

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO CENTRO
TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

VINÍCIUS ROCHA POLTRONIERI

**COMPARAÇÃO DE CURVAS DE RETENÇÃO E
CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DE SOLOS TROPICAIS E
TEMPERADOS NÃO SATURADOS**

VITÓRIA, ES

2020

VINÍCIUS ROCHA POLTRONIERI

**COMPARAÇÃO DE CURVAS DE RETENÇÃO E
CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DE SOLOS TROPICAIS E
TEMPERADOS NÃO SATURADOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração Estruturas/Geotecnia e Fundações.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Kátia Vanessa Bicalho

Co-orientadora: Prof^a. Dr^a. Geórgia Serafim Araújo

VITÓRIA, ES

2020

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de
Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

P779c Poltronieri, Vinícius Rocha, 1987-
COMPARAÇÃO DE CURVAS DE RETENÇÃO E
CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DE SOLOS TROPICAIS E
TEMPERADOS NÃO SATURADOS / Vinícius Rocha
Poltronieri. - 2020.
91 f. : il.

Orientadora: Kátia Vanessa Bicalho.
Coorientadora: Geórgia Serafim Araújo.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade
Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. solos. 2. solos não saturados. 3. condutividade hidráulica.
I. Bicalho, Kátia Vanessa. II. Araújo, Geórgia Serafim. III.
Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV.
Título.

CDU: 624

VINÍCIUS ROCHA POLTRONIERI

**COMPARAÇÃO DE CURVAS DE RETENÇÃO E
CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DE SOLOS TROPICAIS E
TEMPERADOS NÃO SATURADOS**

Dissertação apresentada ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração Estruturas/Geotecnia e Fundações.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Profa. Dra. Kátia Vanessa Bicalho
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientadora

Profa. Dra. Ing. Georgia Serafim Araújo
Instituto Federal do Espírito Santo
Co-orientadora

Profa. Dra. Maristela Gomes da Silva
Universidade Federal do Espírito Santo
Membro Interno

Prof. Dr. Bruno Teixeira Dantas
Universidade Federal do Espírito Santo
Membro Externo

Profa. Dra. Carla T. D. Borjaille Alledi
Instituto Federal do Espírito Santo Membro
Externo

Vitória – ES, 28 de Maio de 2020

Aos meus Pais, minha esposa Gabriela e meu filho Pedro.

Dedico

AGRADECIMENTOS

À Deus, por me dar saúde, sabedoria e colocar anjos em meu caminho para me guiar.

Aos meus Pais pelo carinho, apoio, e dedicação de suas vidas para que eu pudesse alcançar degraus que eles sonharam em um dia chegar.

À minha esposa Gabriela por todo incentivo, compreensão, dedicação e apoio mesmo nos momentos em que achei que não seria possível. E meu filho Pedro, motivação extra que me alegria a cada dia. Amo vocês.

À Professora Kátia Vanessa Bicalho pela sua orientação, paciência, incentivo, críticas e respeito. Pessoa pela qual tenho imensa gratidão e admiração.

À Professora Geórgia Serafim Araújo pela parceria, incentivo e orientação para que eu pudesse alcançar meu objetivo.

Aos Professores Waldyr Lopes de Oliveira Filho e Maristela Gomes da Silva por fazerem parte da minha banca de qualificação, contribuindo com ideias e direcionamentos para a conclusão deste trabalho.

Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil – PPGEC da Universidade federal do Espírito Santo pela oportunidade. A todos os Professores do Programa. Aos colegas do mestrado, em especial à minha cunhada Luísa Braz, ao Lucas Broseghini e ao Thiago Poleto pelos momentos em que dividimos experiências e adquirimos conhecimentos juntos de maneira saudável e alegre.

Ao Instituto Federal do Espírito Santo – IFES por me dar suporte e condições de cumprir este objetivo mesmo que trabalhando em prol da Instituição. Aos amigos e colegas do Instituto, em especial os da CGPE, que sempre me apoiaram.

Aos Professores Bruno Teixeira Dantas, Carla Therezinha Dalvi Borjaille Alledi e Maristela Gomes da Silva por aceitarem participar da banca de avaliação desta dissertação.

Ao meu irmão, minha sogra, familiares, amigos e sobrinhos Bento, Mia e Laura.

RESUMO

O conhecimento da curva de retenção de água no solo (CRAS) e da curva de condutividade hidráulica (CCH) é importante na interpretação do comportamento de solos não saturados. As funções de pedotransferência (PTFs) buscam transformar dados disponíveis, como a distribuição granulométrica dos solos, em dados de difícil obtenção, como a *CRAS* e a *CCH*. Esta dissertação avalia a influência da distribuição granulométrica e da textura do solo na *CRAS* e na *CCH* de um banco de dados hidrofísicos de solos brasileiros. A equação proposta por van Genuchten (1980) é adotada para definir as curvas desses solos. Os dados experimentais foram separados segundo três classificações: (a) classificação em 10 subgrupos baseada na porcentagem de finos (F_c), (b) classificação em 5 classes texturais a partir do triângulo textural denominado *FAO* (do inglês, *Food and Agriculture Organization of the United Nations*) e (c) classificação em 12 classes texturais a partir do triângulo textural *USDA* (do inglês, *United States Department of Agriculture*). As análises foram comparadas com resultados obtidos na literatura para solos temperados. A avaliação geral é de que a influência de F_c não é observada nos parâmetros de ajuste da equação de van Genuchten (1980) para solos com $F_c > 10\%$ para os solos do *HYBRAS* e $F_c > 30\%$ para os solos do *UNSODA*. Esses parâmetros não devem ser interpretados como de significado físico. A influência da distribuição granulométrica na condutividade hidráulica saturada e na *CCH* se mostra limitada para as três classificações investigadas. De maneira geral, a consideração apenas da distribuição granulométrica do solo não é suficiente para descrever a variabilidade da *CRAS* e da *CCH para os solos investigados nesta pesquisa*. Os resultados obtidos ainda sugerem cautela no uso de *PTFs* para solos diferentes daqueles usados para definir essas funções matemáticas.

Palavras-chave: solos não saturados, curva de retenção de água no solo, curva de condutividade hidráulica, solos brasileiros e temperados

ABSTRACT

Knowledge of the soil water retention curve (SWRC) and the hydraulic conductivity curve (HCC) is important in understanding the behavior of unsaturated soils. The called pedotransfer functions (PTFs) are used to transform easy to measure data, such as the soil particle size distribution, into data that are difficult to measure, such as SWRC and HCC. This dissertation investigates the influence of the particle size distribution and textural classes on the SWRC and the HCC of a hydrophysical database of Brazilian soils. The equation proposed by van Genuchten (1980) is adopted to define the SWRC and HCC curves of these soils. The experimental data were separated according to three classifications: (a) classification in 10 subgroups based on the percentage of fines (F_c),

(b) classification in 5 textural classes based on the textural triangle called FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) and (c) classification in 12 textural classes based on the USDA (United States Department of Agriculture) textural triangle. The analyzes were compared with results obtained in the literature for temperate soils. The results suggest that the influence of F_c is not observed in the adjustment parameters of the van Genuchten equation (1980) for soils with $F_c > 10\%$ for HYBRAS soils and $F_c > 30\%$ for UNSODA soils. These parameters should not be interpreted as having physical meaning. The influence of the soil particle size distribution on saturated hydraulic conductivity and HCC is limited for the three investigated classifications. In general, the information limited on the soil particle size distribution is not enough to describe the variability of SWRC and HCC for the soils investigated in this research. It is recommended caution in the use of PTFs for soils different from those used to define these mathematical functions.

Keywords: Unsaturated soils, soil water retention curve, hydraulic conductivity curve, Brazilian and temperate soils.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curva típica de retenção de água no solo. (A) estado de saturação inicial, (B) valor aproximado de entrada de ar (C) grau de saturação residual aproximado.....	22
Figura 2 – Formato da <i>CRAS</i> para diferentes tipos de solo.....	24
Figura 3 - Influência dos parâmetros matemáticos na equação de van Genuchten (1980): (a) a variação de α , com $n_v = 2$ e $m = 1$, (b) a variação de m , com $\alpha = 100$ e $n_v = 2$ e (c) a variação de n_v com $\alpha = 100$ e $m = 1$	27
Figura 4 – Relação entre a (a) curva de retenção e (b) curva de condutividade hidráulica para uma areia e um silte argiloso.....	29
Figura 5 – Fluxograma para a estimativa de funções hidráulicas a partir de PTFs	33
Figura 6 - Distribuição das amostras do banco de dados <i>HYBRAS</i> no território brasileiro	38
Figura 7 - Distribuição das amostras do <i>HYBRAS</i> no triângulo textural.....	39
Figura 8 - Distribuição das amostras do <i>UNSODA</i> no triângulo textural	41
Figura 9 - Triângulo textural a) FAO e b) USDA	43
Figura 10 - Distribuição das amostras do <i>HYBRAS</i> no triângulo textural para diferentes classificações a) F_c , b) classificação textural FAO e c) classificação textural USDA.....	46
Figura 11 - Distribuição das amostras do <i>HYBRAS</i> segundo a classificação baseada em F_c	47
Figura 12 - Distribuição dos pontos experimentais da <i>CRAS</i> para a classificação baseada em F_c	48
Figura 13 - Variação dos parâmetros da equação de van Genuchten (1980) com F_c das 1075 amostras do <i>HYBRAS</i> (a) θ_s , (b) θ_r , (c) α e (d) n_v	51
Figura 14 - Distribuição das amostras do <i>HYBRAS</i> segundo a classificação textural FAO	52
Figura 15 - Distribuição dos pontos experimentais para a classificação textural FAO: a) grossa, b) média, c) média fina, d) fina e e) muito fina	53
Figura 16 - Distribuição das amostras do <i>HYBRAS</i> segundo a classificação textural USDA	55

Figura 17 - Distribuição dos pontos medidos em laboratório para a classificação textural USDA: a) areia, b) areia franca, c) franco arenoso, d) franco, e) franco argilo-arenoso, f) franco argilo-siltoso, g) franco argiloso, h) argila arenosa, i) argila siltosa e j) argila	57
Figura 18 - Variação de θ_r com a % Argila.....	60
Figura 19 - Variação dos parâmetros da equação de van Genuchten (1980) com F_c das 1075 amostras do <i>HYBRAS</i> : a) θ_s , b) θ_r , c) α e d) n_v	63
Figura 20 - Variação dos parâmetros da equação de van Genuchten (1980) para a classificação textural FAO: a) θ_s , b) θ_r , c) α e d) n_v	64
Figura 21 - Variação da média de θ_r para a classificação textural FAO.....	65
Figura 22 – Variação dos parâmetros da equação de van Genuchten (1980) para a classificação textural USDA de diferentes bancos de dados	66
Figura 23 - <i>CRAS</i> hipotéticas para a classificação baseada em F_c (a) sucção x Umidade Volumétrica (θ) e (b) sucção x Grau de Saturação (s).....	69
Figura 24 – Comparação entre as <i>CRAS</i> hipotéticas definidas para o <i>HYBRAS</i> e o <i>UNSODA</i> para a classificação baseada em F_c	70
Figura 25 – <i>CRAS</i> hipotéticas para a classificação textural FAO (a) sucção x umidade volumétrica (θ) e (b) sucção x grau de saturação (s)	71
Figura 26 – Comparação entre as <i>CRAS</i> hipotéticas definidas para o <i>HYBRAS</i> e o <i>UNSODA</i> para a classificação textural FAO	72
Figura 27 - <i>CRAS</i> hipotéticas para a classificação textural USDA: (a) sucção x umidade volumétrica (θ) e (b) sucção x grau de saturação (s)	73
Figura 28 – Comparação entre as <i>CRAS</i> hipotéticas definidas para o <i>HYBRAS</i> e o <i>UNSODA</i> para a classificação textural USDA.....	74
Figura 29 - Distribuição das amostras do <i>HYBRAS</i> com K_{sat} segundo a classificação baseada em F_c	76
Figura 30 - Variação de K_{sat} com F_c para 420 amostras de solos do banco de dados <i>HYBRAS</i>	77
Figura 31 - Variação de K_{sat} com F_c para as 546 amostras de solos do banco de dados <i>UNSODA</i>	77
Figura 32 – <i>CCH</i> definida para os subgrupos baseado na classificação por F_c	79

Figura 33 - Distribuição das amostras do <i>HYBRAS</i> com K_{sat} segundo a classificação textural FAO	80
Figura 34 – <i>CCH</i> definida para os subgrupos baseado na classificação textural FAO	81
Figura 35 - Distribuição das amostras do <i>HYBRAS</i> com K_{sat} segundo a classificação textural USDA	81
Figura 36 - Comparação dos valores de K_{sat} para diferentes bancos de dados.....	82
Figura 37 – <i>CCH</i> definida para os subgrupos baseado na classificação textural USDA	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo das técnicas laboratoriais comuns para medição e controle da sucção do solo	23
Tabela 2 - Modelos matemáticos de ajuste para a <i>CRAS</i>	26
Tabela 3 – Parâmetros da equação de van Genuchten (1980) sugeridos por Wosten <i>et al.</i> (1999)	34
Tabela 4 - Parâmetros da equação de van Genuchten (1980) sugeridos por Schaap, Leij e van Genuchten (2001) para o banco de dados <i>UNSODA</i>	35
Tabela 5 – Parâmetros da equação de van Genuchten (1980) sugeridos por Hodnett e Tomasella (2002) para (a) banco de dados de solos tropicais IGBP-DIS e (b) dados de solos temperados de Carsel e Parrish (1988)	36
Tabela 6 - Resumo estatístico dos parâmetros da equação de van Genuchten (1980) e do K_{sat} para o banco de dados <i>HYBRAS</i>	40
Tabela 7 - Resumo estatístico dos parâmetros de van Genuchten (1980) para o banco de dados <i>UNSODA</i>	42
Tabela 8 – Valores médios para θ_0 , θ_{333} e θ_{15000} para a classificação baseada na F_c para as 1075 amostras de solo do <i>HYBRAS</i>	49
Tabela 9 - Resumo estatístico da variação dos parâmetros da equação de van Genuchten (1980) com F_c	50
Tabela 10 - Valores médios para θ_0 , θ_{333} e θ_{15000} segundo a classificação textural FAO para as 1075 amostras de solo do <i>HYBRAS</i>	53
Tabela 11 - Resumo Estatístico dos parâmetros da equação de van Genuchten (1980) para a classificação textural FAO	54
Tabela 12 - Valores médios para θ_0 , θ_{333} e θ_{15000} segundo a classificação textural USDA para as 1075 amostras de solo do <i>HYBRAS</i>	56
Tabela 13 - Resumo Estatístico dos parâmetros da equação de van Genuchten (1980) para a classificação textural USDA.....	58
Tabela 14 - Resumo Estatístico de K_{sat} para a classificação baseada em F_c para as 420 amostras de solo do <i>HYBRAS</i> analisadas	76

Tabela 15 - Resumo Estatístico de K_{sat} para as classes texturais <i>FAO</i> para as 420 amostras de solo do <i>HYBRAS</i> analisadas	80
Tabela 16 - Resumo Estatístico de K_{sat} para as classes texturais <i>USDA</i> para as 420 amostras de solo do <i>HYBRAS</i> analisadas.....	82

SÍMBOLOS E SIGLAS

a, b = parâmetros de ajuste da equação de Gardner (1956) AEV: valor de entrada de ar

C: Argila

CCH: curva de condutividade hidráulica CL:

Franco Argilosa

CRAS: curva de retenção de água no solo

C(h): fator de correção da equação de Fredlund e Xing (1994) FAO:

Food and Agriculture Organization of the United Nations)

F_c: fração de finos do solo (partículas de tamanho silte e argila) (%) h: sucção (cm)

h_o: sucção osmótica (cm) h_m:

sucção mátrica (cm)

HYBRAS: Hydrophysical Database for Brazilian Soils

HYPRES: Hydraulic Properties of European Soils K_{sat}:

condutividade hidráulica saturada (m/s)

K: condutividade hidráulica (m/s)

K(S_e): condutividade hidráulica não saturada L:

Franco

LS: Areia Franca Med:

Mediana

N_{amostras}: número de amostras dentro de determinado subgrupo

N_w: número de pontos da *CRAS* para cada amostra

p: Vetor de parâmetros da equação de van Genuchten (1980) (θ_s , θ_r , α , n_v). p:

Porosidade Total

PTFs: funções de pedotransferência s:

Grau de saturação

S: areia

S_e: Grau de saturação efetivo SC:

Argila Arenosa

SiC: Argila Siltosa

SiCL: Franco Argilo-Siltosa SiL:

Franco Siltosa

SCL: Franco Argilo-Arenosa SL:

Franco Arenoso

SUC: Sistema Unificado de Classificação u_a :

pressão do ar

u_w : pressão da água

UNSODA: Unsaturated Soil Hydraulic Database USDA:

United States Department of Agriculture

α , m , n_v : parâmetros de ajuste da equação de Van Genuchten (1980) θ :

umidade volumétrica ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)

θ_0 , θ_{330} e θ_{15000} : umidades volumétricas medidas nas sucções de 0, 333 e 15000 cm ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)

θ_r : umidade volumétrica residual ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)

θ_s : umidade volumétrica de saturação ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)

λ = constante empírica do modelo de Mualen (1976) igual a 0,5 γ_d :

Densidade do Solo ($\text{g}.\text{cm}^{-3}$)

γ_s : Densidade das partículas do solo ($\text{g}.\text{cm}^{-3}$)

θ_i : valores experimentais de umidade volumétrica

θ'_i : valores estimados de umidade volumétrica

Sumário

AGRADECIMENTOS.....	4
RESUMO	5
ABSTRACT	6
LISTA DE FIGURAS.....	7
LISTA DE TABELAS.....	10
SÍMBOLOS E SIGLAS.....	12
1. INTRODUÇÃO	16
1.1 Objetivos	18
1.2 Organização do Trabalho	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1 Introdução	20
2.2 Curva de Retenção de Água no Solo (<i>CRAS</i>)	20
2.2.1 Curvas de Retenção Típicas	24
2.3 Modelos matemáticos para ajuste da <i>CRAS</i>	25
2.3.1 Equação de van Genuchten (1980).....	26
2.3.1.1 Função da Curva de Condutividade Hidráulica (CCH)	28
2.3.1.2 Interpretação dos Parâmetros da Equação de van Genuchten (1980)	30
2.3.1.3 Estimativa dos parâmetros da equação de van Genuchten (1980).....	32
2.3.2 Tabelas de Consulta e PTFs de Classe para estimativa da <i>CRAS</i>	33
3. MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1 Descrição do banco de dados <i>HYBRAS</i> (OTTONI <i>et al.</i> , 2018; 2019).....	37
3.2 Descrição do banco de dados <i>UNSODA</i> (SCHAAP; LEIJ; VAN GENUCHTEN, 2001)	40
3.3 Metodologia.....	42
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	45
4.1 Influência da distribuição granulométrica nos parâmetros de van Genuchten (1980) para o <i>HYBRAS</i>	46
4.1.1 Classificação baseada em F_c	47

4.1.2	Classificação segundo triângulo textural FAO	52
4.1.3	Classificação segundo triângulo textural USDA.....	55
4.1.4	Discussão	59
4.1.5	Comparação com outras PTFs de classe: Solos Tropicais e Temperados	62
4.2	Influência da distribuição granulométrica na <i>CRAS</i> para os solos do <i>HYBRAS</i> e <i>UNSODA</i>	68
4.3	Influência da distribuição granulométrica na <i>CCH</i> para os solos do <i>HYBRAS</i> e <i>UNSODA</i>	75
4.3.1	Classificação baseada em F_c	75
4.3.2	Classificação segundo triângulo textural FAO	79
4.3.3	Classificação segundo triângulo textural USDA.....	81
5.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	84
5.1	Conclusões	84
5.2	Sugestões para Pesquisas Futuras	86
	REFERÊNCIAS.....	87

1. INTRODUÇÃO

O estudo dos solos não saturados é importante e necessário para o avanço no desenvolvimento de projetos na área de engenharia civil. Em várias obras de engenharia geotécnica, tais como aterros compactados, fundações, barragens de terra e estabilidade de taludes, a condição de saturação pode variar com as condições ambientais do local da obra e, como consequência, influenciar a estabilidade e a durabilidade dessas obras de engenharia. (BICALHO *et al.*, 2015).

No estudo de solos não saturados é importante quantificar a variação do teor de água nos poros (umidade ou grau de saturação), ao longo do espaço e do tempo. Esse comportamento pode ser representado na forma da curva de retenção de água no solo, denominada somente como curva de retenção ou pela sigla *CRAS* ao longo deste trabalho. Fredlund (2002) define a curva de retenção como a relação entre a quantidade de água no solo e a sucção. De acordo com Gitirana Jr., Marinho e Soto (2015), entende-se a curva como a relação entre a energia necessária para remover a água presente nos vazios de um material poroso e a quantidade dessa água.

A *CRAS* é fundamental para o desenvolvimento de qualquer trabalho quando pensado e desenvolvido com o solo na condição não saturado (FREDLUND, 2002). A sua determinação é de difícil obtenção por métodos experimentais, tanto pelo tempo que se consome nas medições, quanto pela intrínseca modificação dos pontos da curva devido à histerese. Além disso, a *CRAS* é altamente variável e dependente de fatores como a distribuição granulométrica, a forma e o arranjo das partículas do solo, a umidade e o índice de vazios iniciais (VANAPALLI; FREDLUND; PUFAHL, 1999; KAWAI *et al.*, 2000), e a energia de compactação (MARINHO; STUERMER, 2000).

Por esses motivos, a possibilidade de estimar a *CRAS* e outras propriedades hidráulicas do solo de forma indireta é importante, especialmente a partir de propriedades rotineiramente disponíveis dos solos (OTTONI *et al.*, 2018). São as funções de pedotransferência (PTFs), termo inicialmente proposto por Bouma (1989) e com o significado de transformar dados disponíveis em dados necessários.

Patil e Singh (2016) destacam as abordagens semi-empírica e empírica como métodos para o desenvolvimento de *PTFs*: a primeira, baseada em relações físicas conhecidas entre propriedades; a segunda, baseada puramente na relação numérica entre propriedades preditoras e estimadas. Os parâmetros dessas relações matemáticas são ajustados com base em dados já existentes. Por isso, grandes avanços são observados para solos temperados, cujos países possuem extensos e representativos bancos de dados.

Por fornecer uma equação relativamente simples para fornecer ambas *CRAS* e a curva de condutividade hidráulica (*CCH*), a equação proposta por van Genuchten (1980) é uma das mais citadas formas de representação da curva de retenção na literatura e se tornou a parametrização mais comum das propriedades hidráulicas em modelos matemáticos para fluxo e transporte em meios porosos (VERECKEN *et al.*, 2010). Aliado ao modelo de Mualen (1976), a equação de Van Genuchten (1980) permite também estimar a *CCH*. Assim, várias *PTFs* são desenvolvidas para estimar os parâmetros dessa equação a partir de propriedades básicas do solo, como a distribuição granulométrica, a densidade do solo o teor de matéria orgânica (HODNETT; TOMASELLA, 2002). Ottoni *et al.* (2018) destaca, porém, que para solos tropicais, a maior parte das *PTFs* geradas utiliza um banco de dados limitados e de regiões geográficas específicas.

O objetivo deste trabalho, portanto, é o de derivar os parâmetros da equação de van Genuchten (1980) para uma ampla gama de solos brasileiros de clima tropical e compará-los com os valores publicados derivados de conjuntos de dados de solos de outros autores para regiões temperadas. Para isso, é utilizado o banco de dados de solos brasileiros denominado *HYBRAS* (OTTONI *et al.*, 2018; 2019), contendo propriedades hidráulicas de solos de várias regiões do território brasileiro. Este estudo complementa o trabalho de Gonçalves (2012), que estudou a influência da distribuição granulométrica e de classes texturais nas curvas de retenção limite superior de secagem ajustadas pelos parâmetros independentes de ajuste da equação de van Genuchten (1980) para o banco de dados de solos temperados denominado *UNSODA* (*Unsaturated Soil Hydraulic Database*) (SCHAAP; LEIJ; VAN GENUCHTEN, 2001).

1.1 Objetivos

Este estudo investiga a influência da distribuição granulométrica e das classes texturais do solo nos parâmetros da equação de van Genuchten (1980) e, conseqüentemente, nas curvas de retenção de água no solo (*CRAS*) e de condutividade hidráulica (*CCH*) ajustadas por essa equação, a partir da utilização do banco de dados de solos brasileiros denominado *HYBRAS* (OTTONI *et al.*, 2018; 2019).

Os objetivos específicos desta pesquisa incluem:

- Avaliar a influência da granulometria/textura do solo na curva de retenção limite de secagem superior e de condutividade hidráulica desses solos considerando três formas de classificação: (a) baseado na quantidade relativa de finos do solo (F_c), (b) baseado na classificação textural *USDA* (USDA, 2017) e (c) baseado na classificação textural *FAO* (NEMES *et al.*, 1999; WÖSTEN *et al.*, 1999);
- Avaliar o significado físico dos parâmetros independentes da equação proposta por van Genuchten (1980) e a variação de valores para definição da *CRAS* e da *CCH* para os solos investigados;
- Comparar a variação dos parâmetros da equação de van Genuchten (1980), do K_{sat} e das curvas de retenção e de condutividade hidráulica definidas por esses parâmetros para solos tropicais (do *HYBRAS*) e temperados (do *UNSODA*), como complementação ao trabalho de Gonçalves (2012).

1.2 Organização do Trabalho

Esta dissertação foi organizada em 5 capítulos.

O **capítulo 1** sumariza o tema proposto, e apresenta as justificativas e objetivos do trabalho. O **capítulo 2** apresenta a revisão bibliográfica referente aos conceitos

básicos da curva de retenção de água no solo e de condutividade hidráulica, as equações propostas na literatura para estimar essas curvas e em especial, discute a aplicação da equação proposta por van Genuchten (1980) para estimar as curvas de diferentes solos. O **capítulo 3** apresenta os materiais e métodos para o desenvolvimento do estudo e o **capítulo 4** apresenta e discute os resultados das análises realizadas. Finalmente, no **Capítulo 5** são apresentadas as conclusões finais e sugestões para pesquisas futuras.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

O solo na condição não saturada apresenta as fases sólida, representada pelas partículas do sólido; líquida, representada pela água nos poros; e gasosa, representada pelo ar retido nos poros. À medida que o teor de água do solo varia, a distribuição dessas três fases muda juntamente com o estado de tensões do solo. O comportamento dos solos não saturados exige, portanto, a compreensão da distribuição, retenção e liberação da água nas diversas situações as quais o solo pode estar sujeito (GITIRANA JR., MARINHO, SOTO, 2005). Informações acerca das propriedades hidráulicas dos solos são necessárias em várias disciplinas, da geotecnia a ciências agrícolas e ecologia. Essas propriedades incluem a relação quantidade de água-sucção e a condutividade hidráulica – essa, frequentemente determinada a partir da primeira (TIMLIN *et al.*, 2004).

Este capítulo dedica-se ao estudo da curva de retenção (CRAS) e de condutividade hidráulica (CCH) e de suas representações matemáticas fornecidas pela equação de van Genuchten (1980). Os conceitos fundamentais básicos dos solos não saturados podem ser encontrados nas dissertações de mestrado publicadas previamente no PPGEC_CT_UFES na área de solos não-saturados (por exemplo, GONÇALVES, 2012 e VIVACQUA, 2012).

