

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Programa de Pós-graduação em Geografia

Área de concentração: Análise Ambiental

**Caracterização físico-hídrica dos solos da bacia do Córrego Marinho, Sete
Lagoas – MG**

Jonas Rodrigo do Amaral

Belo Horizonte

2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Jonas Rodrigo do Amaral

**Caracterização físico-hídrica dos solos da bacia do Córrego Marinheiro, Sete
Lagoas – MG**

**Dissertação apresentada ao programa de Pós-
Graduação do Departamento de Geografia da
Universidade Federal de Minas Gerais como
requisito parcial para obtenção do título de mestre
em Geografia.**

Orientadora: Profa. Dra. Adriana Monteiro da Costa

Co-orientador: Dr. João Herbert Moreira Viana

Belo Horizonte
Instituto de Geociências da UFMG

2018

A485c
2018 Amaral, Jonas Rodrigo do.
Caracterização físico-hídrica dos solos da bacia do Córrego
Marinheiro, Sete Lagoas – MG [manuscrito] / Jonas Rodrigo do
Amaral. – 2018.
153 f., enc.: il. (principalmente color.)

Orientador: Adriana Monteiro da Costa.
Coorientador: João Herbert Moreira Viana
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais,
Departamento de Geografia, 2018.
Área de concentração: Análise Ambiental.
Inclui bibliografias.
Inclui anexos.

1. Ciência do solo – Sete Lagoas (MG) – Teses. 2. Solos –
Permeabilidade – Sete Lagoas (MG) – Teses. 3. Física do solo –
Teses. I. Costa, Adriana Monteiro da. II. Viana, João Herbert Moreira.
III. Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento de
Geografia. IV. Título.

CDU: 631.4(815.1)

DEDICATÓRIA

A todos aqueles que trabalham pela conservação da água e do solo e lutam pelo acesso democrático a esses recursos tão fundamentais à vida, dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em especial, aos meus pais e ao meu irmão, que mesmo distantes do cotidiano acadêmico, sempre me motivaram a seguir adiante.

Agradeço aos meus amigos queridos de dentro e fora da universidade. Ao pessoal da graduação, do Cefet-MG, à turma das quintas-feiras, sem vocês nada teria tanta graça.

Agradeço especialmente a todos aqueles que acompanharam mais de perto minha jornada no mestrado. Nesse sentido, agradeço muito à Gra, amiga e companheira que mesmo nos bastidores foi minha maior fonte de incentivo. Agradeço aos colegas e amigos do programa de Pós-Graduação, em especial ao pessoal do Laboratório de Solos e Meio Ambiente e do laboratório de Geomorfologia. Não poderia deixar de destacar os auxílios prestados pelos caríssimos colegas de equipe, pela ajuda nas atividades de laboratório e de campo, fundamentais para a realização dessa pesquisa.

Agradeço aos funcionários do IGC, técnicos e terceirizados. Agradeço à UFMG e todo o suporte que essa instituição me deu nos últimos anos.

Agradeço muito aos professores, especialmente àqueles que auxiliaram em minha pesquisa – professores de dentro e de fora do programa. Nesse sentido, não poderia deixar de destacar o papel desempenhado pela colega e orientadora Dra. Adriana Monteiro da Costa, quem buscou dar todo o suporte possível para o desenvolvimento deste trabalho. Através dela, tive a oportunidade de conhecer e aprender muito com o Dr. João Herbert Moreira Viana, quem nos deu verdadeiras aulas durante os longos trabalhos de campo na bacia do Marinheiro. Não poderia deixar de fazer um agradecimento especial ao colega professor Dr. Bruno Montoani, pela disponibilidade e solicitude ímpar para com minhas dúvidas sobre física de solo.

Agradeço aos meus alunos (do passado e do presente), fonte de inspiração para minha formação continuada.

Agradeço à Lívia e ao Dé pelos auxílios fundamentais relativos à estatística.

Agradeço, ainda, aos colaboradores desse processo, como a Fapemig, a Embrapa Milho e Sorgo, aos proprietários rurais de Sete Lagoas e seus funcionários.

Enfim, sou muito grato a todos aqueles que de alguma maneira colaboraram para esta etapa de minha vida que agora chega ao fim.

EPÍGRAFE

"Mestre não é quem sempre ensina, mas quem de repente aprende."

João Guimarães Rosa, em Grande Sertão: Veredas

RESUMO

Os solos compõem parte importante do ciclo hidrológico, seja através do armazenamento da água, seja através da condução do seu fluxo. Por outro lado, o entendimento do comportamento da água em diferentes tipos de solo depende da caracterização de parâmetros hidráulicos de difícil obtenção. A caracterização físico-hídrica, ao trabalhar com uma variedade de métodos de análise, possibilita dimensionar a matriz porosa do solo. O conhecimento dos parâmetros físico-hídricos é fundamental na elaboração de projetos de irrigação e drenagem, na produção de modelos de balanço-hídrico e no entendimento dos processos de pedogênese, lixiviação e nutrição das plantas. Os solos da bacia do Córrego Marinheiro foram escolhidos em função da presença de focos de degradação do solo, com potenciais impactos para os recursos hídricos o que, aliado às pressões ambientais oriundas da urbanização e de práticas agropecuárias no entorno da bacia, trazem grandes preocupações para a conservação desses recursos. Este trabalho teve como objetivo a caracterização de parâmetros físico-hídricos de diferentes classes de solos representativas da bacia hidrográfica do Córrego Marinheiro, em Sete Lagoas - MG. Para tal, mediu-se a condutividade hidráulica saturada (K_0) e a capacidade de água disponível às plantas (CAD). Curvas de retenção de água no solo foram modeladas para 10 classes de solos nas profundidades de amostragem: 20 cm e 50 cm. Além disso, parâmetros físicos do solo foram caracterizados e analisados estatisticamente no intuito de aplicar, elaborar e ajustar funções de pedotransferência capazes de estimar K_0 e CAD. Para determinação de K_0 , foram realizados ensaios de infiltração com permeâmetro de Guelph, mediante aplicação de duas cargas hidráulicas sequenciais – 5 cm e 10 cm de altura de carga. Para determinação das curvas de retenção, foram coletadas amostras indeformadas com anéis volumétricos de 5 x 5 cm, para determinação dos maiores potenciais na mesa de tensão (-1, -2, -4, -6, -10, -33 e -66 kPa) e coletadas amostras deformadas para determinação dos menores potenciais através de análise de tensão no extrator de Richards (-500 e -1500 kPa) e no psicrômetro WP4C. Os maiores valores de K_0 estimados foram observados para as classes LV e CH. Os maiores valores de CAD foram observados nas classes PVA, CY, CX e NV. Alguns modelos propostos para CAD apresentaram boa capacidade preditiva, diferentemente das FPT's elaboradas para predição da K_0 .

Palavras – chave: caracterização físico-hídrica, condutividade hidráulica saturada, curva de retenção de água no solo, função de pedotransferência.

ABSTRACT

Soils make up an important part of the hydrological cycle, either by storing the water or by conducting its flow. On the other hand, the understanding of water behavior in different types of soil depends on the characterization of hydraulic parameters that are difficult to obtain. The physical-hydraulic characterization, based on work with a variety of methods of analysis, allows measuring the soil porous matrix. The knowledge of the physical-hydraulic parameters is fundamental to the elaboration of irrigation and drainage projects, to produce water balance models and to understand the processes of pedogenesis, leaching and plant nutrition. The soils of the Marinhoiro creek watershed were chosen due to the presence of soil degradation foci, with potential impacts on water resources. When they are combined with the environmental pressures of urbanization and agricultural practices around the basin, there is great concern for conservation of these resources. This work aimed to characterize the physical-hydraulic parameters of different soil classes representative of the watershed. For this purpose, the saturated hydraulic conductivity (K_0), and the available water capacity of the plants (CAD) were measured. Soil water retention curves were modeled for 10 soil classes (PVA, LV, CY, CX, CH, PA, TC and NV) at two sampling depths: 20 cm and 50 cm. In addition, soil physical parameters were characterized and analyzed statistically in order to apply, to elaborate, and to adjust pedotransfer functions capable of estimating K_0 and CAD. For the determination of K_0 , infiltration tests by Guelph permeameter were performed by applying two sequential hydraulic loads - 5 cm and 10 cm head. To determine the retention curves, undeformed samples of 5 x 5 cm volumetric rings were collected to determine the highest potentials in the sandbox (-1, -2, -4, -6, -10, -33 and -66 kPa) and deformed samples were collected for determination of lower potentials in the Richards' pressure plate apparatus (-500 and -1500 kPa) and in the WP4C psychrometer. The highest estimated values of K_0 were observed for the LV and the CH classes. The highest CAD values were observed in the PVA, CY, CX and NV classes. Some models proposed for CAD presented a good predictive capacity, unlike the FPTs elaborated to predict K_0 .

Keywords: physical-hydraulic characterization, saturated hydraulic conductivity, water retention curve and pedotransfer function.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Forças de adsorção (adesão e coesão). Autor: Henrique Machado.	28
Figura 2. Hidroxilação de superfícies de minerais que apresentam cargas dependentes de pH. M é o metal estrutural do mineral podendo ser Si, Fe, Al, Mn, etc. Fonte: Fontes et al. (2001).	28
Figura 3. Demonstração da relação granulometria e superfície específica. Autor: Henrique Machado.	30
Figura 4. Dimensão dos agregados e partículas finas do solo. Autor: Henrique Machado.	31
Figura 5. Distribuição ideal das partes líquida, gasosa e sólida de um solo. Autor: Henrique Machado.	35
Figura 6. Modelo conceitual de uma curva de retenção de água no solo. Fonte: gráfico elaborado pelo autor.	38
Figura 7. Relação entre tamanho dos poros e força de retenção. Autor: Henrique Machado.	39
Figura 8. Variedade de poros encontrados na literatura e divisão proposta neste trabalho. Autor: Henrique Machado.	41
Figura 9. Mesa de tensão e membrana porosa de proteção. Fonte: Autor (Laboratório de Solos e Meio Ambiente do IGC-UFMG).	42
Figura 10. Câmara de pressão de Richards. Fonte: Grigolon (2013).	43
Figura 11. Ilustração da câmara interna e seus componentes (DECAGON, 2015) e imagem da câmara interna do WP4C. Fonte: Autor (Laboratório de Solos e Meio Ambiente do IGC-UFMG).	44
Figura 12. Fotografia do Permeâmetro de Guelph, modelo 2800K1. Fonte: Autor. ...	46
Figura 13. Mapa de localização da bacia do Córrego Marinho, município de Sete Lagoas-MG. Fonte: Oliveira (2016).	50
Figura 14. Mapa de solos da Bacia do Córrego Marinho, com perfis selecionados para caracterização físico-hídrica. Fonte: Oliveira (2016) adaptado pelo autor.	53
Figura 15. Métodos utilizados para as faixas de potencial matricial medidas. Fonte: Autor.	56
Figura 16. Preparação de amostras indeformadas – etapa anterior à saturação. Fonte: Autor.	57
Figura 17. Etapa de saturação das amostras indeformadas. Fonte: Autor.	58
Figura 18. Alocação das amostras indeformadas na mesa de tensão. Fonte: Autor.	59
Figura 19. Pré-umedecimento dos agregados para análise de estabilidade. Fonte: Autor.	63
Figura 20. Mapa de localização da bacia do Córrego Marinho, município de Sete Lagoas-MG. Fonte: Oliveira (2016).	87
Figura 21: Valores de dispersão entre K_0 e variáveis dependentes de maior significância.	94
Figura 23. Gráficos de dispersão entre CAD_2 e variáveis dependentes de maior significância. Fonte: Imagem feita pelo autor.	96
Figura 24. Gráficos de dispersão entre CAD_3 e variáveis dependentes de maior significância. Fonte: imagem feita pelo autor.	97
Figura 25. Comparação entre os valores observados e estimados segundo os modelos do grupo 1 e 2.	101
Figura 26. Valores de CAD dos perfis analisados na profundidade de 20 cm, para três tensões de capacidade de campo distintas (- 6 kPa; - 10 kPa e - 33 kPa). Fonte:	

Autor.....	127
Figura 27. Valores de CAD dos perfis analisados na profundidade de 20 cm, para três tensões de capacidade de campo distintas (- 6 kPa; - 10 kPa e - 33 kPa). Fonte: Imagem feita pelo autor.....	128
Figura 28. Valores de AG dos perfis analisados na profundidade de 20 cm, para três tensões de capacidade de campo distintas (- 6 kPa; - 10 kPa e - 33 kPa). Fonte: Autor.....	129
Figura 29. Valores de AG dos perfis analisados na profundidade de 20 cm, para três tensões de capacidade de campo distintas (- 6 kPa; - 10 kPa e - 33 kPa). Fonte: Autor.....	130
Figura 30. Curvas de retenção de água no solo modeladas para o Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico nitossólico (perfil 1), na profundidade de 20 cm, repetições 1, 2 e 3. Fonte: Autor.	131
Figura 31. Curvas de retenção de água no solo modeladas para o Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico nitossólico (perfil 1), na profundidade de 50 cm, repetições 1, 2 e 3. Fonte: Autor.	132
Figura 32. Curvas de retenção de água no solo modeladas para o Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico nitossólico (perfil 2), na profundidade de 20 cm, repetições 1, 2 e 3. Fonte: Autor.	133
Figura 33. Curvas de retenção de água no solo modeladas para o Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico nitossólico (perfil 2), na profundidade de 50 cm, repetições 1, 2 e 3. Fonte: Autor.	134
Figura 34. Curvas de retenção de água no solo modeladas para o Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico (perfil 3), na profundidade de 20 cm, repetições 1, 2 e 3. Fonte: Autor.....	135
Figura 35. Curvas de retenção de água no solo modeladas para o Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico (perfil 3), na profundidade de 50 cm, repetições 1, 2 e 3. Fonte: Autor.....	136
Figura 36. Curvas de retenção de água no solo modeladas para o Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico (perfil 4), na profundidade de 20 cm, repetições 1, 2 e 3. Fonte: Autor.....	137
Figura 37. Curvas de retenção de água no solo modeladas para o Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico (perfil 4), na profundidade de 50 cm, repetições 1, 2 e 3. Fonte: Autor.....	138
Figura 38. Curvas de retenção de água no solo modeladas para o Cambissolo Flúvico Tb Eutrófico típico (perfil 5), na profundidade de 20 cm, repetições 1, 2 e 3. Fonte: Autor.....	139
Figura 39. Curvas de retenção de água no solo modeladas para o Cambissolo Flúvico Tb Eutrófico típico (perfil 5), na profundidade de 50 cm, repetições 1, 2 e 3. Fonte: Autor.....	140
Figura 40. Curvas de retenção de água no solo modeladas para o Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico (perfil 6), na profundidade de 20 cm, repetições 1, 2 e 3. Fonte: Autor.....	141
Figura 41. Curvas de retenção de água no solo modeladas para o Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico (perfil 6), na profundidade de 50 cm, repetições 1, 2 e 3. Fonte: Autor.....	142
Figura 42. Curvas de retenção de água no solo modeladas para o Argissolo Amarelo Distrófico típico (perfil 7), na profundidade de 20 cm, repetições 1, 2 e 3. Fonte: Autor.....	143
Figura 43. Curvas de retenção de água no solo modeladas para o Argissolo Amarelo	

Distrófico típico (perfil 7), na profundidade de 50 cm, repetições 1, 2 e 3. Fonte: Autor.....	144
Figura 44. Curvas de retenção de água no solo modeladas para o Cambissolo Húmico Distrófico típico (perfil 8), na profundidade de 20 cm, repetições 1, 2 e 3. Fonte: Autor.....	145
Figura 45. Curvas de retenção de água no solo modeladas para o Cambissolo Húmico Distrófico típico (perfil 8), na profundidade de 50 cm, repetições 1, 2 e 3. Fonte: Autor.....	146
Figura 46. Curvas de retenção de água no solo modeladas para o Luvissole Crômico Pálico típico (perfil 9), na profundidade de 20 cm, repetições 1, 2 e 3. Fonte: Autor.	147
Figura 47. Curvas de retenção de água no solo modeladas para o Luvissole Crômico Pálico típico (perfil 9), na profundidade de 50 cm, repetições 1, 2 e 3. Fonte: Autor.	148
Figura 48. Curvas de retenção de água no solo modeladas para o Nitossolo Vermelho Eutrófico típico (perfil 10), na profundidade de 20 cm, repetições 1, 2 e 3. Fonte: Autor.....	149
Figura 49. Curvas de retenção de água no solo modeladas para o Nitossolo Vermelho Eutrófico típico (perfil 10), na profundidade de 50 cm, repetições 1, 2 e 3. Fonte: Autor.....	150

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores de referência encontrados na literatura para a CAD, para diferentes classes, em $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$	40
Tabela 2. Valores de referência de condutividade hidráulica saturada (K_0) encontrados na literatura, em mm.h^{-1}	48
Tabela 3. Identificação dos perfis caracterizados na bacia do córrego Marinheiro, Sete Lagoas (MG).	54
Tabela 4. Parâmetros físicos médios, analisados por perfil e profundidade em três repetições.	65
Tabela 5. Valores de condutividade hidráulica saturada estimados, em mm.h^{-1} , acompanhados dos parâmetros textura e porosidade.	67
Tabela 6. Valores de AG, em $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$, estimados para cada perfil e profundidade analisados na bacia do Córrego Marinheiro.	75
Tabela 7. Perfis da Bacia do Córrego Marinheiro com maior potencial para a recarga do lençol freático, de acordo com os valores de K_0 e AG estimados.	76
Tabela 8. Valores de CAD estimados, em $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$, para os solos da bacia do Córrego Marinheiro, nas profundidades de 20 e 50 cm, acompanhados dos atributos físicos de maior correlação.	77
Tabela 9. Pedofunções de referência de solos brasileiros selecionadas na literatura.	86
Tabela 10. Parâmetros físicos medidos	91
Tabela 11. Parâmetros físico-hídricos medidos	92
Tabela 12. Valores de água disponível (CAD) estimados pelas FPT, em $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ e cálculo do Erro Médio Quadrático (EMQ).	98
Tabela 13. Valores de CAD estimados por FPT's, em $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$	99
Tabela 14. FPT'S produzidas para os solos da bacia do Córrego Marinheiro.	99

LISTA DE TABELAS – ANEXO I

Tabela I. 1. Valores medidos de condutividade hidráulica saturada, em mm.h^{-1}	116
Tabela I. 2. Valores de CTC medidos em laboratório.	117
Tabela I. 3. Valores medidos de ΔpH ($\text{pH}^{\text{água}} - \text{pH}^{\text{KCl}}$).	118
Tabela I. 4. Valores medidos para densidade de partícula, em g.cm^{-3}	119
Tabela I. 5. Valores medidos para densidade do solo, em g.cm^{-3}	120
Tabela I. 6. Valores medidos para Diâmetro Médio Geométrico (DMG), em mm. ..	121
Tabela I. 7. Valores percentuais da análise granulométrica e classificação textural das classes analisadas.	122
Tabela I. 8. Valores percentuais da análise granulométrica da fração areia.	123
Tabela I. 9. Valores percentuais de macro agregados e microagregados.	124
Tabela I. 10. Valores estimados de microporosidade, macroporosidade e porosidade total, em $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$	125
Tabela I. 11. Valores de CAD estimados, em $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ para os solos da bacia do Córrego Marinheiro, nas profundidades de 20 e 50 cm.	126

LISTA QUADROS – ANEXO II

Quadro II. 1. Resultado de análise estatística descritiva das variáveis preditas: CAD e k_0 , com profundidade da amostra, médias, medianas e desvio padrão.	151
Quadro II. 2. Matriz de correlação com destaque para variáveis que apresentaram maior correlação.....	152
Quadro II. 3. Matriz com valores do teste de significância (p valor < 0,05).	153

