T. J. F., Oliveira, J.B. (Eds.), 2013a, *Sistema brasileiro de classificação de solos,* 34. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos.

Santos, R.D. dos, Lemos, R.C. de, Santos, H.G. dos, Ker, J.C., Anjos, L.H.C. dos, Shimizu, S.H., 2013b, *Manual de descrição e coleta de solo no campo*, 6a edição, Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.

Saxton, K. E., Rawls, W. J., 2006, *Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions*, Soil Sci. Soc. Am. J., 70:1569-1578, doi:10.2136/sssaj2005.0117.

Scardua, R., 1972, *Porosidade livre de água de dois solos do município de Piracicaba, SP*, Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", São Paulo, Brasil.

Schaap, M.G, Leij, F.J., van Genuchten, MTh., 2001, *ROSSETA: computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions*, Journal of Hydrology, 251: 163-176, doi: 10.1016/S0022-1694(01)00466-8.

Schaap, M.G. e Leij, F.J., 1998, *Database-related accuracy and uncertainty of pedotransfer functions*, Soil Science, 163 (10), 765-779, doi: 10.1097/00010694-199810000-00001.

Schaap, M.G., e van Genuchten, M.Th., 2006, *A Modified Mualem–van Genuchten Formulation for Improved Description of the Hydraulic Conductivity Near Saturation*, Vadose Zone Journal 5:27–34, doi:10.2136/vzj2005.0005

Schjønning, P., 1986, *Soil permeability by air and water as influenced by soil type and incorporation of straw*. Tidsskr. Planteavl., 90, 227-240 (em dinamarquês).

Shapiro, S.S. e Wilk, M.B., 1965, *An analysis of variance test for normality (complete samp1es)*, Biometrika, 52(3,4): 591-611.

Shepherd, T.G., 2000, *Visual soil assessment. Volume 1. Field guide for cropping and pastoral grazing on flat to rolling country*, horizons.mw & Landcare Research, Palmerston North, New Zealand, Available at: http://www.landcareresearch.co.nz/__data/assets/pdf_file/0011/28676/VSA_Volume1_smaller.pdf; accessed 11/11/2015.

Silva, A.P. da, Tormena, C.A., Fidalski, J., Imhoff, S., 2008, *Funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração*, Rev. Bras. Ciênc. Solo, 32(1): 1-10, http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000100001.

Silva, M.A.S. da, 2003, *Agregação e atributos físico-hídricos do solo em sistemas conservacionistas de manejo*, Dissertação de Mestrado, Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Lages, Santa Catarina, Brasil.

Silva, M.A.S. da, Mafra, A.L., Albuquerque, J.A., Bayer, C., Mielniczuk, J., 2005, *Atributos físicos do solo relacionados ao armazenamento de água em um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo*, Ciência Rural, Santa Maria, 35(3):544-552, doi: 10.1590/S0103-84782005000300009.

Skvortsova, E. B. e Utkaeva, V. F., 2008, *Soil pore space arrangement as a geometric indicator of soil structure*, Eurasian Soil Science, 41(11): 1198-1204. https://doi.org/10.1134/S1064229308110082.

Sobieraj, J.A, Elsenbeer, H., Vertessy, R.A., 2001, *Pedotransfer functions for estimating saturated hydraulic conductivity: Implications for modeling storm flow generation*, Journal of Hydrology, 251(3), 202-220, doi: 10.1016/S0022-1694(01)00469-3.

Soil Science Division Staff, 2017, *Soil survey manual*. C. Ditzler, K. Scheffe, and H.C. Monger (eds.). USDA Handbook 18. Government Printing Office, Washington, D.C.

Soil Survey Staff, 1999, *Soil taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys*, 2nd edition, Natural Resources Conservation Service. U.S. Department of Agriculture Handbook 436.

Souto Filho, S.N., 2012, *Variação de armazenamento de água num Latossolos de Cerrado em recuperação*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia, Campus de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, São Paulo, Brasil.

Souza, L.S. e Souza, L.D., 2001, *Caracterização físico-hídrica de solos da área do Centro Nacional de Pesquisa de Mandioca e Fruticultura Tropical*, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Centro Nacional de Pesquisa de Mandioca e Fruticultura Tropical, Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 20, Cruz das Almas/BA.