2.2 Curva de Retenção de Água no Solo (CRAS)

A relação existente entre o teor de umidade e a sucção nos solos, denominada curva de retenção de água no solo (CRAS), fornece uma ferramenta conceitual por meio da qual o comportamento hidráulico e mecânico dos solos não saturados pode ser entendido (BOSZCZOWSKI, 2008). A quantidade de água no solo pode ser representada pela umidade gravimétrica (w), umidade volumétrica (θ) ou pelo grau de saturação (s).

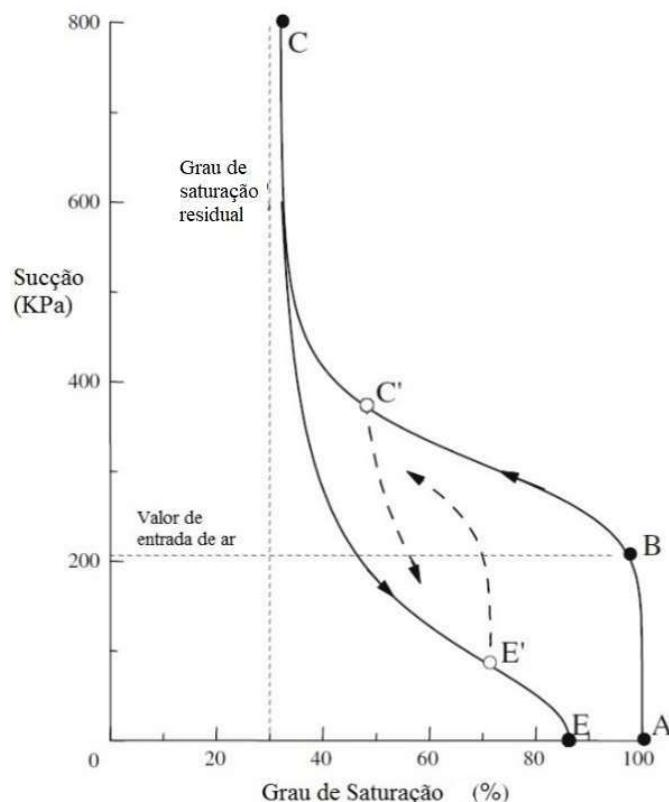
Segundo Marinho (1997), a sucção do solo pode ser definida como uma pressão isotrópica de água intersticial – fruto de condições físico-químicas, que faz com que o sistema água-solo absorva ou perca água, dependendo das condições ambientais. A sucção pode ser decomposta em duas partes:

- sucção mátrica (h_m): definida como a pressão relativa referente à diferença entre a pressão do ar (u_a) e da água (u_w), sendo resultado dos efeitos combinados de capilaridade e adsorção (LU; LIKOS, 2004). É altamente dependente das condições ambientais (FREDLUND, RAHARDJO, FREDLUND, 2012)
- sucção osmótica (h_o), proveniente de solutos dissolvidos na água no solo.

Usualmente, as alterações da sucção mátrica são praticamente iguais a variação da sucção total para a maioria dos problemas geotécnicos envolvendo solos não saturados enquanto sais não são adicionados ao solo (FREDLUND, RAHARDJO, FREDLUND, 2012). Por isso, é comum a não consideração da sucção osmótica ao se determinar a *CRAS*.

A Figura 1 ilustra as curvas típicas limites de secagem e umedecimento de um solo. A diferença entre as curvas se deve ao fenômeno da histerese, que indica que não existe uma *CRAS* singular para cada solo, mas infinitas curvas intermediárias entre os limites definidos pelas curvas limite de secagem e de umedecimento (FREDLUND, 2002). A ocorrência da histerese está ligada ao aprisionamento de ar no solo (FREDLUND; XING, 1994), e significa que duas amostras do solo submetidas ao mesmo valor de sucção podem apresentar valores diferentes de grau de saturação dependendo da trajetória de secagem ou umedecimento do solo (WHEELER; SHARMA; BUISSON, 2003). Em geral, os solos retêm mais água durante os processos de secagem (como a evaporação) do que durante os processos de umedecimento (como a infiltração), como mostra a Figura 1.

Figura 1 - Curva típica de retenção de água no solo. (A) estado de saturação inicial, (B) valor aproximado de entrada de ar (C) grau de saturação residual aproximado



Fonte: Adaptado de MASROURI; BICALHO; KAWAI (2008)

A curva parte do ponto com grau de saturação igual a 100% (ponto A), onde todos os vazios do solo estão preenchidos por água. O ponto B corresponde ao valor de entrada de ar (AEV), nomenclatura utilizada para definir o valor de sucção para o qual os maiores poros do solo começam a dessaturar (FREDLUND, XING, 2004). Nesse trecho da curva A-B, as forças de capilaridade são o mecanismo dominante e a curva é dependente do diâmetro máximo dos poros do solo. Solos com poros amplos e uniformes possuem AEV relativamente baixos (LU, LIKOS, 2004).

Após o ponto B e com o aumento da sucção, os menores poros do solo são dessaturados gradativamente com o aumento da sucção, até que se atinja trecho residual da *CRAS*. A faixa entre os pontos B-C da curva é governada pela distribuição dos poros do solo (LU; LIKOS, 2004). Quando o grau de saturação permanece praticamente constante, pode-se defini-lo como o grau de saturação residual, ponto no qual é

extremamente difícil a remoção de água dos vazios do solo (FREDLUND, VU, STIANSON, 2010). Nesse trecho da curva, a água encontra-se na forma de finos filmes ao redor das partículas sólidas do solo ou na forma de meniscos desconectados (Vanapalli *et al.*, 1998). O mecanismo dominante corresponde às forças de adsorção e, portanto, é dependente de fatores como a área específica e dos minerais argílicos constituintes dos sólidos do solo (LU; LIKOS, 2004).

Várias técnicas são utilizadas para medir a sucção (mátrica ou total) em solos não saturados, e diferentes aplicações e intervalos de medidas são considerados. A Tabela 1 descreve brevemente os princípios de trabalho comumente aplicados de algumas técnicas e suas faixas de aplicabilidade. A técnica mais adequada para determinar a *CRAS* depende de fatores como a aplicação pretendida, os recursos humanos e financeiros disponíveis, e da magnitude de sucções a serem estabelecidas (MASROURI, BICALHO, KAWAI, 2008).

Tabela 1 – Resumo das técnicas laboratoriais comuns para medição e controle da sucção do solo

Técnica	Tipo de sucção	Medir a sucção de / controlar a sucção com	Faixa de medida (MPa)	Trajectoria hidráulica da sucção
Para medir a sucção				
Tensiômetro	Matricial	Poro pressão negativa	0-0,1 (1,5)	
Sensor de condutividade Elétrico / térmico	Matricial	Condutividade térmica	0,01-4	
Papel filtro	Matricial / Total	Conteúdo de água do papel	0,1-03	
Higrômetro / Sensores de Capacidade	Total	Vapor de umidade	0,1-100	
Para controlar a sucção				
Placa de pressão	Matricial	Pressão do ar	0,01-1,5	Secagem / umedecimento
Coluna de solo	Matricial / Total	Comprimento capilar macroscópico	0-0,1	Secagem
Centrífuga	Matricial	Força centrífuga	0,01-1,5	Secagem
Osmótica	Matricial	Pressão osmótica	0-1	Secagem / umedecimento
Equilíbrio de vapor	Total	Solução salina	3-100	Secagem / umedecimento

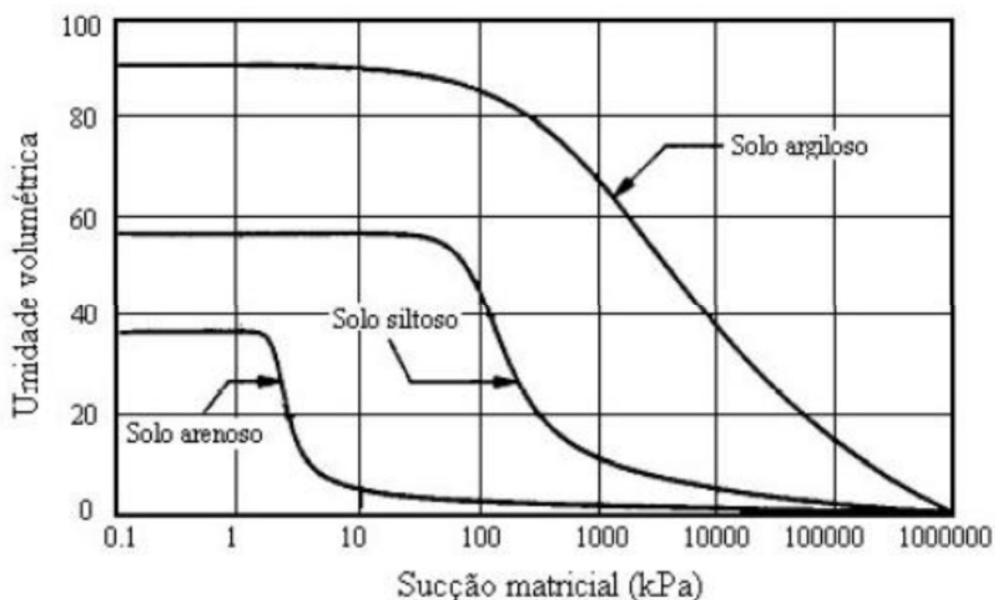
Fonte: Adaptado de MASROURI, BICALHO e KAWAI (2008)

As técnicas citadas geram pontos que relacionam a sucção e o teor de umidade do solo associado. Embora a medição direta seja imprescindível, elas ainda são consideradas trabalhosas e custosas devido a fatores como a dificuldade de amostragem em campo, transporte e preparação das amostras em laboratório, e associadas à instalação, manutenção e instrumentação de campo (LU; LIKOS, 2004).

2.2.1 Curvas de Retenção Típicas

O formato da curva é fortemente influenciado pelo tamanho das partículas sólidas e pela distribuição do tamanho dos poros do solo (LU; LIKOS, 2004). A influência da textura do solo é observada na Figura 2, que mostra curvas típicas referentes a solos de textura arenosa, siltosa e argilosa. O tipo de solo afeta o valor de entrada de ar e a inclinação da *CRAS*.

Figura 2 – Formato da *CRAS* para diferentes tipos de solo



Fonte: Adaptado de Vanapalli (1994)

Barbour (1998) mostra que o decréscimo do tamanho dos grãos leva a um aumento no valor da pressão de entrada de ar e suaviza a inclinação da curva. Os solos arenosos e, portanto, com menor percentual de finos (F_c) (grãos de tamanho silte e/ou argila) apresentam *CRAS* com trecho bem definidos. Como as partículas de areia são relativamente grandes (0.05 - 2 mm), a água pode ser removida para pequenos valores de sucção o que resulta em um *AEV* menor do que para argilas e siltes. Os solos argilosos possuem maior capacidade de retenção de água devido aos menores vazios presentes em sua estrutura. Além disso, devido a interação dos sólidos com a água, quanto maior a plasticidade das argilas, maior será o valor de entrada de ar e de sucção residual (FREDLUND; XING, 1994). Os solos siltosos apresentam comportamento intermediário entre solos arenosos e argilosos.

A inclinação da *CRAS* está ligada à uniformidade do tamanho dos grãos: a curva é mais íngreme para solos de gradação uniforme e suave para solos bem graduados (YANG *et al.*, 2004). Watabe, Leroueil e Le Bihan (2000) destacam ainda que a distribuição dos poros do solo está ligada não somente à distribuição granulométrica, mas também é influenciada pela compactação do solo e pelo estado da amostra (indeformada ou amolgada). Assim, esses fatores também se relacionam ao formato da *CRAS*.

2.3 Modelos matemáticos para ajuste da *CRAS*

Diversas equações são propostas na literatura para representar analiticamente a *CRAS* de água no solo, como mostra a Tabela 2. Essas equações podem ser derivadas de uma única forma genérica (LEONG; RAHARDJO, 1997) e, usualmente, representam a curva em uma forma sigmoidal geral. Essas equações permitem a interpretação dos pontos obtidos pelas técnicas experimentais em uma forma matemática contínua, geralmente úteis para aplicação da *CRAS* na modelagem do comportamento dos solos não saturados. O ajuste dos parâmetros desses modelos é empírico, realizado a partir de dados experimentais existentes.

Os pesquisadores buscam uma função universal que possa descrever a *CRAS* de

todos os tipos de solo. A função de van Genuchten (1980) tem sido, historicamente, a mais amplamente utilizada (CHANG *et al.*, 2004).

Tabela 2 - Modelos matemáticos de ajuste para a *CRAS*

Referência	Equação	Parâmetros
Gardner (1956)	$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\frac{h}{a})^b]}$	θ_r = umidade volumétrica residual a, b = parâmetros de ajuste h = sucção
Brooks e Corey (1964)	$S_e = \left(\frac{h_b}{h}\right)^\lambda$ $S_e = \frac{S - S_r}{1 - S_r}$	S_e = grau de saturação efetivo h_b = valor de sucção associado a AEV λ = índice de distribuição dos tamanhos dos poros
van Genuchten (1980)	$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + \alpha h ^{n-2}]^N}$	θ_s = umidade volumétrica na saturação θ_r = umidade volumétrica residual α , n e m = parâmetros empíricos de ajuste $m = 1 - 1/n$
Fredlund e Xing (1994)	$\theta = C(h) \cdot \left[\frac{\theta_s}{\ln[e + (h/a)^n]} \right]$ $C(h) = 1 - \left[\frac{\ln(1 + h/h_r)}{\ln(1 + 10^6/h_r)} \right]$	θ_s = umidade volumétrica na saturação α , n = parâmetros de ajuste h_r = valor de sucção residual C(h) = fator de correção

2.3.1 Equação de van Genuchten (1980)

A equação proposta por van Genuchten (1980) descreve a relação entre o teor de umidade (θ) e sucção (h) para um solo, ou curva *CRAS* (limite superior de secagem) da seguinte forma:

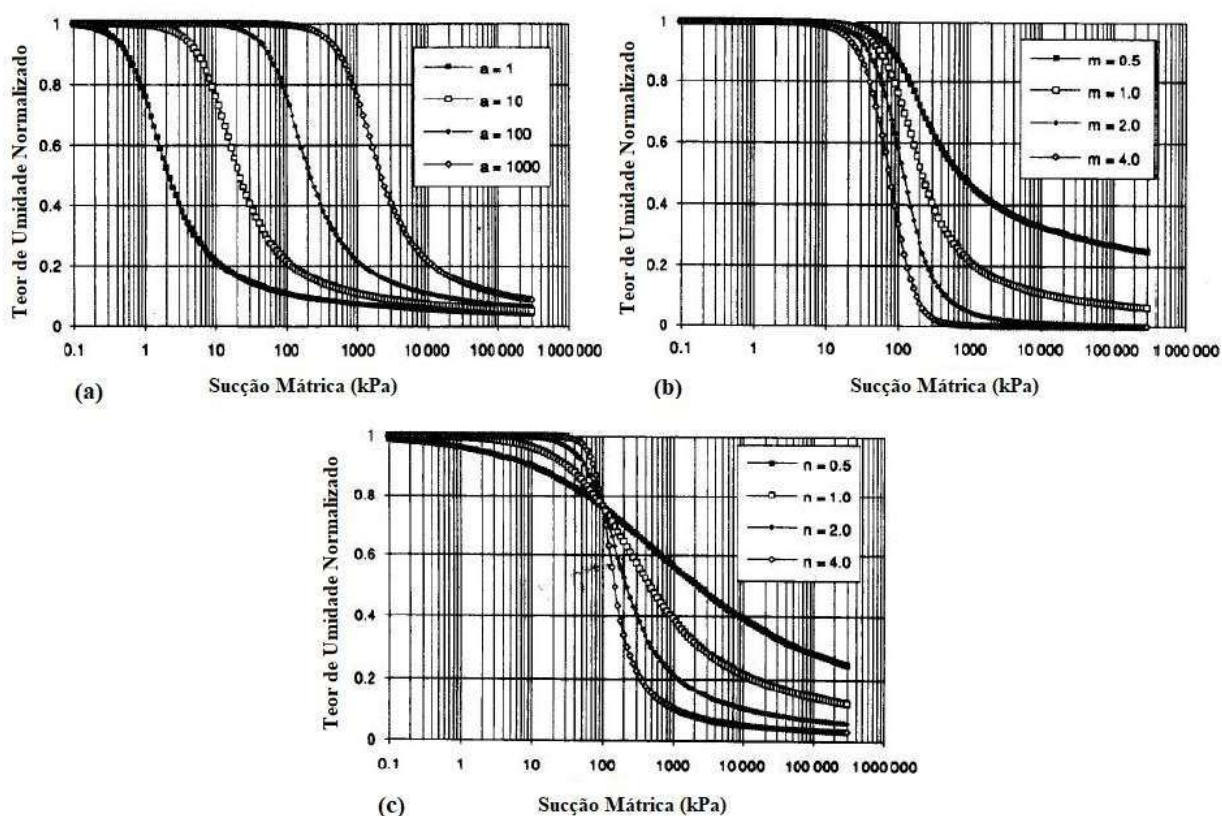
$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h|^{n-2}]^N} \quad (1)$$

onde θ , θ_r e θ_s são a umidade volumétrica atual, residual e saturada, respectivamente, h

é a sucção, α , n_v e m são parâmetros de ajuste do formato da *CRAS*.

Os parâmetros de ajuste são independentes e sua influência no formato da *CRAS* é mostrada na Figura 3. O parâmetro α altera somente a posição da curva em direção à região de maiores ou menores valores de sucção. O parâmetro m controla a inflexão da parte residual inferior e o patamar mínimo da *CRAS* (van Genuchten, 1980) e o parâmetro n_v controla a inclinação da *CRAS*.

Figura 3 - Influência dos parâmetros matemáticos na equação de van Genuchten (1980): (a) a variação de α , com $n_v = 2$ e $m = 1$, (b) a variação de m , com $\alpha = 100$ e $n_v = 2$ e (c) a variação de n_v com $\alpha = 100$ e $m = 1$



Fonte: Adaptado de Silva (2005)

Embora essa forma da equação para a *CRAS* dê maior flexibilidade e precisão ao ajuste (VAN GENUCHTEN, NIELSEN, 1985; FREDLUND, XING, 1994), é comum definir a equação com apenas quatro variáveis independentes (isto é, θ_s , θ_r , α e n_v),

considerando a restrição de $m = 1 - 1/n_v$ (MUALEM, 1976), o que permite a obtenção de uma forma fechada simples da expressão de condutividade hidráulica (VERECKEN *et al.*, 2010).

2.3.1.1 Função da Curva de Condutividade Hidráulica (CCH)

A condutividade hidráulica (K) de um solo representa a maior ou menor facilidade com que a percolação um fluido ocorre nos poros desse solo. A representação gráfica de K com a sua correspondente sucção é denominada curva de condutividade hidráulica (*CCH*), que é função de fatores como a geometria e topologia dos poros do solo, o índice de vazios, o grau de saturação e o histórico de saturação do solo (MASROURI *et al.*, 2008). Quando na condição saturada, K é representada pelo coeficiente de permeabilidade (K_{sat}). Segundo Santos (2004), na condição não saturada, o solo tem parte de seus vazios preenchidos por ar, o que gera uma perda de capacidade de transmitir água. Desta forma, quanto maior a sucção, menor a condutividade hidráulica do solo.

A medição da condutividade hidráulica não saturada como função da sucção é também difícil e custosa em termos de tempo e de dinheiro e por isso a utilização de *PTFs* para sua estimativa também é comum (GUARRACINO, 2007). Para obter uma expressão relativamente simples da condutividade hidráulica, van Genuchten (1980) assumiu $m = 1 - 1/n_v$, e, combinada com as equações propostas por Burdine (1953) e Mualem (1976), descreve a *CCH* da seguinte maneira:

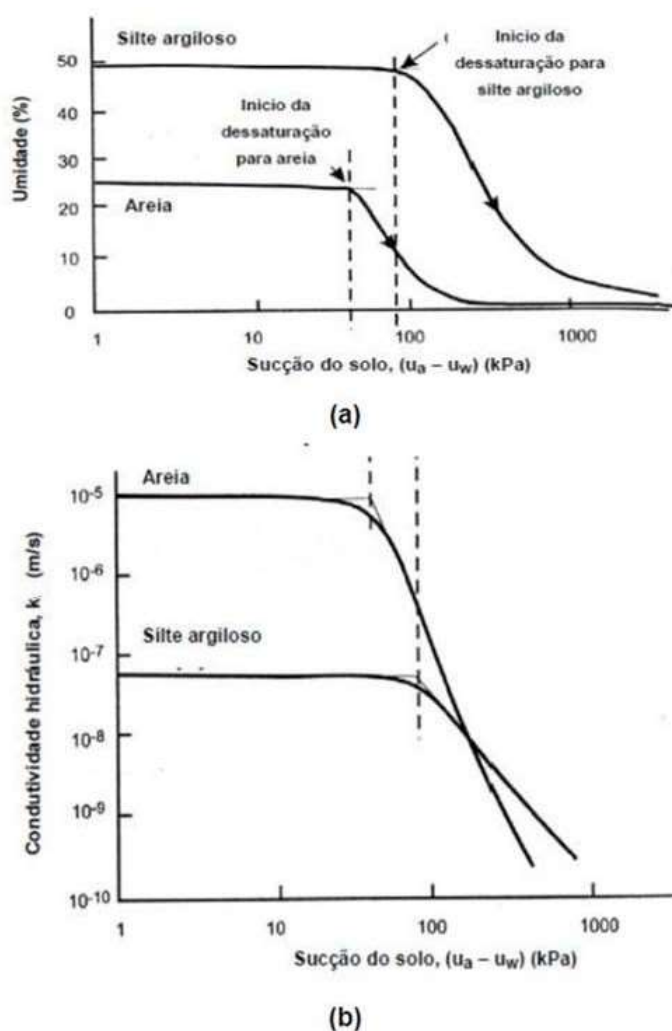
$$K(S_e) = K_{cat} \frac{S_e^B}{e} \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{N}} \right) \right]^2 \quad (2)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_c - \theta_r} = [1 + (\alpha h)^{n_v}]^{-N} \quad (3)$$

onde K_{sat} é a condutividade hidráulica saturada ($s = 100\%$), S_e = saturação efetiva (adimensional), λ = constante empírica, considerado neste trabalho igual a 0,5 (MUALEM, 1976), α e n_v e m são os parâmetros de ajuste da equação de van Genuchten (1980).

A Figura 4 mostra a relação entre as curvas de retenção e de condutividade hidráulica para dois diferentes tipos de solo. Na condição de saturação até o valor de entrada de ar, a condutividade hidráulica é igual ao coeficiente de permeabilidade saturado (K_{sat}). A partir do início do processo de drenagem, o valor da condutividade hidráulica (K) decresce rapidamente à medida que a umidade volumétrica decresce e o valor da sucção aumenta.

Figura 4 – Relação entre a (a) curva de retenção e (b) curva de condutividade hidráulica para uma areia e um silte argiloso



Fonte: Adaptado de Fredlund, Fredlund e Wilson (1997)

2.3.1.2 *Interpretação dos Parâmetros da Equação de van Genuchten (1980)*

Considerando a restrição para definir m , a equação 1 possui quatro parâmetros independentes que devem ser estimados a partir de pontos medidos da *CRAS*. O parâmetro de ajuste θ_s representa o ponto onde o solo está saturado (isto é, $s = 100\%$). De fato, esse ponto pode ser obtido experimentalmente, sendo igual a porosidade total do solo (P) e obtido por meio da densidade aparente seca do solo (γ_d) e da densidade dos sólidos (γ_s), conforme a Equação 4. Embora essa relação seja conhecida, é comum deixar o parâmetro θ_s livre durante a fase de ajuste dos pontos à equação de van Genuchten (1980).

$$\theta_c = P = 1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_c} \text{ quando } s = 100\% \quad (4)$$

O teor de umidade volumétrica residual (θ_r) corresponde ao valor de sucção a partir do qual a drenagem de água livre nos poros do solo não é mais possível. van Genuchten (1980) define esse ponto como o teor de umidade para uma sucção de 1500 kPa. Para fins de modelagem na área da agricultura, esse ponto é definido como ponto de murcha permanente e medições além desse valor não são necessárias para os modelos. Zhai, Rahardjo e Satyanaga (2017) mostram que o parâmetro θ_r funciona apenas como ajuste matemático para a equação e não possui representação quantitativa específica e nem se refere a uma propriedade do solo, uma vez que é determinado puramente por procedimentos de regressão.

Diferentes interpretações são encontradas na literatura em relação ao parâmetro α , que possui unidade inversa a da sucção do solo (h). van Genuchten (1980) define o parâmetro como proporcional ao inverso do valor de h a meio caminho do intervalo entre θ_s e θ_r . Entretanto, é comum encontrar o parâmetro relacionado inversamente ao valor de sucção na entrada de ar (AEV) (LIKOS, YAO, 2014; BENSON *et al.*, 2014), definido como o estado em que a entrada de ar no maior poro é permitida pela primeira vez durante a dessaturação (Fredlund e Xing, 1994). Dessa forma, altos valores de α indicam uma mudança repentina no conteúdo de água, com grandes poros esvaziando sob baixas

sucções, o que geralmente é típico de areias ou solos bem estruturados (HODNETT, TOMASELLA, 2002). Baixos valores de α indicam que os poros esvaziam a partir de valores de sucção mais altos, o que geralmente é mais provável em solos de grão finos e não estruturados. Chiu, Yan e Yuen (2012) associam o parâmetro ao tamanho modal dos poros de um solo.

Embora o parâmetro α controle o AEV da curva (CHIU, YAN, YUEN, 2012), ele não representa o AEV ou a pressão de bolhas (*bubbling pressure*) e não deve ser interpretado como tal (LEONG, RAHARDJO, 1997). van Lier e Pinheiro (2018) o interpretam apenas como parâmetro de ajuste da CRAS. De qualquer forma, α não altera o formato da curva, mas a posição da curva em direção à região de valores de sucção mais altos ou mais baixos.

Finalmente, o parâmetro adimensional n_v relaciona-se à distribuição do tamanho dos poros do solo (LIKOS, YAO, 2014). Chiu, Yan e Yuen (2012) definem n_v como inversamente proporcional ao desvio padrão do tamanho de poro modal. Valores relativamente altos de n_v refletem uma distribuição de tamanho de poro relativamente limitada, no qual a maioria dos poros drena em uma faixa de sucção relativamente pequena (LU, LIKOS, 2004). É mais provável em solos com distribuição limitada de poros ou granulometria (solos uniformes). Para valores de n_v pequenos, a mudança da umidade volumétrica e na CRAS é gradual, típica de solos com granulometria bem graduada. Benson *et al.* (2014) apresentam ainda a amplitude da distribuição granulométrica com importante efeito no parâmetro.