LISTA DE SIGLAS

AD – ÁGUA DISPONÍVEL

AG – ÁGUA GRAVITACIONAL

AIC – CRITÉRIO DE INFORMAÇÃO DE AKAIKE

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS

CAD – CAPACIDADE DE ÁGUA DISPONÍVEL

CAD₁ – CAPACIDADE DE ÁGUA DISPONÍVEL SOB A TENSÃO DE –6kPa

CAD₂ – CAPACIDADE DE ÁGUA DISPONÍVEL SOB A TENSÃO DE – 10kPa

CAD₃ – CAPACIDADE DE ÁGUA DISPONÍVEL SOB A TENSÃO DE -33kPa

CC – CAPACIDADE DE CAMPO

CH – CAMBISSOLO HÚMICO

CNPMS – CENTRO NACIONAL DE PESQUISA DE MILHO E SORGO – EMBRAPA

CRA – CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA

CTC - CAPACIDADE DE TROCA CATIÔNICA

CX – CAMBISSOLO HÁPLICO

CY – CAMBISSOLO FLÚVICO

DMG - DIÂMETRO MÉDIO GEOMÉTRICO

DP – DENSIDADE DE PARTÍCULAS

DP – DESVIO PADRÃO

DS – DENSIDADE DO SOLO

DTA – DISPONIBILIDADE TOTAL DE ÁGUA

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA

EPE – ERRO PADRÃO DA ESTIMATIVA

FPT – FUNÇÃO DE PEDOTRANSFERÊNCIA

K – CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

K₀ – CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA

LV – LATOSSOLO VERMELHO

MO – MATÉRIA ORGÂNICA

NaOH – HIDRÓXIDO DE SÓDIO

NV – NITOSSOLO VERMELHO

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS

PA – ARGISSOLO AMARELO

PG – PERMEÂMETRO DE GUELPH

PMP – PONTO DE MURCHA PERMANENTE

PTF – PEDOTRANSFER FUNCTION

PVA – ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO

EMQ – ERRO MÉDIO QUADRÁTICO

TC – LUVISSOLO CRÔMICO

TFSA – TERRA FINA SECA AO AR

UFLA – UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS

UFMG – UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

UFV – UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

UFSM – UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA

USDA – UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE

SUMÁRIO

RESUMO.....	8
ABSTRACT	10
LISTA DE SIGLAS	16
INTRODUÇÃO GERAL	19
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	22
CAPÍTULO 1	24
Caracterização físico-hídrica dos solos da bacia do Córrego Marinheiro, Sete Lagoas – MG, através de métodos convencionais	24
1.1	INTRODUÇÃO
.....	24
1.2 REFERENCIAL TEÓRICO	26
1.2.1.Solo	26
1.2.2. Comportamento da água no solo	27
1.2.3. Geometria do espaço poroso e parâmetros físicos	29
1.2.4. Densidade do solo (Ds)	36
1.2.5. Densidade de partículas (Dp)	36
1.2.6. Porosidade total (Pt ou α_s)	36
1.2.7. Microporosidade ($\emptyset$)	37
1.2.8 Macroporosidade	37
1.2.9. Água Gravitacional (AG)	37
1.2.10. Curva de retenção de água no solo	38
1.2. 11. Ensaio de retenção de água em baixas tensões	41
1.2.12. Ensaio de retenção de água em baixos potenciais	43
1.2.13. Condutividade hidráulica	45
1.3 MATERIAL E MÉTODOS	49
1.3.1.Área de estudo	49
1.3.2. Método do permeâmetro de Guelph para determinação de K ₀	55
1.3.3. Análises utilizadas para montagem das curvas de retenção de água no solo	56
1.3.4. Coleta e preparação de amostras indeformadas para análise na mesa de tensão.	57
1.3.5. Análise na mesa de tensão	58

1.3.6. Extrator de Richards ou extrator de placa porosa	60
1.3.7. Método do psicrômetro WP4C (Dew Point PotentiaMeter).....	60
1.3.8. Caracterização física e química dos solos	60
1.3.9. Análise granulométrica	61
1.3.10. Densidade de partículas	61
1.3.11. Densidade do solo.....	62
1.3.12. Estabilidade de agregados	62
1.3.13. Matéria orgânica, capacidade de troca catiônica (CTC) e o ΔpH	64
1.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	64
1.4.1. Condutividade hidráulica saturada (K_0).....	66
Tabela 5. Valores de condutividade hidráulica saturada estimados, em mm.h-1, acompanhados dos parâmetros textura e porosidade	67
1.4.2. Potencial de recarga do lençol dos solos da bacia do Córrego Marinheiro	74
Tabela 6. Valores de AG, em cm ³ .cm-3, estimados para cada perfil e profundidade analisados na bacia do Córrego Marinheiro	75
1.4.3. Capacidade de água disponível às plantas e parâmetros físicos.....	77
1.4.4. Curvas de retenção de água no solo (CAD).....	77
1.5 CONCLUSÃO.....	82
CAPÍTULO 2	84
Funções de pedotransferência: teste e elaboração de modelos de predição	84
2.1 INTRODUÇÃO	84
2.2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	86
2.2.1. Área de Estudo.....	86
2.2.2. Metodologia.....	90
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	93
2.3.1. Análise descritiva	93
2.3.2. Análise de correlação e significância	94
2.3.3. Parâmetros de maior correlação e significância referente às variáveis preditoras	94
2.3.4. Parâmetros de maior correlação e significância com a CAD1.....	95
2.3.5. Parâmetros de maior correlação e significância com a CAD2.....	96
2.3.6. Parâmetros de maior correlação e significância com a CAD3.....	97

2.3.7 Funções de pedotransferência de referência	98
2.3.8. Funções de pedotransferência elaboradas	99
2.4 CONCLUSÃO.....	102
2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	102
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104
ANEXO I.....	116
ANEXO II.....	151

INTRODUÇÃO GERAL

O solo cumpre papel de suma importância no meio ambiente e na manutenção de diversas atividades sociais e econômicas, especialmente no Brasil. O uso desse recurso no país se intensificou progressivamente desde meados do século passado, acompanhando os processos de industrialização, urbanização e modernização da agricultura.

Além da intensificação dos usos do solo, também tem se tornado crescente a preocupação com sua conservação e com o uso sustentável de outros recursos ambientais a ele atrelados, tais como a biodiversidade da flora e da fauna e a qualidade e disponibilidade de água.

Segundo pesquisas desenvolvidas junto à Organização das Nações Unidas (ONU), mais de 30% dos solos no mundo estão em condições de degradação, associados principalmente a problemas como perda de solo por erosão, salinização, redução da matéria orgânica e da biodiversidade (FAO et al., 2015).

O levantamento, a caracterização e o mapeamento dos solos são fundamentais para o conhecimento das potencialidades e das limitações dos terrenos. A partir do conhecimento das especificidades de cada solo, diferentes usos e manejos podem ser adotados visando sua conservação.

Nesse sentido, ainda há um grande desafio no Brasil para a governança desse recurso, pois apenas cerca de cinco por cento do território nacional possui mapeamentos na escala de 1:100.000 ou de maior detalhamento (POLIDORO et al., 2016). Diante desse quadro é que surge em 2016 o Programa Nacional de Solos do Brasil (PronaSolos) – um ano após o ano internacional dos solos, promovido pela ONU. Esse programa representa um esforço multi-institucional de retomar as atividades de mapeamento pedológico em todo o território nacional.

Para fins de conservação ambiental, além da ampliação do mapeamento de solos, faz-se cada vez mais necessária a ampliação de análises capazes de integrar diferentes elementos da paisagem e considerar suas inter-relações no ciclo hidrológico. Nesse sentido, a caracterização físico-hídrica figura como uma importante aliada dos planejamentos ambientais que estão sendo realizados no âmbito da gestão das bacias hidrográficas.

A bacia hidrográfica constitui a principal unidade espacial adotada para a gestão dos recursos hídricos, de acordo com a legislação vigente no país (Lei n.º

9.433, 1997). Isso porque sua área figura como unidade espacial comum de captação e drenagem das águas pluviais. Dentre os principais elementos de uma bacia, podemos destacar, além dos elementos fisiográficos e morfológicos atrelados ao relevo, a cobertura vegetal e as classes de solo (MELLO; SILVA, 2013).

A interdependência dos diferentes elementos que constituem uma bacia hidrográfica é tamanha que a quantidade e a qualidade da água disponível dependem diretamente da natureza e magnitude dos usos que são conduzidos no terreno, sobretudo em sua camada mais superficial – o solo. Processos que comprometem a qualidade dos corpos hídricos, tais como o assoreamento e o escoamento superficial, são alguns exemplos dessa interdependência.

Ainda de acordo com a Lei de Águas, a gestão dos recursos hídricos deve ser descentralizada e cumprir algumas funções como: diagnosticar os diferentes usos do solo e as demandas pelo uso da água (presentes e futuras); avaliar a disponibilidade e a qualidade da água; caracterizar seus elementos físicos, biológicos e sociais; identificar áreas degradadas, propor ações de controle, cobrar pelo uso da água, entre outros (BRASIL, 1997).

Boa parte das pesquisas envolvendo a relação solo-água-plantas e a caracterização físico-hídrica trabalha na escala de unidades pedológicas e não na escala de bacias hidrográficas. Essas pesquisas são mais recorrentes na área de física do solo (sobretudo em cursos de agronomia e engenharia), voltadas para a conservação do solo e água, nutrição de plantas e projetos de drenagem e irrigação.

Os diferentes solos apresentam propriedades distintas, o que determina o seu comportamento e, portanto, seu conhecimento deve ser balizador do seu manejo. Em geral, sabe-se que solos bem desenvolvidos, profundos e bem estruturados apresentam maior infiltração de água e, conseqüentemente, maior potencial de armazenamento e recarga de aquíferos. Solos pouco desenvolvidos, rasos e com baixa porosidade podem apresentar menor armazenamento de água no solo, além de serem mais frágeis, favorecendo o escoamento superficial e o processo erosivo (COSTA et al., 2016). Por outro lado, a falta de informações mais precisas referentes aos parâmetros físico-hídricos em cada classe sustenta generalizações sobre o comportamento da água no solo baseadas somente na sua classificação taxonômica.

Outro fator que justifica a necessidade da caracterização físico-hídrica, independente de sua classe, é o uso do solo. A maior parte do uso e da ocupação

do solo em áreas rurais no país se dá pela prática de atividades agropastoris. Essas atividades, quando empreendidas sem considerar as características de cada solo, oferecem grande potencial à degradação dos solos e da água. A prática de queimadas, a compactação, entre outros, são alguns exemplos de como atividades distintas e tipos de manejo podem alterar o espaço poroso do solo e interferir em processos que envolvem a relação solo-água, como a infiltração, a retenção, a drenagem e o escoamento superficial.

A caracterização físico-hídrica de diferentes classes de solos deve contribuir para o aperfeiçoamento de modelos hidrológicos, que, de maneira geral (e até mesmo pela ausência de informações como umidade do solo), consideram apenas o volume de água que entra e sai da bacia hidrográfica. O modelo hidrológico é uma ferramenta extremamente útil que permite, através da equacionalização dos processos, representar, entender e simular o comportamento de uma bacia hidrográfica (TUCCI, 1998). O modelo como o de balanço hídrico, por exemplo, é capaz de simular ou representar os fluxos de água no interior e na superfície de uma bacia hidrográfica e, assim, auxiliar a planejar o atendimento das demandas hídricas atuais e futuras.

Outra vantagem desse tipo de caracterização é auxiliar na identificação de áreas preferenciais para a recarga do lençol freático e na elaboração de projetos de irrigação mais eficazes, através da determinação da capacidade de água disponível¹ (CAD). Segundo dados da Agência Nacional de Águas (ANA), o uso dos recursos hídricos para irrigação é o maior dentre todas as outras atividades e tende a crescer ainda mais no país nas próximas décadas. Da vazão consumida total, estimada para 2010 no Brasil, 72% destinou-se à irrigação (BRASIL, 2013). Precisar melhor, portanto, o volume de água disponível em diferentes ambientes do sistema hidrológico (no caso, o solo) pode trazer contribuições tanto para a eficiência da produtividade agrícola como, também, para a difusão de práticas conservacionistas dos recursos hídricos.

A caracterização físico-hídrica de diferentes solos que compõem uma mesma bacia é rara não por acaso, pois um dos principais obstáculos está

¹ A capacidade de água disponível (CAD) ou Disponibilidade Total de Água no solo (DTA) representa a quantidade de água presente no solo que realmente está disponível às plantas. Isso porque nem toda água que infiltra no solo encontra-se nessa condição, seja pelas perdas por drenagem e evaporação, seja pelas forças de retenção oferecidas pela matriz porosa do solo. Para determinação da CAD ou DTA, segundo Reichardt (1988), deve ser estabelecido, para cada solo, o teor de umidade entre na capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP). Ambos são dados presentes na curva de retenção ou curva característica de água no solo.

relacionado à operacionalidade e aos custos para sua execução. Os métodos de caracterização utilizados tanto em campo, quanto em laboratórios, são, em geral, demorados e representam altos custos operacionais (BOUMA, 1989; MUALEM, 1986). Em função disso, tem sido crescente o número de trabalhos que se utilizam de funções ou equações de pedotransferência. Tais funções, também chamadas de pedofunções, são capazes de inferir sobre valores de determinados parâmetros físico-hídricos de difícil obtenção, como a umidade em diferentes potenciais matriciais e condutividade hidráulica (K), a partir da obtenção de outros parâmetros de mais fácil aquisição, tais como textura, por exemplo.

Assim, este trabalho tem por objetivo central a caracterização físico-hídrica de solos da Bacia do Córrego Marinho, assim como a avaliação de funções de pedotransferência para futura espacialização do comportamento da água nos demais solos da bacia. Ainda que sejam necessários outros tipos de análises não abordadas neste trabalho, pretende-se comparar as propriedades hidráulicas dos solos caracterizados na bacia do Marinho, a fim de apontar quais deles são potencialmente favoráveis ou não à recarga do lençol freático e ao armazenamento de água no solo.

A escolha da bacia do Córrego Marinho busca fortalecer os instrumentos de gestão dos recursos hídricos em Sete Lagoas-MG e região. Nela foram identificados focos de degradação do solo e dos recursos hídricos e feições cársticas de elevada suscetibilidade ambiental, sem nenhum tipo de restrição ao uso (dolinas, cavernas e sumidouros). Outro fator que estimulou a escolha da área está relacionado ao contexto espacial da bacia do Marinho – área rural periurbana que vem registrando significativo aumento da demanda hídrica. Fatores que pressionam essa demanda estão relacionados à presença de áreas irrigadas e à presença predominante de atividades agropecuárias, em contraste com uma recente expansão urbana no entorno. Tais características apontam a necessidade de realizar um trabalho de maneira integrada, envolvendo a relação solo-água, que pode ser analisada através da caracterização físico-hídrica dos solos da bacia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOUMA, J. **Using soil survey data for quantitative land evaluation**. Advance in Soil Science, vol. 9, p. 177-213. 1989.

BRASIL, Agência Nacional de Águas (ANA). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil**. Brasília. 2013.

BRASIL. **Lei no.9.433**, de 8 de janeiro de 1997. **Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos**, Brasília, DF. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/l9433.htm>. Acesso em 16 de jun. 2018.

COSTA, A. M.; OLIVEIRA, A. R.; VIANA, J. H. M. V. **Manejo do solo**. Revista Manuelzão, Belo Horizonte, n. 75, 2015. Disponível em: <<http://goo.gl/xLU9Vu>>. Acesso em: 5 jan. 2016.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO) and intergovernmental Technical Panel on Soils (ITPS). **Status of de World's Soil Resources**. Rome, Italy. 2015.

MELLO, C. R.; SILVA, A. M. **Hidrologia: princípios e aplicações em sistemas agrícolas**. Lavras.ed. UFLA, 2013.

MUALEM, Y. Hydraulic conductivity of unsaturated soils: Predictions and formulas. In: KLUTE, A. (ed.). **Methods of soil analysis. Part 1**. Agronomy. Monography, ASA and SSSA, Madison, WI. P. 2nd ed, vol.9, p. 799-823. 1986.

POLIDORO, J. C.; MENDONÇA-SANTOS, M. de L.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; CARVALHO FILHO, A. de; MOTTA, P. E. F. da; CARVALHO JUNIOR, W. de; ARAUJO FILHO, J. C. de; CURCIO, G. R.; CORREIA, J. R.; MARTINS, E. de S.; SPERA, S. T.; OLIVEIRA, S. R. de M.; BOLFE, E. L.; MANZATTO, C. V.; TOSTO, S. G.; VENTURIERI, A.; SA, I. B.; OLIVEIRA, V. A. de; SHINZATO, E.; ANJOS, L. H. C. dos; VALLADARES, G. S.; RIBEIRO, J. L.; MEDEIROS, P. S. C. de; MOREIRA, F. M. de S.; SILVA, L. S. L.; SEQUINATTO, L.; AGLIO, M. L. D.; DART, R. de O. **Programa Nacional de Solos (PronaSolos)**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 2016.

REICHARDT, K. **Capacidade de campo**. Revista Brasileira de Ciência do Solo; vol. 12, p. 211-216. 1988.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre, Ed. Universidade UFRGS. 1998.

CAPÍTULO 1

Caracterização físico-hídrica dos solos da bacia do Córrego Marinheiro, Sete Lagoas – MG, através de métodos convencionais

1.1 INTRODUÇÃO

As partículas do solo e seus distintos arranjos constituem um tipo de espaço poroso de grande complexidade e relevância para o armazenamento e transporte da água nesse meio. A complexidade dessa arquitetura porosa se dá por diferentes fatores. Dentre eles temos o tipo de mineralogia, a granulometria das partículas, a presença de material orgânico, a atuação de processos pedogenéticos, a atividade promovida por organismos que habitam o solo e, ainda, o manejo promovido pelas atividades antrópicas.

A dinâmica de água, gases e nutrientes no solo é controlada basicamente pelo estado de energia da água, o qual é bastante influenciado por variações na arquitetura porosa. A caracterização físico-hídrica serve justamente para auxiliar na compreensão do espaço poroso e do estado de energia da água no solo. Para isso, se faz uso de diferentes métodos de análise diretos e indiretos.

A compreensão da dinâmica hídrica no solo é de suma importância, ainda, para estudos relacionados à evolução pedogenética, estudos de nutrição de plantas, projetos de irrigação, projetos de drenagem e estudos voltados para a compreensão do balanço entre infiltração e escoamento, fundamentais para o controle da erosão, por exemplo.

Os solos apresentam diferentes características e propriedades que são determinantes de seu comportamento. As principais propriedades físico-hídricas segundo Couto e Sans (2002) são a densidade (do solo e de partículas), a capacidade de campo (CC), o ponto de murcha permanente (PMP), a curva de retenção de água, a composição textural, a condutividade hidráulica (K), a taxa de infiltração básica e a porosidade do solo. Mello e Silva (2013), por sua vez, destacam propriedades como textura, estrutura, porosidade e umidade. Além desses parâmetros, outras propriedades físicas e químicas interferem na dinâmica hídrica, como a estabilidade dos agregados, o teor de matéria orgânica, a capacidade de troca catiônica (CTC), a mineralogia da fração argila, entre outros.

Dentre os principais parâmetros caracterizados e analisados nesta pesquisa estão a condutividade hidráulica saturada (K_0) e a capacidade de água disponível no solo (CAD), cujos métodos de análise diretos são, em geral, demorados e onerosos.

A condutividade hidráulica do solo é uma propriedade que expressa a facilidade com que a água nele se movimenta (LIBARDI; GONÇALVES, 2013). Ela varia de acordo com o grau de saturação do solo e, é representada pela constante de proporcionalidade K . Esta, por sua vez, varia conforme características do fluido percolante e características da matriz porosa do solo, tais como as propriedades mencionadas acima.

A CAD é uma propriedade que estima o teor de água disponível às plantas. Esse dimensionamento pode ser representado através da montagem da curva característica de água no solo – expressão gráfica que relaciona diferentes teores de umidade em diferentes tensões com que a água fica retida na matriz porosa. Para montagem da curva de retenção podem ser utilizados métodos distintos, como a mesa de tensão; o extrator de Richards; e o psicrômetro (WP4C).

No Brasil, tanto os bancos de dados de parâmetros físico-hídricos, quanto os laboratórios adequados para análises de caracterização físico-hídrica ainda estão restritos a poucos centros de pesquisa, concentrados em sua maioria nos programas de pós-graduação de ciências do solo e de algumas engenharias. As pesquisas que vêm trabalhando com caracterização físico-hídrica dos solos, no âmbito da Geografia, ainda são recentes (MIRANDA, 2008; PARAHYBA; 2013).

Diante da elevada e crescente demanda pelos recursos hídricos, aliada às pressões ambientais sobre a qualidade do solo e a disponibilidade da água nesse meio, os estudos de caracterização das propriedades hidráulicas podem contribuir positivamente para a conservação desses recursos, sobretudo quando realizados no recorte espacial da bacia hidrográfica, tendo em vista que tal unidade espacial é cada vez mais reconhecida pela representatividade das interações entre as águas e os meios físico, biótico, social, econômico e cultural (YASSUDA, 1993).

Considerando esse cenário é que se buscou nesta pesquisa realizar a caracterização físico-hídrica de diferentes solos da Bacia do Córrego Marinheiro. A bacia está localizada na área periurbana do município de Sete Lagoas, Minas Gerais, e é marcada por usos diversos comuns na região, tais como culturas irrigadas, pecuária, mineração, além da própria expansão urbano-industriais.

Espera-se que a caracterização de propriedades hidráulicas, como a permeabilidade e a retenção de água de cada solo da bacia analisado, possa fornecer suporte técnico para sua gestão, orientando os usos e manejos mais adequados quanto à conservação do solo e da água.

Na bacia do Córrego Marinheiro já existem desafios ambientais suficientes, marcados por casos de escassez hídrica, presença de solos degradados, focos de incêndio em áreas protegidas, além dos desafios impostos pelo crescimento urbano regional.