Souza, Z.M. de, Júnior, J.M., Cooper, M., Pereira, G.T., 2006, *Micromorfologia do solo e sua relação com atributos físicos e hídricos*, Pesq. agropec. bras., 41(3):487-492.

Spychalski, M., Kaźmierowski, C., Kaczmarek, Z., 2007, *Estimation of saturated hydraulic conductivity on the basis of drainage porosity*, EJPAU, 10(1).

Stolf, R., Thurler, A.M., Bacchi, O.O.S. e Reichardt, K., 2011, *Method to estimate soil macroporosity and microporosity based on sand content and bulk density*. R. Bras. Ci. Solo, 35:447-459.

Suleiman, A.A. e Ritchie, J.T., 2001, *Estimating saturated hydraulic conductivity from soil porosity*, Trans ASAE., 44(2), 235–339, DOI: 10.13031/2013.4683.

Tawornpruek S., Kheoruenromne I., Suddhiprakarn A., Gilkes R. J., 2005, *Microstructure and water retention of Oxisols in Thailand*, Australian Journal of Soil Research, 43, 973-986.

Tempel P., Batjes, N.H., van Engelen, V.W.P., 1966. *IGBP-DIS soil data set for pedotransfer function development*, Working paper and Preprint 96/05, International Soil Reference and information Centre (ISRIC), Wageningen.

Thomasson, A. J., 1978, *Towards an objetive classification of soil structure*, Journal of Soil Science, 29:38-46.

Thurler, A.M., 2000, *Determinação da capacidade de campo e retenção de umidade em solos do Terciário da Formação Barreiras, em função de suas características granulométricas e fatores estruturais*, Tese de Doutorado, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Curso de pós-graduação em Ciência do Solo, Instituto de Agronomia, Seropédica, Rio de Janeiro, Brasil.

Tietje, O. e Hennings, V., 1996, *Accuracy of the saturated hydraulic conductivity prediction by pedo-transfer functions compared to the variability within FAO textural classes*, Geoderma, 69(1):71-84, http://dx.doi.org/10.1016/0016-7061(95)00050-X.

Timlin, D.J., Ahuja, L.R., Pachepsky, Ya., Williams, R.D., Gimenez, D., Rawls, W., 1999, *Use of Brooks-Corey Parameters to Improve Estimates of Saturated Conductivity from Effective Porosity*, Soil Sci. Soc. Am. J., 63, 1086-1092.

Toma, R.S., 2012, *Evolução do funcionamento físico-hídrico do solo em diferentes sistemas de manejo em áreas de agricultura familiar na região do vale do Ribeira, SP*, Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", São Paulo, Brasil.

Tomasella, J. e Hodnett, M.G., 1997, *Estimating unsaturated hydraulic conductivity of Brazilian soils using soil-water retention data*, Soil Science, 162(10), 703-712, doi: 10.1097/00010694-199710000-00003

Tomasella, J. e Hodnett, M.G., 1998, *Estimating soil water retention characteristics from limited data in Brazilian Amazonia*, Soil Sci., 163: 190-202, doi: 10.1097/00010694-199803000-00003

Tomasella, J. e Hodnett, M.G., 2004, *Pedotransfer functions for tropical soils*, In: Pachepsky, Ya., and Rawls, W.J. (Eds.), Development of Pedotransfer Functions in Soil Hydrology: Developments in Soil Science, 30, Elsevier, pp. 415–429.

Tomasella, J., Hodnett, M.G., Rossato, L., 2000, *Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in Brazilian soils*, Soil Sci. Soc. Am. J., 64: 327-338, doi: 10.2136/sssaj2000.641327x.

Tomasella, J., Pachepsky, Ya., Crestana, S., Rawls, W.J., 2003, *Comparison of two techniques to develop pedotransfer functions for water retention*, Soil. Sci. Soc. Am. J., 67: 1085-1092, doi: 10.2136/sssaj2003.1085.

Tormena, C.A. e Silva, A.P. da, 2002, *Incorporação da densidade no ajuste de dois modelos à curva de retenção de água no solo*, R. Bras. Ci. Solo, 26:305-314, http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832002000200003.

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, doi: 10.1111/ejss.12192.

USDA, 1987, *Soil Mechanics Level I, Module 3 - USDA Textural Soil Classification, Study Guide*, National Employee Development Staff, Soil Conservation Service.