Gonçalves (2012) analisou a influência da distribuição granulométrica e de classes texturais nos parâmetros da equação de van Genuchten (1980) para solos temperados da Europa e da América do Norte do UNSODA. O estudo sugere que não existe dependência entre o teor de finos e a textura dos solos quando o percentual de finos é tal que preenche todos os vazios das partículas mais grossas. A análise da variação do K_{sat} com F_c indicou esse valor como igual a 30% para os solos de finos não plásticos utilizados no estudo. A falta de significado físico dos parâmetros não possibilitaram a quantificação dos parâmetros com a distribuição granulométrica.

2.3.1.3 Estimativa dos parâmetros da equação de van Genuchten (1980)

Devido às dificuldades e custos da medição direta da *CRAS*, métodos indiretos como as funções de pedotransferência (PTFs) têm sido usados para estimativa da curva (SCHAAP; LEIJ; VAN GENUCHTEN, 2001; VEREECKEN *et al.*, 2010; PATIL; SINGH, 2016). As PTFs podem ser criadas a partir de métodos semiempíricos ou empíricos. O trabalho de Arya e Paris (1981) é um exemplo de modelo semiempírico, que se aproveita de relações físicas existentes entre a curva de distribuição granulométrica e a *CRAS* para estimativa da segunda.

As PTFs empíricas podem ser divididas em PTFs pontuais e PTFs paramétricas. As PTF pontuais estimam o valor da umidade volumétrica para um valor de sucção fixo e pré-determinado, enquanto as PTFs paramétricas estimam parâmetros de equações que descrevem a curva para um determinado intervalo de sucções. Vereecken *et al.* (2010) citam os esforços na criação de PTFs paramétricas porque elas fornecem uma função matemática para a *CRAS* e *CCH*, podendo ser utilizada diretamente na criação de modelos matemáticos. É o caso das PTFs para estimar os parâmetros da equação de van Genuchten (1980).

São diversas as estruturas matemáticas e estatísticas para a estimativa dos parâmetros da equação de van Genuchten (1980). Pode-se destacar os modelos de regressão (WOSTEN *et al.*, 1999; HODNETT; TOMASELLA, 2002), as técnicas computacionais de mineração de dados, como redes neurais artificiais (SCHAAP; LEIJ; VAN GENUCHTEN, 2001) e as tabelas de consulta (CARSEL; PARRISH, 1988; WOSTEN *et al.*, 1999) que fornecem parâmetros hidráulicos para classes texturais específicas. As entradas podem ser variáveis categóricas, como a classe textural do solo, ou numéricas, como as frações granulométricas de areia, argila e silte, a densidade do solo e o teor de matéria orgânica, como mostra a Figura 5. Entretanto, muitas vezes os parâmetros dessas equações são definidos como apenas ajustes matemáticos (ZHA, RAHARDJO; SATYANAGA, 2017), o que dificulta a correlação com propriedades físicas do solo.

Figura 5 – Fluxograma para a estimativa de funções hidráulicas a partir de PTFs



Fonte: Autor (2020)

2.3.2 Tabelas de Consulta e PTFs de Classe para estimativa da CRAS

A forma mais simplória e ainda amplamente utilizada de *PTFs* são as tabelas de consulta que permitem estimar os parâmetros de equações propostas para definir a *CRAS* por meio de parâmetros hidráulicos médios para solos com propriedades semelhantes. Essas funções são denominadas *PTFs* de classe, e constituem o primeiro passo na identificação de relações de dependência entre os parâmetros hidráulicos do solo e classes de solo classificadas pela textura, por exemplo. A principal premissa de grande parte das *PTFs* é que as propriedades texturais dominam o comportamento hidráulico dos solos (LILLY; LIN, 2004).

Existem diversas tabelas de banco de dados publicadas que permitem estimar os quatro parâmetros independentes da equação de van Genuchten (1980). Wosten *et al.* (1999) reuniu no *HYPRES (Hydraulic Properties of European Soils)*, dados hidráulicos de 20 instituições e 12 países da Europa em um total de 5521 amostras de solo. O principal objetivo foi tornar as propriedades hidráulicas do solo facilmente acessíveis e representativas, permitindo o desenvolvimento de funções de pedotransferência (PTFs) em escala europeia. As PTFs permitem a previsão de propriedades hidráulicas a partir de dados de fácil obtenção, como a textura ou granulometria do solo, sendo uma

alternativa à medição direta demorada e dispendiosa (WOSTEN *et al.*, 1999). As PTFs de classe propostas são mostradas na

Tabela 3, prevendo os quatro parâmetros da equação de van Genuchten (1980) e o valor de K_s para 11 classes de solo baseadas na classe pedológica e na textura do solo.

Tabela 3 – Parâmetros da equação de van Genuchten (1980) sugeridos por Wosten *et al.* (1999)

Classificação textural	θ_r (cm ³ .cm ⁻³)	θ_s (cm ³ .cm ⁻³)	α (cm ⁻¹)	n_v	m	K_{sat} (cm/dia)
Solos superficiais						
Grossa	0.025	0.403	0.0383	1.3774	0.2740	60.000
Média	0.010	0.439	0.0314	1.1804	0.1528	12.061
Média fina	0.010	0.430	0.0083	1.2539	0.2025	2.272
Fina	0.010	0.520	0.0367	1.1012	0.0919	24.800
Muito Fina	0.010	0.614	0.0265	1.1033	0.0936	15.000
Subsolos						
Grossa	0.025	0.366	0.043	1.5206	0.3424	70.000
Média	0.01	0.392	0.0249	1.1689	0.1445	10.755
Média fina	0.01	0.412	0.0082	1.2179	0.1789	4.000
Fina	0.01	0.481	0.0198	1.0861	0.0793	8.500
Muito Fina	0.01	0.538	0.0168	1.0730	0.0680	8.235
Orgânicos	0.01	0.766	0.013	1.2039	0.1694	8.000

Da mesma forma, o banco de dados *UNSODA* (SCHAAP; LEIJ; VAN GENUCHTEN, 2001) possui dados de 2134 amostras de solos temperados sedimentares da América do Norte e Europa. Os pesquisadores desenvolveram o programa ROSETTA, que implementa funções de pedrotransferência (PTFs) para estimar os parâmetros da equação de van Genuchten (1980) para modelagem da *CRAS*, além da condutividade hidráulica saturada e a função de condutividade hidráulica não saturada. O primeiro modelo, baseado apenas na classificação textural, constitui uma *PTF* de classe e é mostrado na Tabela 4. As demais *PTFs* são modelos hierárquicos de redes neurais artificiais que utilizam parâmetros como apenas a classificação textural, a distribuição

granulométrica, a densidade do solo, e/ou pontos da *CRAS* medidos experimentalmente para obtenção de propriedades hidráulicas dos solos.

Tabela 4 - Parâmetros da equação de van Genuchten (1980) sugeridos por Schaap, Leij e van Genuchten (2001) para o banco de dados *UNSODA*

Classe Textural	θ_r (cm ³ .cm ⁻³)	θ_s (cm ³ .cm ⁻³)	α (cm ⁻¹)	n_v	K_{sat} (cm/dia)
Argila	0.098	0.459	0.015	1.253	1.169
Franco Argilosa	0.079	0.442	0.016	1.416	0.913
Franco	0.061	0.399	0.011	1.472	1.081
Areia Franca	0.049	0.390	0.035	1.746	2.022
Areia	0.053	0.375	0.035	3.177	2.808
Argila Arenosa	0.117	0.385	0.033	1.208	1.055
Franco Argilo Arenosa	0.063	0.384	0.021	1.330	1.120
Franco Siltosa	0.039	0.387	0.027	1.449	1.583
Silte	0.050	0.489	0.007	1.679	1.641
Argila Siltosa	0.111	0.481	0.016	1.321	0.983
Franco Argilo Siltosa	0.090	0.482	0.008	1.521	1.046
Franco Siltosa	0.065	0.439	0.005	1.663	1.261

Hodnett e Tomasella (2002) estudaram 771 solos tropicais, incluindo dados de países da Ásia, África e Américas, do banco de dados *IGBP-DIS*. Os solos são, em maioria, classificados como Latossolos, Argissolos e Cambissolos. Os parâmetros θ_s , θ_r , α e n_v da equação de van Genuchten (1980) foram derivados para esses solos e comparados com valores de parâmetros de dois conjuntos de dados publicados de solos da região temperada: o conjunto de Schaap, Leij e van Genuchten (2001) citado anteriormente, e dados de 5611 horizontes do trabalho de Carsel e Parrish (1988), mostrados na Tabela 5.

Segundo Levi (2017), as classes texturais fornecem informações valiosas, mas, para algumas aplicações, as frações de areia, silte e argila são preferíveis devido às limitações das informações fornecidas pelas classes, resultantes das amplas faixas de valores de areia, silte e argila dentro de cada classe.

A variabilidade de valores entre as classes indica a influência da textura nas propriedades hidráulicas dos solos, e, portanto, na *CRAS*. Apesar disso, as *PTFs* de

classe possuem limitações, uma vez que fornecem apenas uma característica hidráulica média para cada classe de textura, mesmo que possa haver uma grande variabilidade de características dentro de uma única classe textural (Wosten *et al.*, 1995).

Tabela 5 – Parâmetros da equação de van Genuchten (1980) sugeridos por Hodnett e Tomasella (2002) para (a) banco de dados de solos tropicais IGBP-DIS e (b) dados de solos temperados de Carsel e Parrish (1988)

Classe textural	θ_r (m ³ .m ⁻³)		θ_s (m ³ .m ⁻³)		α (kPa ⁻¹)		n_v	
	Tropical	Temp.	Tropical	Temp.	Tropical	Temp.	Tropical	Temp.
Areia	0.034	0.045	0.426	0.430	0.380	1.450	2.391	2.681
Franco Arenoso	0.072	0.057	0.448	0.410	0.670	1.240	1.889	2.278
Areia Franca	0.099	0.065	0.461	0.410	0.420	0.750	1.588	1.890
Franco	0.163	0.078	0.531	0.430	0.330	0.360	1.446	1.560
Franco Siltoso	0.198	0.067	0.578	0.450	0.170	0.200	1.556	1.410
Areia Franco Argilosa	0.148	0.100	0.418	0.390	0.570	0.590	1.489	1.479
Franco Argiloso	0.227	0.095	0.495	0.410	0.510	0.190	1.428	1.311
Franco Silte Argiloso	0.243	0.089	0.579	0.430	0.270	0.100	1.466	1.230
Silte argiloso	0.269	0.070	0.578	0.360	0.300	0.050	1.481	1.091
Areia argilosa	0.201	0.100	0.439	0.380	0.500	0.270	1.388	1.230
Argila	0.270	0.068	0.545	0.380	0.460	0.080	1.461	1.091

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo utiliza o banco de dados *HYBRAS* (OTTONI *et al.*, 2018; 2019) para investigar a variação dos parâmetros de ajuste da equação de van Genuchten (1980) – proposta para estimar a curva de retenção (CRAS) e de condutividade hidráulica (CCH) –, com a distribuição granulométrica e a textura de solos brasileiros. O *HYBRAS* é um extenso banco de dados hidrofísicos de solos tropicais de todo o território brasileiro, contendo 1075 amostras de diferentes solos. A organização em tabelas que associam dados hídricos dos solos, como dados de teor volumétrico de água (θ) para diferentes valores de sucção e de condutividade hidráulica saturada (K_{sat}), a dados físicos, como a distribuição granulométrica e a densidade aparente seca do solo, por exemplo, tornam o *HYBRAS* importante para o desenvolvimento de PTFs para solos brasileiros.

Três classificações são adotadas nesta pesquisa para investigar se formas limitadas, baseadas apenas na textura ou granulometria, podem ser usadas para estimar valores dos parâmetros de ajuste da equação proposta por van Genuchten (1980) para definição da *CRAS* e da *CCH*. Além disso, para efeito de comparação, a análise dos solos tropicais brasileiros se estende para o banco de dados *UNSODA* (SCHAAP; LEIJ; VAN GENUCHTEN, 2001), que contém dados de solos temperados da Europa e da América do Norte.

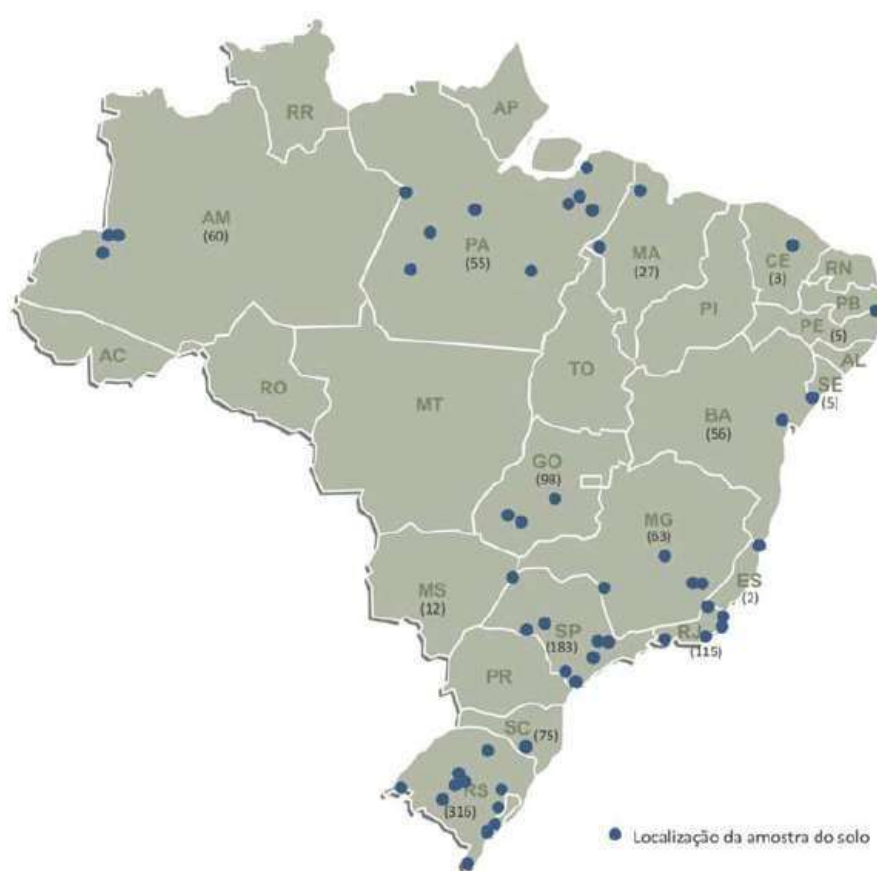
3.1 Descrição do banco de dados *HYBRAS* (OTTONI *et al.*, 2018; 2019)

As 1075 amostras do banco de dados *HYBRAS* englobam solo de uma variedade de locais do território brasileiro, conforme mostra a Figura 6. Todas as regiões do Brasil são representadas. Informações das publicações de origem das amostras de solo ensaiadas são apresentadas no trabalho de Ottoni *et al.* (2018).

O *HYBRAS* utiliza a classificação granulométrica da *USDA* que considera os finos do solo (isto é, partículas de tamanho silte e argila) como as partículas de tamanho menor do que 0.05 mm, o que difere do Sistema Unificado de Classificação (SUC), que

considera esse valor igual a 0.074 mm (USDA, 2017). As informações acerca da distribuição granulométrica de cada amostra são fornecidas como porcentagens de areia (grão de tamanho 0.05 a 2.0 mm), silte (0.002 a 0.05 mm) e argila (< 0.002 mm) de cada amostra, sempre totalizando 100%. A limitação do banco de dados se refere à ausência de informações a respeito da mineralogia dos finos de cada amostra.

Figura 6 - Distribuição das amostras do banco de dados *HYBRAS* no território brasileiro

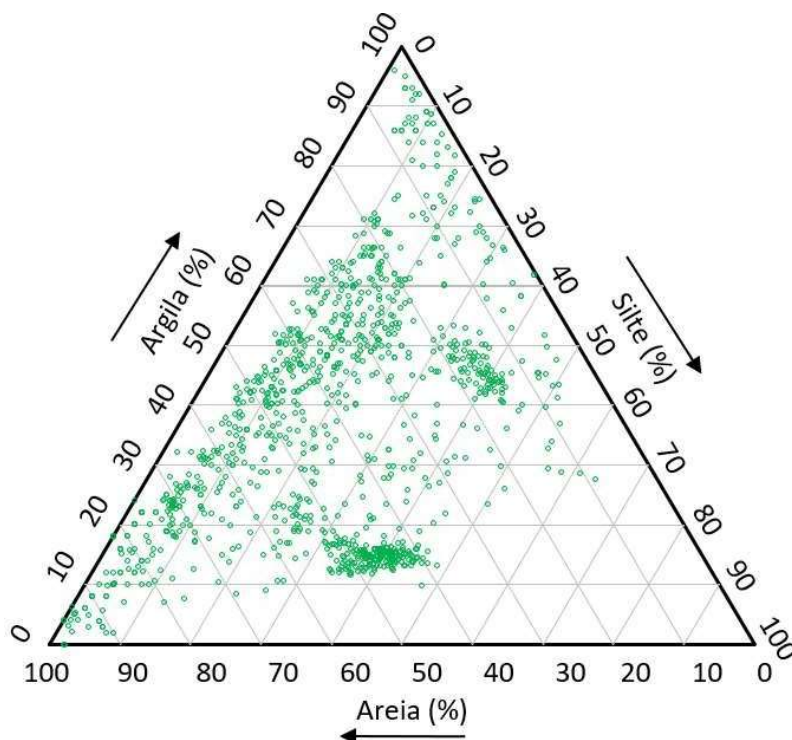


Fonte: Ottoni *et al.* (2018)

Além do peneiramento para a fração arenosa, os métodos da pipeta e do densímetro são utilizados para obtenção dos dados da fração fina do solo. A distribuição dos solos no triângulo textural é mostrada na Figura 7. É observada ausência de solos com alto teor de silte e uma concentração de amostras no lado esquerdo e na parte

central do triângulo. O triângulo textural reforça a heterogeneidade e variedade de tipos de solo presente no *HYBRAS*.

Figura 7 - Distribuição das amostras do *HYBRAS* no triângulo textural



Fonte: Autor (2020)

Os dados de teor de umidade volumétrica (θ) totalizam 8793 pontos para as 1075 amostras. Os métodos experimentais para obtenção desses dados são diversos, com destaque para a mesa de tensão para valores de sucção entre a saturação e 60 cm e da placa porosa em câmara de pressão para a faixa de sucção completa (0 a 1500 kPa). Todos os dados são provenientes de ensaios em amostras de solo saturadas e indeformadas, correspondendo à *CRAS* limite de secagem superior desses solos. A condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) é medida em 425 amostras, representando 11 estados do Brasil e cobrindo uma extensa amplitude de valores (1.35×10^{-7} a 4.5×10^{-4} m/s). A principal forma de obtenção do K_{sat} foi por meio de ensaios de permeâmetros de carga constante em amostras indeformadas (cerca de 80% das amostras).

A partir da utilização do algoritmo *GlobalSearch* da toolbox *Global Optimization* do software *Matlab*, o *HYBRAS* faz o ajuste da equação de van Genuchten (1980) a partir dos dados experimentais de retenção de água de cada amostra, que relacionam umidade volumétrica e sucção, fornecendo os 4 parâmetros de ajuste do modelo: θ_s , θ_r , α , n_v . A otimização dos parâmetros foi sujeita a restrições, tais como: θ_r : 0 a 0.533 cm³.cm⁻³; θ_s : 0.1 a 0.96 cm³.cm⁻³; α : 0.00001 a 0.99999 cm⁻¹; e n_v : 1.01 a 15. O modelo mostrou-se satisfatório no ajuste dos dados de retenção do *HYBRAS*, com RMSE (raiz do erro quadrático médio) global na ordem de 0.0107 cm³.cm⁻³. O resumo estatístico dos parâmetros da equação de van Genuchten (1980) para as 1075 amostras e do K_{sat} (420 amostras) do *HYBRAS* é mostrado na Tabela 6.

Tabela 6 - Resumo estatístico dos parâmetros da equação de van Genuchten (1980) e do K_{sat} para o banco de dados *HYBRAS*

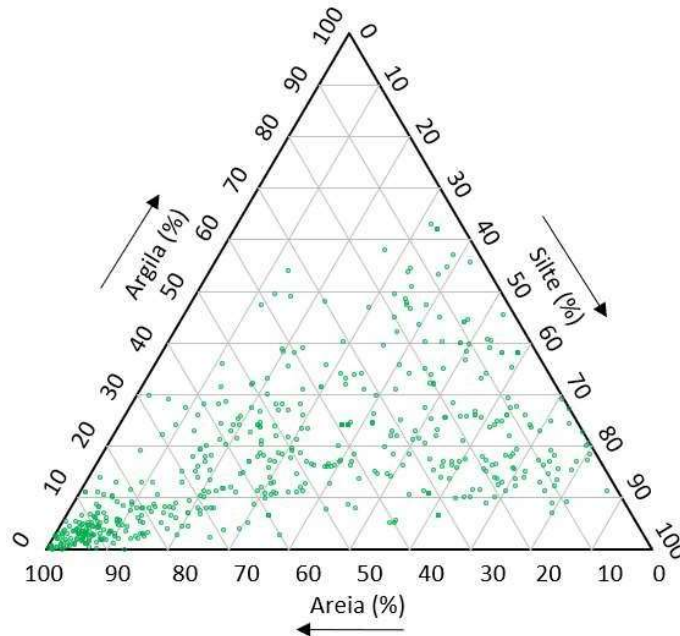
Parâmetros	Mínimo	Média	Máximo	Desvio Padrão	CV
θ_s (cm ³ .cm ⁻³)	0.261	0.484	0.866	0.11	0.22
θ_r (cm ³ .cm ⁻³)	0	0.161	0.401	0.10	0.64
α (cm ⁻¹)	0	0.25	0.99999	0.32	1.26
n_v	1.03	1.59	15	1.36	0.85
K_{sat} (m/s)	1.35E-07	2.51E-05	4.50E-04	4.45E-05	0.0179

CV: coeficiente de variação

3.2 Descrição do banco de dados *UNSODA* (SCHAAP; LEIJ; VAN GENUCHTEN, 2001)

Embora o banco de dados *UNSODA* (SCHAAP; LEIJ; VAN GENUCHTEN, 2001) possua dados da *CRAS* de mais de 2000 solos sedimentares da América do Norte e da Europa, apenas 554 amostras de solo estão disponíveis no software *ROSETTA* e são utilizadas nessa pesquisa, assim como no trabalho de Gonçalves (2012). A distribuição dos solos do *UNSODA* no triângulo textural é mostrada na Figura 8. Diferentemente do *HYBRAS*, o *UNSODA* é pouco representado por solos com alta porcentagem de argila (> 65%) e apresenta maior concentração de amostras de solo com elevada fração arenosa.

Figura 8 - Distribuição das amostras do *UNSODA* no triângulo textural



Fonte: Autor (2020)

Os parâmetros da equação de van Genuchten (1980) foram ajustados aos dados de retenção de água a partir do algoritmo *Simplex* (ou *amoeba*). A função objetivo é apresentada na Equação 5:

$$O_w(\mathbf{p}) = \sum_{i=1}^{N_w} (\theta_i - \theta_i^v)^2 \quad (5)$$

onde θ_i e θ_i^v correspondem aos valores experimentais e estimados, respectivamente, N_w é o número de pontos da *CRAS* para cada amostra e $\mathbf{p}$ é o vetor dos parâmetros da equação (θ_s , θ_r , α , n_v).

O resumo estatístico dos parâmetros do *UNSODA* para as 554 amostras é mostrado na Tabela 7. As maiores divergências entre os dois bancos de dados referem-se aos valores máximos de θ_r e n_v (0.401 e 15.0 para o *HYBRAS* e 0.300 e 10.0 para o *UNSODA*, respectivamente). Os valores da condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) variam de $1,62 \times 10^{-8}$ a $3,65 \times 10^{-7}$ m/s, que correspondem a valores típicos de permeabilidade de areias siltsas.

Tabela 7 - Resumo estatístico dos parâmetros de van Genuchten (1980) para o banco de dados *UNSODA*

Parâmetros	Mín	Média	Máx	Desvio Padrão	CV
θ_s (cm ³ .cm ⁻³)	0.257	0.418	0.824	0.09	0.21
θ_r (cm ³ .cm ⁻³)	0.000	0.068	0.300	0.08	1.21
α (cm ⁻¹)	0.00	0.08	1.00	0.17	2.26
n_v	1.01	2.07	10.00	1.43	0.69
K_{sat} (m/s)	1.62E-08	1,97E-07	3,65E-07	8.34E-08	0.00423

3.3 Metodologia

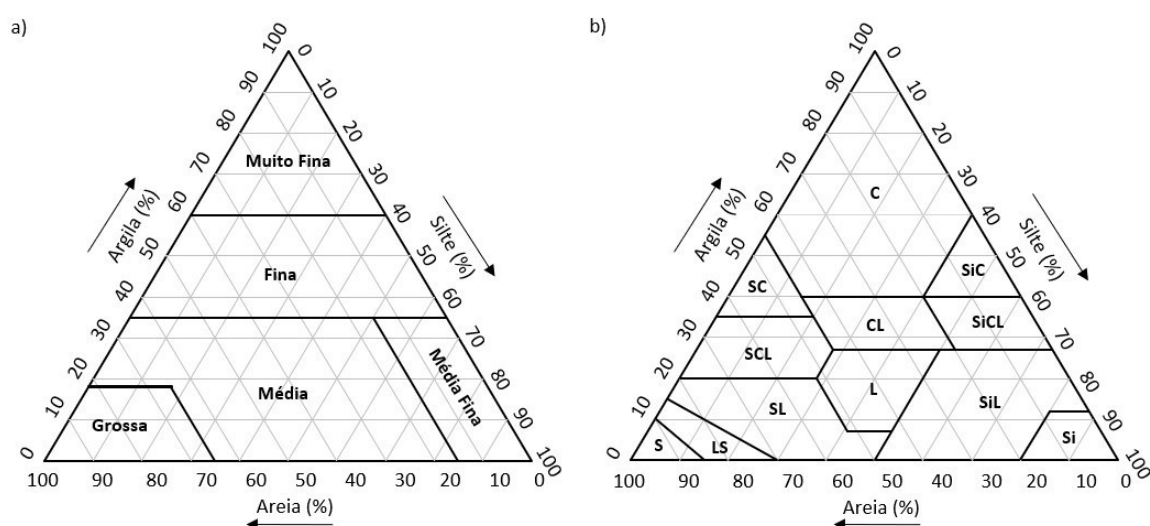
De forma a avaliar a maneira com que a distribuição granulométrica e as classes texturais do solo afetam a modelagem da *CRAS*, os parâmetros da equação de van Genuchten (1980) e a função de condutividade não saturada, as 1075 amostras do *HYBRAS* foram agrupadas nesta dissertação em três diferentes classificações: uma divisão em 10 subgrupos a partir de F_c de cada amostra de solo, que corresponde à soma das porcentagens de silte e/ou argila (GONÇALVES, 2012); uma divisão baseada em cinco classes texturais segundo o triângulo da *FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations)* (NEMES *et al.*, 1999; WÖSTEN *et al.*, 1999); e uma divisão baseada nas 12 classes texturais do triângulo da *USDA (United States Department of Agriculture)* (SCHAAP; LEIJ; VAN GENUCHTEN, 2001).