1.2 REFERENCIAL TEÓRICO

1.2.1. Solo

O solo, segundo o *Soil Survey Manual* (1951), pode ser entendido de maneira mais simplificada como o conjunto de corpos naturais que compõem partes da superfície terrestre, cujas propriedades são resultantes da interação entre organismos vivos e clima sobre rochas e minerais, condicionados pelo relevo durante determinado tempo. Ele se configura como o mais importante meio para o desenvolvimento das plantas.

Na pedologia, a concepção mais abrangente de solo é aquela que nasce na escola russa – o solo como corpo natural organizado. Esse conceito marca os estudos de Ciência do Solo no mundo e se baseia nos fatores de formação do solo, classicamente estudados até os dias de hoje (KÄMPF; CURI, 2012)

O solo, na perspectiva da física de solo, é entendido como um corpo heterogêneo tridimensional formado por frações sólidas, líquidas e gasosas. Tais frações se constituem tanto de material mineral quanto de material orgânico. As rochas constituem o principal material de origem dos solos. Estas, ao entrarem em contato com a atmosfera ao longo do tempo geológico, são transformadas através de processos físicos, químicos e biológicos de desintegração, decomposição e recombinação, em material poroso de características peculiares (REICHARDT; TIMM, 2004).

O entendimento das características desse meio poroso é fundamental para compreendermos a função que o solo desempenha na paisagem, seja no armazenamento de água e nutrientes disponíveis às plantas, seja na condução da água aos aquíferos e aos canais fluviais. Para tal entendimento é que se presta a

caracterização físico-hídrica dos diferentes solos que compõem a paisagem.

1.2.2. Comportamento da água no solo

Este tópico apresenta um conjunto de fenômenos físicos de grande relevância no controle da dinâmica da água no solo, a fim de proporcionar um melhor entendimento dos métodos de análise adotados e do papel de alguns parâmetros físicos.

Forças que interferem no comportamento da água no solo

A energia potencial total da água no solo representa o conjunto de forças que atuam na água do solo, seja no favorecimento ou não da sua movimentação. O potencial da água no solo é, portanto, composto pelos seguintes potenciais: matricial, gravitacional, hidráulico, osmótico, térmico e de pressão.

Dentre todos os seus componentes, sob condição de solo parcialmente saturado, o potencial matricial se torna expressivo e é representado pelas forças de atração da água promovidas pelo arranjo poroso do solo, representado tanto pelas paredes das partículas sólidas, quanto pela configuração dessas paredes em um sistema de tubos - tubos capilares (LIBARDI, 2010). Se a água está retida ao solo, tem menor energia livre, portanto assume valores negativos. O mesmo se considera para o potencial osmótico, que expressa o efeito da concentração salina presente na água no solo.

O potencial matricial, em condições de saturação, não se expressa. No entanto, à medida que os poros vão se esvaziando, a tensão aumenta. Isso ocorre em função do contato do ar com a água em um sistema de poros, fazendo com que forças associadas aos fenômenos de adsorção e de capilaridade, se manifestem. Esse contato entre ar e água é marcado pela formação de meniscos, curvaturas côncavas que são formadas tendo em vista a tensão superficial da água em contato com o ar e as superfícies sólidas.

Fenômenos de adsorção e de capilaridade estão intimamente relacionados e ocorrem simultaneamente, porém, possuem comportamentos distintos conforme o grau de saturação do solo e o tipo de arquitetura porosa.

O efeito de capilaridade ocorre em minúsculos canais formados pela conectividade dos poros, combinando forças de adsorção²: adesão³ e coesão⁴ (Figura

²A adsorção é produto da interação líquido-sólido que se dá entre a superfície da fração coloidal

1). Este efeito, em adição ao efeito da tensão superficial, compõe o efeito da capilaridade.

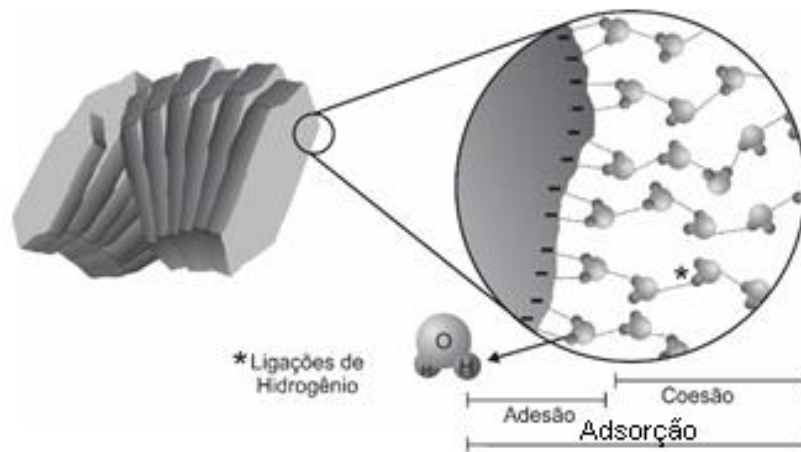


Figura 1. Forças de adsorção (adesão e coesão). Autor: Henrique Machado.

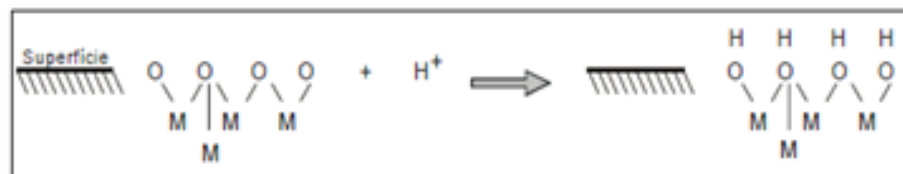


Figura 2. Hidroxilação de superfícies de minerais que apresentam cargas dependentes de pH. M é o metal estrutural do mineral podendo ser Si, Fe, Al, Mn, etc. Fonte: Fontes et al. (2001).

Quando a umidade do solo é muito pequena, de tal maneira que há basicamente água adsorvida, isto é, finíssimas camadas que envolvem o material coloidal, forças de adsorção predominam sobre forças de capilaridade (REICHARDT, 1985). Normalmente, as faixas de potenciais para essas umidades são muito elevadas, resultando, portanto, em alta tensão matricial e alta retenção.

Por outro lado, se o teor de água aumenta nos poros (sem, contudo, saturá-los), efeitos de capilaridade passam a predominar em detrimento da adsorção. Essa água, retida sob menor tensão, também é conhecida como água capilar. Ela é de

(argilas e húmus de carga negativa) e os átomos de hidrogênio presentes nas moléculas de água (Figura 3).

³ Adesão = contato entre o solo e moléculas de água.

⁴ A força de coesão é produto da interação entre as moléculas de água (H_2O-H_2O), também conhecida como ponte de hidrogênio.

grande importância na redistribuição da umidade no perfil, após o esvaziamento dos poros grandes, pois se dá em várias direções e sentidos. Para a hidratação e a nutrição das plantas, assim como para o fenômeno de evapotranspiração, por exemplo, ela cumpre papel fundamental.

A caracterização da porosidade é uma das maneiras existentes para o dimensionamento da capacidade de retenção de água pela matriz porosa.

1.2.3. Geometria do espaço poroso e parâmetros físicos

A dinâmica da água no solo caracteriza-se como fenômeno de grande complexidade, podendo ocorrer em diferentes direções, sentidos e velocidades, a depender de distintos fatores internos e externos ao próprio solo.

Diferentes condições climáticas, tipo de cobertura vegetal, formas de relevo, diferentes tipos de uso e manejo do solo, nível de saturação, natureza e estrutura da rocha matriz são alguns exemplos de como diversos fatores são capazes de interferir na dinâmica hídrica de uma bacia hidrográfica, seja em superfície, seja em subsuperfície, como no caso dos solos.

Considerando-se apenas o solo, há uma gama de fatores responsáveis pelo entendimento da dinâmica da água. Essa dinâmica é controlada por diferentes propriedades ou parâmetros físicos e químicos. Dentre os parâmetros físicos mais importantes temos: a textura; a estrutura, a matéria orgânica, a densidade, a porosidade, a umidade, etc.

- Textura

Dentre os atributos físicos, a textura é definida como a proporção relativa das diferentes frações granulométricas (areia, silte e argila) constituintes do solo e apresenta destaque nos estudos de caracterização físico-hídrica feitos até então, especialmente em trabalhos estrangeiros.

A retenção de água, sob elevadas tensões, é produto predominante do fenômeno de adsorção, cuja manifestação é bastante influenciada pela relação textura e superfície específica. Isto é, quanto mais fina ou mais argilosa for a textura, maior tende a ser a superfície de contato disponível para a adesão ou o contato solo-água (Figura 3).

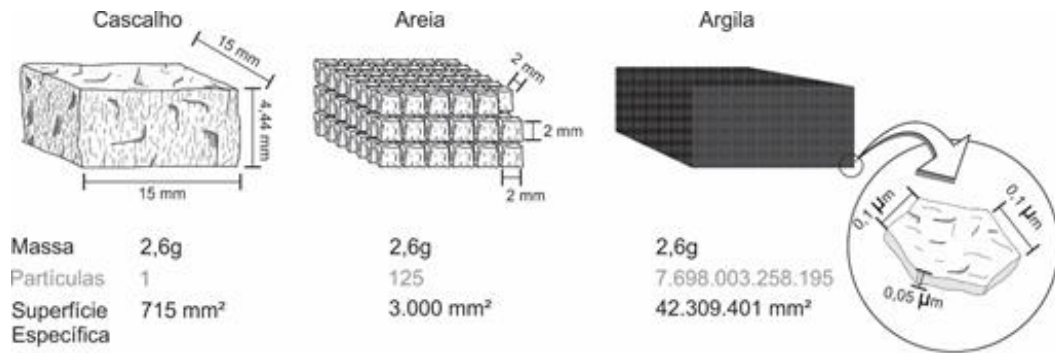


Figura 3. Demonstração da relação granulometria e superfície específica. Autor: Henrique Machado.

Desse modo, há uma generalização comum na literatura estrangeira, especialmente no que diz respeito aos estudos de caracterização físico-hídrica em solos de clima temperado (em geral, menos argilosos) de que, quanto mais fina é a textura, maior tende a ser a retenção de água no solo. Assim como o contrário, onde quanto mais grosseira é a textura (mais arenosa), maior tende a ser a condutividade hidráulica. Contudo, essa generalização não é regra quando estudamos a matriz porosa de solos evoluídos como os de climas tropicais.

Centurion e Andrioli (2000), avaliando o comportamento da água disponível em Latossolos e Nitossolos de Jaboticabal-SP, identificaram maior interferência das partículas mais finas do solo (silte e argila), tanto para tensões correspondentes à capacidade de campo (CC), quanto para aquelas correspondentes ao ponto de murcha permanente (PMP). Scheinost, Sinowski e Auerswald (1997), por sua vez, ao avaliarem o comportamento da água em solos evoluídos a partir de distintos materiais de origem no norte de Munique, Alemanha, apontaram para a necessidade de caracterizar outros parâmetros físicos além da textura, nas análises do comportamento da água no solo. Eles apontam parâmetros como a densidade aparente, o teor de carbono orgânico e, ainda, os padrões de arranjos de distribuição.

- Estrutura

A estrutura do solo, do ponto de vista físico, está relacionada ao modo como suas partículas se encontram arranjadas, formando um sistema de poros (FERREIRA et al., 2014). A resistência ou estabilidade dessa estrutura também é bastante estudada como um indicador da qualidade física do solo e está diretamente

atrelada a outros parâmetros físicos, como a estabilidade de agregados e o conteúdo de matéria orgânica. Trata-se de um atributo dinâmico ao longo do tempo e de grande variabilidade ao longo do perfil. Isso porque a estrutura pode ainda ser alterada em função de fatores, como o desenvolvimento radicular das plantas e o tipo de manejo utilizado.

Diferentes arranjos estruturais das partículas do solo são possíveis, possibilitando, assim, a configuração de variados sistemas de poros. Fala-se em sistema de poros, pois os poros podem apresentar diferentes tamanhos, assim como diferentes graus de conectividade entre si.

Hillel (1980) salienta que a estrutura é uma propriedade de maior importância que a textura na determinação da retenção de água a baixas tensões, porque o maior teor de água e a consequente baixa influência da adsorção, frente às forças capilares, fazem com que a água esteja mais livre na matriz porosa.

Em campo, do ponto de vista da Pedologia, a estrutura do solo é caracterizada qualitativamente durante a descrição morfológica, através da avaliação do tamanho, da forma e do grau de desenvolvimento de seus agregados. Em laboratório, sua análise é indireta, por exemplo, através da inferência da porosidade em amostras indeformadas.

Os agregados do solo são aglutinações formadas tanto por materiais minerais quanto por substâncias orgânicas, tais como hifas de fungos, raízes, restos de decomposição, etc. (Figura 4).

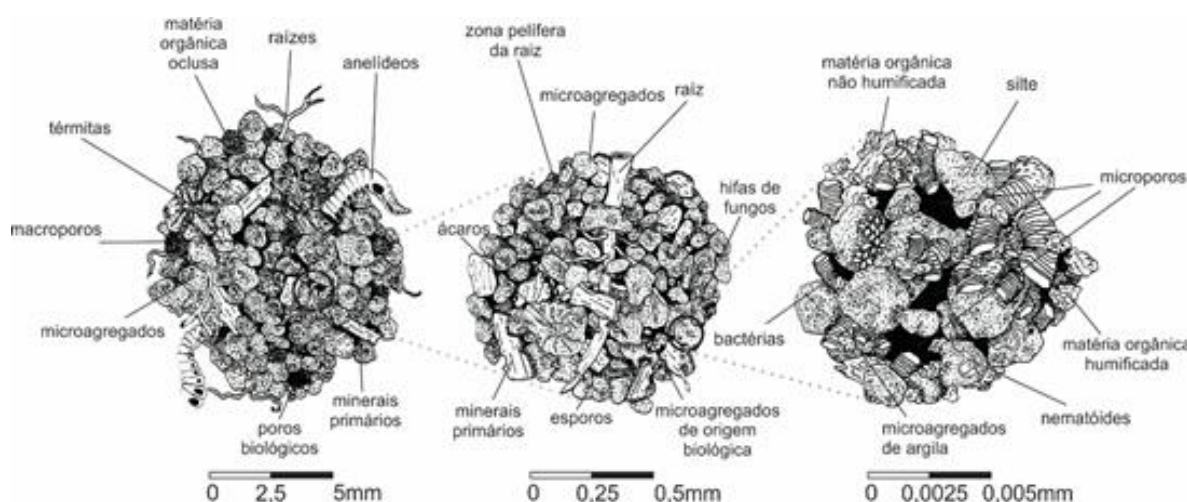


Figura 4. Dimensão dos agregados e partículas finas do solo. Autor: Henrique Machado.

A determinação do tamanho dos agregados no solo, assim como o seu grau de estabilidade, são parâmetros físicos de grande relevância para a compreensão da configuração do arranjo poroso do solo (BRADY, 2013).

A medição direta da estrutura dos solos ainda é um desafio metodológico para os trabalhos de caracterização físico-hídrica, tendo em vista o restrito acesso e disponibilidade de métodos práticos capazes de medir sua configuração em campo e que considerem a elevada variabilidade de sua distribuição no perfil. Existem, segundo Reinert e Reichert (2006), algumas tecnologias modernas que trabalham com ressonância magnética e tomografia. No entanto, o acesso a esses tipos de equipamento é restrito a poucos centros de pesquisas no mundo. Para efeitos práticos, esses equipamentos ainda se mostram pouco versáteis na análise de diferentes pontos no campo.

Por esse motivo, a caracterização da estrutura normalmente é obtida de maneira indireta, através da análise conjunta de outros atributos físico-hídricos e dependem dos materiais e métodos disponíveis. Como exemplos disso, temos a caracterização do tamanho e da proporção dos poros (porosidade), da densidade e da estabilidade dos agregados, entre outros (ANDRADE et al., 2007).

A estruturação de um solo em agregados, além de um importante indicador pedogenético, depende intimamente da relação textura e presença de matéria orgânica.

- Matéria orgânica e agregação do solo

Segundo Brady et al. (2013), a formação e a estabilidade dos agregados são condicionadas por diferentes processos físico-químicos e biológicos, tais como: a variação da umidade; a contração e a expansão das argilas; a penetração e a expansão de raízes; o congelamento e o derretimento da água; a perturbação da fauna do solo; e, ainda, a própria atividade antrópica, como, por exemplo, o manejo agrícola.

O conteúdo de matéria orgânica está entre os principais constituintes do solo responsável pela formação e estabilização dos agregados. De maneira geral, a agregação das partículas do solo é de grande relevância para processos associados à dinâmica da água, como infiltração e retenção. O aumento no tamanho médio dos agregados reduz a área superficial total das partículas sólidas, reduzindo,

consequentemente, os efeitos da adsorção da água, de gases e de eventuais nutrientes.

Presume-se, em muitos casos, que um maior teor de MO no solo resulta numa maior condutividade hidráulica saturada (K_0). A razão por trás dessa interpretação, segundo Beare et al. (1994), é que uma melhor agregação do solo está ligada a maiores conteúdos de MO. Nesse mesmo sentido, Adams (1973) e Rawls et al. (2003) encontraram correlação inversa entre o conteúdo de MO e a densidade do solo, indicando, ao contrário, então, que a porosidade e a condutividade teriam uma correlação direta entre si.

Ainda assim, o teor de matéria orgânica pode contribuir para o aumento de cargas negativas, uma vez que o húmus, por exemplo, compõe a fração coloidal do solo. Isso pode contribuir para o aumento das forças de adsorção, fortemente relacionado ao balanço de cargas elétricas na superfície dos colóides. Nemes et al. (2005) observaram uma correlação inversa entre K_0 e a MO. A hipótese para esse comportamento estaria associada ao fato da MO, ao contribuir para uma maior adesão, poder saturar os poros do solo, impedindo o fluxo livre da água. Eles destacam ainda que diferentes tipos de matéria orgânica podem apresentar efeitos distintos para as propriedades hidráulicas do solo.

A instabilidade da agregação condiciona vulnerabilidade ao solo, à medida que potencializa a quebra dos agregados em partículas menores, capazes de preencher e, portanto, reduzir espaço poroso do solo. Esse efeito, por sua vez, favorece o escoamento superficial da água em detrimento da infiltração, aumentando o potencial erosivo do solo em áreas com maior declividade.

A avaliação da condição dos agregados ainda pode ajudar a definir áreas com maior ou menor restrição a determinados tipos de manejo agrícola e caracterizar o potencial de erodibilidade dos solos (GUERRA, 1990).

A hidrofobicidade (rejeição do solo à água) é outro fenômeno capaz de interferir na infiltração da água no solo. Ela está relacionada geralmente ao recobrimento das partículas do solo por material orgânico hidrofóbico. Contudo, a hidrofobicidade dos solos está mais relacionada à natureza da matéria orgânica do que a seu teor propriamente dito (PÉREZ et al., 1998). Diferentes elementos vegetais são responsáveis por esse efeito, tais como a presença de ácidos húmicos, frações alifáticas e demais resíduos vegetais (CHENU et al., 2000).

Como relatado por Vogelmann (2014), a presença de compostos

hidrofóbicos reduz a sortividade do solo, afetando diretamente o processo de infiltração, assim como, o balanço hídrico e a dinâmica da água no solo. Outro efeito desses compostos seria o aumento da estabilidade dos agregados (PÉREZ et al., 1998). Nesse sentido, Bastos et al. (2005) concluíram que compostos orgânicos com caráter hidrofóbico acentuado contribuem positivamente para a melhoria da estabilidade dos agregados em água, principalmente na dose de $5,5 \text{ g.kg}^{-1}$.

- Mineralogia

Nas frações areia e silte, geralmente predominam minerais primários pouco alterados como o quartzo, por exemplo. Em solos evoluídos a partir de rochas calcárias, nessas mesmas frações, podem aparecer minerais como a calcita e a dolomita (KÄMPF; CURI, 2012).

Nos solos mais evoluídos pelos processos pedogenéticos, como é o caso dos solos tropicais, a fração argila, além de constituir a maior parte da textura, é composta por argilominerais e óxidos de diferentes naturezas (diferentes estruturas cristalinas, carga elétrica, área superficial e contração-expansão), o que é capaz de interferir no comportamento hidráulico. Essa influência está diretamente relacionada com a reatividade da superfície dos diferentes tipos de argilominerais (KÄMPF; CURI, 2012).

Não é baixa a frequência com a qual vem sendo enfatizada a importância de minerais do grupo dos óxidos, sobretudo de Fe e de Al, nas propriedades físicas do solo. A classe dos Latossolos, de grande expressão no Brasil, comumente apresenta grandes quantidades de óxidos de Fe e Al na fração argila. Em média, cerca de 73% da fração argila é composta por caulinita, 14,5% por goethita e hematita e 12,5% por gibbsita (DICK, 1986). Como tais argilominerais possuem estruturas distintas, a tendência é que o comportamento de propriedades hidráulicas seja também diferenciado para cada caso.