Valpassos, M.A.R., Cavalcante, E.G.S., Cassiolato, A.M. R., Alves, M.C., 2001, *Effects of soil management systems on soil microbial activity, bulk density and chemical properties*, Pesquisa Agropecuária Brasileira, 36(12):1539-1545, https://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2001001200011.

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., Leij, F.J. & Yates, S.R., 1991, *The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils*. Riverside, U. S. Salinity Laboratory.

van Genuchten, MTh., 1980, *A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*, Soil Sci. Soc. Am. J., 44: 892-989, doi: 10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x

Vasconcellos, E.B., 1993, *Levantamento dos atributos físicos e hídricos de três solos de várzea do Rio Grande do Sul*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil.

Vereecken, H., Schnepf, A., Hopmans, J.W., Javaux, M., Roose, D.Ot.T., Vanderborght, J., Young, M. H., Amelung, W., Altkenhead, M., Allison, S.D., Assouline, S., Baveye, P., Berli, M., Brüggemann, N., Finke, P., Flury, M., Gaiser, T., Govers, G., Ghezzehei, T., Hallett, P., Hendricks Franssen, H.J., Heppell, J., Horn, R., Huisman, J.A., Jacques, D., Jonard, F., Kollet, S., Lafolie, F. Lamarsky, K., Leitner, D., McBratney, A., Minasny, B., Montzka, C., Nowak, W., Pachepsky, Y., Padarian, J., Romano, N., Roth, K., Rothfuss, Y., Rowe, E.C., Schwen, A., Simunek, J., Tiktak, A., Van Dam, J., van der Zee, S.E.A.T.M., Vogel, H.J., Vrugt, J. A., Wöling, T. e Young, L.M., 2015, *Modeling soil processes:review, key challenges, and new perspectives*, Vadose Zone Journal, 15, pp.1–57, doi: 10.2136/vzj2015.09.0131.

Vogel, H. J., 2002, *Topological Characterization of Porous Media*, 2002, in Mecke, K., Stoyan, D. (eds), Berlin-Heidelberg, Springer-Verlag, pp.75-92.

Walkley, A. e Black, I.A., 1934, *An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method*, Soil Science, 37(1): 29-38.

Wang, C., McKeague, J. A., Topp, G.C., 1985, *Comparison of estimated and measured horizontal Ksat values*, Canadian Journal of Soil Science, 65(4): 707-715, https://doi.org/10.4141/cjss85-076.

Weynants, M., Vereecken, H., Javaux, M., 2009, *Revisiting Vereecken Pedotransfer Functions: Introducing a Closed-Form Hydraulic Model*, Vadose Zone Journal, 8, 86–95, doi: 10.2136/vzj2008.0062.

Williams, J., Prebble, R. E., Williams, W.T., Hignett, C.T., 1983, *The influence of texture, structure and clay mineralogy on the soil moisture characteristic*, Australian Journal of Soil Research, 21: 15-32.

Wilson, G. V., Jardine, P. M., Gwo, J. P., 1992, *Modeling the Hydraulic Properties of a Multiregion*, Soil. Soil Sci. Soc. Am. J., 56:1731-1737, doi:10.2136/sssaj1992.03615995005600060012x

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, doi:10.1016/S0016-7061(98)00132-3.

WRB-World Reference Base for Soil Resources, 2015, *International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*, World Soil Resources Reports, No. 106, FAO, Rome.

Young, I.M. e Crawford, J.W., 2004, *Interactions and self-organization in the soil-microbe complex*, Science, 11,304(5677): 1634-1637, DOI: 10.1126/science.1097394.

Zdravkov B. D., Čermák J. J., Šefara M., Janků J., 2007, *Pore classification in the characterization of porous materials: A perspective*, Central European Journal of Chemistry, 5(2): 385-395, https://doi.org/10.2478/s11532-007-0017-9

Zobeck, T.M., Fausey, N.R., Al-Hamdan, N.S., 1985, *Effect of sample cross-sectional area on saturated hydraulic conductivity in two structured clay soils*, Trans. ASAE, 28, 791-794, doi: 10.13031/2013.32339.

ANEXO A - BANCO DE DADOS HIDROFÍSICOS EM SOLOS BRASILEIROS (HYBRAS)

Arquivo digital disponibilizado em DVD.