A primeira classificação leva em conta a influência do teor de finos do solo (isto é, partículas de tamanho silte e argila) nos parâmetros de ajuste da equação de van Genuchten (1980). As amostras foram divididas em 10 subgrupos ordenadas em ordem crescente de F_c (isto é, 0-10%, 10-20%; 20-30%; 30-40%; 40-50%; 50-60%; 60-70%; 70-80%; 80-90%; 90-100%).

A adequação de modelos de previsão pode ser influenciada por classes texturais (ou seja, partículas finas ou grossas do solo) e não por faixas de tamanho de partículas (NEMES *et al.*, 1999). As porcentagens de areia, silte e argila podem ser transportadas para um diagrama triangular, onde diferentes classes baseadas em textura estão

delimitadas. Existem diferentes modelos de triângulo para auxiliar a classificação das classes texturais de solo. Este trabalho utiliza dois deles: a segunda classificação é baseada no modelo proposto pela *FAO*, que divide os solos em 5 classes texturais: Grossa, Média, Média-Fina, Fina e Muito Fina. A terceira classificação utiliza o modelo proposto pelo *USDA*, que classifica os solos em 12 classes texturais: Areia (S), Areia Franca (LS), Argila (C), Argila Arenosa (SC), Argila Siltosa (SiC), Franco (L), Franco Arenoso (SL), Franco Argilo-Arenoso (SCL), Franco Argilo-Siltoso (SiCL), Franco Argiloso (CL) e Franco Siltoso (SiL). Os dois triângulos texturais são mostrados nas Figuras 9a e 9b.

Figura 9 - Triângulo textural a) FAO e b) USDA



Fonte: Autor (2020)

A partir das três classificações, foram calculados para cada subgrupo o valor mínimo, máximo, médio e a mediana dos quatro parâmetros de ajuste da equação de van Genuchten (1980) (θ_s , θ_r , α , e n_v). A mediana dos parâmetros permitiu o traçado de *CRAS* e de *CCH* hipotéticas para cada subgrupo dentro das três classificações. Para as duas primeiras classificações, os resultados são comparados com os resultados obtidos por Gonçalves (2012) para o banco de dados *UNSODA* (SCHAAP; LEIJ; VAN GENUCHTEN, 2001). Para a terceira classificação, os resultados são comparados com os valores fornecidos pelo modelo H1 de Schaap, Leij e Van Genuchten (2001) e por

Hodnett e Tomasella (2002), o que permite a comparação entre solos tropicais e temperados. A partir das curvas de cada subgrupo são analisadas a variação dos parâmetros da equação de van Genuchten (1980) com a textura e a distribuição granulométrica dos solos investigados.

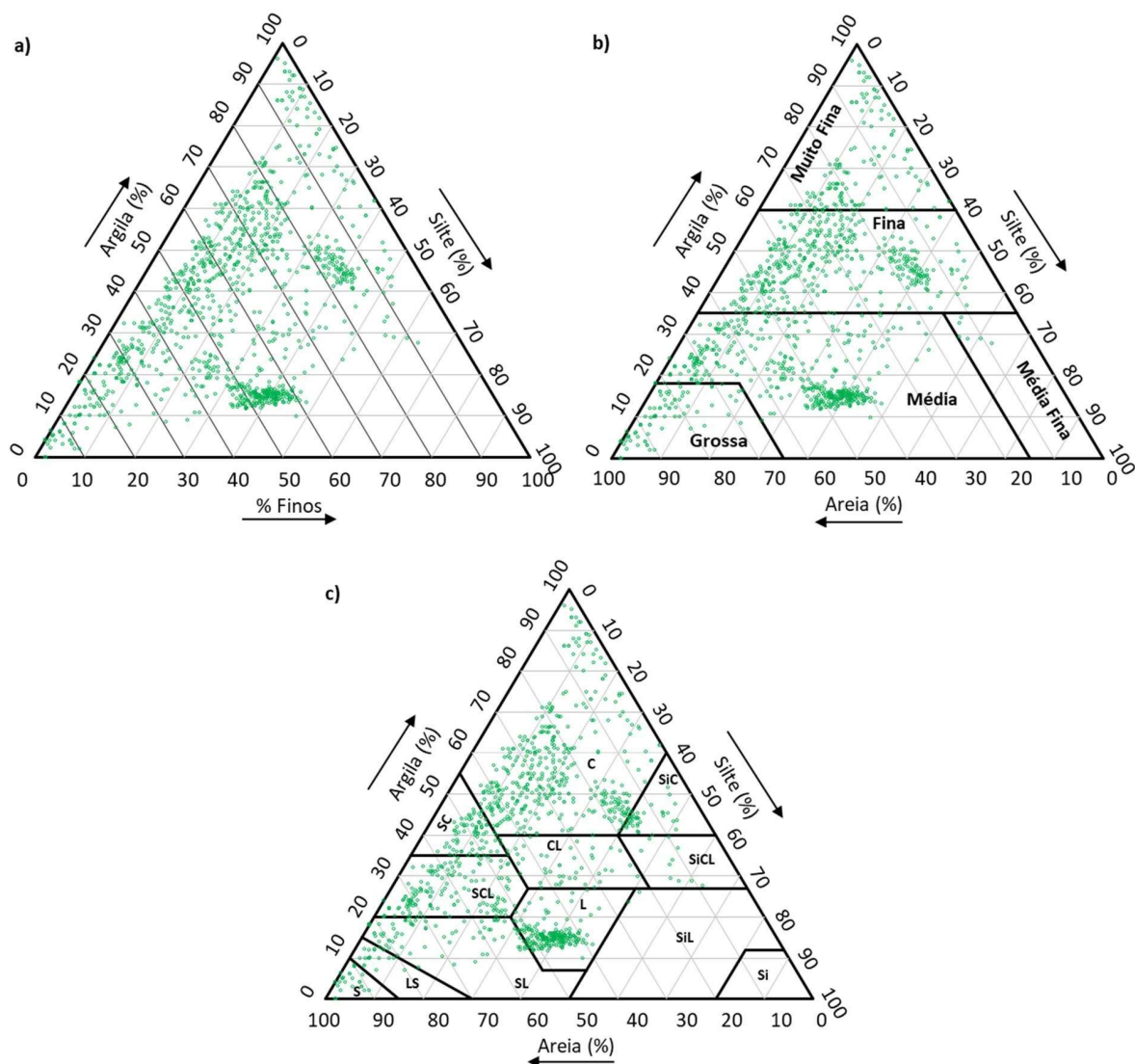
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta a análise dos dados do *HYBRAS* a partir das três classificações adotadas neste estudo. A utilização de PTFs de classe se faz a partir de parâmetros da equação de van Genuchten (1980) tabelados e definidos para determinado grupo de solo. Em adição, uma abordagem baseada em F_c é verificada.

A distribuição das amostras no triângulo textural para cada uma das três classificações propostas é mostrada na Figura 10 e permite observar como as amostras de solo da classificação baseada em F_c estão distribuídas nas classes segundo os triângulos texturais FAO e USDA. A análise indica uma variabilidade em F_c dentro das classes texturais. Para o triângulo FAO, solos com até $F_c < 20\%$ são classificados como de textura Grossa. Quando F_c está entre 20 e 85%, os solos podem ser classificados nas classes texturais denominadas Grossa, Média, Fina ou Muito Fina. Para F_c entre 85 e 100%, são três possibilidades de classe textural: Média Fina, Fina ou Muito Fina.

Para o triângulo textural *USDA*, os solos com $F_c < 10\%$ são classificados na classe textural Areia. Quando $F_c > 10\%$, os solos podem ser classificados em pelo menos duas classes texturais, a depender do percentual das frações de silte e argila da amostra. A classe Argila, por exemplo, engloba solos com F_c variando entre 55 e 100%. A variação de F_c dentro das classes texturais sugere, portanto, variabilidade nas propriedades hidráulicas para os solos dentro de uma mesma classe textural.

Figura 10 - Distribuição das amostras do *HYBRAS* no triângulo textural para diferentes classificações a) F_c , b) classificação textural FAO e c) classificação textural USDA



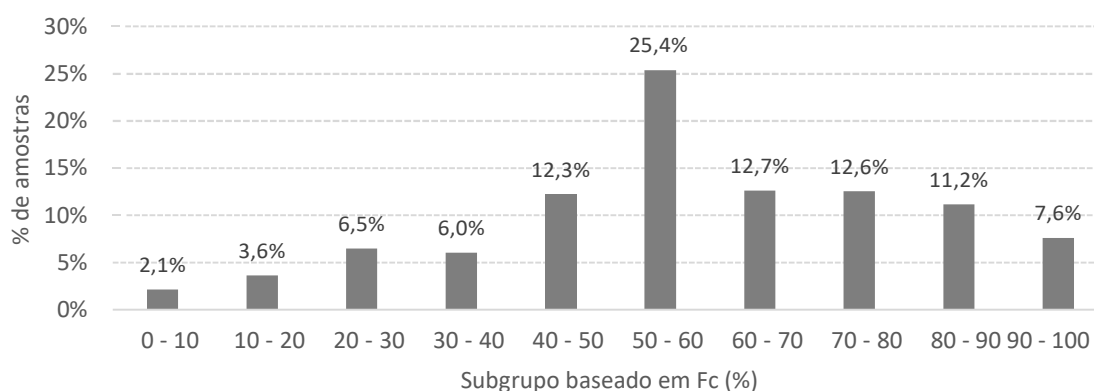
Fonte: Autor (2020)

4.1 Influência da distribuição granulométrica nos parâmetros de van Genuchten (1980) para o *HYBRAS*

4.1.1 Classificação baseada em F_c

A distribuição percentual das 1075 amostras do banco de dados *HYBRAS* dentro dos 10 subgrupos baseados em F_c é mostrada na Figura 11. Observa-se que a maior parte das amostras de solo possui $F_c > 50\%$ (746 das 1075 amostras). O subgrupo com 50-60% de finos destaca-se com o maior percentual de amostras (25.4%). Por outro lado, os subgrupos com 0-10% e 10-20% de finos são os menos representados pelo banco de dados, devido à ausência de solos com elevada fração arenosa.

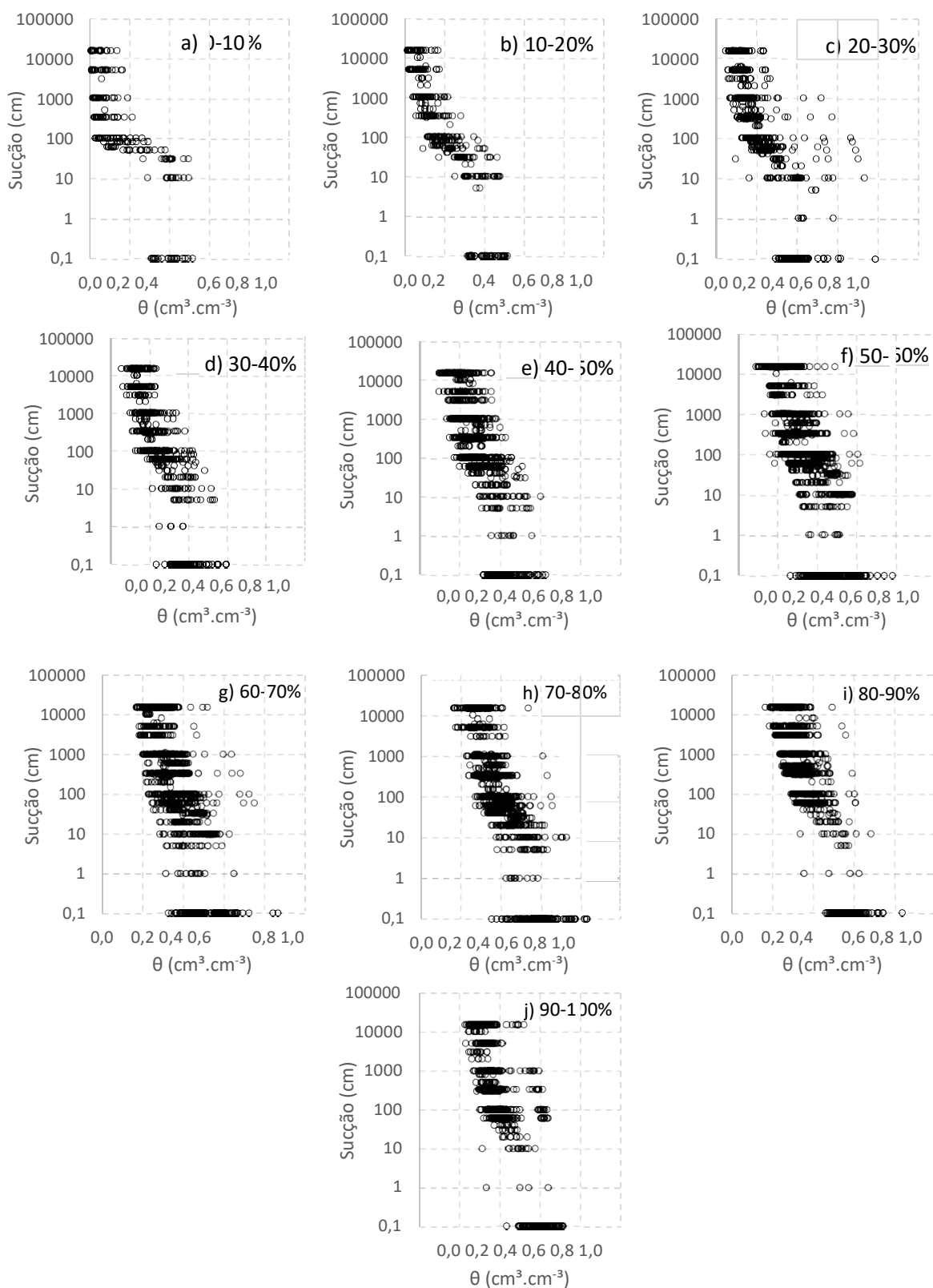
Figura 11 - Distribuição das amostras do *HYBRAS* segundo a classificação baseada em F_c



Fonte: Autor (2020)

Os pares de pontos experimentais de cada subgrupo (θ -h) são plotados na Figura 12. No total, 8793 pontos experimentais estão disponíveis no *HYBRAS* para as 1075 amostras. O valor médio da umidade volumétrica medida em sucções distintas (0, 333 e 15000 cm) é mostrado na Tabela 8, de forma a ilustrar a variação no trecho saturado, intermediário e seco da *CRAS* para cada subgrupo. A análise sugere maior capacidade de retenção de água para os solos quanto maior F_c . No trecho saturado da curva (θ_0), a média passou de $0.404 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ quando $F_c < 10\%$ e chega a $0.586 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ quando $F_c > 90\%$. No trecho residual, a variação do valor médio foi ainda maior, e passou de $0.047 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ quando $F_c < 10\%$, para $0.324 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ quando $F_c > 90\%$.

Figura 12 - Distribuição dos pontos experimentais da *CRAS* para a classificação baseada em F_c



Fonte: Autor (2020)

Tabela 8 – Valores médios para θ_0 , θ_{333} e θ_{15000} para a classificação baseada na F_c para as 1075 amostras de solo do *HYBRAS*

Classe F_c (%)	N _{amostras}	θ_0 (cm ³ .cm ⁻³)	θ_{333} (cm ³ .cm ⁻³)	θ_{15000} (cm ³ .cm ⁻³)
0-10	23	0.404	0.077	0.047
10-20	39	0.401	0.135	0.060
20-30	70	0.402	0.187	0.112
30-40	65	0.392	0.206	0.147
40-50	132	0.419	0.258	0.186
50-60	273	0.441	0.281	0.207
60-70	136	0.521	0.350	0.281
70-80	135	0.589	0.351	0.283
80-90	120	0.568	0.352	0.278
90-100	82	0.586	0.391	0.324

A Tabela 9 apresenta o resumo estatístico dos valores de cada parâmetro independente da equação de van Genuchten (1980), com valores mínimos, máximos, a média, a mediana e o desvio padrão (SD) para cada subgrupo. Adicionalmente, a Figura 13 ilustra a variação dos quatro parâmetros com o F_c para as 1075 amostras do banco de dados *HYBRAS*, incluindo os valores da média e da mediana de cada subgrupo.

Representativo da porção saturada da curva de retenção, os valores de θ_s aumentam à medida que F_c aumenta (Fig. 13a), com valores médios variando de 0.399 cm³.cm⁻³ (subgrupo com F_c entre 0 e 10%) a 0.593 cm³.cm⁻³ (subgrupo com F_c entre 90 e 100%), valores semelhantes ao da variação de θ_0 . Esse comportamento é esperado uma vez que os maiores poros presentes em solos com baixo F_c tendem a esvaziar a baixos valores de sucção.

Os valores da média e mediana dos parâmetros de VG se mostram similares para todos os subgrupos. Em relação ao teor de água residual (θ_r), uma tendência de crescimento com o aumento do teor de finos dos solos é observada. Entretanto, para grande parte das amostras, θ_r é ajustado como zero, sendo esse o mínimo valor para todos os subgrupos com exceção de um (0-10% de finos). Para a maior parte dos subgrupos, os valores da média e da mediana são razoavelmente similares.

Tabela 9 - Resumo estatístico da variação dos parâmetros da equação de van Genuchten (1980) com F_c

Classe F_c		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100
Número de Amostras		23	39	70	65	132	273	136	135	120	82
% Total		2.1%	3.6%	6.5%	6.0%	12.3%	25.4%	12.7%	12.6%	11.2%	7.6%
θ_s (cm ³ .cm ⁻³)	Mín	0.3	0.309	0.292	0.267	0.317	0.261	0.328	0.39	0.437	0.463
	Média	0.399	0.403	0.406	0.391	0.421	0.44	0.521	0.59	0.567	0.593
	Med	0.407	0.405	0.398	0.379	0.407	0.416	0.54	0.591	0.56	0.586
	Máx	0.511	0.511	0.703	0.589	0.636	0.779	0.866	0.837	0.837	0.712
	SD	0.058	0.064	0.071	0.072	0.065	0.081	0.092	0.087	0.062	0.062
θ_r (cm ³ .cm ⁻³)	Mín	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Média	0.057	0.05	0.09	0.112	0.12	0.141	0.209	0.241	0.179	0.241
	Med	0.045	0.056	0.089	0.121	0.147	0.168	0.236	0.254	0.175	0.277
	Máx	0.152	0.132	0.228	0.222	0.343	0.35	0.381	0.401	0.366	0.371
	SD	0.042	0.038	0.049	0.062	0.091	0.094	0.101	0.080	0.086	0.108
α (cm ⁻¹)	Mín	0.0153	0.014	0.0013	0.0022	0.0027	0.0016	0.0017	0.0007	0.0014	0.0364
	Média	0.0576	0.1122	0.1836	0.1627	0.2217	0.1617	0.2313	0.2407	0.5774	0.4842
	Med	0.0235	0.0511	0.056	0.0687	0.0844	0.068	0.1226	0.1373	0.5477	0.2706
	Máx	0.4943	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999
	SD	0.103	0.182	0.277	0.262	0.299	0.245	0.275	0.281	0.359	0.411
n_v	Mín	1.45	1.15	1.08	1.09	1.05	1.03	1.04	1.04	1.04	1.04
	Média	3.41	1.72	1.79	2.29	1.65	1.51	1.52	1.41	1.21	1.48
	Med	3.53	1.61	1.58	1.43	1.27	1.3	1.31	1.4	1.17	1.28
	Máx	8.99	4.12	6.85	15	15	15	15	2.22	2.02	15
	SD	1.639	0.600	1.072	2.680	1.551	1.301	1.307	0.217	0.155	1.615

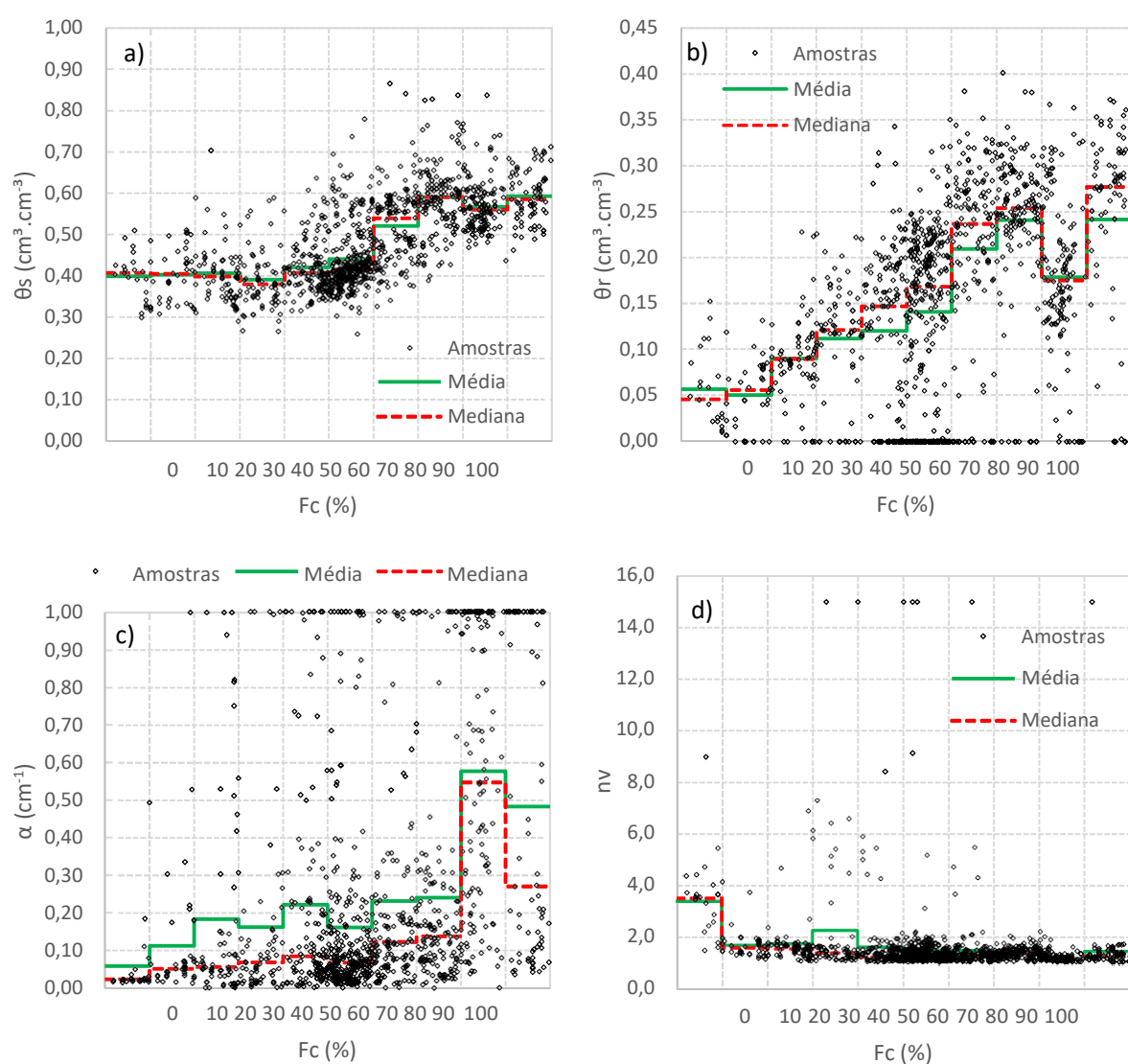
O parâmetro α (cm⁻¹), usualmente relacionado na literatura ao inverso do valor de entrada de ar do solo (AEV), não apresenta uma tendência de variação definida com a variação de F_c . Exceto para $F_c < 10\%$, o valor máximo de α é igual 0.9999 cm⁻¹ para todos os subgrupos. O mínimo valor de α ajustado foi de 0.0007 cm⁻¹. A média dos subgrupos se mostra bastante influenciada pelos solos com valor máximo de α e isso resulta em valores da média de α sempre superiores aos valores da mediana. Dessa forma, o valor da mediana se torna mais representativo de cada subgrupo.

O parâmetro adimensional n_v , que determina a inclinação da CRAS, apresenta valores constantes para as amostras com F_c entre 20 e 100%, sugerindo funcionar apenas como parâmetro de ajuste para esses solos. Comportamento distinto novamente é percebido para o

subgrupo com $F_c < 10\%$. Para parte das amostras, n_v tem como ajuste

o valor máximo arbitrado (igual a 15), enquanto o valor mínimo de ajuste foi de 1.03. Para a maioria das classes, os valores da média e da mediana são similares.

Figura 13 - Variação dos parâmetros da equação de van Genuchten (1980) com F_c das 1075 amostras do HYBRAS (a) θ_s , (b) θ_r , (c) α e (d) n_v

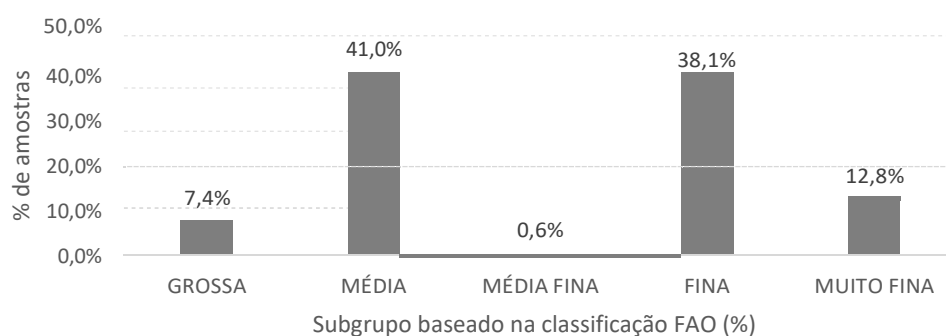


Fonte: Autor (2020)

4.1.2 Classificação segundo triângulo textural FAO

A distribuição percentual das 1075 amostras do banco de dados *HYBRAS* dentro dos 5 subgrupos baseados no triângulo textural FAO é mostrada na Figura 14. Uma predominância de solos de textura média e fina é observada, correspondendo a quase 80% das amostras. O subgrupo textural Média Fina, caracterizado por solos com alta porcentagem de silte, é pouco representado no *HYBRAS*, apresentando apenas 6 amostras.