Distintos estudos vêm avaliando o comportamento de determinados argilominerais na agregação do solo. Muggler (1998) aponta que a mineralogia dos compostos de Fe pode determinar seu efeito na agregação. Nesse mesmo sentido, Silva et al. (1998) destacaram que o predomínio de gibbsita na fração argila também é capaz de favorecer a agregação. Este fato, segundo Resende et al. (1999), favorece a manutenção da estrutura microgranular presente nesses solos, contribuindo para uma maior condutividade hidráulica.

Estudos realizados em horizontes B latossólicos representativos do sudeste do Brasil, Ferreira et al. (1999) concluíram que, além da correlação direta encontrada entre a condutividade hidráulica e a fração argila, óxidos de alumínio afetaram mais as propriedades físicas do que óxidos de Fe, especialmente a caulinita e a gibbsita. Os Latossolos cauliniticos foram aqueles que apresentaram maior densidade, menor macroporosidade e menor permeabilidade.

A figura e as fórmulas apresentadas, a seguir, demonstram algumas relações entre massa-volume importantes para compreender os métodos utilizados para a caracterização físico-hídrica e o papel dos parâmetros físicos no comportamento da água do solo (Figura 5).

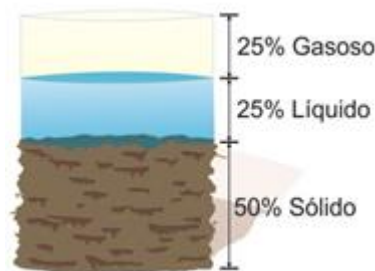


Figura 5. Distribuição ideal das partes líquida, gasosa e sólida de um solo. Autor: Henrique Machado.

$$M_t = M_s + M_l + M_g, \text{ onde:}$$

M_t = massa total;

M_s = massa de sólidos;

M_l = massa de líquidos;

M_g = massa de gases.

$$V_t = V_s + V_l + V_g, \text{ onde:}$$

V_t = volume total;

V_s = volume de sólidos;

V_l = volume de líquidos;

V_g = volume de gases.

1.2.4. Densidade do solo (D_s)

A densidade do solo é definida pela massa de sólidos sobre o volume total de uma amostra, como expresso na equação a seguir:

$$D_s = \frac{M_s}{V_t}$$

A densidade do solo é um parâmetro físico importante, pois está diretamente relacionado à porosidade e, ainda, ao grau de compactação do solo. Por isso é um importante indicador de qualidade do solo, além de ser um condicionante do comportamento da água neste meio.

1.2.5. Densidade de partículas (D_p)

A densidade de partículas, por sua vez, se dá pela razão entre a massa de sólidos e o volume de sólidos, como pode ser expresso a seguir:

$$D_p = \frac{M_s}{V_s}$$

Como se pode ver, ela não considera o volume do espaço poroso e, portanto, não é afetada pelo manejo do solo. A densidade de partículas está associada à mineralogia da fração sólida, de modo que, quanto maior a densidade dos minerais que constituem a massa de sólidos, maior a densidade de partículas.

De acordo com os minerais mais comuns presentes no solo (minerais silicatados), a densidade de partículas geralmente varia entre 2,65 e 2,75 g.cm⁻³. Entretanto, ela tende a ter um valor inferior a essa faixa, quanto maior for a presença de material orgânico na fração sólida.

1.2.6. Porosidade total (P_t ou α_s)

A porosidade total do solo é representada pelo volume não ocupado por sólidos, sendo o somatório de macroporos e microporos. A porosidade total pode ser representada pela seguinte equação:

$$P_t = \frac{V_p}{V_t} \text{ ou } \alpha_s = \frac{V_{ar} - V_a}{V_t}, \text{ onde:}$$

P_t ou α_s = porosidade total;

V_t = volume total (m^3);

V_a = volume de água (m^3);

V_{ar} = volume de ar (m^3);

V_p = volume de poros (m^3).

1.2.7. Microporosidade ($\emptyset$)

A microporosidade é definida pelo conteúdo de água em equilíbrio, sob uma tensão de 60 cm de coluna d'água (CLAESSEN, 1997), sendo que 60 cm de coluna d'água é o equivalente a -6kPa. O limite superior dos microporos escolhido neste trabalho foi o de 50 μm ou 0,05 mm. A microporosidade reflete o conteúdo de água retida como água capilar (de redistribuição). A microporosidade pode ser expressa da seguinte maneira:

$$\text{Microporosidade} = (M_{-6kPa} - M_s) \div V_t, \text{ onde:}$$

M_{-6kPa} = massa de água retida sob a tensão de -6kPa;

M_s = massa da amostra seca;

V_t = volume total da amostra.

1.2.8 Macroporosidade

A macroporosidade se dá pela porosidade total, deduzida da microporosidade. Isto é, representa o total do volume de água que não ficou retido sob a tensão de -6kPa, a partir de uma amostra saturada (onde o volume de poros é igual ao volume de líquido). A macroporosidade reflete o volume de água gravitacional, isto é, volume de água livre ou de baixa retenção. Sendo assim:

$$\text{Macroporosidade} = \text{Porosidade} - \text{Microporosidade}$$

1.2.9. Água Gravitacional (AG)

A água gravitacional ou conteúdo de água livre diz respeito ao volume de

água retido sob baixas tensões pela matriz porosa. Isto é, entre zero (em situação de saturação) e as tensões clássicas associadas à capacidade de campo (-6 kPa, -10 kPa e -33 kPa). Pode-se dizer que o conteúdo de água livre está relacionado à macroporosidade.

1.2.10. Curva de retenção de água no solo

A relação “porosidade e retenção de água no solo” pode ser expressa através da curva de retenção de água no solo (CRA), ou curva característica de água no solo. Essa curva nada mais é que uma expressão gráfica que relaciona umidade e potencial matricial (Figura 6).

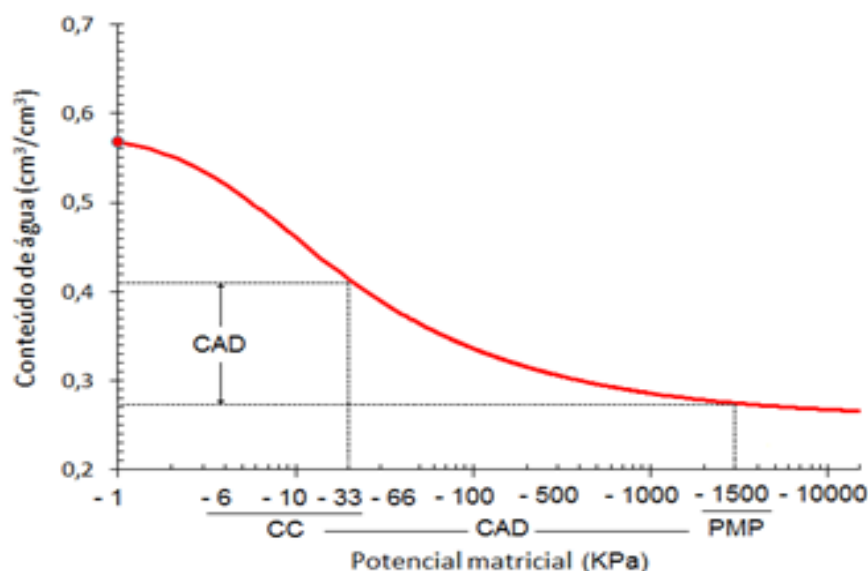


Figura 6. Modelo conceitual de uma curva de retenção de água no solo. Fonte: gráfico elaborado pelo autor.

Dois teores de água são de uso recorrente na literatura, a saber: a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP). A CC é o limite superior de disponibilidade de água. O seu valor representa o conteúdo máximo de água no solo para o qual a perda de água por drenagem é pequena (VAN LIER, 2010). Para solos tropicais, alguns trabalhos apontam valores de tensão relativos à CC que variam entre -6 kPa e -10 kPa (ANDRADE; STONE, 2011). Na literatura estrangeira, geralmente baseada em caracterizações físico-hídricas de solos sob o clima temperado, o valor mais recorrente de potencial matricial associado à CC é o de -33 kPa. Níveis de tensão mais baixos estão, geralmente, associados à predominância de forças de capilaridade que ocorrem nos macroporos, ou também,

ao conteúdo de água livre no solo.

O PMP representa o teor de água disponível às plantas que está retido sob a maior tensão matricial, normalmente, trabalha-se com o potencial de -1500 kPa. Esse nível de tensão mais elevado está associado à predominância de forças de adsorção, por sua vez, mais associadas à água presente nos microporos (Figura 7).

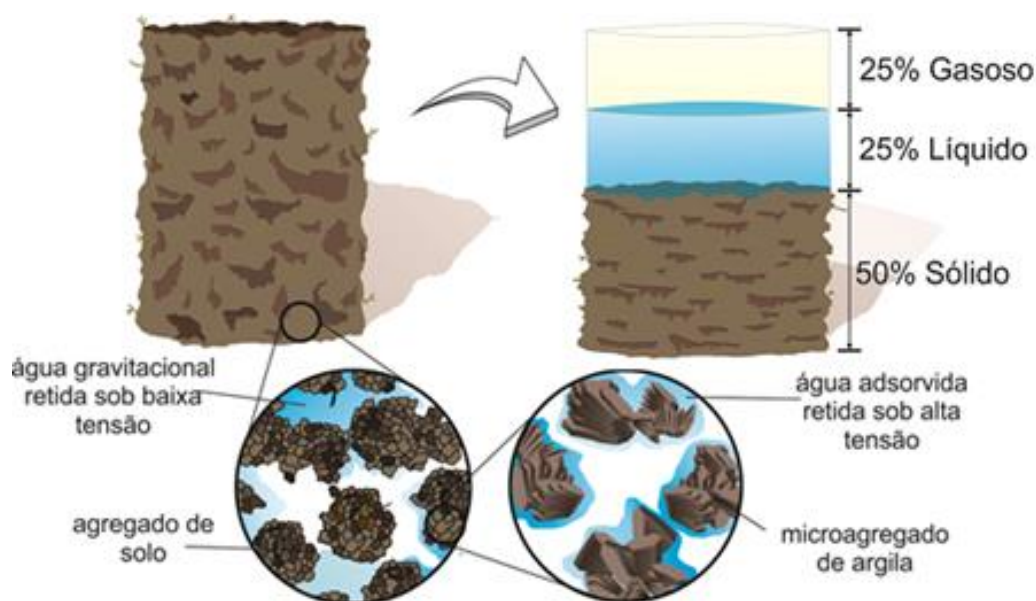


Figura 7. Relação entre tamanho dos poros e força de retenção. Autor: Henrique Machado.

O PMP representa uma umidade mínima presente no solo com a qual a planta consegue sobreviver. Umidades abaixo desse valor estão retidas a uma força de retenção que a planta já não consegue mais superar e esta entra, então, em um estado de murcha permanente.

A diferença entre esses dois teores, por fim, representa o volume de água no solo disponível às plantas (AD) ou a capacidade de água disponível (CAD) e, ainda a disponibilidade total de água no solo (DTA). A CAD é um atributo físico-hídrico importante para o crescimento radicular, para as reações químicas, movimento e absorção de nutrientes e, consequentemente, para a produção das culturas (BLEUTER et al., 2002). Vale dizer, ainda, que esses valores de umidade (CC e PMP) são valores de referência que alimentam grandes debates no âmbito da física do solo, haja visto, segundo Klein (2008), a grande dificuldade para estabelecer critérios para a sua definição. Distintos valores estimados para a CAD em outros trabalhos podem ser vistos na Tabela 1.

Tabela 1. Valores de referência encontrados na literatura para a CAD, para diferentes classes, em $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$.

Referências bibliográficas	Classe de solo	CAD ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)
PORTUGAL et al. (2007)	PVA distrófico latossólico	0,154 a 0,207
SOUZA (2004)	PA	0,080 a 0,084
ESPERA et al. (1999)	PV, PVA	0,461 a 0,545
PORTUGAL et al. (2008)	CX Tb Distrófico típico	0,120 a 0,190
GODOY e LOPES-ASSAD (2002)	CX Tb Distrófico (állico, plíntico, lítico, ácrico)	0,2
SOUZA (2004)	CXdt	0,072 a 0,128
BLEUTER et al. (2002)	LVd, Lvef	0,079
GODOY e LOPES-ASSAD (2002)	LV	0,55 a 0,76
MAIA (2016)	LV, LVA, LA	0,107
CAVALIERI et al. (2011)	LV	0,11 a 0,12
OLIVEIRA (2007)	TC	0,104 a 0,112
LIMA (2016)	NV	0,8 a 1,3
GODOY e LOPES-ASSAD (2002)	NV	0,35
MORALES (2014)	NV	0,13 a 0,20

A relação entre o tamanho dos poros (macro ou microporos) e o movimento da água também apresenta uma dimensão físico-hídrica de fundamental importância. Os poros podem ser classificados, empiricamente, em função do raio, como fizeram Koorevaaret al. (1983) ou do diâmetro (KIEHL, 1979; RICHARDS, 1965). Neste trabalho adotou-se como referência para a classificação de macroporos e microporos, o diâmetro de $50\ \mu\text{m}$ ou $0,05\ \text{mm}$, como feito por Richards (1965) e ilustrado na Figura 8.

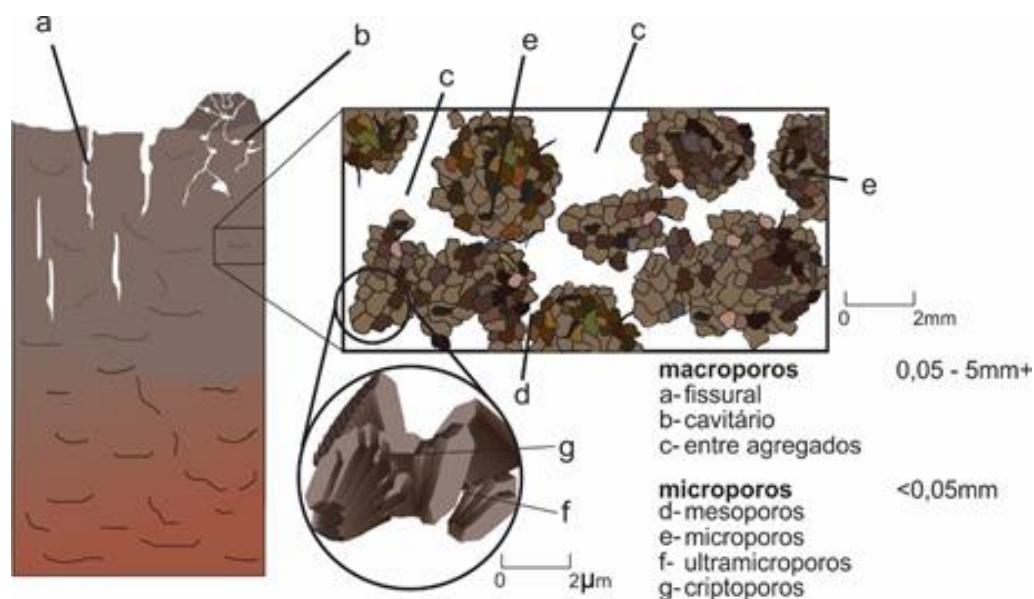


Figura 8. Variedade de poros encontrados na literatura e divisão proposta neste trabalho. Autor: Henrique Machado.

A microporosidade de maneira geral tende a ser predominante em solos de textura argilosa em relação àqueles de textura mais arenosa, embora a textura por si só (como já foi dito) não seja o único parâmetro responsável por configurar a geometria porosa do solo. Seguindo a mesma lógica, a formação de macroporos está associada a uma granulometria mais grosseira, isto é, com maior teor de areia.

Contudo, quando tratamos de solos tropicais, essa mesma lógica não pode ser aplicada indiscriminadamente, uma vez que o nível de estruturação de solos mais desenvolvidos pedogeneticamente é maior e, portanto, mais complexa. Um caso exemplar dessa situação é o Latossolo de estrutura granular. Isso porque os grânulos são pequenos agregados que se comportam como material mais grosseiro, normalmente, associados a uma configuração geométrica de macroporos e, portanto, a um movimento mais livre da água – água gravitacional.

Para avaliação da porosidade, são utilizados métodos capazes de medir a massa de água retida sob diferentes tensões. A porosidade total pode ser estabelecida através do método do anel volumétrico (BLAKE; HARTGE, 1986), bastante utilizado para calcular a densidade do solo. No entanto, para avaliar a proporção de macroporos e microporos o método mais utilizado é o da mesa de tensão, que também depende da coleta de amostras indeformadas através de anéis volumétricos.

A coleta dessas amostras deve ser cuidadosa, pois qualquer perturbação ou fissura no interior da amostra altera sua estrutura porosa e implica em erros de análise. Por isso, após a coleta é necessário um cuidado especial com o armazenamento e o transporte das amostras.

1.2. 11. Ensaio de retenção de água em baixas tensões

A mesa de tensão é composta por uma bomba de vácuo, cuja tensão (sucção) é aplicada sob duas membranas porosas de condutividade hidráulica conhecida (Figura 9).



Figura 9. Mesa de tensão e membrana porosa de proteção. Fonte: Autor (Laboratório de Solos e Meio Ambiente do IGC-UFMG).

Uma dessas membranas é fixa e a outra é móvel, servindo de proteção para a membrana fixa. Na preparação da mesa, primeiramente, a membrana fixa é umedecida gradativamente com água deionizada através de um borrifador. Isso evita que haja formação de bolhas ou dobras na membrana, capazes de atrapalhar o contato hidráulico, formar bolhas entre a amostra e a membrana e, conseqüentemente, produzir erros na análise.

Pelo mesmo motivo, a membrana móvel (de proteção) também deve estar saturada de água ao ser colocada sobre a membrana fixa e ter o mesmo cuidado para que não haja formação de bolhas entre as duas membranas. Em alguns casos, a formação de vergões é inevitável. Por isso, a colocação das amostras na mesa, sobre as membranas, deve ser feita de modo que a base das amostras (parte com pano molhado) não entre em contato com os vergões.

O princípio de funcionamento da mesa de tensão se dá pela aplicação de diferentes níveis de sucção programados sob a base das amostras indeformadas de solo, a fim de medir o volume de água que permanece sob cada tensão. O excedente (volume de água que não permanece na amostra) é armazenado em uma garrafa transparente, localizada em um nível abaixo da membrana porosa.

Como apresentado anteriormente, pretende-se com esta análise, avaliar o potencial matricial em função da umidade. Vale dizer que a umidade, neste caso, é medida pela variação gravimétrica, por isso faz-se necessário o uso de uma balança de precisão.

1.2.12. Ensaio de retenção de água em baixos potenciais

Extrator de Richards

Como explicado anteriormente, em função da baixa umidade, a faixa de potencial matricial medida por esse método independe da arquitetura porosa das amostras e, por isso, pode ser realizado a partir de amostras deformadas.

O princípio de funcionamento desse equipamento é diferente daquele visto na mesa de tensão. Nele, a placa porosa fica em uma câmara onde, na parte inferior o ambiente é mantido sob pressão atmosférica através de um dreno. Na parte superior, onde se encontram as amostras, a pressão é controlada por uma válvula e um compressor (Figura 10). Trata-se do equipamento mais utilizado para montagem da CRA.

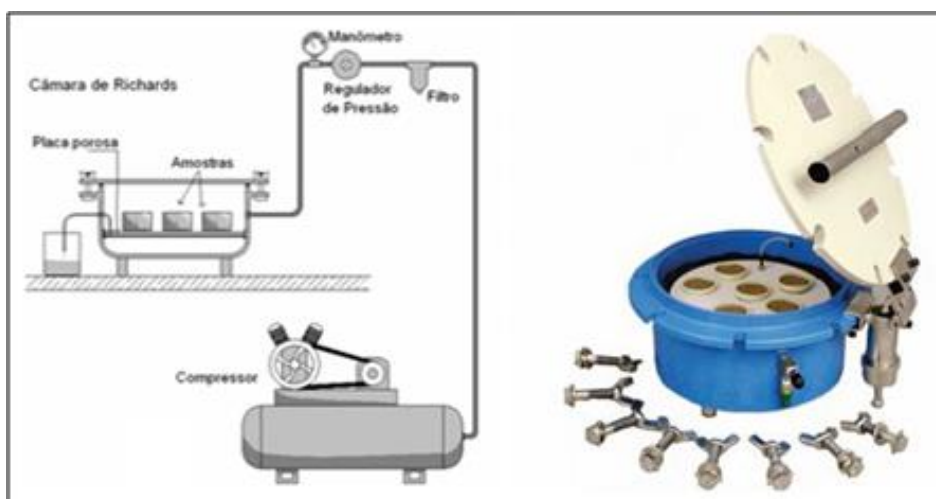


Figura 10. Câmara de pressão de Richards. Fonte: Grigolon (2013).