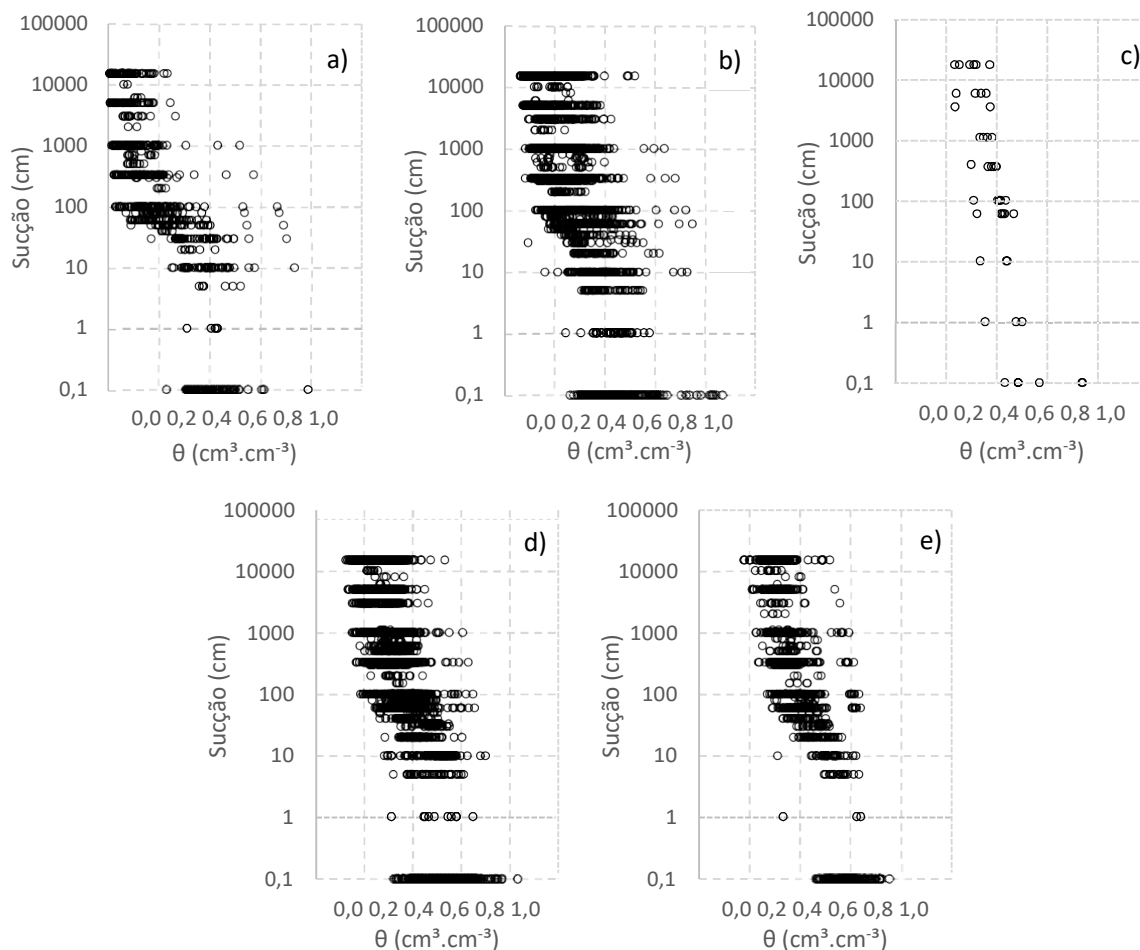
Figura 14 - Distribuição das amostras do *HYBRAS* segundo a classificação textural FAO



Fonte: Autor (2020)

Os pontos experimentais das amostras de solo relacionados a cada uma das classes são plotados na Figura 15. O valor médio da umidade volumétrica medida para cada subgrupo em sucções distintas (0, 333 e 15000 cm) é mostrado na Tabela 10, de forma a ilustrar a variação no trecho saturado, intermediário e seco da *CRAS*. Uma tendência de aumento de retenção de água é observada da classe Grossa para a classe textural Muito fina. A classe Média Fina apresenta valores semelhantes à classe Muito Fina, o que ocorre devido ao alto valor médio de F_c associado a essa classe.

Figura 15 - Distribuição dos pontos experimentais para a classificação textural FAO: a) grossa, b) média, c) média fina, d) fina e e) muito fina



Fonte: Autor (2020)

Tabela 10 - Valores médios para θ_0 , θ_{333} e θ_{15000} segundo a classificação textural FAO para as 1075 amostras de solo do HYBRAS

Classe FAO	N _{amostras}	θ (cm ³ .cm ⁻³)			F _c (%)		
		θ_0	θ_{333}	θ_{15000}	Mínimo	Média	Máximo
Grossa	80	0.405	0.140	0.070	2.0	16.0	34.9
Média	441	0.417	0.255	0.182	18.1	47.5	79.0
Média Fina	6	0.575	0.368	0.282	85.4	88.1	91.2
Fina	410	0.539	0.339	0.263	41.0	68.7	96.1
Muito Fina	138	0.581	0.371	0.308	67.0	86.4	99.6

A Tabela 11 apresenta o resumo estatístico dos valores de cada parâmetro independente da equação de van Genuchten (1980), com valores mínimos, máximos, a média, a mediana e o desvio padrão (SD) para cada subgrupo para a segunda classificação proposta. Devido à falta de representatividade, os valores para a classe textural denominada Média Fina são pouco significativos para o estudo.

Tabela 11 - Resumo Estatístico dos parâmetros da equação de van Genuchten (1980) para a classificação textural FAO

Classe Textural		Grossa	Média	Média Fina	Fina	Muito Fina
N_{amostras}		80	441	6	410	138
% Total		7.44%	41.02%	0.56%	38.14%	12.84%
θ_s (cm ³ .cm ⁻³)	Mín	0.269	0.261	0.405	0.325	0.333
	Média	0.405	0.418	0.571	0.539	0.582
	Med	0.400	0.404	0.525	0.553	0.580
	Máx	0.703	0.866	0.740	0.837	0.750
	SD	0.086	0.075	0.083	0.137	0.064
θ_r (cm ³ .cm ⁻³)	Mín	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Média	0.060	0.123	0.142	0.192	0.253
	Med	0.054	0.130	0.158	0.208	0.277
	Máx	0.206	0.343	0.323	0.401	0.371
	SD	0.093	0.050	0.086	0.126	0.095
α (cm ⁻¹)	Mín	0.00129	0.00065	0.07486	0.00927	0.00136
	Média	0.09042	0.16780	0.65426	0.36409	0.28157
	Med	0.03389	0.06589	0.76268	0.18250	0.15823
	Máx	0.99999	0.99999	0.99999	0.99999	0.99999
	SD	0.362	0.164	0.257	0.405	0.306
nv	Mín	1.10	1.03	1.05	1.04	1.04
	Média	2.22	1.59	1.14	1.51	1.50
	Med	1.67	1.32	1.15	1.25	1.34
	Máx	8.99	15.00	1.21	15.00	15.00
	SD	1.505	1.300	1.231	0.062	1.224

Os valores de θ_s apresentam uma tendência de crescimento da classe Grossa para a classe Muita fina (média de 0.405 a 0.582 cm³.cm⁻³). Os valores da média e mediana se mostram similares para todos os subgrupos. Em relação ao θ_r , o valor mínimo de ajuste igual a zero é observado para todas as classes e, assim como θ_s , os valores

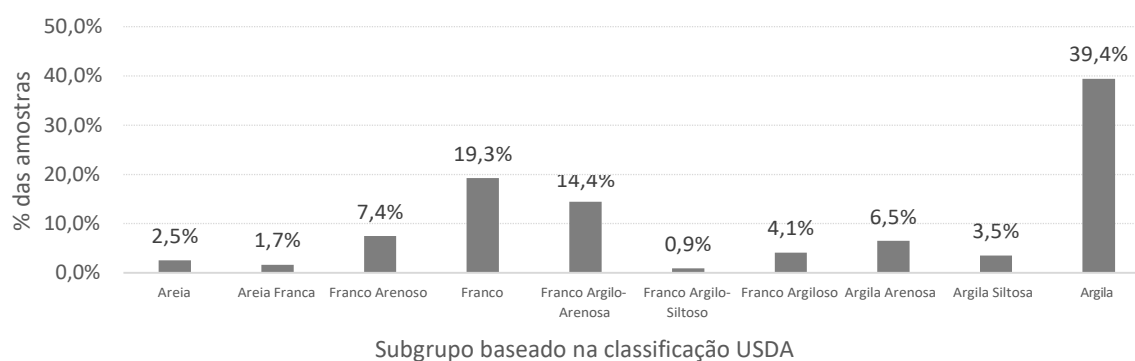
médios apresentam uma tendência de crescimento da textura Grossa para a textura Muito Fina (0.060 a 0.253 cm³.cm⁻³).

Dispersão maior é observada para os parâmetros α e n_v , para os quais os valores da mediana são sempre menores do que os valores da média (com exceção da classe Média Fina). A média e a mediana do parâmetro α crescem com a diminuição do tamanho dos grãos, isto é, da textura Grossa para a textura Muito Fina. O parâmetro n_v é maior para a classe textural denominada Grossa (2.22) e praticamente constante para as classes texturais denominadas Média, Fina e Muito Fina (1.50 a 1.59).

4.1.3 Classificação segundo triângulo textural USDA

A distribuição percentual das 1075 amostras do banco de dados *HYBRAS* dentro dos subgrupos da terceira classificação, baseada no triângulo textural do USDA, é mostrada na Figura 16. Dentre as 12 classes texturais da USDA, nenhuma amostra é classificada como Silte e apenas 2 amostras são classificadas como Franco Siltosa e, por isso, as duas classes foram excluídas da análise. A maior parte das amostras é classificada dentro da classe Argila (424 de 1075 ou 39.4%). Devido às características do banco de dados, as classes com predominância de solos grossos (Areia e Areia Franca) e silte (Franco-Argilo Siltoso e Argila Siltosa) são pouco representativas, mas usadas para análise dos parâmetros.

Figura 16 - Distribuição das amostras do *HYBRAS* segundo a classificação textural USDA



Fonte: Autor (2020)

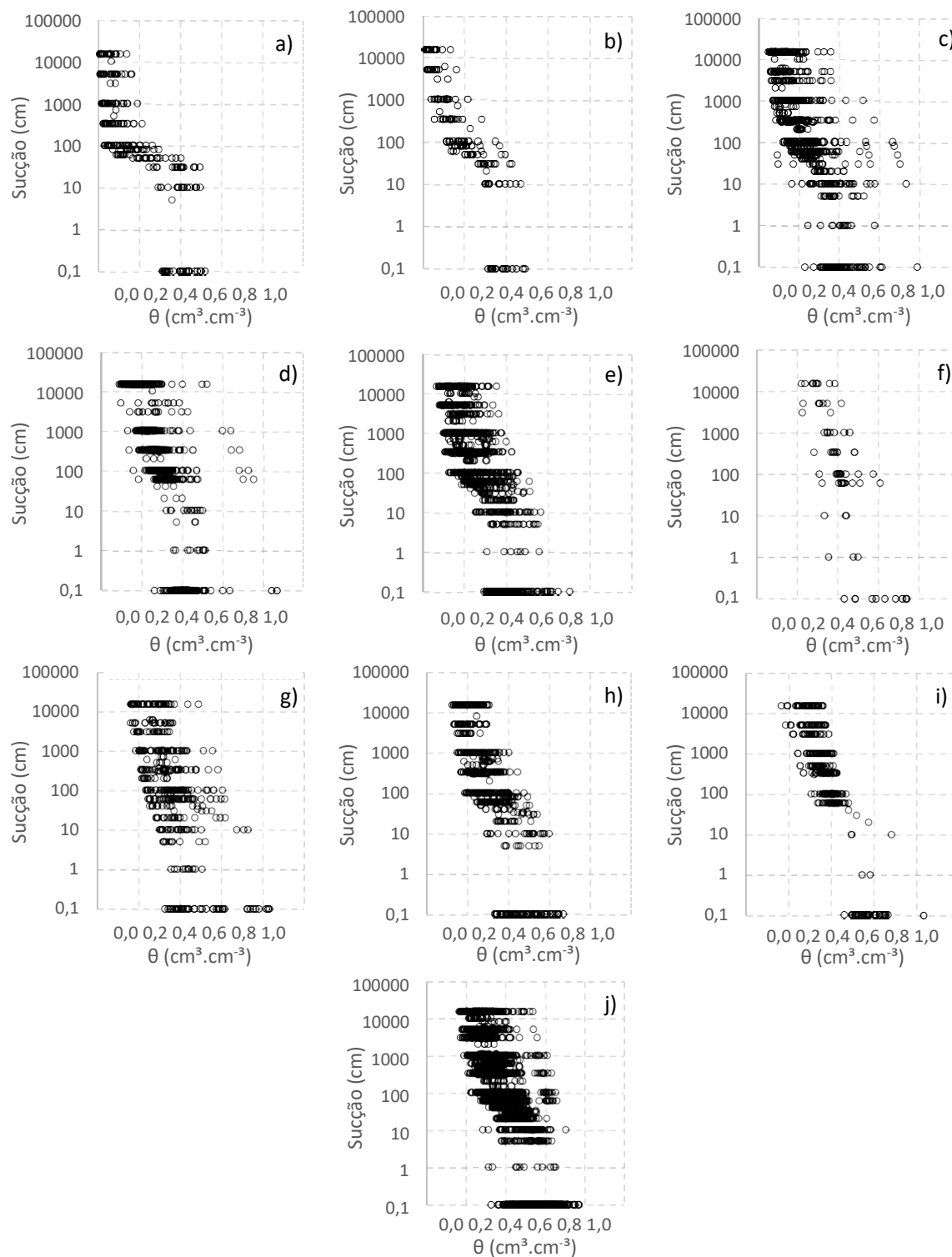
Os pares de pontos experimentais (θ -h) para cada classe textural USDA são plotados na Figura 17. O valor médio da umidade volumétrica medida em sucções distintas (0, 333 e 15000 cm) para cada classe é mostrado na Tabela 12, de forma a ilustrar a variação nos trechos saturado, intermediário e residual da *CRAS*. A Tabela apresenta ainda, os valores de mínimo, média e máximo de F_c dentro de cada classe textural.

Tabela 12 - Valores médios para θ_0 , θ_{333} e θ_{15000} segundo a classificação textural USDA para as 1075 amostras de solo do *HYBRAS*

Classe Textural USDA	N _{amostras}	θ (cm ³ .cm ⁻³)			F_c (%)		
		θ_0	θ_{333}	θ_{15000}	Mínimo	Média	Máximo
Areia	27	0.402	0.082	0.047	2.0	7.2	10.5
Areia Franca	18	0.378	0.132	0.044	12.0	14.9	19.8
Franco arenoso	80	0.408	0.211	0.127	17.5	30.2	47.7
Franco	207	0.406	0.267	0.192	47.7	54.2	67.2
Franco Argilo-Arenosa	155	0.416	0.220	0.162	22.0	37.9	54.1
Franco Argilo-Siltoso	10	0.607	0.392	0.292	83.0	87.8	91.2
Franco Argiloso	44	0.521	0.349	0.266	55.1	65.2	79.0
Argila Arenosa	70	0.465	0.284	0.205	41.0	50.0	54.9
Argila Siltosa	38	0.572	0.365	0.288	82.7	87.4	96.1
Argila	424	0.560	0.352	0.285	55.0	75.8	99.6

No geral, os valores médios de θ_0 , θ_{333} e θ_{15000} cm são maiores para as classes com maiores F_c (Franco Argilo-Siltoso, Argila Siltosa e Argila, por exemplo) e menores para as classes com menor F_c (Areia, Areia Franca e Franco Arenoso), evidenciando uma ligação direta entre a porcentagem de finos do solo e a capacidade de retenção de água no solo.

Figura 17 - Distribuição dos pontos medidos em laboratório para a classificação textural USDA: a) areia, b) areia franca, c) franco arenoso, d) franco, e) franco argilo-arenoso, f) franco argilo-siltoso, g) franco argiloso, h) argila arenosa, i) argila siltosa e j) argila



Fonte: Autor (2020)

A Tabela 13 apresenta o resumo estatístico dos valores de cada parâmetro independente da equação de van Genuchten (1980), com valores mínimos, máximos, a média, a mediana e o desvio padrão (SD) para cada classe dentro da terceira classificação proposta.

Tabela 13 - Resumo Estatístico dos parâmetros da equação de van Genuchten (1980) para a classificação textural USDA

Classe Textural		Areia	Areia Franca	Franco Arenoso	Franco	Franco Argilo-Arenoso	Franco Argilo-Siltoso	Franco Argilosos	Argila Arenosa	Argila Siltosa	Argila
N amostras		27	18	80	207	155	10	44	70	38	424
% Total		2.5%	1.7%	7.4%	19.3%	14.4 %	0.9%	4.1%	6.5%	3.5%	39.4%
θs (cm³.cm⁻³)	Mín	0.300	0.309	0.267	0.261	0.292	0.437	0.328	0.333	0.496	0.325
	Média	0.396	0.377	0.414	0.406	0.417	0.604	0.524	0.465	0.573	0.560
	Med	0.404	0.366	0.400	0.399	0.409	0.608	0.475	0.435	0.565	0.565
	Máx	0.511	0.497	0.703	0.866	0.694	0.740	0.837	0.667	0.837	0.770
	SD	0.059	0.054	0.073	0.062	0.077	0.116	0.151	0.088	0.065	0.073
θr (cm³.cm⁻³)	Mín	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.006	0.000
	Média	0.056	0.032	0.095	0.115	0.124	0.127	0.175	0.130	0.201	0.223
	Med	0.045	0.032	0.090	0.134	0.127	0.143	0.174	0.160	0.196	0.244
	Máx	0.152	0.103	0.343	0.313	0.302	0.323	0.326	0.248	0.334	0.401
	SD	0.042	0.032	0.072	0.093	0.068	0.110	0.106	0.091	0.068	0.092
α (cm⁻¹)	Mín	0.0153	0.0140	0.0013	0.0016	0.0017	0.0458	0.0017	0.0110	0.0440	0.0014
	Média	0.0540	0.0683	0.1753	0.0897	0.2367	0.6971	0.3254	0.2739	0.6280	0.3240
	Med	0.0235	0.0387	0.0713	0.0571	0.0881	1.0000	0.1619	0.1590	0.5404	0.1683
	Máx	0.4943	0.3044	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999
	SD	0.095	0.080	0.254	0.123	0.325	0.412	0.371	0.315	0.358	0.339
nv	Mín	1.45	1.31	1.05	1.03	1.06	1.05	1.04	1.05	1.05	1.04
	Média	3.25	1.68	1.53	1.37	2.00	1.14	1.29	2.16	1.18	1.45
	Med	3.44	1.44	1.44	1.27	1.42	1.14	1.24	1.29	1.17	1.31
	Máx	8.99	3.71	4.65	3.11	15.00	1.21	1.95	15.00	1.46	15.00
	SD	1.608	0.592	0.485	0.295	1.981	0.058	0.207	3.036	0.081	1.037

O parâmetro θ_s apresenta tendência de crescimento das classes de textura grossa (Areia, Areia e Franca e Franco Arenoso) e, conseqüentemente, menor F_c , para os solos de textura fina (Argila, Argila Siltosa e Areia Arenosa), com maior F_c . Os valores médios variam de 0.377 cm³.cm⁻³ da classe Areia Franca para 0.560 cm³.cm⁻³ para a classe

textural Argila. Mesma tendência para os valores de θ_r , com o valor mínimo de $0.032 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ e máximo de $0.223 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ para as mesmas classes, respectivamente. Entretanto, o ajuste mínimo de θ_r igual a zero é visto para 8 das 10 classes analisadas. Os valores da média e mediana, para os dois parâmetros, diferem-se pouco.

Da mesma forma, o ajuste para o valor máximo (0.9999 cm^{-1}) para o parâmetro α é visto para 8 das 10 classes, com exceção das classes Areia e Areia Franca. Assim como as duas primeiras classificações, média e mediana são divergentes e não apresentam uma tendência clara. Em relação a n_v , a mediana mostra um alto valor (3.44) para a classe Areia, e pequena variação entre todas as demais classes (variação de 1.14 a 1.44).

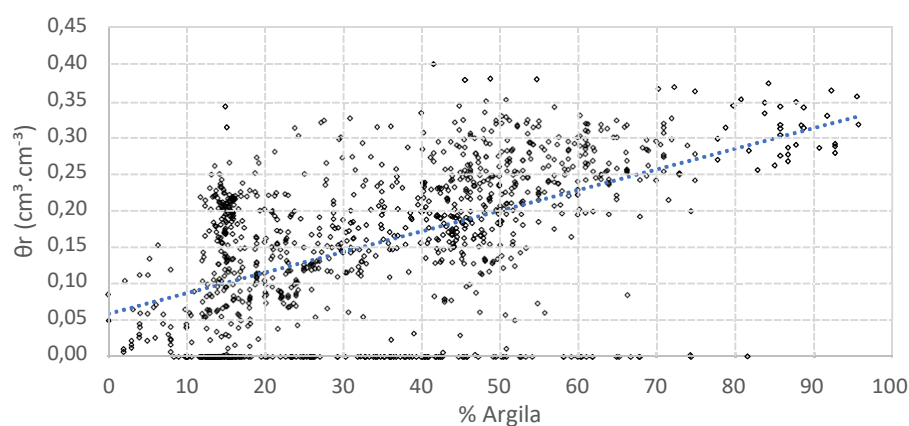
4.1.4 Discussão

Apresentada a variação dos parâmetros dentro das três classificações, algumas conclusões podem ser apresentadas. A umidade volumétrica saturada do solo (θ_s), denominada na engenharia geotécnica como porosidade total do solo, possui uma base física. Porém, para as amostras de solo do *HYBRAS*, o parâmetro não é fixo e, portanto, não representa a porosidade total do solo, funcionando como parâmetro livre de ajuste. A tendência de crescimento de θ_s com o aumento de F_c , e conseqüentemente, aumento das frações de textura fina e muito fina, é esperado. Os solos com baixo F_c , tipicamente, apresentam poros maiores que se esvaziam a valores baixos de sucção. Assim, os subgrupos denominados 0-10% F_c , Grossa e Areia/Areia Franca apresentam os menores valores médios de θ_s ; e os subgrupos denominados 90-100% F_c , Muito Fina e Argila, os maiores valores.

Ao contrário de θ_s , que pode ser medido em laboratório, para a maioria dos fins θ_r é obtido por ajuste (HODNETT, TOMASELLA, 2002). Os valores da umidade residual do solo θ_r variaram entre 0.0 e $0.401 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ sendo, para grande parte das amostras, assumido igual a zero, o que reforça a ideia de que o parâmetro funciona puramente como ajuste. Ainda assim, os valores de θ_r parecem seguir uma tendência de

crescimento com o aumento de F_c das amostras. Da mesma forma, os valores da média e da mediana crescem da textura Grossa para a Muito Fina, e da classe textural Areia Franca para Argila. A quantidade adsorvida de água na região residual da *CRAS* está ligada à área da superfície das partículas sólidas do solo, o que pode explicar o aumento de θ_r com o teor de argila (HODNETT, TOMASELLA, 2002). Essa tendência é reforçada quando analisada a Figura 18, que relaciona θ_r e a fração argila dos solos para as 1075 amostras do *HYBRAS*.

Figura 18 - Variação de θ_r com a % Argila



Fonte: Autor (2020)

O ajuste de *CRAS* a partir da equação de van Genuchten (1980) resultou em valores muito baixos para θ_r para parte das amostras de solo do *HYBRAS*, o que não parece ser fisicamente realista considerando a predominância da fração argila para os finos dos solos. Segundo Hodnett e Tomasella (2002), isso ocorre pelo fato de o formato da curva definido pelos parâmetros da equação de van Genuchten (1980) não ser totalmente sigmoidal, o que requer um valor muito baixo de θ_r para obtenção do melhor ajuste (HODNETT, TOMASELLA, 2002).

Uma grande variação é observada para o parâmetro α independente da classificação analisada. Os valores altos para a média aritmética de α para grande parte dos subgrupos esconde o fato de que a maioria das amostras apresenta valores de $\alpha < 0.10 \text{ cm}^{-1}$. Esses baixos valores são mais prováveis em solos finos e não estruturados

enquanto altos valores são esperados em solos arenosos ou bem estruturados, uma vez que indicam mudança repentina no teor de umidade, com esvaziamento de poros sob sucções baixas (OTTONI *et al.*, 2018). Entretanto, a variação de valores de α encontrada dentro do *HYBRAS* não segue nenhuma tendência definida com a variação de F_c ou classe textural do solo, reforçando a ideia de que funciona puramente como parâmetro de ajuste. A relação com de α com o valor de entrada de ar (AEV) será avaliada a frente.

O comportamento do parâmetro adimensional relacionado à distribuição dos poros do solo n_v sugere uma relação com a distribuição granulométrica apenas para solos granulares, com $F_c < 10\%$. Para os solos do *UNSODA*, Gonçalves (2012) sugere esse valor como sendo igual a 30%. A partir desse valor, n_v parece se tornar um parâmetro de ajuste sem comportamento definido pela variação da classe textural ou da granulometria do solo.

De maneira geral, as análises sugerem o efeito da granulometria e da classe textural para o parâmetro θ_s e, de certa forma, para o parâmetro θ_r . O parâmetro α não está relacionado com a granulometria/textura do solo, enquanto n_v está relacionado apenas com a granulometria de solos grossos (ou $F_c < 10\%$). Portanto, esses parâmetros não devem ser interpretados como parâmetros com significado físico, mas apenas como parâmetros de ajuste da *CRAS* definida pela equação de van Genuchten (1980).

A variabilidade de solos dentro de cada subgrupo e a falta de significado físico dos parâmetros de ajuste da equação de van Genuchten (1980) não possibilitam, portanto, a definição de uma função para quantificar a variação dos parâmetros com a distribuição granulométrica dos solos analisados, conclusão semelhante a obtida por Gonçalves (2012) para o banco de dados de solos temperados *UNSODA*. Assim, conforme apontado por Gonçalves (2012), a consideração de diagramas triangulares para a classificação dos solos é limitada, pois não leva em conta a forma da curva granulométrica e nem a plasticidade dos finos do solo.

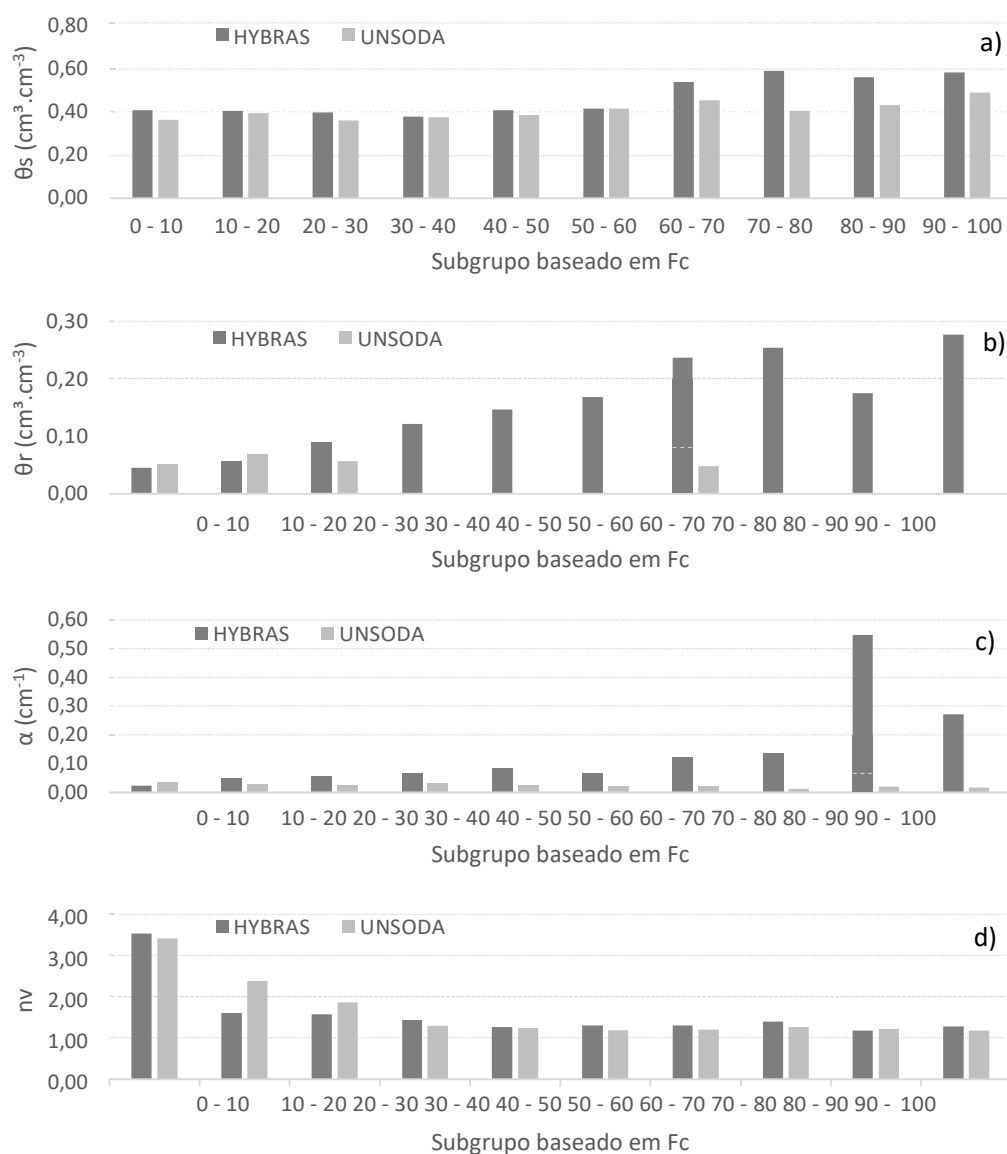
4.1.5 Comparação com outras PTFs de classe: Solos Tropicais e Temperados

De forma a analisar a diferença entre as *CRAS* para solos tropicais e temperados, os valores da mediana dos parâmetros da equação de van Genuchten (1980) obtidos para cada uma das classificações propostas são comparados. Os resultados obtidos nesta pesquisa para o banco de dados de solos brasileiros *HYBRAS* são comparados com as análises realizadas por Gonçalves (2012) para o banco de dados de solos temperados *UNSODA* (SCHAAP; LEIJ; VAN GENUCHTEN, 2001). A mediana é utilizada no lugar da média por ser mais representativa do parâmetro α , conforme tópico anterior. A Figura 19 mostra a variação das medianas de θ_s , θ_r , α e n_v para os bancos de dados *HYBRAS* e *UNSODA*, segundo a classificação baseada em F_c .

As principais diferenças encontradas são em razão da plasticidade dos finos: ocorre predominância de argila na fração fina dos solos brasileiros de clima tropical do *HYBRAS* (contra predominância da fração silte, considerado fino não plástico, para o *UNSODA*). Por essa razão, por exemplo, os valores da mediana de θ_s para os solos brasileiros se mostram ligeiramente superiores para $F_c < 60\%$ e grande diferença é observada para $F_c > 60\%$. Esses valores são esperados, uma vez que a retenção de água está ligada a plasticidade das argilas, capazes de reter mais água em qualquer valor de sucção. Da mesma forma, o crescimento de θ_r com F_c no *HYBRAS* não é acompanhado pelo *UNSODA*, que sugere um valor médio igual a zero para a maioria das classes.

A análise das medianas do parâmetro α mostra um comportamento inverso para os dois bancos de dados. Quanto maior a porcentagem de finos, espera-se um maior valor da entrada de ar para o solo e, portanto, menores valores associados para α , que controla a posição da curva. Esse comportamento é observado para os solos do *UNSODA* e não se repete para o *HYBRAS*, que, por outro lado, mostra o crescimento do valor médio de α e por consequência, redução do AEV, com o aumento de F_c . Portanto, a utilização da mediana para interpretação do parâmetro α se mostra inadequada para os solos tropicais do *HYBRAS*.

Figura 19 - Variação dos parâmetros da equação de van Genuchten (1980) com F_c das 1075 amostras do *HYBRAS*: a) θ_s , b) θ_r , c) α e d) n_v

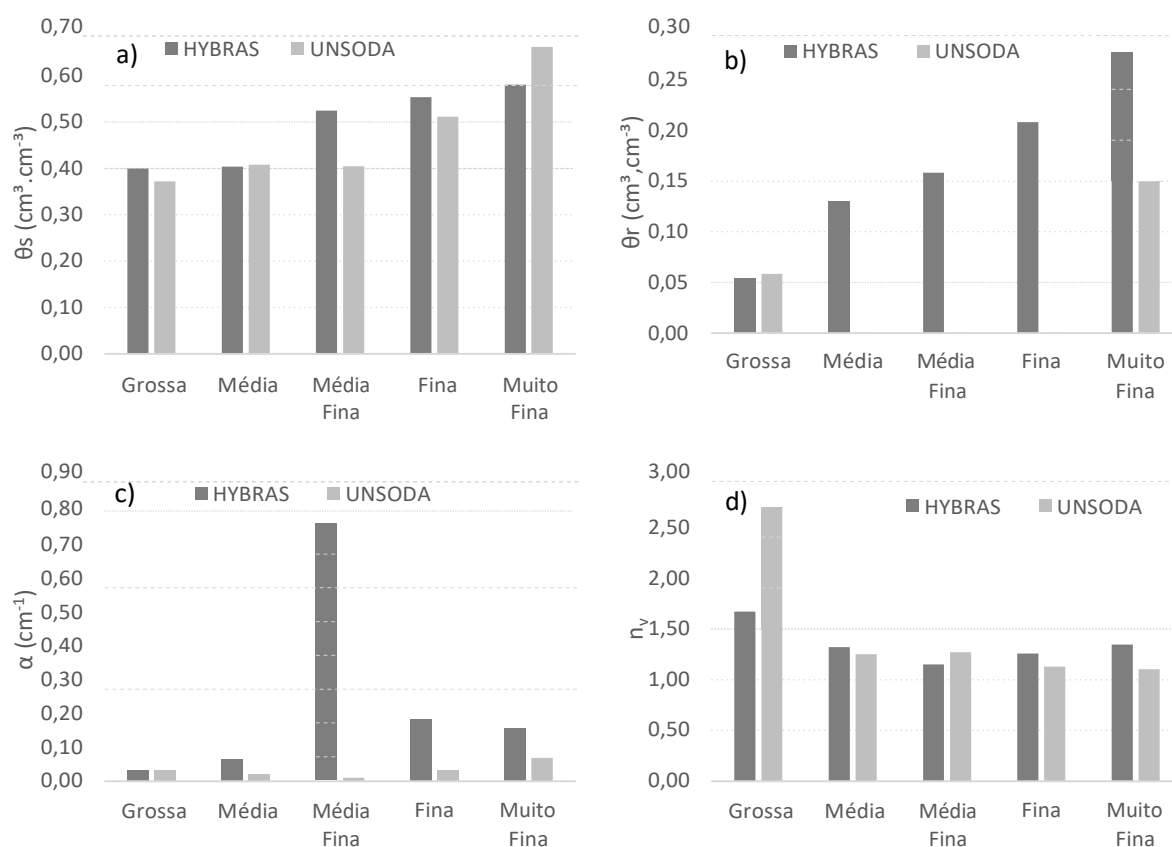


Fonte: Autor (2020)

Os valores de n_v são semelhantes entre os dois bancos de dados, exceto para o trecho $10\% < F_c < 30\%$. A variação ocorre devido ao valor crítico para o qual n_v está relacionado com a granulometria da fração grossa, valor sugerido como 10% nesta pesquisa para o *HYBRAS*, e igual a 30% para o *UNSODA* segundo Gonçalves (2012).

A Figura 20 mostra a variação da mediana de θ_s , θ_r , α e n_v , respectivamente, para o *HYBRAS* e o *UNSODA*, para a segunda classificação proposta, baseada nas classes texturais da FAO. As observações feitas a partir de F_c podem ser facilmente trazidas para essa classificação textural. Os valores de θ_s novamente são superiores para os solos do *HYBRAS*, com exceção da classe Muito Fina. Entretanto, apenas 4 das 554 amostras do *UNSODA* são classificadas dentro dessa classe textural e os valores encontrados são, portanto, pouco representativos.

Figura 20 - Variação dos parâmetros da equação de van Genuchten (1980) para a classificação textural FAO: a) θ_s , b) θ_r , c) α e d) n_v



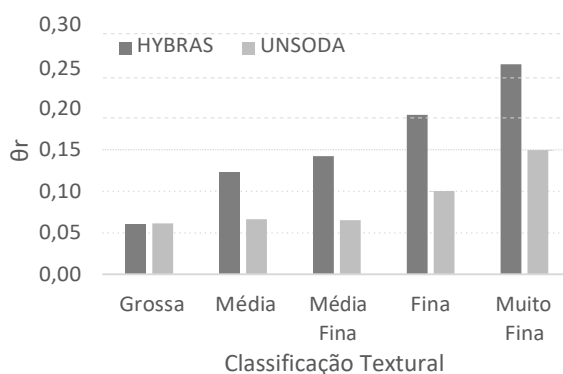
Fonte: Autor (2020)

O crescimento de θ_r da textura Grossa para Muito Fina para o *HYBRAS* não se repete para o *UNSODA*. Os valores de θ_r são diferentes de zero apenas para a textura Grossa e Muito Fina. A interpretação usando os valores da mediana, neste caso, se

mostra falha, uma vez que grande parte dos solos do *UNSODA* apresenta θ_r igual a zero. Quando analisada a média de θ_r , conforme Figura 21, a tendência de crescimento observada para o *HYBRAS* se repete para o *UNSODA*.

Para o parâmetro α , não é observada tendência com a variação de classes texturais. O parâmetro n_v se mostra praticamente constante para os dois bancos de dados, exceção à classe grossa. Entretanto, como visto na primeira classificação, n_v apresenta uma relação especialmente para $F_c < 10\%$, valor este que a classificação baseada apenas em classes texturais não revela.

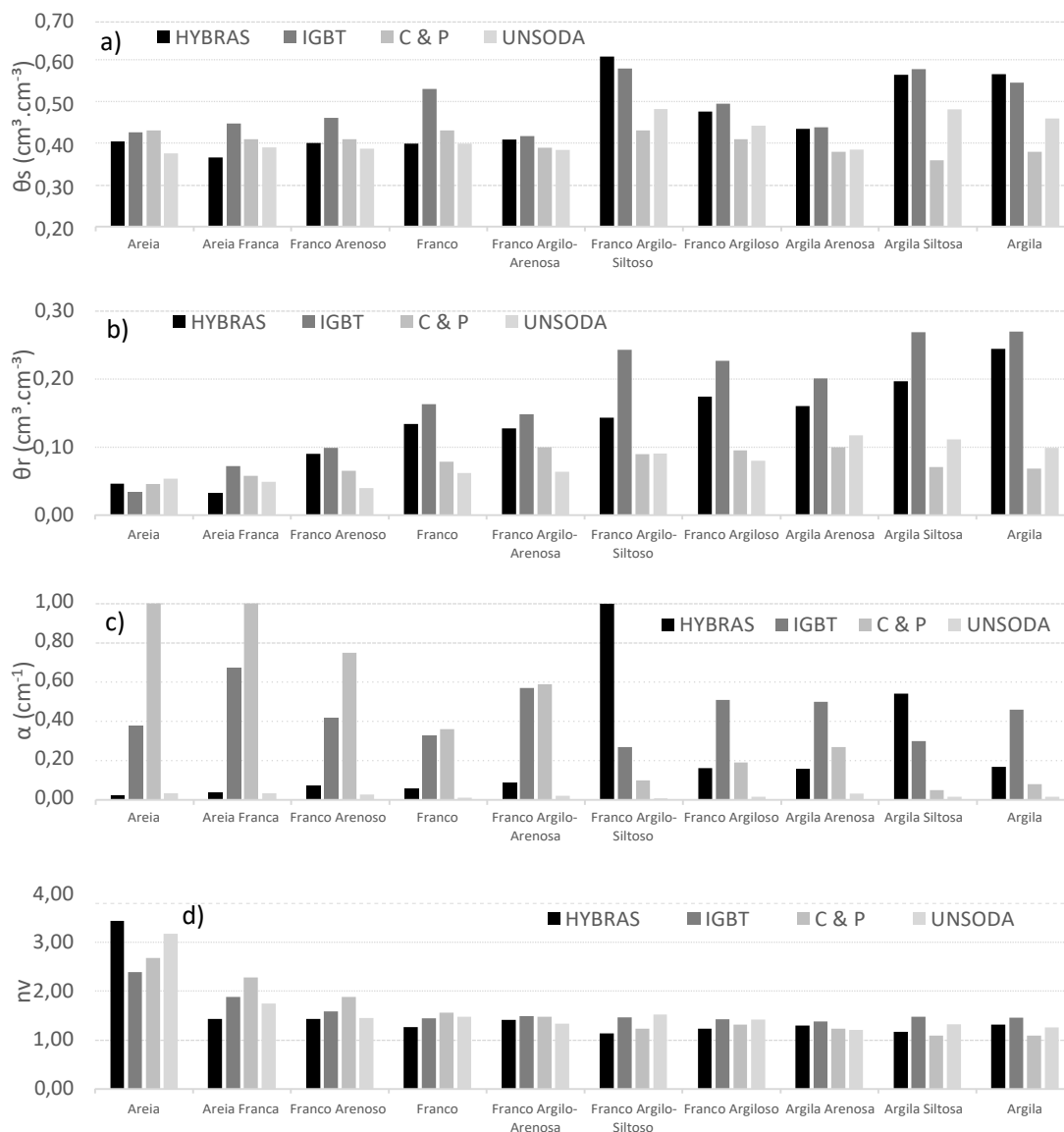
Figura 21 - Variação da média de θ_r para a classificação textural FAO



Fonte: Autor (2020)

A Figura 22 mostra a variação da mediana de θ_s , θ_r , α e n_v , respectivamente, para 4 bancos de dados distintos seguindo a terceira classificação proposta, baseada no triângulo textural da *USDA*. Os valores do *HYBRAS* são comparados com os valores da *PTF* de classe proposta como primeiro modelo hierárquico do *ROSETTA* utilizando o banco de dados *UNSODA* (SCHAAP; LEIJ; VAN GENUCHTEN, 2001) e com os valores sugeridos no trabalho de Hodnett e Tomasella (2002) para solos tropicais (banco de dados IGBT) e solos temperados C&P (CARSEL; PARRISH, 1988). Devido à ausência de amostragem significativa dentro do *HYBRAS*, as classes Franco Siltoso e Silte não são analisadas. Os valores da mediana dos parâmetros são utilizadas para o *HYBRAS*, e da média, para os demais bancos de dados.

Figura 22 – Variação dos parâmetros da equação de van Genuchten (1980) para a classificação textural USDA de diferentes bancos de dados



Fonte: Autor (2020)

A análise sugere diferenças entre os bancos de dados de clima tropical e temperado e reforça a influência de F_c para as regiões saturada e residual da *CRAS*. Com exceção do banco de dados de solos temperados *C&P*, as classes Franco Argilo-Siltoso, Argila Siltosa e Argila, mais à direita do triângulo textural e, consequentemente, com maior F_c , apresentam valores superiores de θ_s e θ_r dentre as classes analisadas.

Ao mesmo tempo, maior variabilidade entre os solos tropicais e temperados é observada para essas classes texturais. Por outro lado, as classes Areia, Areia Franca e Franco Arenoso, com menor F_c , apresentaram os menores valores de θ_s e valores semelhantes são sugeridos para os solos tropicais e temperados para essas classes. Solos com alta porcentagem de fração argila são mal representados nos bancos de dados de solos temperados e, por isso, é esperado que essa variação ocorra. Não obstante, existem diferenças nas propriedades físicas entre as argilas tropicais e temperadas (HODNETT; TOMASELLA, 2002).

Em relação a α , uma certa discrepância é observada dentre os valores obtidos entre o *HYBRAS* e os solos de clima tropical (IBGT). Ottoni *et al.* (2018) justificam isso pela utilização de diferentes intervalos de ajuste para α . Além disso, os valores 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, fato típico nas areias, mas que também ocorre em solos bem estruturados, como são alguns dos solos de textura fina do *HYBRAS* (OTTONI *et al.*, 2018). Por outro lado, para os solos temperados dos bancos de dados *UNSODA* e *C&P*, uma tendência de decréscimo é vista da classe textural Areia para Argila. Isso explica por que é comum na literatura encontrar a relação inversa entre α e o valor da entrada de ar (AEV). Segundo essa interpretação, o AEV aumenta (e α diminui) para a curva de secagem à medida que as partículas se tornam mais finas.

A análise do n_v mostra valores semelhantes para os solos tropicais e temperados, exceção vista para as classes Areia, Areia Franca e Franco Arenoso. Altos valores são obtidos para essas classes e esse valor reduz e se torna constante para as demais classes, sendo, portanto, claramente influenciado pela fração arenosa.

No geral, os valores da mediana de θ_r , θ_s e n_v para o *HYBRAS* foram relativamente próximos aos valores médios para os solos de clima tropical de Hodnett e Tomasella (2002). Ao mesmo tempo, esses valores diferenciam-se bastante dos bancos de dados para solos temperados. Cuidados devem ser tomados, portanto, na aplicação de PTFs

de classe para solos com características diferentes dos solos das quais elas foram propostas.

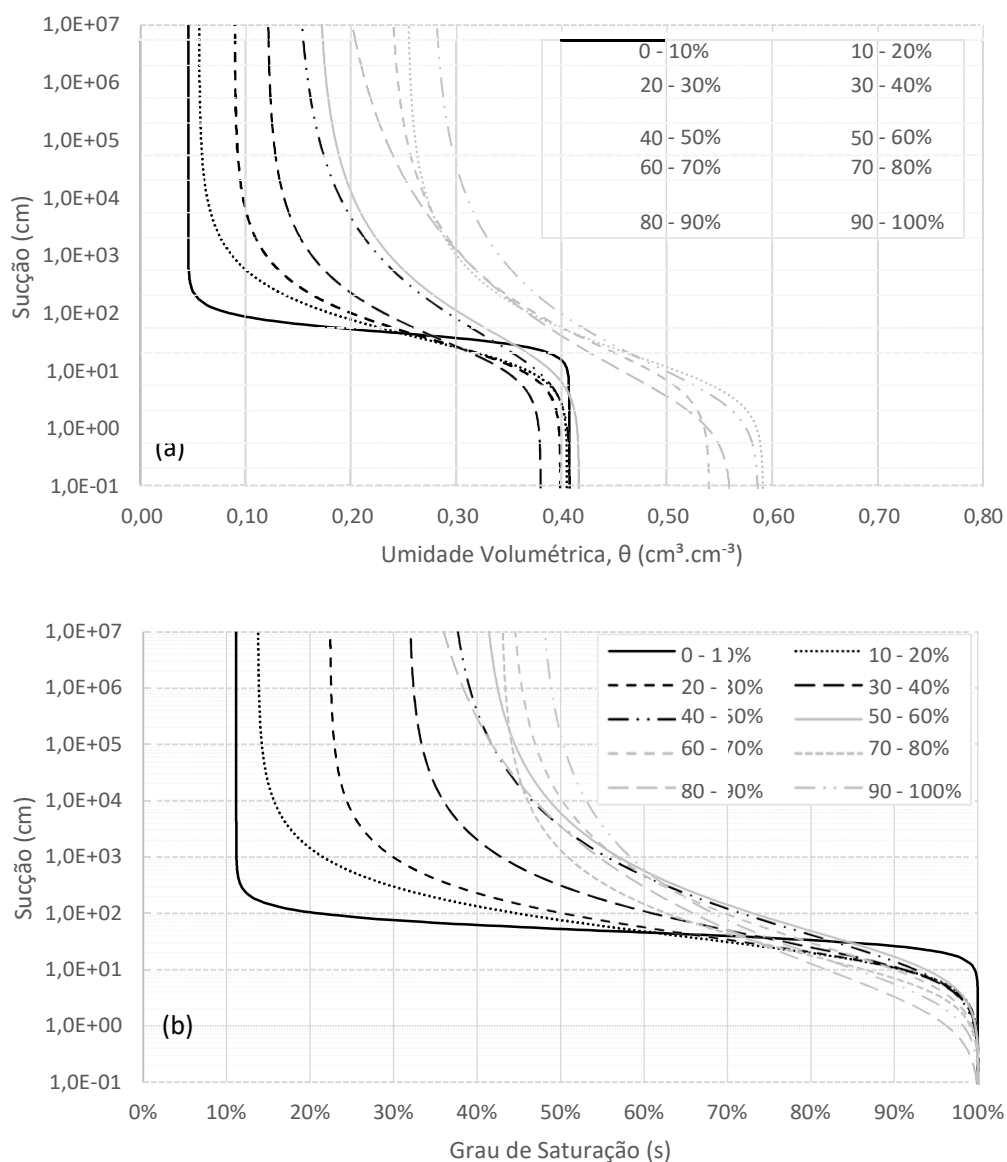
4.2 Influência da distribuição granulométrica na *CRAS* para os solos do *HYBRAS* e *UNSODA*

A influência da distribuição granulométrica na *CRAS* definida pela equação de van Genuchten (1980) pode ser melhor entendida quando analisada a curva graficamente, pela relação entre umidade volumétrica (θ) ou grau de saturação (s) com a sucção do solo (h). A partir da mediana dos quatro parâmetros da equação de van Genuchten (1980), *CRAS* limite superior de secagem hipotéticas foram definidas e traçadas para cada subgrupo dentro das três classificações propostas. A Figura 23 mostra as *CRAS* para os 10 subgrupos após a classificação baseada em F_c . A grande variação dentre as *CRAS* ajustadas sugere e reforça a influência de F_c na *CRAS* dos solos brasileiros.

Na zona saturada, observa-se um comportamento distinto para solos com F_c menor e maior do que 60%. O primeiro grupo mostra θ_s em torno de $0.40 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ e o segundo, valores próximos a $0.60 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$. Entretanto, a utilização das medianas resulta em uma inconsistência quando analisado o valor de entrada de ar. Segundo Barbour (1998), a diminuição no tamanho dos grãos leva a um aumento no valor de entrada de ar e suaviza a inclinação da curva. As *CRAS* hipotéticas sugerem, entretanto, maior AEV para a classe 0-10%, que possui os maiores poros, como mostra Fig. 23b, sugerindo, portanto, falha na modelagem da porção saturada da *CRAS*.

Por outro lado, o formato das curvas, controlado por n_v , mais suave para os solos com alto F_c é consistente com a literatura. Dessa forma, os subgrupos com menor F_c apresentam curvas com trecho mais bem definidos. Na zona residual, as classes com maior F_c retêm mais água a altos valores de sucção. Esse resultado é consistente considerando que o fino dominante no *HYBRAS* tem tamanho argila e o trecho seco da curva é governado pelas forças de adsorção relacionadas aos minerais argílicos.

Figura 23 - *CRAS* hipotéticas para a classificação baseada em F_c (a) sucção x Umidade Volumétrica (θ) e (b) sucção x Grau de Saturação (s)

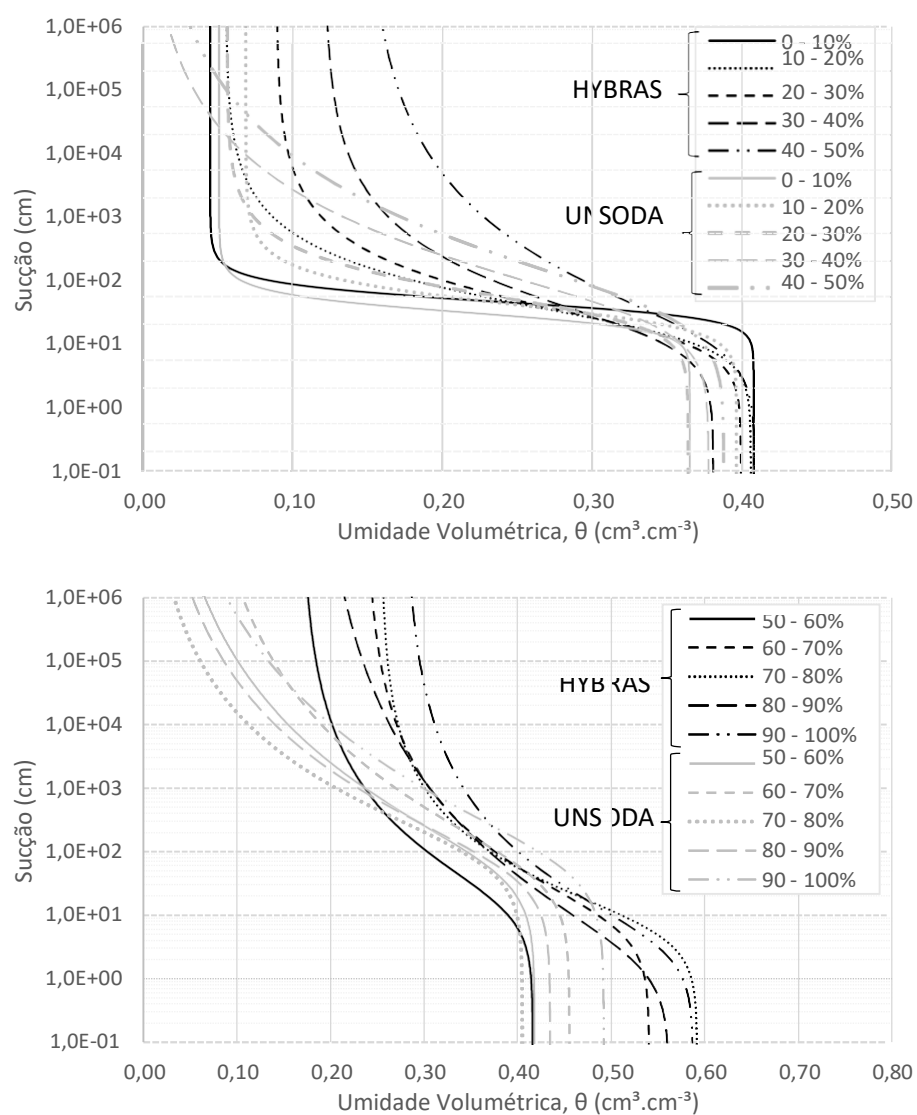


Fonte: Autor (2020)

As curvas hipotéticas obtidas para o *HYBRAS* são comparadas com as curvas hipotéticas obtidas para os solos temperados do *UNSODA*, propostas por Gonçalves (2012) a partir dos valores da mediana dos parâmetros da equação de van Genuchten (1980) para cada subgrupo, como mostra a Figura 24. A principal diferença entre curvas de um mesmo subgrupo refere-se ao trecho seco da *CRAS*, que sugere que os solos

brasileiros do *HYBRAS* são capazes de reter maior volume de água a altos valores de sucção quando $F_c > 20\%$. Para o trecho saturado da *CRAS*, as curvas para $F_c < 60\%$ são similares, conforme análise de θ_s realizada anteriormente na Figura 20a. Quando $F_c > 60\%$, a capacidade de reter maior volume de água para os solos brasileiros é observada para toda a faixa de sucções.