Para produzir potenciais mais elevados, esse equipamento depende de um sistema pneumático mais robusto. Isso, normalmente, implica em maiores custos de instalação e manutenção para os laboratórios e é um dos motivos pelo qual o método da psicrometria através do WP4 vem sendo cada vez mais testado e aperfeiçoado.

O extrator possibilita a aplicação de tensões que variam de -10 kPa a -2.000 kPa (ANDRADE et al., 2008). Apesar de ser muito utilizado para montagem da curva, sua análise é considerada demorada, além de, às vezes, apresentar problemas de contato hidráulico entre a placa porosa e a amostra.

Psicrometria com WP4

Este método tem sido cada vez mais usado para compor a montagem da curva de retenção de água no solo, substituindo, em alguns casos, a medição do potencial através de funis de placa porosa e câmara de Richards, mediante ajustes matemáticos. Apesar do WP4 apresentar imprecisão em faixas de potenciais mais úmidas, como apresentaram Thakur et al. (2005) nas faixas de potencial inferiores a -1MPa, ele tem dado uma resposta satisfatória (KLEIN, 2010). Vale, contudo, ressaltar que o fabricante sugere uma faixa de confiabilidade das medições que varia entre os potenciais de -0,1MPa e -300MPa (DECAGON, 2015).

O WP4C é a versão mais atual do psicrômetro fabricado pela *Decagon Devices Inc.* Diferentemente dos demais métodos de análise de potencial em altas tensões, ele mede o potencial da água no solo no momento em que há formação de orvalho em um ambiente controlado. Entretanto, seu potencial é representado pelo somatório dos potenciais mátrico e osmótico, fato esse que seria responsável pela imprecisão dos potenciais na faixa mais úmida (CRESSWELL et al., 2008).

Ao iniciar a leitura no WP4C, a cápsula contendo a amostra (com parte superior aberta) é acoplada a uma câmara de metal onde permanece em um ambiente hermeticamente fechado.

Neste ambiente há um sensível controle da temperatura interna. Nele estão contidos um espelho, um pequeno ventilador, um sensor ótico e um sensor de temperatura (Figura 11). A medição do potencial se dá quando há equilíbrio entre a pressão de vapor do ar na câmara de metal e a pressão de vapor de saturação da amostra. O cálculo do potencial se baseia na equação de Kelvin. Esse princípio é o responsável pela rapidez na determinação do potencial (SCALON et al., 2002).

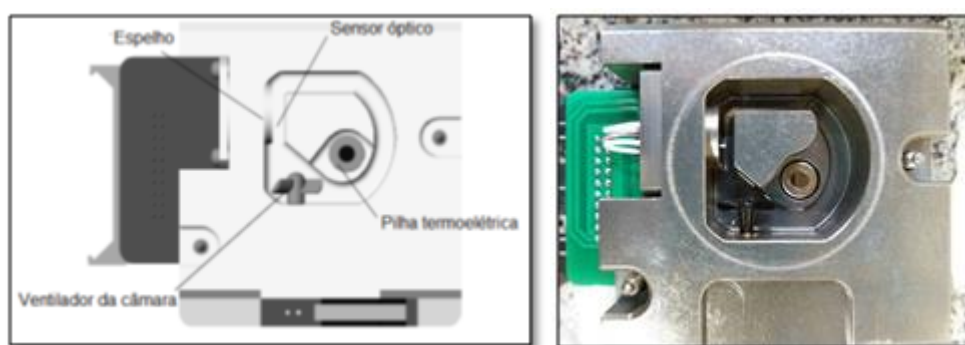


Figura 11. Ilustração da câmara interna e seus componentes (DECAGON, 2015) e

imagem da câmara interna do WP4C. Fonte: Autor(Laboratório de Solos e Meio Ambiente do IGC-UFMG).

Dentre as desvantagens desse método, podem ser apontadas variações no tempo de análise (entre 5 e 30 minutos) em função de perturbações na temperatura do ambiente onde está o aparelho. Além disso, requer um grande cuidado no manuseio ao introduzir e retirar as amostras, uma vez que a agitação e formação de poeira no interior da câmara, à medida que o aparelho vai sendo utilizado, contamina o sensor ótico. Em função disso, é recomendada sua aferição com substância padrão todas as vezes que tiver início uma nova sequência de análises, assim como eventuais limpezas cuidadosas da câmara interna. Por outro lado, sua praticidade se mostra superior, quando comparada às desvantagens apresentadas pelos equipamentos de placa porosa e câmara de Richards, tal como a maior demanda de manutenção, fragilidade, demora e imprecisões oriundas da ausência de contato hidráulico entre as amostras e a placa porosa (KLEIN, 2010).

1.2.13. Condutividade hidráulica

A condutividade hidráulica é uma variável que depende da relação de diferentes parâmetros físico-hídricos que se encontram intimamente atrelados e que, em conjunto, constituem a “geometria porosa dos solos⁵” (LIBARDI, 1999).

Matematicamente, a condutividade hidráulica (K) se apresenta como uma constante que relaciona diferentes parâmetros físicos, a depender da condição de saturação e dos diferentes métodos de análise existentes. Daí a origem de diferentes equações ou modelos empíricos presentes na literatura capazes de inferir tanto a condutividade hidráulica saturada (K_0 ou K_s), quanto a condutividade hidráulica insaturada (K). Neste trabalho adotou-se o método do permeâmetro de Guelph (PG), que assume uma condição de saturação.

Dentre os vários modelos para ajuste dos dados, alguns são frequentemente utilizados ou adaptados. Dentre esses, podemos destacar o modelo de Reynolds (1986), Reynolds e Elrick (1985), Rossi e Nimmo (1994) e Zhang et al.(1998), elaborados para cálculo da condutividade hidráulica saturada através de ensaios

⁵ A geometria porosa do solo também é conhecida como arranjo poroso, sistemas de poros e canais e, ainda, como matriz do solo.

com o permeâmetro de Guelph; os modelos de Van-Genuchten (1980), Mualen (1976) e Dourado Neto et al. (2011) foram descritos para cálculos da condutividade hidráulica não-saturada.

Segundo Libardi (2013), a primeira equação que estabelece a constante de proporcionalidade K foi feita por Henry Darcy (Lei de Darcy), em 1856, ao trabalhar com colunas de areia saturadas com água.

A condutividade hidráulica também pode ser entendida como a permeabilidade do solo, embora o uso desse termo seja mais comum na área das engenharias.

Há vários métodos disponíveis para estimar a condutividade hidráulica em campo. A escolha do método mais adequado, segundo Banton (1993), dependerá das condições do local a ser estudado. O permeâmetro de Guelph tem sido de grande aceitação por oferecer uma leitura mais rápida e de grande exatidão, além de oferecer menor perturbação ao solo (RAGAB; COOPER, 1990). Esse aparelho possibilita o controle da carga hidráulica, ou seja, tem a capacidade de controlar a altura da coluna de água no interior do furo. O mesmo possui um cilindro interno e externo graduado em mm, que permite avaliar a taxa de infiltração da água no solo (Figura 12).



Figura 12. Fotografia do Permeâmetro de Guelph, modelo 2800K1. Fonte: Autor.

Seu uso em campo é baseado em ensaios de infiltração realizados no interior de furos cilíndricos feitos com trado. Uma vantagem do permeâmetro de Guelph é que ele apresenta certa versatilidade em ambientes cujo relevo é mais movimentado em função do seu peso e seu apoio (tripé), o que garante a ele facilidade de transporte, montagem e desmontagem.

O funcionamento do permeâmetro de Guelph se baseia no princípio do tubo de Mariotte. Uma vantagem, segundo Soto et al. (2009), é que ele permite determinar a condutividade hidráulica saturada, levando em consideração o efeito do fluxo não saturado. Isso permite determinar, ainda, outras propriedades como o potencial matricial de fluxo e sorção. Além disso, ao simular condição de saturação à medida que forma um bulbo úmido em profundidade (diferente dos outros métodos), calcula a condutividade considerando tanto o fluxo vertical, quanto o fluxo horizontal da água no solo.

Existem outros métodos utilizados para medição da condutividade hidráulica. O método do infiltrômetro de duplo anel, por exemplo, é um deles, porém é mais adequado para ensaios a serem realizados em áreas aplainadas. Outro método existente é o do perfil instantâneo. Esse, por sua vez, depende da instalação *in situ* de chapas galvanizadas relativamente grandes. Isso torna a análise pouco prática em uma grande quantidade de pontos, pois depende de uma preparação antecipada da área. Outro método indireto de campo é o tensiômetro. Sua utilização geralmente depende da montagem de um determinado grupo de tensiômetros, demandando um maior tempo de preparo. Por isso ele é mais utilizado em áreas experimentais. Há vários modelos de tensiômetros diferentes, sendo alguns mais sensíveis a variações de temperatura (CARVALHO, 2002), o que pode afetar a viscosidade da água e, consequentemente, a permeabilidade.

Os ensaios de infiltração em campo feitos com o permeâmetro de Guelph, apesar de testarem condições reais, estão sujeitos a determinados erros que se dão em função da presença de camadas heterogêneas provocadas por fatores diversos, tais como a presença de furos e canais formados por antigas raízes, formigueiros e cupinzeiros. Por esse motivo, o uso do permeâmetro de Guelph, por exemplo, requer atenção para eventuais variações bruscas na velocidade de infiltração durante os ensaios, exigindo, assim, repetições em locais distintos, próximos uns dos outros.

Apesar dessa desvantagem, os resultados de medições em campo feito com o permeâmetro de Guelph têm apresentado valores estatísticos próximos de ensaios realizados em laboratórios, como atestaram Bagarello e Provenzano (1996).

Diferentes tipos de solo apresentam comportamentos distintos quanto à condutividade hidráulica. O Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS et al., 2013), em seu primeiro nível categórico, apresenta 13 classes de solos distintas. Dentre essas classes, características gerais como profundidade, sequência de horizontes, grau de estágio pedogenético, entre outras, refletem comportamentos típicos de determinadas propriedades físicas, como textura, estrutura e conteúdo de MO, por exemplo.

Por outro lado, se consideramos as particularidades de cada solo, como propriedades químicas e mineralógicas, posição na paisagem, condições ambientais, tipos de uso e manejo, a caracterização da permeabilidade, por classe taxonômica, torna-se mais difícil. Isso pode ser observado pela grande variabilidade dos valores de condutividade hidráulica saturada, apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Valores de referência de condutividade hidráulica saturada (K_0) encontrados na literatura, em mm.h^{-1} .

K_0	Classe de solo	Referências
3,6 a 36	Argissolo Vermelho-Amarelo	BETIM et al. (2012)
73,8 a 87,3	Argissolo Amarelo Eutrófico abrupto e Argissolo Amarelo Eutrófico típico	SILVA et al. (2012)
5,62 a 142,67	Argissolo Amarelo Distrófico fragipânico latossólico	BERNARDES (2005)
0,36 a 36	Cambissolo Háplico	BETIM et al. (2012)
36 a 3600	Cambissolo Háplico Tb Distrófico (saprolítico e argissólico)	SILVA et al. (2012)
4,21 a 21,35	Cambissolo Háplico Tb Distrófico gleico	BERNARDES (2005)
1,03 a 1,59	Latossolo Vermelho e Latossolo Amarelo	MARQUES et al. (2008)
2,75 a 3,5	Latossolo Amarelo	TEIXEIRA (2001)
0,04 a 0,40	Latossolo Vermelho Eutroférico Argiloso	NETO; FERNANDES (2005)
0,4 a 109,08	Latossolo Vermelho-Amarelo	GHIRBERTO; MORAES (2011)
0,01 a 0,36	Latossolo Vermelho-Amarelo	BETIM (2013)
170 a 2831	Latossolo Vermelho-Amarelo	ESPÍRITO SANTO, (2011)
22,04 a 114,35	Latossolo Vermelho Distrófico típico	VIEIRA; KLEIN (2007)

14,4 a 90	Latossolo Vermelho e Nitossolo	CELLIGOI et al. (2006)
18,9 a 262	Latossolo Vermelho Distrófico	FERREIRA (2008)
2,3 a 31,7	Luvissolo Hipocrômico	FREIRE et al. (2003)
7,5 a 28,3	Luvissolo Crômico	FREIRE et al. (2003)
0,53 a 15	Luvissolo Háplico	PAES (2012)
0 a 2,16	Luvissolo Crômico	PAES (2012)
18,33 a 157,51	Nitossolo Vermelho Distroférico	ASSIS; LANÇAS (2005)
14,4 a 90	Nitossolo	CELLIGOI et al. (2006)
2,35 a 20,26	Nitossolo	LIBARDI; GONÇALVES (2013)

1.3 MATERIAL E MÉTODOS

1.3.1. Área de estudo

A bacia do córrego Marinheiro está inserida na sub-bacia do ribeirão Jequitibá, por sua vez, pertencente à bacia hidrográfica do rio da Velhas. Ela está na região central do estado de Minas Gerais, a 70 Km da capital, Belo Horizonte e está situada na zona periurbana do município de Sete Lagoas-MG. A bacia do Córrego Marinheiro encontra-se a sudeste da mancha urbana de Sete Lagoas e a oeste do município de Prudente de Moraes (Figura 13).

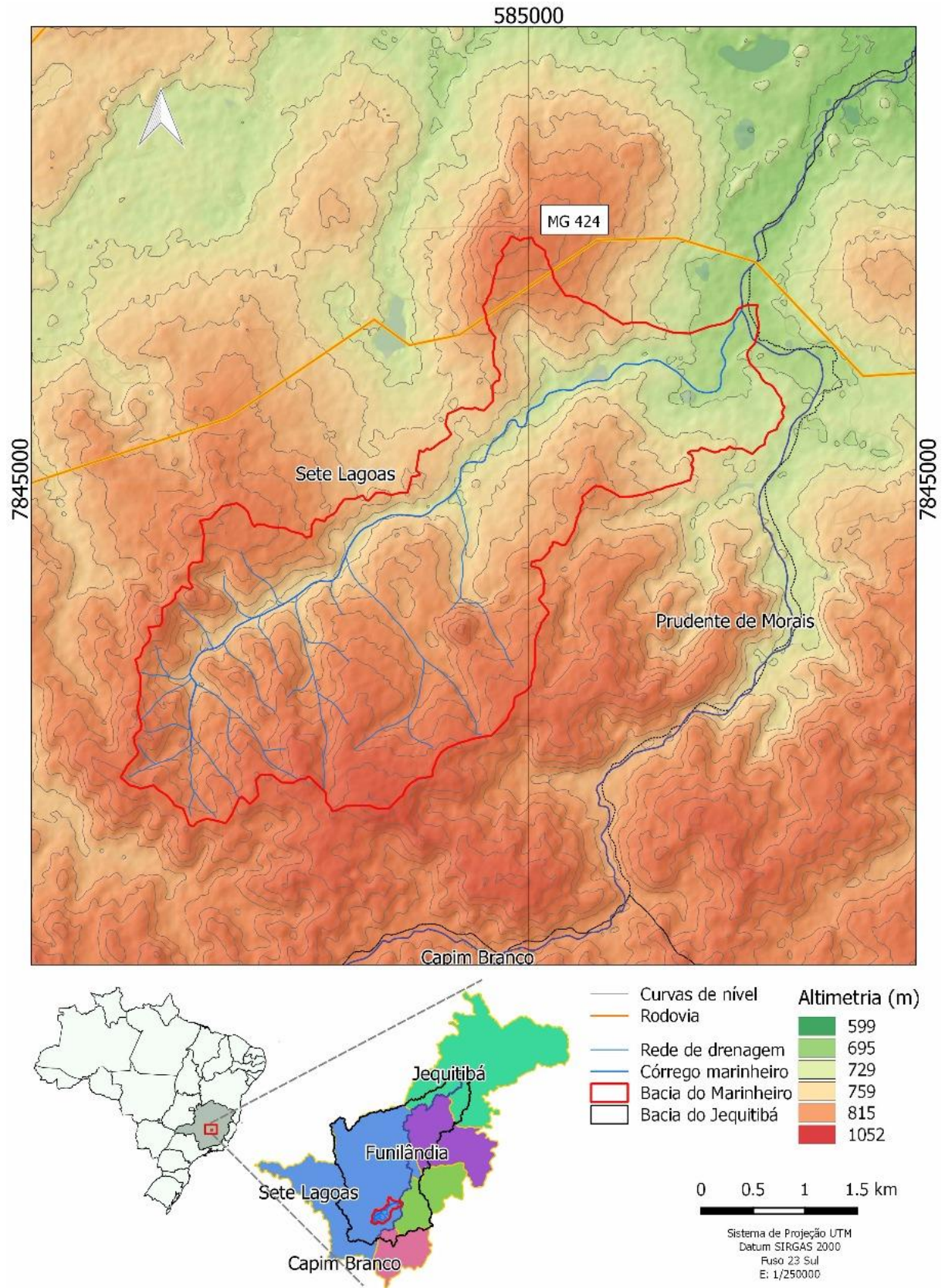


Figura 13. Mapa de localização da bacia do Córrego Marinho, município de Sete Lagoas-MG. Fonte: Oliveira (2016).

Encontra-se na depressão São Franciscana e apresenta relevo marcado pela presença de colinas suaves côncavo-convexas, com variação altimétrica na faixa de 700m a 800m (ÁLVARES, 2008).

Seu baixo e médio cursos se encontram em um domínio geomorfológico inferior constituído por metacalcários da Formação Sete Lagoas, com presença de feições como paredões, sumidouros e cavernas (FILHO et al., 2004).

A geologia local é representada por litotipos do grupo Bambuí originário de sedimentação carbonática e pelítica, representados pela Formação Sete Lagoas (Membros Lagoa Santa e Pedro Leopoldo) e pela Formação Serra de Santa Helena, sobrepostas ao embasamento gnáissico-migmatítico (RIBEIRO, 2003). Segundo Pessoa (1996), os litotipos presentes no membro Pedro Leopoldo localizados a sudeste de Sete Lagoas são formados por calcários de cor cinza a cinza-escuro, com intercalações mais escuras de metapelito, assim como interdigitações de calcários ainda mais escuros, com deformação branda do tipo interestratal. De acordo com Ribeiro et al. (2003) o membro Lagoa Santa sobrepõe o membro Pedro Leopoldo através de falhas de deslocamento onde geralmente se observa grande ocorrência de veios de calcita/quartzo. As rochas encontradas nesse membro são calcarenito, espatitos e calcilutitos (MACHADO, 2011).

O mapa pedológico mais recente da bacia aponta uma grande variabilidade de solos, com a presença das classes dos Neossolos, Cambissolos, Chernossolos, Luvissolos, Gleissolos, Nitossolos, Argissolos e Latossolos (OLIVEIRA, 2016). Diferente do que havia sido identificado em trabalhos pretéritos na bacia, onde apareciam apenas classes como a do Latossolo Vermelho amarelo distrófico, Argissolo Vermelho Distrófico típico e Cambissolo Háptico Distrófico típico (CASTRO, 2011; PANOSO et al., 2002).

O clima regional predominante é o tropical de altitude (Cwb), segundo Köppen (1936), com chuvas no verão, mais concentradas entre os meses de outubro e março. Já entre os meses de abril e agosto, predominam temperaturas mais baixas que coincidem com período de estiagem.

Na bacia do córrego Marinheiro há uma estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia, instalada no CNPMS (Embrapa Milho e Sorgo) a mais de 90 anos. Através de dados desta estação e outros dados meteorológicos analisados em campo, Monteiro (2016) identificou na bacia quatro unidades climáticas diferentes, influenciadas pela cobertura do solo, tipo de vegetação e relevo. Apesar

de se localizar em área periurbana, o autor identificou influência da expansão urbana no microclima da bacia.

Quanto à cobertura vegetal nativa da área, há grande predominância do Cerrado, especialmente os subtipos campos e cerrado típico. Outros tipos vegetacionais que podem ser encontrados na área são as matas de galeria e ciliar com características de Floresta Estacional Semidecidual e Mata Seca (Floresta Decídua) sob afloramento de calcário.

O nível de alteração da cobertura vegetal na área da bacia hidrográfica do Ribeirão Jequitibá (bacia que engloba a bacia do Marinheiro) é significativo, sendo maior que 50%. Essa alteração é marcada por um histórico de ocupação associado a atividades agropecuárias, à exploração da madeira nas áreas de Cerrado, e, mais recentemente, a atividades como o cultivo do eucalipto (CHAVES, 2005).

Em seu trabalho sobre o uso e ocupação da bacia, Santos (2016) identificou áreas onde se destacam atividades de agricultura irrigada, pastoreio e silvicultura, além de dois grupos distintos de vegetação (de porte arbóreo baixo e rasteiro e de porte médio e alto), além de áreas urbanas incipientes no extremo noroeste e nordeste da bacia.