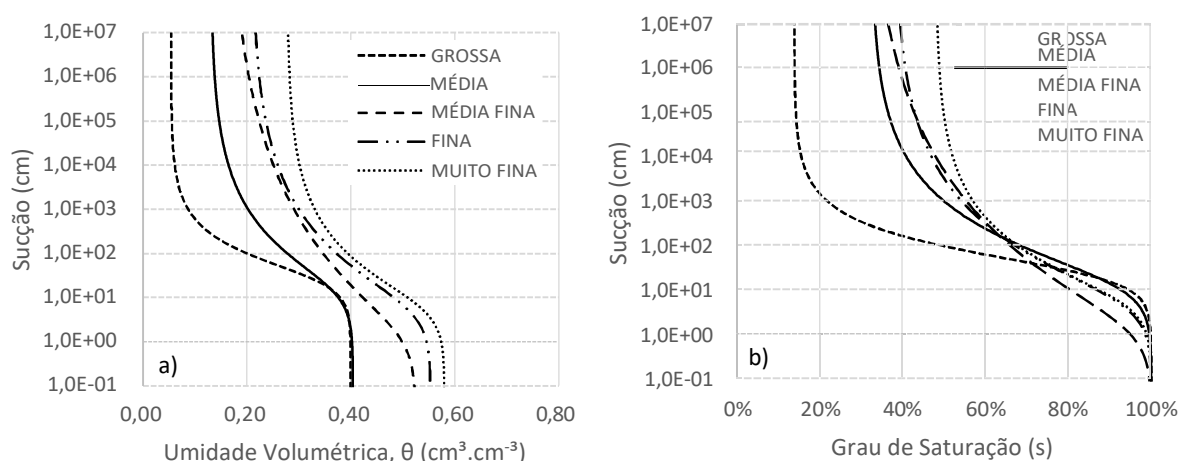
Figura 24 – Comparação entre as *CRAS* hipotéticas definidas para o *HYBRAS* e o *UNSODA* para a classificação baseada em F_c .



Fonte: Autor (2020)

As *CRAS* hipotéticas obtidas a partir da segunda classificação – com base nas classes texturais da *FAO* – são apresentadas na Figura 25. Os limites inferior e superior são vistos para as classes Grossa e Muito Fina, o que é consistente com a literatura. A análise pelo grau de saturação (s), entretanto, sugere que o valor de entrada de ar (AEV) é maior para a classe com menor F_c .

Figura 25 – *CRAS* hipotéticas para a classificação textural *FAO* (a) sucção x umidade volumétrica (θ) e (b) sucção x grau de saturação (s)

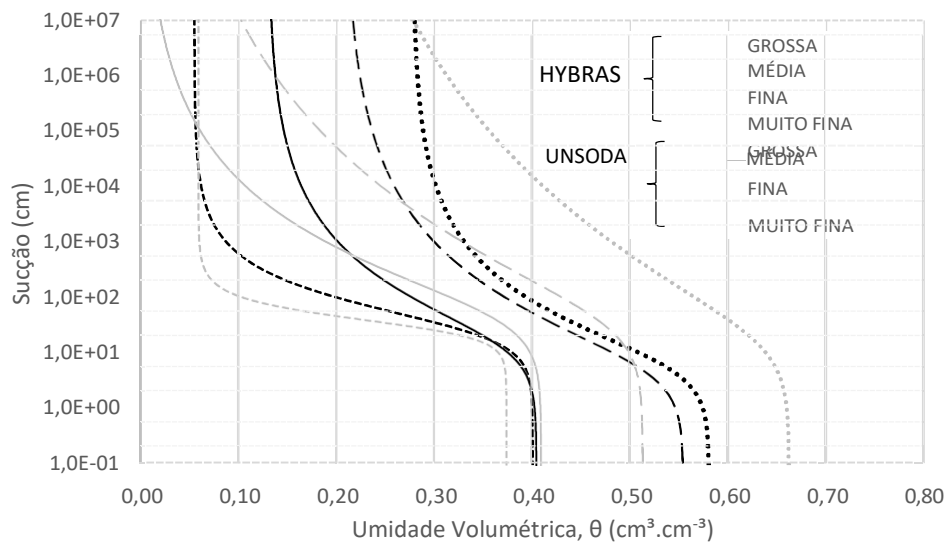


Fonte: Autor (2020)

As curvas hipotéticas obtidas para o *HYBRAS* são comparadas com as curvas hipotéticas obtidas para os solos temperados do *UNSODA*, proposta por Gonçalves (2012) a partir da mediana dos parâmetros da equação de van Genuchten (1980), como mostra a Figura 26.

Assim como para as classes com $F_c < 20\%$, as curvas para os solos do *HYBRAS* e do *UNSODA* são semelhantes para a classe textural Grossa. Para as classes Média e Fina, destaca-se a maior capacidade de retenção de água a altas sucções para os solos brasileiros, comportamento influenciado pela maior porcentagem de fração de argila para esses solos. A classe Muito Fina apresenta um comportamento inverso, mas a baixa representatividade de solos dentro do *UNSODA* não permite uma conclusão válida.

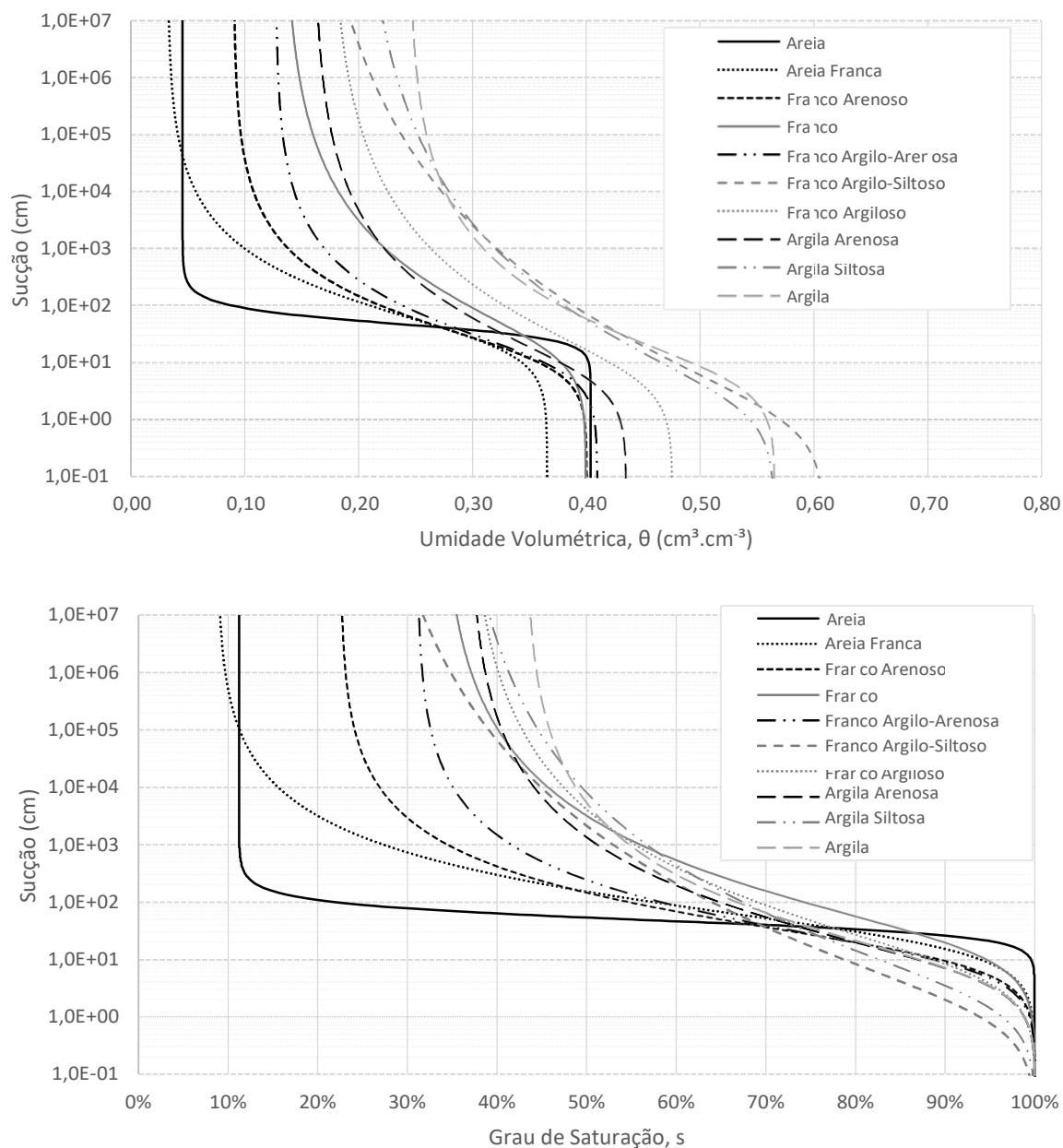
Figura 26 – Comparação entre as *CRAS* hipotéticas definidas para o *HYBRAS* e o *UNSODA* para a classificação textural FAO



Fonte: Autor (2020)

Finalmente, as curvas hipotéticas para o *HYBRAS* segundo a classificação textural USDA são mostradas na Figura 27. Embora existam diferenças marcantes entre algumas das curvas, como para as classes Areia e Franco Argiloso, outras curvas são muito semelhantes (Argila, Franco Argilo-Siltoso e Argila Siltosa, por exemplo). No entanto, os altos valores de desvio padrão para os parâmetros da equação de van Genuchten (1980) sugerem ampla variedade de curvas dentro de cada classe textural, o que explica as dificuldades de utilizar a mediana para representação de todo um subgrupo.

Figura 27 - *CRAS* hipotéticas para a classificação textural USDA: (a) sucção x umidade volumétrica (θ) e (b) sucção x grau de saturação (s)

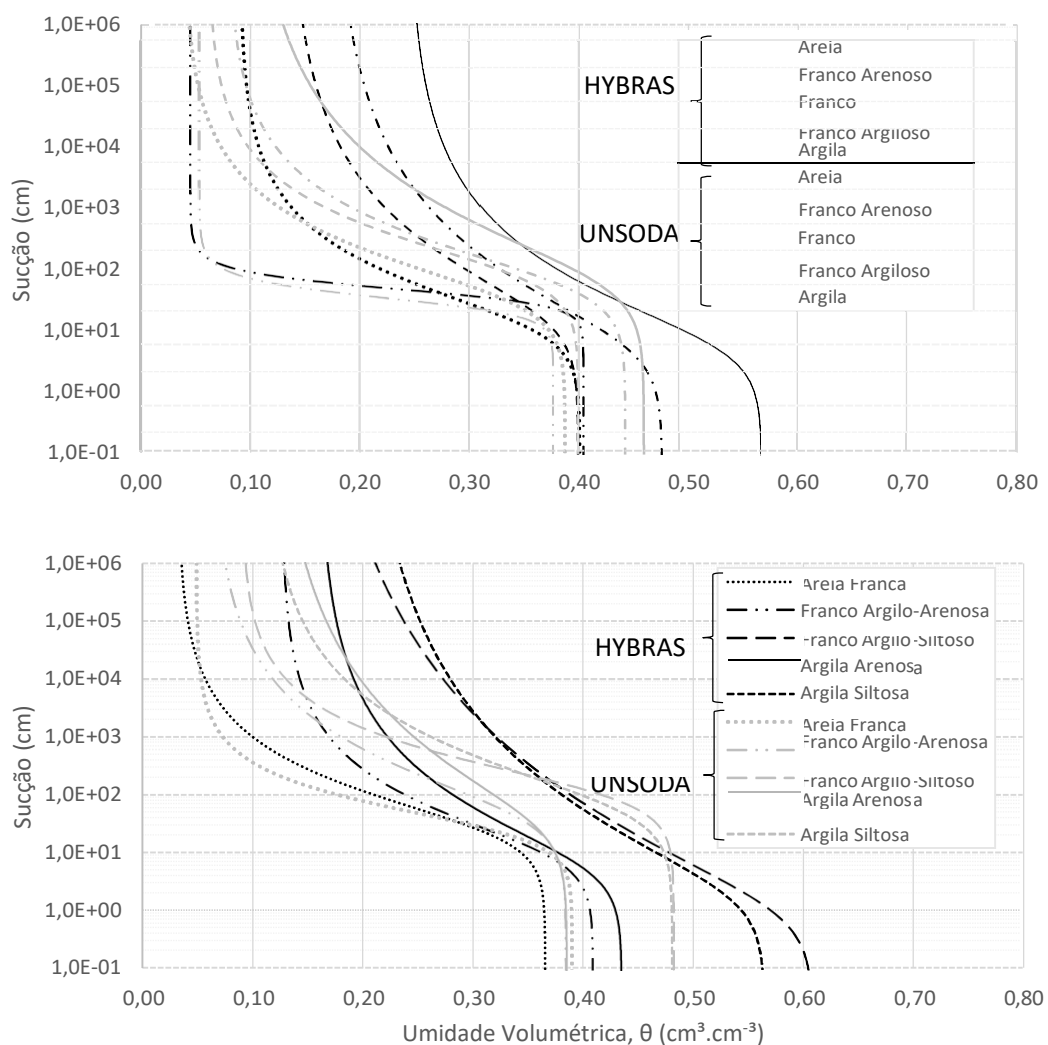


Fonte: Autor (2020)

As curvas hipotéticas obtidas para o *HYBRAS* são comparadas com as curvas hipotéticas obtidas por Schaap, Leij e van Genuchten (2001) para os solos temperados do *UNSODA* a partir da mediana dos parâmetros da equação de van Genuchten (1980), como mostram as Figura 29. As classes são divididas de forma a facilitar a visualização.

Para as classes de textura grossa (Areia e Areia Franca) as curvas são semelhantes entre os solos brasileiros tropicais do *HYBRAS* e temperados do *UNSODA*. Para as demais classes, as diferenças se referem, principalmente, a maior capacidade de retenção de água no trecho saturado e no trecho seco da *CRAS* para os solos brasileiros, o que foi observado pela variação do valor de θ_s e θ_r anteriormente.

Figura 28 – Comparação entre as *CRAS* hipotéticas definidas para o *HYBRAS* e o *UNSODA* para a classificação textural USDA



Fonte: Autor (2020)

4.3 Influência da distribuição granulométrica na CCH para os solos do *HYBRAS* e *UNSODA*

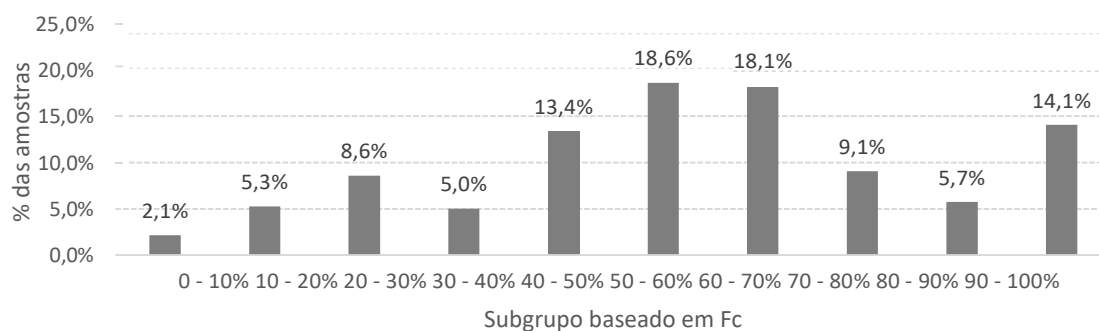
A condutividade hidráulica do solo (K) é fortemente influenciada pelo arranjo macroporoso dos solos (OTTONI, 2017). Dessa forma, a condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) em amostras de solo indeformadas depende principalmente das características dos maiores poros do solo (OTTONI *et al.*, 2019). Para as amostras de solo do banco de dados *HYBRAS*, os valores de K_{sat} variaram entre 1.35×10^{-7} e 4.50×10^{-4} m/s e para o *UNSODA* essa variação é entre 1.62×10^{-8} e 3.65×10^{-7} m/s, que correspondem a valores típicos de permeabilidade de areias siltosas (GONÇALVES, 2012).

De forma a avaliar a relação entre K e F_c e a distribuição granulométrica dos solos, é investigada a variação de K_{sat} para os subgrupos dentro de cada classificação proposta. Além disso, foram traçadas as *CCH* hipotéticas a partir dos valores das medianas de α , n_v e K_{sat} obtidos para cada subgrupo, necessários para aplicação da Equação 2. O valor de m foi assumido como $(1-1/n_v)$.

4.3.1 Classificação baseada em F_c

A distribuição percentual das 420 amostras com K_{sat} medido do banco de dados *HYBRAS* dentro dos 10 subgrupos baseados no teor de finos do solo é mostrada na Figura 29. O subgrupo 0-10% apresenta a menor quantidade de amostras (9) e o subgrupo 50-60% a maior quantidade (78). O resumo estatístico de K_{sat} é apresentado na Tabela 14, que apresenta os valores de mínimo, média, mediana e de máximo para cada subgrupo.

Figura 29 - Distribuição das amostras do *HYBRAS* com K_{sat} segundo a classificação baseada em F_c



Fonte: Autor (2020)

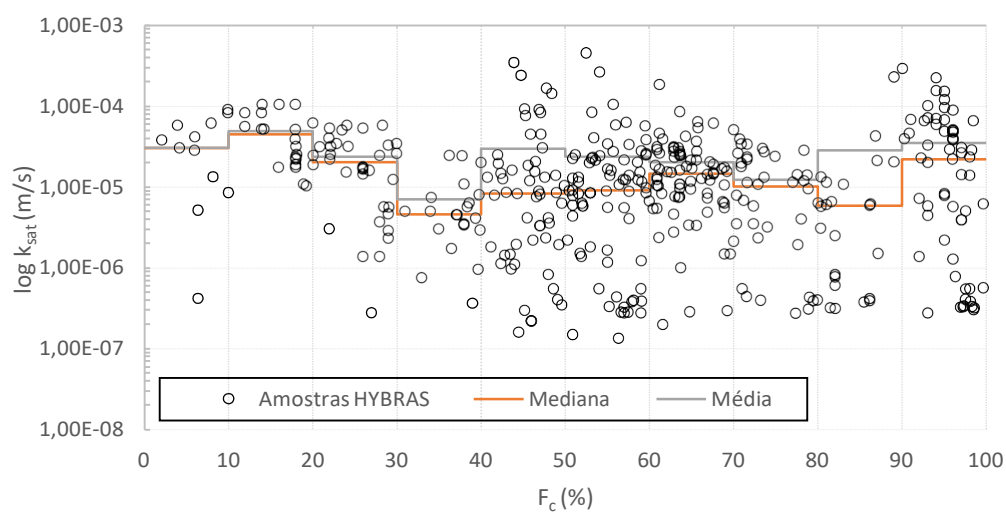
Tabela 14 - Resumo Estatístico de K_{sat} para a classificação baseada em F_c para as 420 amostras de solo do *HYBRAS* analisadas

Classe F_c	$N_{amostras}$	K_{sat} (m/s)			
		Mín	Média	Mediana	Máx
0 - 10%	9	4.17E-07	3.06E-05	3.02E-05	6.13E-05
10 - 20%	22	8.52E-06	4.93E-05	4.50E-05	1.05E-04
20 - 30%	36	2.78E-07	2.37E-05	2.04E-05	6.18E-05
30 - 40%	21	3.61E-07	7.01E-06	4.56E-06	2.45E-05
40 - 50%	56	1.61E-07	2.97E-05	8.19E-06	3.46E-04
50 - 60%	78	1.35E-07	2.39E-05	9.09E-06	4.50E-04
60 - 70%	76	2.00E-07	2.04E-05	1.46E-05	1.84E-04
70 - 80%	38	2.75E-07	1.24E-05	1.01E-05	3.90E-05
80 - 90%	24	3.18E-07	2.82E-05	5.84E-06	2.89E-04
90 - 100%	59	2.78E-07	3.54E-05	2.21E-05	2.21E-04

A Figura 30 apresenta a variação da média e da mediana do logaritmo de K_{sat} com F_c para os solos do *HYBRAS* e a Figura 31 apresenta a variação de K_{sat} e F_c para os solos temperados do *UNSODA*. A tendência de decréscimo de K_{sat} observada para os solos temperados utilizados por Gonçalves (2012) não se repete para os solos brasileiros tropicais do *HYBRAS*. De fato, os solos argilosos intemperizados brasileiros são solos bem estruturados, e tendem a apresentar elevado valor de condutividade hidráulica (TOMASELLA; HODNETT, 2004). Conforme apontam Ottoni et al. (2018), 672 solos do *HYBRAS* (ou 62.5%) são classificados como solos intemperizados: Latossolos (355),

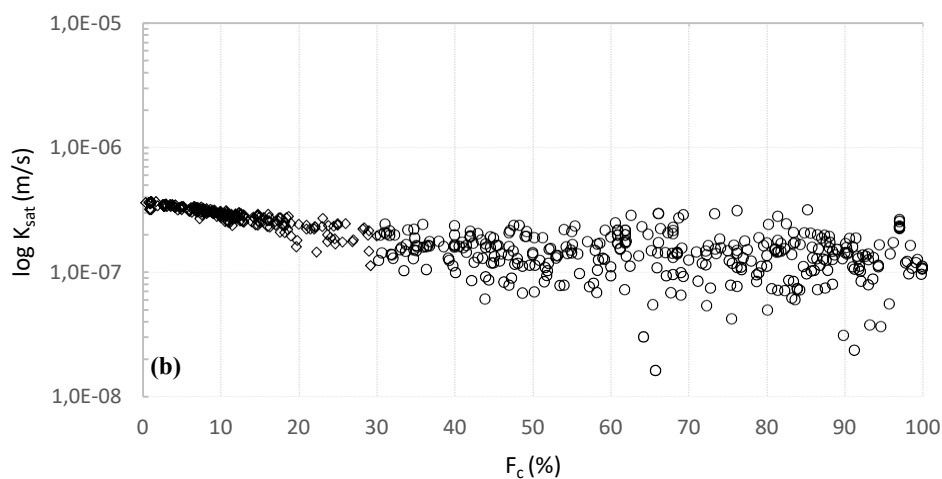
Argissolos (209) ou Nitossolos (108). Por essa razão, solos com alto F_c apresentam valores de K_{sat} próximos a solos de textura arenosa.

Figura 30 - Variação de K_{sat} com F_c para 420 amostras de solos do banco de dados *HYBRAS*



Fonte: Autor (2020)

Figura 31 - Variação de K_{sat} com F_c para as 546 amostras de solos do banco de dados *UNSODA*



Fonte: Adaptado de Gonçalves (2012)

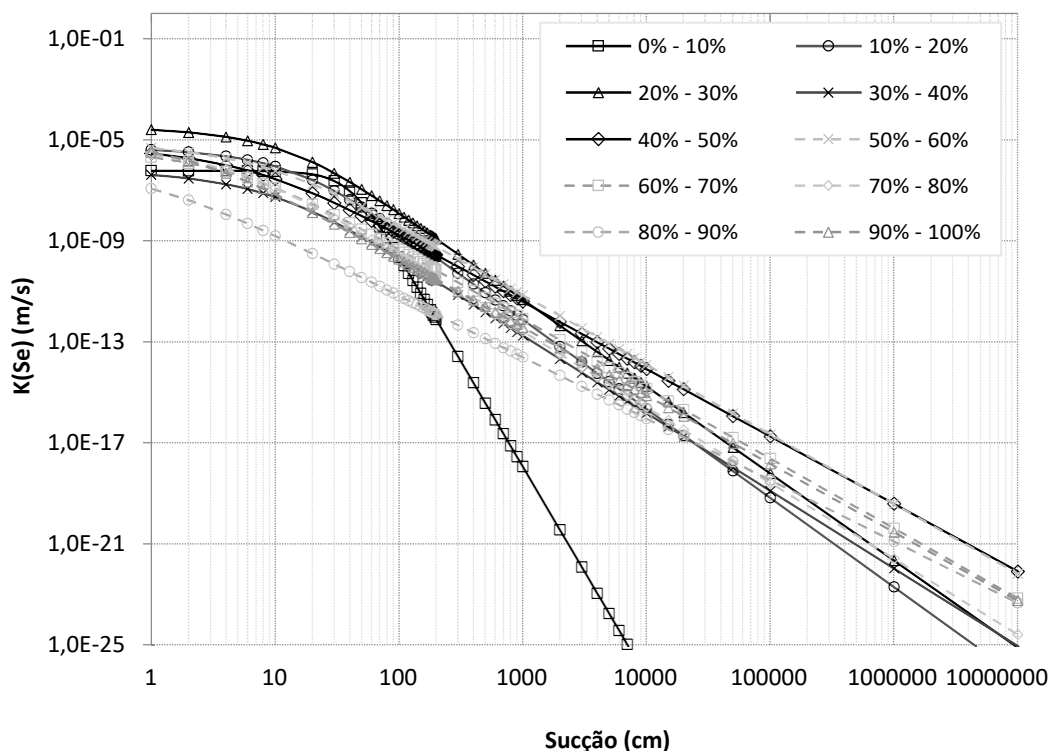
A variação de K_{sat} com F_c pode estar associada ao valor crítico do teor de finos no qual os finos preenchem completamente todos os poros da fração arenosa do solo. Para baixos teores de finos, as partículas finas se encaixam nos vazios entre as partículas de areia, de forma que K_{sat} diminui com o aumento de F_c para uma porosidade específica do solo. Segundo Gonçalves (2012), esse valor crítico está entre 20 e 30% F_c para os solos de finos não plásticos do *UNSODA* (Gonçalves, 2012). Quando os finos preenchem todos os vazios do solo, a permeabilidade do solo passa então a ser definida pela permeabilidade do tipo de fino e da microestrutura do solo (GONÇALVES, 2012), o que explica a maior variabilidade de K_{sat} quando $F_c > 30\%$.

Para os solos do *HYBRAS*, entretanto, os finos são plásticos e a distribuição granulométrica se mostra ineficaz para explicar a variação de K_{sat} . Fatores como a mineralogia e a estrutura do solo – como a porosidade total (P), devem ser levados em consideração para interpretação da variação do K_{sat} (OTTONI *et al.*, 2019).

A Figura 32 apresenta as *CCH* hipotéticas relacionando $K(Se)$ e sucção (h) para os 10 subgrupos baseados em F_c . Um comportamento distinto é apresentado pelo subgrupo 0-10%, enquanto todas as demais curvas apresentam comportamento similar, o que sugere ineficiência na utilização apenas da distribuição granulométrica para estimativa da *CCH*.

O comportamento das curvas é similar ao apresentado por Gonçalves (2012) para os solos do *UNSODA*, exceto para os subgrupos dentro do intervalo $10\% < F_c < 30\%$. Para baixas sucções, na parte saturada da curva, os subgrupos com menor F_c apresentam maior condutividade hidráulica (K). Com o aumento da sucção o valor de K decresce rapidamente para esses subgrupos, especialmente para o subgrupo 0-10% para o *HYBRAS* e para os subgrupos 0-10%, 10-20% e 20-30% no *UNSODA*. Para os demais subgrupos, o decréscimo do tamanho dos grãos suaviza a curva de condutividade hidráulica e garante a manutenção do fluxo por mais tempo durante o processo de drenagem e, por isso, maiores valores de K são observados conforme o aumento de F_c .