Além do predomínio de médias propriedades rurais, nesta mesma bacia estão situados o Centro Nacional de Pesquisas de Milho e Sorgo – CNPMS (Embrapa Milho e Sorgo), o campus Sete Lagoas da Universidade Federal de São João Del Rey e áreas urbanas e industriais recentes, oriundas da expansão urbana do município de Sete Lagoas.

Para caracterização físico-hídrica, foram selecionados dez perfis de solos representativos da bacia, a partir do mapa pedológico na escala de 1:25.000 elaborado por Oliveira (2016) (Figura 14). A escolha dos perfis levou em consideração a representatividade da classe de solos na bacia e buscou contemplar a maior diversidade possível de classes (Tabela 3).

Pontos Amostrais nas Diferentes Classes de Solos na Bacia do Córrego Marinheiro

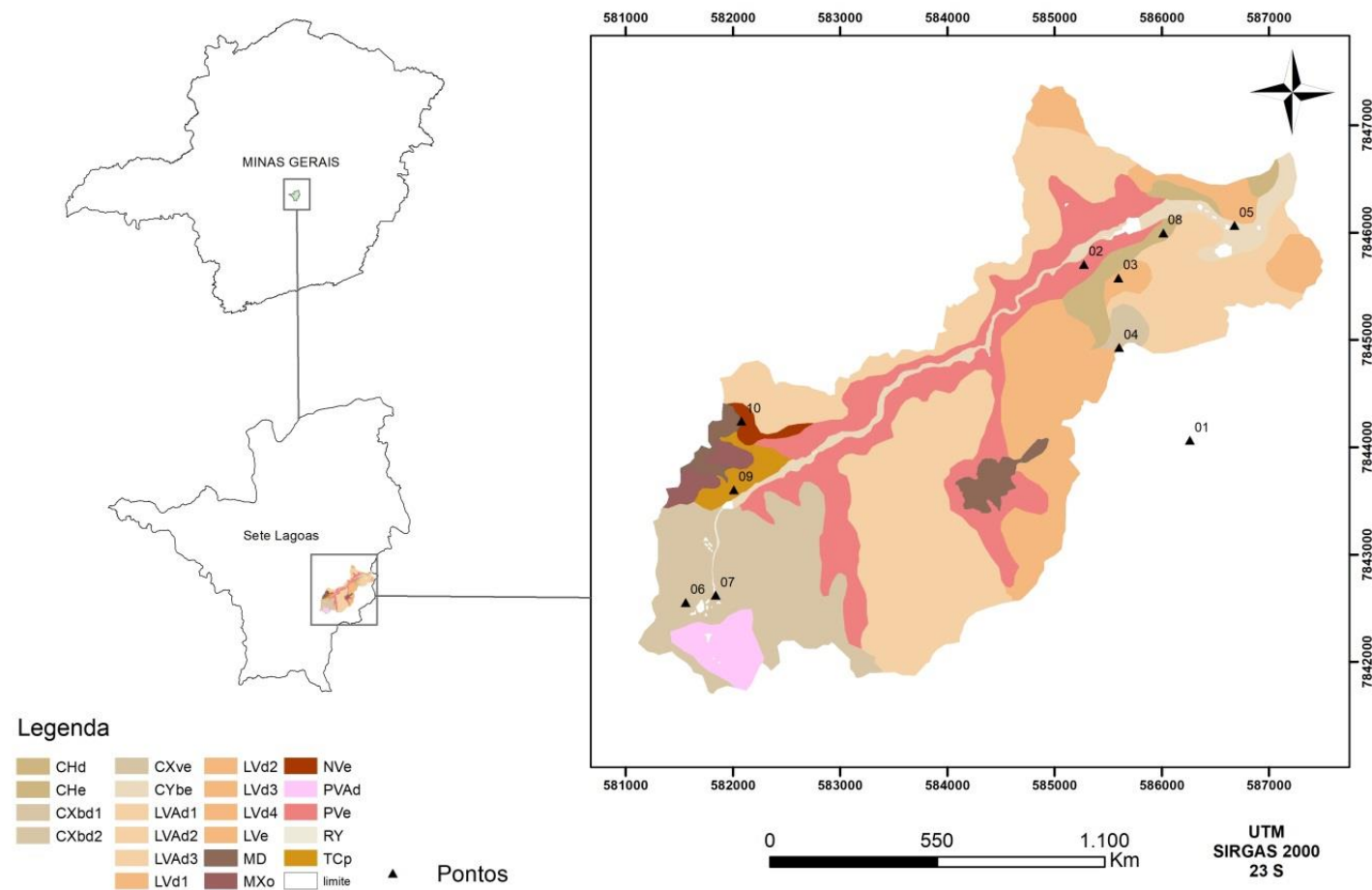


Figura 14. Mapa de solos da Bacia do Córrego Marinheiro, com perfis selecionados para caracterização físico-hídrica. Fonte: Oliveira (2016) adaptado pelo autor.

Tabela 3. Identificação dos perfis caracterizados na bacia do córrego Marinheiro, Sete Lagoas (MG).

Id. Perfil	Classificação dos solos analisados	Sigla	Prof.	Hor.	Transição hor.	Estrutura
P1	ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Eutrófico nitossólico	PVA	20 cm	Ap	Clara e irregular	moderada grande blocos subangulares que se desfazem em moderada pequena blocos subangulares
			50 cm	AB	Gradual e plana	moderada média e grande prismática e moderada média e grande blocos subangulares que se desfazem em moderada pequena blocos subangulares
P2	ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Eutrófico nitossólico	PVA	20 cm	Ap2	Gradual e irregular	forte pequena e média blocos subangulares
			50 cm	Bt2	Gradual e plana	moderada grande prismática que se desfazem em moderada pequena blocos subangulares
P3	LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico	LV	20 cm	A	Clara e irregular	moderada grande grumos e forte pequena a muito pequena granular
			50 cm	Bw1	Difusa e plana	moderada grande e média blocos subangulares que se desfazem em forte muito pequena granular
P4	LATOSSOLO VERMELHO Distrófico húmico	LV	20 cm	A1	Clara e ondulada	moderada muito pequena grumos
			50 cm	A2	Difusa e plana	forte muito pequena granular
P5	CAMBISSOLO FLÚVICO Tb Eutrófico típico	CY	20 cm	Ap	Clara e plana	moderada pequena blocos subangulares
			50 cm	Bi	Abrupta e ondulada	forte pequena blocos subangulares
P6	CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico	CX	20 cm	BA	Irregular e ondulada	moderada muito pequena, pequena e média blocos subangulares
			50 cm	B1	Gradual e plana	maciça
P7	ARGISSOLO AMARELO Distrófico típico	PA	20 cm	Ap2	Clara e irregular	moderada muito pequena e pequena prismática e moderada muito pequena e pequena blocos subangulares
			50 cm	Ap2	Gradual e irregular	moderada muito pequena e pequena prismática e moderada muito pequena e pequena blocos subangulares
P8	CAMBISSOLO HÚMICO Distrófico típico	CH	20 cm	Ap2	Difusa e plana	moderada muito pequena blocos subangulares
			50 cm	BA	Gradual e plana	moderada muito pequena blocos subangulares
P9	LUVISSOLO CRÔMICO Pálico típico	TC	20 cm	Ap	Clara e plana	forte pequena e média blocos subangulares e forte pequena e média prismática
			50 cm	Bt	Clara e irregular	forte grande e muito grande prismática
P10	NITOSSOLO VERMELHO Eutrófico típico	NV	20 cm	A	Difusa e plana	forte muito grande blocos subangulares que se desfazem em forte muito pequena blocos subangulares
			50 cm	AB	Gradual e plana	forte muito grande prismática que se desfazem em forte muito pequena e pequena prismática

Para caracterização dos atributos físicos e químicos dos solos foram coletadas em cada perfil amostras deformadas de solos para análise de textura, densidade específica, estabilidade de agregados, matéria orgânica, CTC e o ΔpH , e indeformadas, para análise de densidade do solo, porosidade (total, macro e micro), e capacidade de água disponível.

1.3.2. Método do permeâmetro de Guelph para determinação de K_0 .

Para caracterização da condutividade hidráulica saturada, foram realizados ensaios de infiltração em campo com o permeâmetro de Guelph, modelo 2800K1, fabricado pela *Soilmoisture Equipment Corp.* Os furos para os ensaios de infiltração foram realizados em dez perfis, em duas profundidades diferentes, de 20 cm e 50 cm, através de um trado de 6 cm de diâmetro. Para cada profundidade, foram aplicadas duas cargas sequenciais de coluna de água, de 5 cm e 10 cm de altura. Para cada furo, foram realizadas três repetições. Ao todo, foram realizados 120 ensaios de infiltração (10x2x2x3). Após realização dos furos com o trado, esses tiveram sua base nivelada horizontalmente com um trado de caneco auxiliar apropriado. A fixação do PG em campo é feita a partir de um tripé.

Durante os ensaios, a leitura da taxa de infiltração no permeâmetro de Guelph foi feita a cada 1 (um) minuto, e, em casos de lenta infiltração, a cada 5 minutos. A leitura foi feita utilizando-se a graduação em mm.

Para garantir a estabilidade e uma taxa de infiltração constante, cada leitura durou, em média, de 30 a 40 minutos. As leituras foram feitas ora utilizando-se a graduação do cilindro interno (nos casos de menor taxa de infiltração), ora pelo cilindro externo (maior taxa).

Os dados referentes à taxa de infiltração foram anotados em uma planilha em cm/minuto. Posteriormente, a condutividade hidráulica foi calculada seguindo o modelo empírico de Zhang et al. (1998), uma adaptação da equação de Reynolds (1986) sugerida pelo fabricante do modelo de permeâmetro utilizado (2800K1).

A fim de comparar os solos da bacia do Córrego Marinheiro entre si quanto à condutividade hidráulica saturada e um possível potencial de recarga dos aquíferos livres, optou-se por usar como critério de agrupamento, dados relativos ao volume de água gravitacional (AG) estimados a partir da análise na mesa de tensão, sendo:

$$AG_1 (P_t - U_{v-6kPa}), AG_2 (P_t - U_{v-10kPa}) \text{ e } AG_3 (P_t - U_{v-33kPa}).$$

Essa foi uma alternativa escolhida tendo em vista a elevada variabilidade dos valores de K_0 estimados na literatura para cada classe taxonômica.

Foram discriminados três grupos: o de maior potencial, o de menor potencial e o de potencial intermediário. A partir do cálculo da mediana dos valores de AG, por profundidade, separou-se os perfis de maior e menor volume de água gravitacional. A partir disso, foram calculadas médias de K_0 para grupo de maior teor de AG1, AG2 e AG3, assim como, médias para o grupo de menor AG1, AG2 e AG3. O grupo que apresentou valores médios intermediários de K_0 ou que apresentaram situações opostas entre uma profundidade ou outra, foram agrupados como sendo de potencial de recarga intermediário.

1.3.3. Análises utilizadas para montagem das curvas de retenção de água no solo

Para a montagem das curvas de retenção de água no solo, foram utilizados três métodos de avaliação dos potenciais matriciais de acordo com o teor de umidade do solo – método da mesa de tensão, método do extrator de Richards e método da psicrometria (Figura 15).

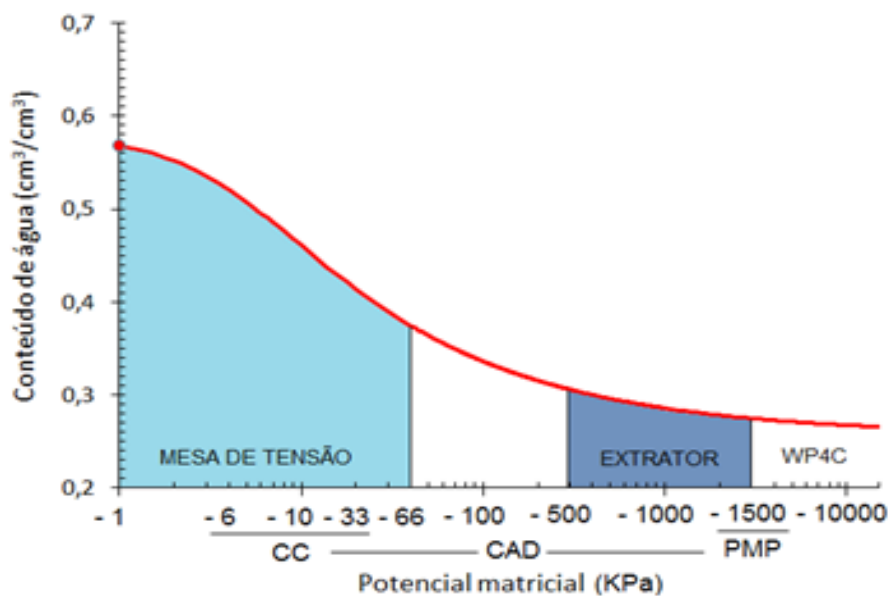


Figura 15. Métodos utilizados para as faixas de potencial matricial medidas. Fonte: Autor.

1.3.4. Coleta e preparação de amostras indeformadas para análise na mesa de tensão.

Para composição da chamada parte alta da curva (faixa de maior potencial matricial ou menor tensão), foi utilizado o método da mesa de tensão. A mesa utilizada foi a da fabricante Ecotech.

Para análise dos potenciais matriciais nesse equipamento, faz-se necessário o uso de amostras indeformadas coletadas em campo. A coleta de amostras indeformadas foi feita a partir do uso de anéis volumétricos de 5 cm de diâmetro por 5 cm de altura, com auxílio de batedores, canivete, espátula e ponteiros de borracha de 2". Optou-se pelo uso de ponteiros de borracha nas extremidades do anel, no intuito de preservar sua estrutura e umidade

As dimensões exatas de cada anel foram medidas anteriormente às coletas através de um paquímetro digital. Os anéis foram coletados em duas profundidades (20 e 50 cm). Por segurança, em campo, coletou-se uma sobra de material além das extremidades do anel. Já em laboratório, as amostras indeformadas foram preparadas para análise (Figura 16).



Figura 16. Preparação de amostras indeformadas – etapa anterior à saturação.
Fonte: Autor

Em laboratório foi realizada a preparação dos anéis com retirada do excesso de solo e de raízes para além do volume dos anéis. Para tal, utilizaram-se canivetes e cortadores de unha. Após o ajuste do volume, colocou-se numa das extremidades do anel um pedaço de pano circular de cetim (identificado e pesado seco e úmido) preso por um elástico, para evitar perda de material ao ser saturado e levado à mesa de tensão.

Para saturação, as amostras foram colocadas em bandejas de fundo plano, sendo adicionada água deionizada de forma gradativa. Primeiro, encheu-se a vasilha até um terço da altura dos anéis, depois até a metade e depois até dois terços. Cada intervalo durou em média 24h (Figura 17).



Figura 17. Etapa de saturação das amostras indeformadas. Fonte: Autor.

A saturação das amostras indeformadas levou de 2 a 5 dias, até que uma lâmina d'água de brilho homogêneo surgisse na parte superior da amostra. Feito isso, realizou-se a pesagem da amostra saturada em balança de precisão.

Para preparação das amostras indeformadas referentes à profundidade de 50 cm do perfil 8, foi necessário a utilização de outro método, tendo em vista a elevada quantidade de cascalhos nesta profundidade. Foram preparados monolitos conforme o método proposto por Viana (2008).

1.3.5. Análise na mesa de tensão

Esta etapa foi realizada no laboratório de Solos e Meio Ambiente do Instituto de Geociências da UFMG. Ela se iniciou logo após a pesagem da amostra saturada. Para um total de 60 amostras indeformadas, a análise foi dividida em duas etapas. O critério de separação desses grupos foi a K_0 de cada amostra estimada em campo pelo PG (Figura 18).



Figura 18. Alocação das amostras indeformadas na mesa de tensão. Fonte: Autor.

Foram aplicadas, nesta ordem, as seguintes tensões: -1 kPa; -2 kPa; -4 kPa; -6 kPa; -10 kPa; -33 kPa e -66 kPa. Após cada tensão aplicada, o tempo para estabilização da água retida demorou de 2 a 5 dias. Após cada estabilização, as amostras foram pesadas e os valores anotados em planilha.

A definição do momento de retirada e pesagem das amostras da mesa ocorreu através da estabilização do nível de água na garrafa acoplada à mesa, medido através da fixação de uma régua junto à garrafa.

Após a estabilização da água sob a tensão de -66kPa e pesagem das amostras, as mesmas foram colocadas em latas de alumínio previamente identificadas/taradas e submetidas à secagem em estufa por dois dias, sob temperatura de 105°C. Após a secagem, todas as amostras foram submetidas a uma última pesagem, a fim de se obter a massa seca e, por diferença gravimétrica, identificou-se a massa de água armazenada na matriz porosa do solo sob cada tensão. As massas do pano e do elástico foram descontadas no final.

A estimativa do conteúdo de água para cada tensão analisada teve diferentes fins, além da montagem da curva como um todo. Os volumes retidos entre a tensão zero (amostras saturadas) e às tensões referentes à CC (-6 kPa; -10 kPa e -33 kPa) foram utilizadas para estimar o volume de água gravitacional.

1.3.6.Extrator de Richards ou extrator de placa porosa

A parte baixa da curva (faixa de menor umidade, altas tensões ou baixos potenciais) foi montada a partir de dois métodos distintos. Um deles foi a câmara de Richards do laboratório de física dos solos da Universidade Federal de Lavras (UFLA).

A umidade volumétrica foi medida sob duas tensões, - 506,62 kPa e - 1519,88 kPa. Para isso, separou-se uma porção de 200 g de TFSA, referente às profundidades de 20 cm e 50 cm de cada perfil.

1.3.7.Método do psicrômetro WP4C (*Dew Point PotentiaMeter*)

As amostras de solo (aproximadamente 3 g de TFSA) foram armazenadas em cápsulas de aço inoxidável e depois introduzidas na câmara do WP4C. Foram analisadas 20 amostras correspondentes a 10 perfis de solos e duas profundidades de amostragem (0-20 e 20-50 cm).

Para a análise de cada amostra, foi feita uma medida inicial de referência com terra fina seca em estufa. Após o resfriamento em dessecador fechado e submetido a vácuo, cada cápsula contendo o solo foi submetida a um umedecimento progressivo: armazenamento ao ar e armazenamento em dessecador contendo água no fundo. Os tempos de umedecimento, sob cada ambiente, variaram.

Os valores de potencial da água no solo fornecidos pelo aparelho foram anotados em uma planilha. Foram realizadas, no mínimo, cinco medições para cada amostra. Porém, em alguns casos, mais medições foram feitas no intuito de se obter potenciais na faixa de maior precisão do aparelho.

Para montagem da parte baixa da curva e regularização da variabilidade dos resultados nessa faixa de tensão, utilizou-se o modelo proposto por Peters e Durner (2008).

1.3.8.Caracterização física e química dos solos

As análises físicas de granulometria, densidade de partícula, densidade do solo e estabilidade de agregados foram realizadas nos laboratórios de Solo e Meio

Ambiente e de Geomorfologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

1.3.9. Análise granulométrica

A análise granulométrica consiste basicamente em fracionar a terra fina seca ao ar (TFSA) em diferentes granulometrias. Entende-se por TFSA o produto de uma amostra após o tempo de 48h de ressecamento ao ar, seguido do destorroamento e do peneiramento em peneira com malha de 2mm.

Essas frações granulométricas estão relacionadas ao diâmetro equivalente dessas partículas. Há diferentes sistemas de classificações quanto à proporção de cada fração. O mais comum é o fracionamento entre areia (partículas mais grosseiras), silte e argila (partículas mais finas). Cada sistema adota limites distintos de diâmetro médio, para cada fração.

A *USDA* (Departamento de agricultura dos EUA), um dos sistemas mais comuns para classificação textural, adota as seguintes faixas: areia (entre 2mm e 0,05mm); silte (0,05mm a 0,002mm) e argila (<0,002mm) (ESTADOS UNIDOS, 1959, 1993). O mesmo sistema é adotado pela EMBRAPA no Brasil.

Muitos são os métodos possíveis para determinação de cada fração em laboratório. Os adotados aqui foram os métodos da pipeta, preconizado por Almeida et al. (2012). Durante a análise, a fração areia é obtida por peneiramento, enquanto as frações silte e argila são obtidas por sedimentação.

Para desagregação do material, utilizou-se para 200 g de TFSA, 20 ml de NaOH, ambos colocados em garrafas, submetidas à agitação por 16h, com 30 rotações por minuto.

Após o peneiramento, realizou-se o fracionamento de fração areia duas classes distintas: areia grossa e areia fina. Foram utilizadas peneiras de aço inoxidável com as seguintes aberturas, em mm, respectivamente, 2, 0,2 e 0,05 mm.