Figura 32 – CCH definida para os subgrupos baseado na classificação por F_c

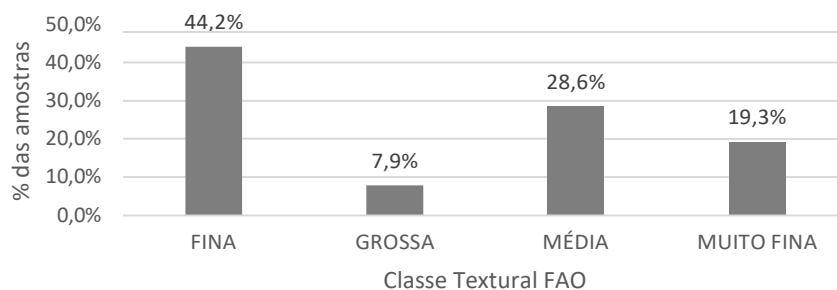


Fonte: Autor (2020)

4.3.2 Classificação segundo triângulo textural FAO

A distribuição percentual das 420 amostras do banco de dados *HYBRAS* dentro das 5 classes segundo o triângulo textural *FAO* é mostrada na Figura 33. A classe textural denominada Média Fina não é representada por nenhuma amostra de solo e as classes texturais denominadas Fina e Média apresentam a maior quantidade de amostras de solo com K_{sat} medido em laboratório. Na Tabela 15 é apresentado o resumo estatístico para a variação de K_{sat} dentro de cada uma das classes texturais. O valor mínimo e o valor máximo de K_{sat} dentro do *HYBRAS* estão dentro da classe textural fina.

Figura 33 - Distribuição das amostras do *HYBRAS* com K_{sat} segundo a classificação textural FAO



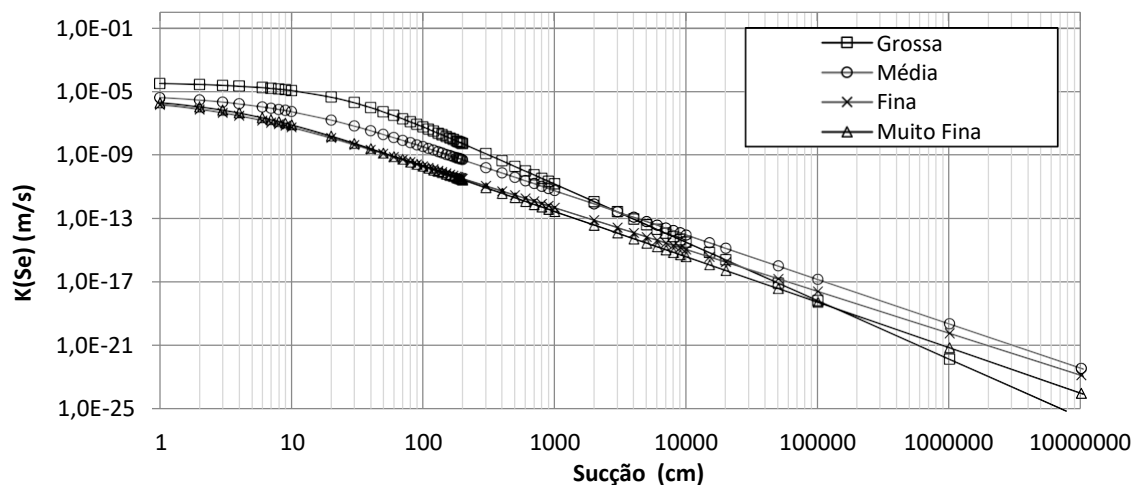
Fonte: Autor (2020)

Tabela 15 - Resumo Estatístico de K_{sat} para as classes texturais FAO para as 420 amostras de solo do *HYBRAS* analisadas

Classe Textural FAO	n	% Total	K_{sat} (m/s)			
			Mín	Média	Mediana	Máx
Grossa	33	7.90%	4.17E-07	4.27E-05	3.89E-05	1.05E-04
Média	120	28.60%	1.61E-07	2.26E-05	1.20E-05	2.62E-04
Fina	185	44.20%	1.35E-07	2.14E-05	1.08E-05	4.50E-04
Muito Fina	81	19.30%	2.75E-07	3.23E-05	8.33E-06	2.89E-04

A Figura 34 apresenta as *CCH* hipotéticas para as 4 classes. As curvas são bastante similares, e as conclusões são similares ao observado na primeira classificação: maiores valores de condutividade hidráulica para baixas sucções para a classe textural denominada Grossa, associada a solos com menor F_c ; e comportamento inverso para altas sucções.

Figura 34 – *CCH* definida para os subgrupos baseado na classificação textural FAO

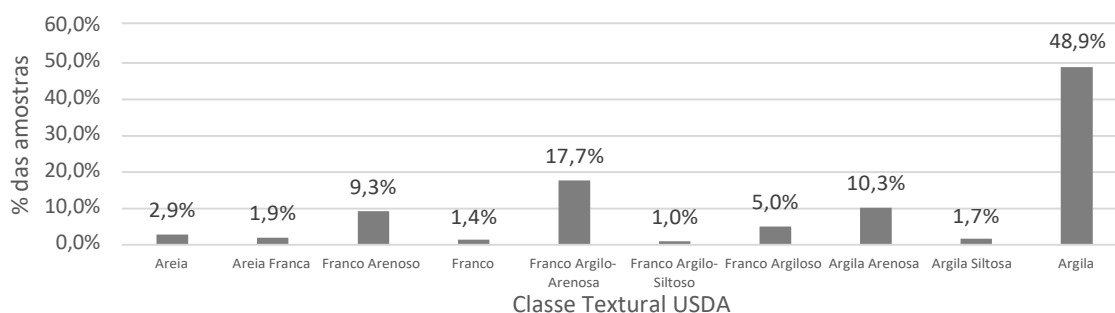


Fonte: Autor (2020)

4.3.3 Classificação segundo triângulo textural USDA

A distribuição percentual das 420 amostras do banco de dados *HYBRAS* dentro das 10 classes segundo o triângulo textural *USDA* é mostrado na Figura 35. A grande maioria dos solos com K_{sat} medido pertence à classe textural denominada Argila, e muitas das classes texturais são mal representadas (Areia, Areia Franca, Franco, Franco Argilo-siltoso e Argila Siltosa, por exemplo). Em adição, na Tabela 16 é apresentado o resumo estatístico para a variação de K_{sat} dentro de cada uma das classes texturais *USDA*.

Figura 35 - Distribuição das amostras do *HYBRAS* com K_{sat} segundo a classificação textural USDA



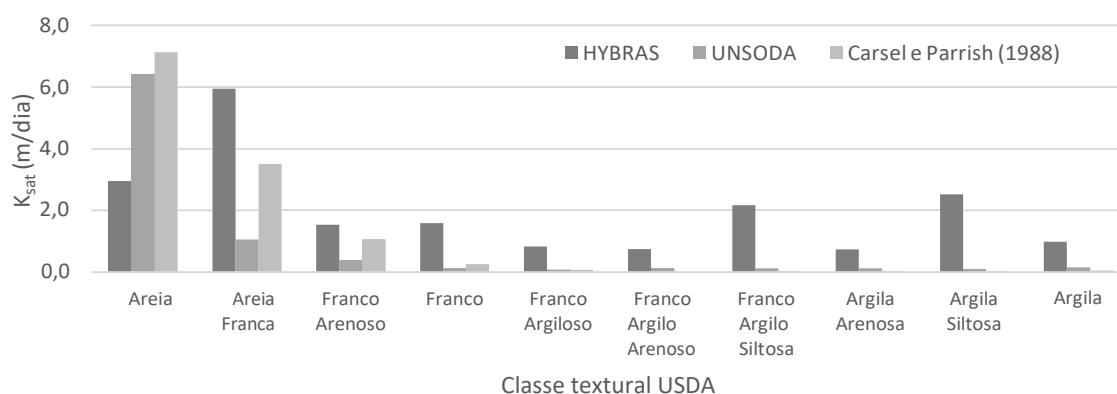
Fonte: Autor (2020)

Tabela 16 - Resumo Estatístico de K_{sat} para as classes texturais *USDA* para as 420 amostras de solo do *HYBRAS* analisadas

Classe Textural USDA	n	% Total	K_{sat} (m/s)			
			Mín	Média	Mediana	Máx
Areia	12	2.9%	4.17E-07	3.80E-05	3.41E-05	9.05E-05
Areia Franca	8	1.9%	1.75E-05	6.87E-05	6.87E-05	1.05E-04
Franco Arenoso	39	9.3%	1.39E-06	2.91E-05	1.78E-05	2.41E-04
Franco	6	1.4%	4.40E-07	4.14E-05	1.83E-05	1.42E-04
Franco Argilo-Arenoso	74	17.7%	1.61E-07	2.16E-05	8.54E-06	2.62E-04
Franco Argilo-Siltoso	4	1.0%	5.91E-06	2.54E-05	2.49E-05	4.58E-05
Franco Argiloso	21	5.0%	3.36E-07	1.36E-05	9.44E-06	4.21E-05
Argila Arenosa	43	10.3%	1.50E-07	2.96E-05	8.41E-06	4.50E-04
Argila Siltosa	7	1.7%	3.77E-07	3.35E-05	2.91E-05	7.00E-05
Argila	205	48.9%	1.35E-07	2.33E-05	1.14E-05	2.89E-04

A Figura 36 apresenta uma comparação entre os valores de K_{sat} em $m.dia^{-1}$ para diferentes bancos de dados: o *HYBRAS* para solos brasileiros e os bancos de dados *UNSODA* (SCHAAP; LEIJ; VAN GENUCHTEN) e de Carsel e Parrish (1988) para solos temperados. Conforme destacado por Ottoni (2017), os valores para os solos argilosos brasileiros são altamente contrastantes com a faixa reportada na literatura para solos argilosos de clima temperado. Apenas para a classe textural denominada Areia o valor de K_{sat} é superior para os bancos de dados de solos de clima temperado.

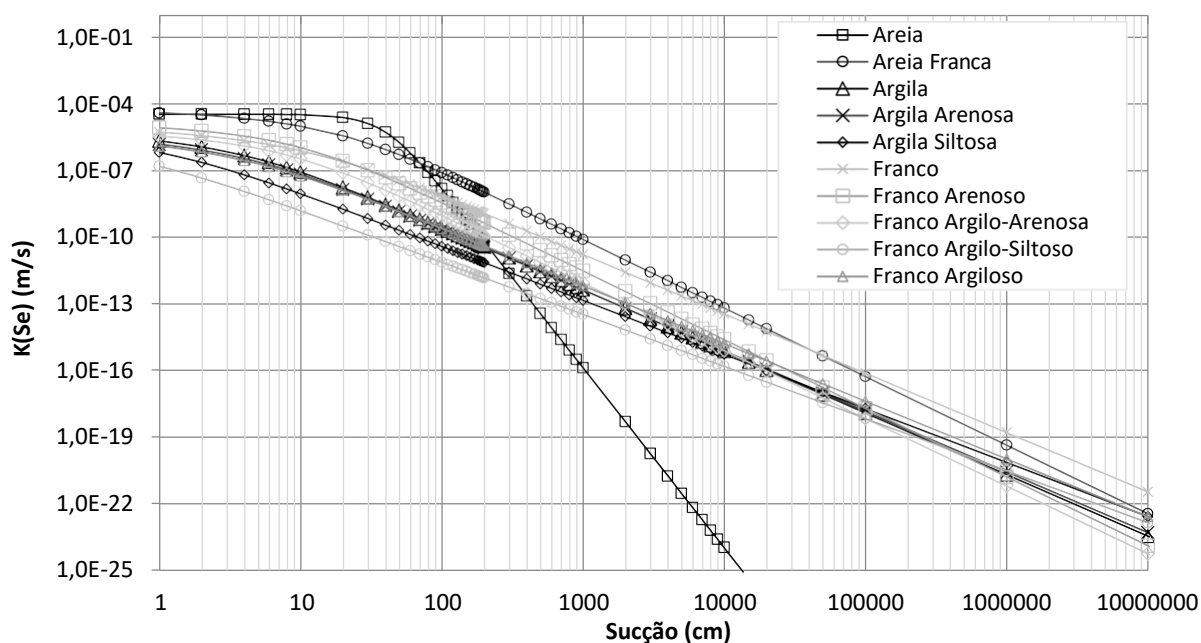
Figura 36 - Comparação dos valores de K_{sat} para diferentes bancos de dados



Fonte: Autor (2020)

A Figura 37 apresenta as *CCH* hipotéticas para as 10 classes texturais investigadas. A classe textural Areia apresenta comportamento similar ao subgrupo 0- 10% F_c da primeira classificação, enquanto os demais grupos apresentam curvas similares. Dessa forma, a classificação baseada em classes texturais não é suficiente para representação da *CCH* dos solos brasileiros.

Figura 37 – *CCH* definida para os subgrupos baseado na classificação textural USDA



Fonte: Autor (2020)

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Este estudo analisou a influência da distribuição granulométrica e da textura do solo nas curvas de retenção de água no solo (*CRAS*) e de condutividade hidráulica (*CCH*) de solos não saturados brasileiros de clima tropical utilizando resultados experimentais presentes no banco de dados *HYBRAS*. A equação de van Genuchten (1980) foi utilizada para representação de ambas as curvas. Os resultados obtidos foram comparados com as análises para solos de clima temperado do banco de dados *UNSODA* realizadas por Gonçalves (2012).

5.1 Conclusões

Embora seja notória a influência da distribuição granulométrica e da textura na curva de retenção de água no solo (*CRAS*) e na curva de condutividade hidráulica (*CCH*), o trabalho apresenta as limitações dessas classificações para a estimativa dos parâmetros de ajuste da equação de van Genuchten (1980) e, conseqüentemente, na estimativa de propriedades hidráulicas de solos tropicais brasileiros.

A separação adicional dos solos por F_c , além das separações nas classes texturais *FAO* e *USDA*, é importante na descrição de faixas de heterogeneidade das propriedades hidráulicas do solo. A influência da parcela de finos do solo, avaliada neste trabalho em 10 grupos com crescente F_c , é observada no formato da *CRAS*. Para os parâmetros de ajuste da equação de Van Genuchten (1980), essa influência é limitada, especialmente para solos com $F_c > 10\%$ para os solos do *HYBRAS* e $F_c > 30\%$ para os solos do *UNSODA*. Os parâmetros de ajuste da equação de van Genuchten (1980) (θ_s , θ_r , α e n_v), portanto, não devem ser interpretados como parâmetros com significado físico.

Em relação à curva de condutividade hidráulica (*CCH*), o estudo evidencia a falha da utilização apenas da distribuição granulométrica em explicar a variabilidade e o comportamento da *CCH*. Embora o K_{sat} cubra uma grande faixa de valores (1.35×10^{-7} a

4.5×10^{-4} m/s), não é observada tendência de variação com F_c ou com as classes texturais. O formato das curvas é similar para todos os subgrupos estudados, com apenas duas exceções: o subgrupo 0-10% de finos e a classe textural denominada Areia. Gonçalves (2012) mostra uma relação direta entre o K_{sat} e F_c para os solos temperados investigados com $F_c < 30\%$. Esse comportamento não se repete para os solos tropicais aqui investigados, o que reforça a necessidade da utilização de propriedades que reflitam a estrutura do solo para estimativa da CCH para os solos tropicais.

O estudo mostra a dificuldade na determinação dos parâmetros da equação de van Genuchten (1980) válidos para toda uma classe textural. A consideração da mediana dos parâmetros se mostra falha para explicar a variabilidade da $CRAS$, principalmente para a interpretação do parâmetro α . Isso ocorre, primeiramente, pela variabilidade de solos presentes dentro de cada classe para o banco de dados de solos tropicais brasileiros *HYBRAS*. Ainda, diferentes métodos experimentais são utilizados na determinação das propriedades hidráulicas para as 1075 amostras do banco de dados. Além disso, é importante lembrar que uma mesma curva pode ser ajustada de maneira semelhante a partir de diferentes valores dos parâmetros α e n_v . Adiciona-se ainda a não consideração da estrutura do solo quando utilizadas apenas dados referentes a distribuição granulométrica ou a classificação textural.

A comparação entre o banco de dados de solos tropicais e temperados evidencia as diferenças em função da plasticidade dos finos: a fração argilosa é significativamente maior na fração fina dos solos tropicais do *HYBRAS*, enquanto a fração siltosa é mais importante para os solos temperados do *UNSODA*. Nesse sentido, as diferenças observadas entre solos de mesma classe para solos tropicais e temperados sugerem cautela no uso de $PTFs$ fora da faixa de solos a partir do qual elas foram derivadas, conclusão semelhante a obtida por Hodnett e Tomasella (2002) e Ottoni *et al.* (2019).

5.2 Sugestões para Pesquisas Futuras

As seguintes sugestões são feitas para trabalhos futuros:

- Avaliar experimentalmente a variação das curvas de retenção e de condutividade hidráulica com o teor de finos para misturas de solos grossos e finos.
- Avaliar outros modelos matemáticos de ajuste para a *CRAS*, como as equações de Brooks e Corey (1964) e de Fredlund e Xing (1994).
- Propor novas formas de classificação para os solos tropicais, baseadas não somente na textura, mas também na origem e na estrutura dos solos;
- Utilizar modelos numéricos computacionais, como redes neurais artificiais, que permitem o reconhecimento de padrões implícitos para a definição de correlações entre propriedades do solo e os parâmetros da equação de van Genuchten (1980) para solos tropicais;

REFERÊNCIAS

ARYA, L. M.; PARIS, J. F. A Physicoempirical Model to Predict the Soil Moisture Characteristic from Particle-Size Distribution and Bulk Density Data. **Soil Science Society of America Journal**, v. 45, n. 6, p. 1023–1030, nov. 1981.

BARBOUR, S. L. Nineteenth Canadian Geotechnical Colloquium: The soil-water characteristic curve: a historical perspective. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 35, n. 5, p. 873–894, 1998.

BENSON, Craig H. *et al.* Estimating van Genuchten parameters α and n for clean sands from particle size distribution data. In: **From Soil Behavior Fundamentals to Innovations in Geotechnical Engineering: Honoring Roy E. Olson**. 2014. Atlanta, Goergia. p. 410-427.

BICALHO, K. V. *et al.* Experimental investigation of soil-atmosphere interaction in an instrumented embankment constructed with two treated clays. **Soils and Rocks**, v. 38, n. 2, p. 149–162, 2015.

BOSZCZOWSKI, Roberta Bomfim. **Avaliação de propriedades mecânicas e hidráulicas de um perfil de alteração de granito-gnaiss de Curitiba, PR**. 2008. 577f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

BOUMA, J. Using soil survey data for quantitative land evaluation. In: **Advances in soil science**. Springer, New York, NY, 1989. p. 177-213.

BROOKS, R. H; COREY, A. T. **Hydraulic properties of porous media**. Colorado State University, Hydrology Papel nº 3, 1964.

BURDINE, N. T. Relative Permeability Calculations From Pore Size Distribution Data. **Journal of Petroleum Technology**, v. 5, n. 03, p. 71–78, 1 mar. 1953.

CARSEL, R. F.; PARRISH, R. S. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. **Water Resources Research**, v. 24, n. 5, p. 755–769, maio 1988.

CHIN, K.-B.; LEONG, E.-C.; RAHARDJO, H. A simplified method to estimate the soil- water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 47, n. 12, p. 1382– 1400, dez. 2010.

CHIU, C. F.; YAN, W. M.; YUEN, K. V. Estimation of water retention curve of granular soils from particle-size distribution - a Bayesian probabilistic approach. **Canadian Geotechnical Journal**, 2012.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H.; FREDLUND, M. D. **Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice**. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2012.

FREDLUND, D. G.; XING, A. Equations for the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 31, n. 4, p. 521–532, 1 ago. 1994.

FREDLUND, D. G. Use of the soil-water characteristic curve in the implementation of unsaturated soil mechanics. In: **Proceedings of the 3rd International Conference on Unsaturated Soils**, Recife, Brasil. 2002. p. 887-902.

FREDLUND, D. G., FREDLUND, D. G., WILSON, G. W. Prediction of soil-water characteristic curve from grain size distribution and volumetric mass properties. In: **III Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados**. Rio de Janeiro, Brasil, 1997. Vol. 1, p. 13-23.

FREDLUND, D. G.; VU, H. Q.; STIANSON, J. Engineering protocols for the assessment of the net moisture flux at the ground surface. **Geotechnical Engineering**, v. 41, n. 1, p. 193, 2010.

GARDNER, W. R. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. **Soil Science**, v. 85, n. 4, p. 228–232, abr. 1958.

GITIRANA JUNIOR, G. DE F. N.; MARINHO, F. A. M.; SOTO, M. A. A. A curva de retenção de água de materiais porosos. In: **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (ABMS), 2005. p. 763.

GONÇALVES, Fernanda Vescovi. **Estudo das curvas de retenção e condutividade hidráulica estimadas pela equação de van Genuchten (1980) para diferentes tipos de solos**. 2012. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

GUARRACINO, L. Estimation of saturated hydraulic conductivity K_s from the van Genuchten shape parameter α . **Water Resources Research**, v. 43, n. 11, p. 15–18, 2007.

HODNETT, M. G.; TOMASELLA, J. Marked differences between van Genuchten soil water-retention parameters for temperate and tropical soils: a new water-retention pedo- transfer functions developed for tropical soils. **Geoderma**, v. 108, n. 3–4, p. 155–180, ago. 2002.

KAWAI, K. *et al.* The model of water retention curve considering effects of void ratio. In: **Unsaturated soils for Asia. Proceedings of the Asian Conference on Unsaturated Soils**, UNSAT-ASIA 2000, Singapore, 18-19 May, 2000. AA Balkema, 2000. p. 329-334.

LEONG, E. C.; RAHARDJO, H. Review of soil-water characteristic curve equations. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 123, n. 12, p. 1106–1117, 1997.

LEVI, M. R. Modified Centroid for Estimating Sand, Silt, and Clay from Soil Texture Class. **Soil Science Society of America Journal**, v. 81, n. 3, p. 578–588, maio 2017.

LIKOS, W. J.; YAO, J. Effects of Constraints on van Genuchten Parameters for Modeling Soil-Water Characteristic Curves. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 140, n. 12, p. 06014013, dez. 2014.

LILLY, A.; LIN, Hangsheng. Using soil morphological attributes and soil structure in pedotransfer functions. In: **Developments in soil science**, v. 30, p. 115-141, 2004.

LU, N.; LIKOS, W. J. **Unsaturated Soil Mechanics**. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2004.

MARINHO, F. A. M. Medição de sucção em solos. In: **3º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados**, NSAT97, Rio de Janeiro: 1997

MARINHO, Fernando AM; STUERMER, Mônica M. The influence of the compaction energy on the SWCC of a residual soil. In: **Advances in unsaturated geotechnics**. 2000. p. 125-141.

MASROURI, F.; BICALHO, K. V.; KAWAI, K. Laboratory Hydraulic Testing in Unsaturated Soils. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 26, n. 6, p. 691–704, 23 dez. 2008.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Research**, v. 12, n. 3, p. 513–522, jun. 1976.

NEMES, A. *et al.* Evaluation of different procedures to interpolate particle-size distributions to achieve compatibility within soil databases. **Geoderma**, v. 90, n. 3–4, p. 187–202, jul. 1999.

OTTONI, M. V. *et al.* Hydrophysical Database for Brazilian Soils (*HYBRAS*) and Pedotransfer Functions for Water Retention. **Vadose Zone Journal**, v. 17, n. 1, p. 170095, 2018.

OTTONI, M. V. *et al.* Pedotransfer functions for saturated hydraulic conductivity using a database with temperate and tropical climate soils. **Journal of Hydrology**, v. 575, p. 1345–1358, ago. 2019.

PATIL, N. G.; SINGH, S. K. Pedotransfer Functions for Estimating Soil Hydraulic Properties: A Review. **Pedosphere**, v. 26, n. 4, p. 417–430, ago. 2016.

SANTOS, Cláudio Rodrigues dos. **Análise Paramétrica da Infiltração e sua Influência da Estabilidade de Taludes em Solo Não Saturado**. 2004. 104 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004

SCHAAP, M. G.; LEIJ, F. J.; VAN GENUCHTEN, M. T. Rosetta : a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. **Journal of Hydrology**, v. 251, n. 3–4, p. 163–176, out. 2001.

SILVA, Angelita Martins da. **Banco de dados de curvas de retenção de água de solos brasileiros**. 2005. 116f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

TIMLIN, D. J. *et al.* Simple parametric methods to estimate soil water retention and hydraulic conductivity. In: Developments of Pedotransfer Functions in Soil Hydrology: **Development in Soil Science**, v. 30, Elsevier, 2004. p. 71-93.

TOMASELLA, J.; HODNETT, M.G. Pedotransfer functions for tropical soils. In: Pachepsky, Y; Rawls, W.J. (Eds). Developments of Pedotransfer Functions in Soil Hydrology: **Development in Soil Science**, v. 30, Elsevier, 2004. p. 415–429.

United States Department of Agriculture (USDA). Soil Science Division Staff. **Soil survey manual**. C. Ditzler, K. Scheffe, e H.C. Monger (eds.). USDA Handbook 18. Government Printing Office, Washington, D.C, 2017.

VAN GENUCHTEN, M. T. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, n. 5, p. 892–898, set. 1980.

VAN GENUCHTEN, M. T.; NIELSEN, D. R. On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soils. **Annales Geophysicae**, v. 3, n. 5, p. 615-628, 1985.

VAN LIER, Q. DE J.; PINHEIRO, E. A. R. An Alert Regarding a Common Misinterpretation of the Van Genuchten α Parameter. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 42, 2 jul. 2018.

VANAPALLI, S. K.; FREDLUND, D. G.; PUFAHL, D. E. The influence of soil structure and stress history on the soil–water characteristics of a compacted till. **Géotechnique**, v. 49, n. 2, p. 143–159, abr. 1999.

VANAPALLI, S. K. Simple test procedures and their interpretation in evaluating the shear strength of an unsaturated soil. 340 f. Tese (Doutorado em Filosofia) – University of Saskatchewan, Saskatchewan, 1996.

VERECKEN, H. *et al.* Using Pedotransfer Functions to Estimate the van Genuchten- Mualem Soil Hydraulic Properties: A Review. **Vadose Zone Journal**, v. 9, n. 4, p. 795– 820, nov. 2010.

VIVACQUA, Gabriel Peixoto Derenzi. **Estudo da influência da interação solo- atmosfera nos perfis de umidade, sucção e temperatura de um subsolo não saturado**. 2012. 174 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

WATABE, Y.; LEROUEIL, S.; LE BIHAN, J. P. Influence of compaction conditions on pore-size distribution and saturated hydraulic conductivity of a glacial till. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 37, n. 6, p. 1184–1194, 1 dez. 2000.

WHEELER, S. J.; SHARMA, R. S.; BUISSON, M. S. R. Coupling of hydraulic hysteresis and stress–strain behaviour in unsaturated soils. **Géotechnique**, v. 53, n. 1, p. 41–54, fev. 2003.

WÖSTEN, J. H. *et al.* Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. **Geoderma**, v. 90, n. 3–4, p. 169–185, jul. 1999.

WÖSTEN, J. H. M.; FINKE, P. A.; JANSEN, M. J. W. Comparison of class and continuous pedotransfer functions to generate soil hydraulic characteristics. **Geoderma**, v. 66, n. 3–4, p. 227–237, maio 1995.

ZHAI, Q.; RAHARDJO, H.; SATYANAGA, A. Effects of residual suction and residual water content on the estimation of permeability function. **Geoderma**, v. 303, p. 165–177, out. 2017.