1.3.10. Densidade de partículas

Para determinação da densidade de partículas adotou-se o método do balão volumétrico. No balão, foram adicionados cerca de 20 g de terra fina seca submetidos à estufa e ao resfriamento no dessecador. Completou-se o volume do balão com álcool até a marca de 50 ml. O volume de álcool foi medido e aplicado na

seguinte equação, onde “a” é o peso da amostra seca a 105°C e “b” o volume de álcool gasto.

$$Dp = \frac{a}{(50-b)}, \text{ onde:}$$

Dp = Densidade de partículas (g/cm³);

a = peso da amostra seca a 105°C;

b = volume de álcool gasto.

1.3.11.Densidade do solo

Para análise de densidade do solo, adotou-se o método do anel volumétrico (BLAKE; HARTGE, 1986), através das amostras indeformadas provenientes da análise na mesa de tensão. Após a finalização destas análises mediu-se massa de solo seca contida no anel (após 48h na estufa a 105°C). Deste modo, dividiu-se a massa seca de solo pelo volume total do anel, obtendo-se assim a densidade do solo.

O volume do anel foi calculado com auxílio de paquímetro digital, medindo-se, em triplicata, o diâmetro interno do anel e sua altura.

1.3.12.Estabilidade de agregados

Para a determinação da estabilidade de agregados, foi utilizado o método de Yoder (1936), que consiste no peneiramento do solo por via úmida. Para tal, foram coletados em campo torrões grandes, devidamente armazenados e transportados para evitar sua compactação ou alteração da estrutura interna. Em laboratório, esses torrões foram individualizados à mão em torrões menores, através de suas linhas de fraquezas e secos ao ar por 48h. Feito isso, o material foi submetido ao peneiramento através de peneiras com malhas de 4mm e 2mm. Pesou-se 25g de agregados, em triplicata, para cada amostra e depois esses agregados foram distribuídos homogeneamente sobre um papel filtro, no interior de uma placa de Petri para pré-umedecimento.

O pré-umedecimento foi realizado com auxílio de uma pisseta, molhando-se com água deionizada o papel filtro sob os agregados (Figura 19). Deste modo, o

umedecimento dos agregados se deu por capilaridade, a fim de evitar o aprisionamento de bolhas no interior dos mesmos.



Figura 19. Pré-umedecimento dos agregados para análise de estabilidade. Fonte: Autor.

Posteriormente, os agregados foram levados à mesa de peneiramento tipo Yoder, contendo uma sequência de peneiras de malhas de 2,00; 1,00; 0,50; 0,25 e 0,125 mm.

As amostras foram colocadas na peneira superior, com abertura 2 mm, agitadas por 15 minutos, com movimento vertical de 30 ciclos por minuto, alternando em movimentos de subida e descida. O recipiente de armazenamento de água foi preenchido com água até a altura do meio da peneira superior (2mm). Assim, durante a análise, as peneiras ora afundam, ora emergem na água. À medida que os agregados vão se desfazendo, o material mais fino vai sendo transferido para as peneiras de inferiores.

Posteriormente, o conteúdo de solo remanescente em cada peneira foi cuidadosamente transferido para uma lata já identificada, com auxílio de uma pisseta. As latas contendo água e solo foram levadas à estufa a 105°C, por 24h, para secagem e depois pesadas em balança de precisão.

Os valores foram tabulados e, em seguida, foram calculados os percentuais de agregados maiores do que 2mm (peneira superior); o diâmetro médio geométrico (DMG) dos agregados; os percentuais de micro agregados (somatório de agregados

menores do que 0,50mm e retidos nas peneiras de 0,25mm e 0,125mm) e macroagregados (somatório de agregados acomodados nas peneiras de 2mm, 1mm e 0,5mm).

1.3.13. Matéria orgânica, capacidade de troca catiônica (CTC) e o ΔpH

Os teores de matéria orgânica, CTC e ΔpH foram avaliados conforme Donagemma et al. (2011).

1.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Antes da apresentação e discussão específica dos resultados de condutividade hidráulica saturada e da apresentação e discussão das Curvas de Retenção da Água no solo e respectivos valores de capacidade de Água Disponível, na Tabela 4 pode ser visto o conjunto de parâmetros físicos comumente analisados e que serviram de base para a discussão deste tópico. A caracterização detalhada de cada parâmetro analisado, por perfil e profundidade, encontra-se no ANEXO I.

Tabela 4. Parâmetros físicos médios, analisados por perfil e profundidade em três repetições.

Perfil	Classe	Granulometria					Agregados					Porosidade			Ds g.cm ⁻³
		Prof.	Areia	Silte	Argila	Classificação textural	MO	DMG	>2 mm	Macro	Micro	Macro	Micro	Total	
		cm	%	%	%		g.kg ⁻¹	mm	%	%	%	cm ³ .cm ⁻³	cm ³ .cm ⁻³	cm ³ .cm ⁻³	
1	PVA	20	61	18	21	Franco-argiloarenosa	13,8	3,14	79	96	4	0,271	0,220	0,482	1,31
		50	56	19	25	Franco-argiloarenosa	4,6	1,21	36	88	12	0,321	0,128	0,427	1,48
2	PVA	20	18	35	47	Argila	18,2	4,25	94	97	3	0,418	0,182	0,602	1,05
		50	11	32	57	Argila	15,6	2,6	36	94	6	0,317	0,193	0,513	1,32
3	LV	20	14	11	75	Muito argilosa	14	2,75	74	94	6	0,366	0,215	0,583	1,12
		50	10	10	80	Muito argilosa	11,2	1,45	57	81	19	0,328	0,271	0,589	0,96
4	LV	20	15	11	74	Muito argilosa	28	3,7	87	97	3	0,298	0,395	0,689	0,76
		50	11	11	78	Muito argilosa	17,6	1,59	53	88	12	0,306	0,325	0,638	0,92
5	CY	20	30	36	34	Franco-argilosa	23,5	1,31	39	89	11	0,319	0,200	0,542	1,21
		50	19	44	37	Franco-argilossiltosa	11,2	1,3	37	88	12	0,317	0,073	0,398	1,57
6	CX	20	56	18	26	Franco-argiloarenosa	18	3,33	80	98	2	0,293	0,257	0,536	1,16
		50	56	18	26	Franco-argiloarenosa	4,2	1,7	53	90	10	0,261	0,150	0,423	1,48
7	PA	20	46	17	37	Argiloarenosa	12,7	3,08	78	97	3	0,245	0,267	0,492	1,36
		50	46	17	37	Argiloarenosa	8,8	1,22	31	93	7	0,280	0,177	0,455	1,45
8	CH	20	25	13	62	Muito argilosa	26,1	4,67	97	99	1	0,285	0,293	0,599	0,95
		50	16	11	73	Muito argilosa	23,2	4,57	94	99	1	0,269	0,152	0,420	2,17
9	TC	20	13	51	36	Franco-argilossiltosa	39,3	4,67	99	99	1	0,346	0,229	0,580	1,06
		50	5	55	40	Franco-argilossiltosa	3	4,57	85	85	15	0,298	0,149	0,472	1,40
10	NV	20	15	45	40	Franco-argilossiltosa	38,5	4,15	98	98	2	0,336	0,197	0,552	1,22
		50	13	45	42	Argilossiltosa	18,8	2,7	96	96	4	0,330	0,252	0,551	1,23

1.4.1. Condutividade hidráulica saturada (K_0)

Os valores de condutividade hidráulica saturada (K_0) estimados para os principais solos presentes na bacia do Córrego Marinheiro, ainda que tenham apresentado certa variabilidade, possibilitam identificar propriedades físicas que interferem mais do que outras na permeabilidade, evidenciando o importante papel da caracterização físico-hídrica.

Os valores médios de K_0 , por profundidade, foram de 24,49 mm.h⁻¹ na profundidade de 20 cm e de 24,48 mm.h⁻¹ na profundidade de 50 cm. A dispersão dos valores encontrados foi alta para as duas profundidades, tendo em vista a elevada heterogeneidade entre as repetições 1, 2 e 3, como mostram o Desvio Padrão (DP) e o Coeficiente de Variação (CV), apresentados na Tabela 5.

Na profundidade de 20 cm, a condutividade hidráulica variou de 7,2 mm.h⁻¹ a 46,13 mm.h⁻¹. Na profundidade de 50 cm, os valores de condutividade variaram entre 1,23 mm.h⁻¹ a 73,27 mm.h⁻¹.

A elevada dispersão encontrada tem sido comum nos trabalhos de caracterização da condutividade hidráulica medidos *in situ* através do Permeâmetro de Guelph, sobretudo para uma mesma classe taxonômica (Tabela 5). Soto et al. (2009) chamam atenção para a variabilidade dos valores de K_0 em função do número insuficiente de amostras (tais autores sugerem um mínimo de 30 amostragens por perfil, na mesma profundidade) e, ainda, do método utilizado para aplicação da carga hidráulica (de uma única aplicação ou dupla aplicação sequencial, com variação da altura).

O CV de K_0 determinado *in situ* através do PG por Abreu et al. (2003) foi de 62,7% na profundidade de 15 cm. Jury et al. (1991), por sua vez, estimaram coeficientes de variação para os valores de K_0 entre 48% e 320%, atribuindo a esta elevada variabilidade a heterogeneidade do espaço poroso do solo. O espaço poroso varia bastante de solo para solo e, também, para o mesmo solo em função das variações estruturais (SCHERPINSKI et al., 2010).

As propriedades físicas que mais se correlacionaram com K_0 foram o teor de argila, a porosidade total e a macroporosidade.

Tabela 5. Valores de condutividade hidráulica saturada estimados, em mm.h^{-1} , acompanhados dos parâmetros textura e porosidade.

Perfil	Classe	Prof. cm	Ds g.cm^{-3}	Granulometria			Textura (classif. Embrapa)	Porosidade			K_0		
				Areia	Silte	Argila		macro %	macro $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$	total	Média mm.h^{-1}	DP^1	CV^2 %
1	PVA	20	1,31	61	18	21	Franco-argiloarenosa	45,6	0,220	0,482	19,2	17,87	93,07
		50	1,48	56	19	25	Franco-argiloarenosa	30,0	0,128	0,427	31,27	32,85	105,1
2	PVA	20	1,05	18	35	47	Argila	30,3	0,182	0,602	13,07	11,06	84,62
		50	1,32	11	32	57	Argila	37,6	0,193	0,513	7,13	2,94	41,23
3	LV	20	1,12	14	11	75	Muito argilosa	36,9	0,215	0,583	46,13	47,28	102,5
		50	0,96	10	10	80	Muito argilosa	46,0	0,271	0,589	43,03	11,26	26,17
4	LV	20	0,76	15	11	74	Muito argilosa	57,3	0,395	0,689	45,27	47,51	104,9
		50	0,92	11	11	78	Muito argilosa	50,9	0,325	0,638	73,37	19,23	26,21
5	CY	20	1,21	30	36	34	Franco-argilosa	36,9	0,200	0,542	7,2	4,26	59,17
		50	1,57	19	44	37	Franco-argilossiltosa	18,3	0,073	0,398	1,23	1,96	159,3
6	CX	20	1,16	56	18	26	Franco-argiloarenosa	47,9	0,257	0,536	23	7,75	33,7
		50	1,48	56	18	26	Franco-argiloarenosa	35,5	0,150	0,423	7,1	3,74	52,68
7	PA	20	1,36	46	17	37	Argiloarenosa	54,2	0,267	0,492	13,2	8,62	65,3
		50	1,45	46	17	37	Argiloarenosa	38,9	0,177	0,455	3,53	3,59	101,7
8	CH	20	0,95	25	13	62	Muito argilosa	48,9	0,293	0,599	28,53	16,74	58,68
		50	2,17	16	11	73	Muito argilosa	36,1	0,152	0,420	56,33	21,1	37,46
9	TC	20	1,06	13	51	36	Franco-argilossiltosa	39,5	0,229	0,580	30,43	17,84	58,63
		50	1,40	5	55	40	Franco-argilossiltosa	31,6	0,149	0,472	6,1	8,07	132,3
10	NV	20	1,22	15	45	40	Franco-argilossiltosa	35,7	0,197	0,552	18,9	11,33	59,95
		50	1,23	13	45	42	Argilossiltosa	45,7	0,252	0,551	15,73	9,14	58,11

¹ DP = Desvio Padrão; ² = Coeficiente de Variação

Ao contrário do que concluíram Soto et al. (2009), houve uma correlação direta entre o teor de argila e a condutividade hidráulica, como no caso dos perfis de textura muito argilosa analisados, que apresentaram elevados valores de K_0 para ambas as profundidades, assim como os maiores índices de dispersão entre repetições.

Por outro lado, os valores de K_0 estimados que apresentaram a menor dispersão foram também os que apresentaram menor condutividade hidráulica, como é o caso do perfil 2, de textura argilosa, com $7,13 \text{ mm.h}^{-1}$ (50 cm); do perfil 5, com $7,2 \text{ mm.h}^{-1}$ (20 cm) e $1,23 \text{ mm.h}^{-1}$ (50 cm), com texturas franco-argilosa e franco-argilossiltosa, respectivamente; e do perfil 6, de textura franco-argiloarenosa, com $7,1 \text{ mm.h}^{-1}$ (50 cm).

Os valores de permeabilidade encontrados, segundo classificação apontada por Hillel (1998), estariam numa ordem de grandeza entre 10^{-7} a 10^{-5} m.s^{-1} , isto é, entre $3,6$ a 36 mm.h^{-1} . A título de comparação, a ordem de grandeza encontrada estaria relacionada à condutividade hidráulica saturada do silte e da areia. Contudo, a classificação proposta por Hillel (1998) diz respeito às classes granulométricas e não às classes texturais. Bielschowsky et al. (2012), por sua vez, ao analisarem a condutividade hidráulica *in situ* através do permeâmetro de Guelph, encontraram valores de K_0 para solos arenosos entre $126,36 \text{ mm.h}^{-1}$ (Neossolo Quartzarênico hidromórfico) e $446,4 \text{ mm.h}^{-1}$ (Neossolo Quartzarênico) e valores de K_0 entre $0,371 \text{ mm.h}^{-1}$ (Organossolo) e $0,486 \text{ mm.h}^{-1}$ (Argissolo Vermelho) para solos com percentuais de material fino (silte e argila), entre 40% e 50%.

Quanto aos solos da bacia do Marinheiro, verificou-se que os perfis que apresentaram maior condutividade hidráulica saturada - perfis 3 (LV), 4 (LV) e 8 (CH), foram também os mesmos que apresentaram os maiores valores de porosidade total e Macroporosidade, especialmente os perfis 3, 4 e 8. No perfil 8 (CH), a elevada permeabilidade está associada à elevada concentração de cascalhos na profundidade de 50 cm, que, em função do elevado tamanho, diminui a área superficial total disponível para a adesão.

O contrário também se mostrou válido, uma vez que o perfil de menor K_0 estimado para a bacia, perfil 5 (CY), apresentou a maior proporção de microporos na profundidade de 50 cm, o que oferece maior superfície de contato para as moléculas de água e, conseqüentemente, maior tendência à retenção, em

detrimento da condutividade. Tal relação pode ser mais bem vista na Tabela 5.

A fim de facilitar a discussão dos resultados de condutividade com outros trabalhos de caracterização, optou-se pela apresentação agrupada de solos da mesma classe taxonômica.

Os Argissolos analisados foram dois, o Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico nitossólico (PVA) e o Argissolo Amarelo Distrófico típico (PA). Destes, o perfil 1 foi o que apresentou maior condutividade hidráulica nas profundidades 1 e 2 (19,19 e 31,29 mm.h⁻¹, respectivamente). Os maiores valores neste perfil podem estar relacionados a sua textura mais arenosa, associada a uma elevada proporção de macroporos, em comparação aos perfis 2 e 7 (50 cm).

Dentre os Argissolos analisados, os perfis 2 e 7 apresentaram baixos valores de condutividade, especialmente na profundidade de 50 cm (7,13 e 3,53 mm.h⁻¹, respectivamente). Em tese, a diminuição da permeabilidade na transição do horizonte A para o horizonte B é esperada em função do incremento de argila no horizonte B. Entretanto, a grande variabilidade das repetições e a estruturação desse teor de argila no perfil não garante que essa hipótese seja válida.

Betim (2013) sugere cautela na apresentação de valores médios de K_0 para uma mesma classe pedológica, tendo em vista a grande variabilidade encontrada em um mesmo perfil. Silva et al. (2012), ao analisarem um Argissolo Amarelo Eutrófico abrupto, perceberam o decaimento de K_0 com o aumento da profundidade, acompanhado da redução do teor de areia, fato que aconteceu de maneira similar no perfil 2 (PVA) e parcialmente no perfil 7 (PA), cuja escolha prévia das profundidades a serem analisadas não foi suficiente para comparar diferentes horizontes identificados nesse perfil.

Bernardes (2005), ao buscar compreender o comportamento de K_0 através do permeâmetro de Guelph, encontrou grande variabilidade nos resultados e não conseguiu estabelecer correlação significativa com nenhuma propriedade física analisada. Este autor justifica tais resultados apontando que nem sempre os processos dinâmicos que regem o movimento de água no solo dependem de características utilizadas na separação de horizontes e sugere, ainda, que os ensaios de infiltração sejam realizados em pontos específicos para cada tipo de solo.

Elrick et al. (1989), na tentativa de solucionar o problema de variabilidade dos

dados obtidos com o PG, sugerem a aplicação de apenas uma carga hidráulica nos ensaios de infiltração, diferentemente do que foi feito aqui (aplicação de carga hidráulica dupla e sequencial).

Os Cambissolos avaliados, Cambissolo Flúvico Tb Eutrófico típico (CY), Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico (CX) e Cambissolo Húmico Distrófico típico (CH), perfis 5, 6 e 8, respectivamente, apresentaram diferenças significativas nos valores de condutividade hidráulica saturada.

O CY apresentou valores muito baixos de K_0 , sendo o menor valor médio estimado para a profundidade de 50 cm ($1,23 \text{ mm.h}^{-1}$). Este solo apresentou a maior redução de macroporos, assim como o maior incremento de silte na transição descensional das profundidades 1 e 2, dentre os Cambissolos analisados (Tabela 5). Nesse sentido, Ribeiro et al. (2007) identificaram relação diretamente proporcional entre macroporosidade e K_0 . Segundo Brandão et al. (2006) o silte, pela dificuldade de formar agregados estáveis e pelo seu tamanho, ao se deslocar para camadas mais profundas, pode entupir os macroporos do solo, reduzindo a condutividade hidráulica. Essa hipótese ganha consistência quando analisamos os valores de DMG e do percentual de agregados maiores que 2 mm do Perfil 5 (CY), os menores valores encontrados dentre a classe dos Cambissolos e demais classes caracterizadas (Tabela 4). Além disso, este perfil apresenta uma densidade do solo elevada ($1,57 \text{ g.cm}^{-3}$), assim como o menor valor de porosidade total dentre os solos analisados, $0,398 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$.

Os valores de K_0 do perfil 5 (CY) estimados para a profundidade de 20 cm refletem ainda as características pedogenéticas deste solo. Sua localização, na parte baixa da paisagem (planície de inundação), torna o processo de adição (de material aluvial) predominante em sua formação. Por fim, o conjunto de características desse perfil oferece grandes restrições para a infiltração e, consequentemente, para a capacidade de recarga do lençol.

O perfil 6 (CX) apresentou uma condutividade hidráulica saturada considerada intermediária na profundidade de 20 cm (23 mm.h^{-1}), assim como uma baixa condutividade na faixa de 50 cm ($7,1 \text{ mm.h}^{-1}$). Estes valores podem ser reflexo de alterações nas características físicas do perfil, como a redução de macroporos, acompanhada do aumento da densidade do solo, no sentido do aprofundamento, o que é coerente com a transição da estrutura prismática para maciça (Tabelas 3 e

5). Outra explicação para o adensamento desse perfil pode estar relacionada à redução significativa tanto do DMG, quanto do percentual de agregados maiores do que 2mm (Tabela 4).

Já o perfil 8 (CH) apresentou uma condutividade hidráulica superior em relação aos demais Cambissolos analisados, tanto na profundidade de 20 cm, quanto na de 50 cm (Tabela 5). A maior K_0 observada na profundidade de 20 cm provavelmente está associada ao caráter húmico do perfil, tendo em vista o elevado teor de MO (26,1 g. kg⁻¹) do mesmo. Já a K_0 estimada para a profundidade de 50 cm está relacionada à forte presença de cascalhos (percentual entre 70% e 80% em relação à TFSA), conferindo-lhe boa macroporosidade. Esse mesmo fator pode ser evidenciado pelo elevado DMG de 4,57 mm (Tabela 4).

Os Latossolos (LV) da bacia do Córrego Marinheiro (Perfis 3 e 4) apresentaram os maiores valores de condutividade hidráulica saturada (Tabela 5). O perfil 3 apresentou estimativa de K_0 de 46,13 e 43,03 mm.h⁻¹, respectivamente, para as profundidades de 20 cm e 50 cm. Já o perfil 4 apresentou valores estimados de 45,27 e 73,37 mm.h⁻¹, nessa mesma ordem.

Valores superiores de condutividade hidráulica já eram esperados para esses solos, tendo em vista que, em geral, os Latossolos, apresentam alta porosidade, estrutura microgranular e alta permeabilidade, mesmo quando apresentam altos teores de argila. No entanto, é difícil fazer generalizações seguras acerca do comportamento da condutividade hidráulica para uma mesma classe taxonômica. Betim (2013), ao analisar três Latossolos Vermelho-Amarelos de textura média a muito argilosa, evoluídos a partir de gnaisses, estimou valores muito heterogêneos de K_0 , porém inferiores a 2 mm.h⁻¹ e para profundidades superiores a 50 cm.

Os Latossolos analisados na bacia do Córrego Marinheiro são de textura muito argilosa, com teores superiores a 74%. Eles apresentam estrutura granular, porosidade total entre 0,599 e 0,705 cm³.cm⁻³, sendo que a Macroporosidade estimada no perfil 3 foi de 36,9% (20 cm) e de 46% (50 cm), enquanto no perfil 4, a macroporosidade foi de 57,3% (20 cm) e de 50,9% (50 cm) (Tabelas 3 e 5). Isto demonstra uma proporção equilibrada entre macroporos e microporos, o que confere a esses solos, além de boa permeabilidade, boa disponibilidade de água às plantas.

Os Latossolos estão presentes em boa parte do território brasileiro, são

marcados por um relevo intensamente modelado pela ação de agentes externos e por isso, são bem lixiviados e apresentam elevadas profundidades do horizonte B. Além disso, sua comum localização em áreas planálticas aplainadas confere a esta classe de solo elevado potencial para a agricultura mecanizada e para a recarga do lençol freático. O risco, contudo, de um manejo agrícola inadequado desses solos é o de danos a sua estrutura, capaz de comprometer tanto seu uso econômico, quanto ambiental.

Ferreira (2008), ao analisar um Latossolo Vermelho sob diferentes tipos de manejo, identificou correlação direta entre a K_0 e o percentual de macroporos. Segundo esse autor, o aumento dos macroporos estaria associado ao revolvimento do solo produzido pelo plantio convencional.

Espírito Santo (2011), por sua vez, ao comparar diferentes usos de um Latossolo Vermelho sob cerrado, identificou maior condutividade hidráulica em áreas de vegetação nativa em relação a solos cobertos por pasto e cultivo de milho. Na bacia do Córrego Marinheiro, o perfil 4, Latossolo Vermelho sob vegetação nativa, também apresentou maior K_0 , porém em área de Floresta Estacional Semidecidual, o que pode ser explicado pelo maior conteúdo de MO.

Marques et al. (2008), ao analisarem Latossolos amazônicos, observaram relação inversamente proporcional entre K_0 e as propriedades argila e densidade do solo. Já a situação dos Latossolos vermelhos da bacia do Córrego Marinheiro não foi a mesma. No perfil 3, houve redução da permeabilidade na transição de 20 cm para 50 cm (ainda que muito pequena). Enquanto isso, houve leve aumento no teor de argila e redução da densidade (Tabela 5), o que pode ser um indício de que a textura interferiu na K_0 mais do que a estrutura.

No perfil 4, o aumento significativo da permeabilidade, de 20 cm para 50 cm, foi acompanhado pelo aumento tanto do teor de argila, quanto da densidade, isto é, uma relação direta, indicando que a estrutura teve maior influência do que a textura neste caso. Um fator que pode ter auxiliado na estrutura grumosa, especialmente na faixa de 20 cm, é o caráter húmico identificado neste perfil.

Ferreira et al. (1999), em um importante trabalho sobre a mineralogia da fração argila de Latossolos da região sudeste do Brasil, chegaram a resultados similares no que diz respeito à correlação identificada entre a fração argila e condutividade hidráulica. A ausência de dados sobre mineralogia para os perfis aqui

analisados não nos permite avançar na relação entre mineralogia e macroestrutura. No entanto, vale destacar que a estrutura apontada na descrição morfológica para os dois Latossolos analisados foi a do tipo granular.

Neto e Fernandes (2005), ao analisarem Latossolos do noroeste paulista, perceberam correlação de K_0 com o teor de areia, especialmente de areia grossa. O teor de areia grossa teria contribuído para aumento da macroporosidade. Essa mesma situação foi constatada por Santos e Ribeiro (2000), diferentemente da situação aqui encontrada.

O Perfil 9 (Luvissolo) apresentou valores de condutividade hidráulica de $30,43 \text{ mm h}^{-1}$ na profundidade de 20 cm e de $6,1 \text{ mm.h}^{-1}$ na profundidade de 50 cm. A diferença nos valores pode estar relacionada ao maior teor de matéria orgânica ($39,3 \text{ g. kg}^{-1}$), à maior macroporosidade (39,5%) e à menor densidade do solo na profundidade de 20 cm (Tabelas 4 e 5).

Outra característica física com marcante variação entre as duas profundidades foi a estrutura, observada na descrição morfológica, sendo esta em blocos na camada mais superficial e prismática na profundidade inferior (Tabela 3).

Quanto à análise textural, a maior diferença entre as duas profundidades está no teor de areia, maior na superfície. Os teores de silte observados no perfil 9 são os maiores entre as classes analisadas, no entanto, são próximos se comparados entre si (51% e 55%), assim como os teores de argila (36% e 40%), respectivamente, nas profundidades de 20cm e 50 cm (Tabela 5). Solos com alto teor de silte apresentam alta instabilidade física, reduzida infiltração e porosidade. Segundo Brandão et al. (2006), o silte, pela dificuldade de formar agregados estáveis e pelo seu tamanho, ao se deslocar para camadas mais profundas, pode entupir os macroporos do solo, reduzindo a condutividade hidráulica. Essa hipótese ganha consistência quando analisamos a redução no percentual de agregados maiores que 2 mm e no percentual de macroporos em direção à profundidade 2 (Tabelas 4 e 5).

Dados de condutividade hidráulica saturada para a classe dos Luvissolos são escassos, devido principalmente à baixa representatividade dos solos no território brasileiro - os Luvissolos estão concentrados no norte e nordeste e ocupam uma área inferior a 3% do território nacional (EMBRAPA-AGEITEC, 2017).

O Nitossolo apresentou valores estimados de K_0 de $18,9 \text{ mm.h}^{-1}$ e $15,73 \text{ mm}$

h^{-1} nas profundidades de 20 cm e 50 cm, respectivamente. A redução da K_0 , considerando-se a elevada variabilidade dos resultados, pode ser desprezível, uma vez que valores de textura, densidade e porosidade também estão muito próximos uns dos outros, excetuando-se os valores de MO, superiores na superfície, o que pode ter contribuído para uma maior estabilidade dos agregados na profundidade de 20 cm (Tabelas 4 e 5). Outra explicação possível para a diferença na permeabilidade entre as duas camadas analisadas é a estrutura, caracterizadas como blocos subangulares e prismática, respectivamente nas profundidades de 20 cm e 50 cm (Tabela 3).

Nesse sentido, Cooper e Vidas-Torrano (2005) destacam o papel da interferência da forma e do grau de desenvolvimento da estrutura, assim como da abundância e desenvolvimento da cerosidade no comportamento físico-hídrico do horizonte B nítico. Estes mesmos autores observaram que blocos subangulares de grau forte ou moderado, com cerosidade moderada e abundante, e moderada e comum, apresentaram um menor desenvolvimento de macroporos e, conseqüentemente, uma menor condutividade hidráulica.

1.4.2. Potencial de recarga do lençol dos solos da bacia do Córrego Marinheiro

Para análise dos solos de maior ou menor potencial de recarga do lençol freático, foram estimados os valores de água gravitacional (AG), em $cm^3.cm^{-3}$ (Tabela 6).

Tabela 6. Valores de AG, em $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$, estimados para cada perfil e profundidade analisados na bacia do Córrego Marinheiro.

Perfil	Classe	Prof. (cm)	Volume de água gravitacional ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)			K_0 (mm.h-1)
			AG1	AG2	AG3	
1	PVA	20	0,211	0,233	0,28	19,19
		50	0,106	0,117	0,141	31,29
2	PVA	20	0,183	0,199	0,248	13,07
		50	0,196	0,206	0,236	7,11
3	LV	20	0,218	0,242	0,287	46,16
		50	0,262	0,299	0,344	43,02
4	LV	20	0,391	0,41	0,443	45,28
		50	0,332	0,356	0,391	73,39
5	CY	20	0,223	0,234	0,273	7,23
		50	0,081	0,089	0,117	1,24
6	CX	20	0,243	0,26	0,303	23
		50	0,163	0,18	0,215	7,08
7	PA	20	0,247	0,258	0,298	13,21
		50	0,176	0,186	0,222	3,51
8	CH	20	0,314	0,334	0,369	28,49
		50	0,152	0,158	0,166	56,35
9	TC	20	0,234	0,245	0,289	30,43
		50	0,174	0,182	0,209	6,09
10	NV	20	0,215	0,223	0,258	18,89
		50	0,222	0,23	0,261	15,74

Os perfis da bacia do Córrego Marinheiro analisados apresentaram o seguinte agrupamento: na profundidade de 20 cm, os perfis que apresentaram valores de K_0 inferiores a 21 mm.h^{-1} foram considerados de menor potencial de recarga. Valores acima de 26 mm.h^{-1} foram considerados de maior potencial. Na profundidade de 50 cm, por sua vez, valores médios de K_0 inferiores a 20 mm.h^{-1} foram considerados de menor potencial e superiores a 31 mm.h^{-1} , de maior potencial. Os perfis que apresentaram valores médios intermediários foram considerados de potencial intermediário, em uma comparação por profundidade.

Ao analisar em conjunto as duas profundidades quanto o potencial de recarga do solo -em função dos valores de K_0 e AG estimados – chegou-se ao seguinte resultado (Tabela 7).

Tabela 7. Perfis da Bacia do Córrego Marinheiro com maior potencial para a recarga do lençol freático, de acordo com os valores de K_0 e AG estimados.

Perfil	Classe	Prof.	K_0 médio	Potencial de recarga de acordo com o volume de AG ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)			Potencial de recarga geral do perfil
		cm	$\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$	AG ₁	AG ₂	AG ₃	
1	PVA	20	19,2	MENOR	MENOR	MENOR	INTERMEDIÁRIO
		50	31,27	MENOR	MAIOR	MAIOR	
2	PVA	20	13,07	MENOR	MENOR	MENOR	MENOR
		50	7,13	MENOR	MENOR	MENOR	
3	LV	20	46,13	MAIOR	MAIOR	MAIOR	MAIOR
		50	43,03	MAIOR	MAIOR	MAIOR	
4	LV	20	45,27	MAIOR	MAIOR	MAIOR	MAIOR
		50	73,37	MAIOR	MAIOR	MAIOR	
5	CY	20	7,2	MENOR	MENOR	MENOR	MENOR
		50	1,23	MENOR	MENOR	MENOR	
6	CX	20	23	INTER.	INTER.	INTER.	INTERMEDIÁRIO
		50	7,1	MENOR	MENOR	MENOR	
7	PA	20	13,2	MENOR	MENOR	MENOR	MENOR
		50	3,53	MENOR	MENOR	MENOR	
8	CH	20	28,53	MAIOR	MAIOR	MAIOR	MAIOR
		50	56,33	MAIOR	MAIOR	MAIOR	
9	TC	20	30,43	MAIOR	MAIOR	MAIOR	INTERMEDIÁRIO
		50	6,1	MENOR	MENOR	MENOR	
10	NV	20	18,9	INTER.	MENOR	MENOR	MENOR
		50	15,73	MENOR	MENOR	MENOR	

A caracterização físico-hídrica dos solos pode servir como uma importante ferramenta na orientação de tomada de decisões no âmbito da gestão de recursos hídricos. A caracterização da condutividade hidráulica e do conteúdo de água livre no solo realizados na bacia do Córrego Marinheiro aponta para um cuidado especial (uso e manejo) que se deve ter com os solos que apresentaram maior potencial de recarga, sendo eles os Latossolos Vermelhos (perfis 3 e 4) e o Cambissolo Húmico (perfil 8).

Os solos da bacia que apresentaram potencial intermediário foram o Argissolo Vermelho-Amarelo (perfil 1), o Cambissolo Háplico (perfil 6), o Luvisolo Crômico (perfil 9) e o Nitossolo Vermelho (perfil 10). Os solos, por sua vez, que apresentaram menor potencial de recarga foram o Argissolo Vermelho-Amarelo (perfil 2), o Cambissolo Flúvico (perfil 5) e o Argissolo Amarelo (perfil 7).

1.4.3.Capacidade de água disponível às plantas e parâmetros físicos.

Os valores de Capacidade de água Disponível (CAD), estimados para os solos analisados, permitem afirmar que há diferenças no armazenamento de água disponível às plantas, quando comparamos todos os solos da bacia do Córrego Marinho. Pode-se afirmar, ainda, que determinadas propriedades físicas do solo interferiram mais do que outras no volume de água armazenada no solo(Tabela 8).

Tabela 8.Valores de CAD estimados, em $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$, para os solos da bacia do Córrego Marinho, nas profundidades de 20 e 50 cm, acompanhados dos atributos físicos de maior correlação.

Perfil	Classe	Prof. cm	Argila %	Porosidade			CAD		
				Micro	Macro	Total $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$	CAD1	CAD2	CAD3
1	PVA	20	21	0,271	0,22	0,482	0,185	0,163	0,116
		50	25	0,321	0,128	0,427	0,229	0,218	0,195
2	PVA	20	47	0,418	0,182	0,602	0,249	0,233	0,184
		50	57	0,317	0,193	0,513	0,147	0,137	0,107
3	LV	20	75	0,366	0,215	0,583	0,146	0,121	0,076
		50	80	0,328	0,271	0,589	0,095	0,058	0,012
4	LV	20	74	0,298	0,395	0,689	0,069	0,05	0,017
		50	78	0,306	0,325	0,638	0,07	0,045	0,01
5	CY	20	34	0,319	0,2	0,542	0,191	0,179	0,141
		50	37	0,317	0,073	0,398	0,196	0,188	0,16
6	CX	20	26	0,293	0,257	0,536	0,183	0,165	0,123
		50	26	0,261	0,15	0,423	0,159	0,142	0,106
7	PA	20	37	0,245	0,267	0,492	0,118	0,107	0,068
		50	37	0,28	0,177	0,455	0,156	0,146	0,11
8	CH	20	62	0,285	0,293	0,599	0,082	0,062	0,027
		50	73	0,269	0,152	0,42	0,056	0,05	0,042
9	TC	20	36	0,346	0,229	0,58	0,184	0,173	0,129
		50	40	0,298	0,149	0,472	0,135	0,127	0,1
10	NV	20	40	0,336	0,197	0,552	0,173	0,164	0,13
		50	42	0,33	0,252	0,551	0,159	0,151	0,119

1.4.4.Curvas de retenção de água no solo (CAD)

As curvas de retenção de água no solo (CRA), modeladas nas profundidades de 20 cm e 50 cm, encontram-se todas disponíveis no ANEXO I (Figuras 31-50).A análise dos resultados e as discussões estão discriminadas, a seguir, por classe taxonômica.

Os Argissolos da bacia analisados estão entre os perfis que apresentaram os maiores valores de CAD estimados, com destaque para o perfil 2 na profundidade de 20 cm e para o perfil 1 na profundidade de 50 cm.

Uma resposta que é geralmente esperada dos Argissolos, com relação ao armazenamento de água, é que o horizonte B, em função da maior concentração de argila, favoreça uma maior Capacidade de Água Disponível (CAD) em relação ao horizonte sobrejacente. No caso dos Argissolos analisados na bacia do Córrego Marinho, o Argissolo Vermelho Amarelo (perfil 1) e o Argissolo Amarelo (perfil 7) seguiram esse padrão, no entanto, o Argissolo Vermelho Amarelo (perfil 2) teve um comportamento inverso (Figuras 20 e 21).

De acordo com a Tabela 8, um atributo que também teve um comportamento inverso no perfil 2 e apresentou forte correlação negativa com a CAD foi o volume de macroporos. Esse Argissolo Vermelho Amarelo apresentou volume macroporos superior na profundidade de 50 cm ($0,366\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$) em relação à profundidade de 20 cm ($0,317\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$), diferente dos perfis 1 e 7.

Portugal et al. (2007) estimaram valores de CAD entorno de $0,207\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ na profundidade de 20 cm e de $0,154\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ na profundidade de 40 cm. Tais valores são referentes a Argissolos cobertos por pastagem, mesma cobertura de todos os Argissolos aqui analisados. Nota-se que são valores próximos daqueles estimados para os perfis 1 e 2 na profundidade de 20 cm. Já os valores estimados para a camada mais profunda se aproximam dos valores obtidos para os perfis 2 e 7 (Figura 20).

Portugal et al. (2007) encontraram nas áreas de pastagens os maiores valores de CAD. A justificativa apresentada foi a maior concentração de argila e MO, situação similar na profundidade de 20 cm para o Argissolo Vermelho-Amarelo (perfil 2), que apresentou maior CAD e maiores teores de argila e MO (Tabelas 4 e 8). Já em relação à profundidade de 50 cm, o Argissolo Vermelho-Amarelo (Perfil 1) foi o que apresentou a maior CAD. Entretanto, a textura e o conteúdo de MO não parecem ter influenciado tal resposta e, sim, a menor taxa de macroporos encontrada para os Argissolos analisados da bacia do Córrego Marinho (Tabela 8).

Souza (2004), ao analisar um Argissolo amarelo do norte fluminense, estimou valores de CAD_2 inferiores aos estimados pelo Perfil 7, de $0,080\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ na profundidade de 20 cm e de $0,084\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ na profundidade de 50 cm. O mesmo

autor concluiu que a estrutura teve maior influência nas propriedades físicas do solo.

Spera et al. (1999) encontraram valores superiores de CAD que variaram entre $0,461 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ e $0,545 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ para Argissolos localizados em mata de galeria não inundável em áreas de cerrado. Uma justificativa plausível para a superioridade dos valores de CAD encontrados pode estar relacionada aos maiores percentuais de microporos (67% a 73%), em relação aos valores encontrados para os Argissolos da bacia do Marinho (45,8% a 70%).

Os volumes de CAD estimados para os Cambissolos da bacia do Córrego Marinho estão acima da média, com exceção do perfil 8 (CH), que apresentou uma baixa CAD. Os perfis 5 (CY) e 6 (CX) tiveram bastante semelhança entre si, como pode ser verificado nas curvas de retenção. Os elevados valores de CAD dos perfis 5 e 6 podem estar relacionados aos menores teores de argila e ao maior volume de macroporos, ambos correlacionados negativamente com a CAD (Tabela 8). O Perfil 8 (CH) apresentou uma baixa retenção em ambas profundidades analisadas.

Portugal et al. (2008) encontraram valores de CAD para Cambissolos da zona da mata mineira que variaram entre $0,120 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ e $0,190 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$, na profundidade de 20 cm, para diferentes coberturas. O Cambissolo Flúvico (Perfil 5) da bacia do Marinho se encontra em uma área de cultivo de milho e sorgo. O Cambissolo Háptico, por sua vez, numa área de pastagem.

O perfil 5, na profundidade de 20 cm, teve um CAD_2 estimado (mesma CC do trabalho de referência) de $0,179 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ e o perfil 6 um CAD_2 de $0,165 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$, enquanto os Cambissolos da zona da mata mineira apresentaram valores muito próximos de $0,170 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$, $0,174 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ e $0,190 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$, respectivamente, para solos cobertos por cultivos de laranja, seringueira e pastagem. Os valores do perfil 8 foram os menores para essa profundidade, em torno de $0,062 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$.

Quanto à profundidade subjacente, os perfis 5 e 6 apresentaram valores de CAD_2 de $0,188 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ e $0,142 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$, respectivamente. Portugal et al. (2008) encontraram valores entre $0,158 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ e $0,189 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ para áreas de cultivo e $0,169 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ para área de pastagem. Godoy e Lopes-Assad (2002), por sua vez, ao analisarem Cambissolos da bacia do Rio Jardim (DF), encontraram valores inferiores de CAD em torno de $0,020 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$. Souza (2004) estimou valores inferiores de CAD_2 para um Cambissolo Háptico Distrófico típico no norte fluminense, na faixa de

0,072cm³.cm⁻³ na profundidade de 20 cm e de 0,128 cm³.cm⁻³.

Os valores de CAD₁ estimados para a classe dos Latossolos estão entre os menores quando comparado aos demais solos da bacia do Marinheiro, nas duas profundidades analisadas (Tabela 8). Quando comparados entre si, os dois Latossolos apresentaram curvas bastante semelhantes na profundidade de 50 cm, apesar de a CAD₁ ser levemente superior no perfil 3. Já na profundidade de 20 cm, nota-se uma maior retenção de água no perfil 3 (0,146 cm³.cm⁻³) em relação ao perfil 4 (0,069 cm³.cm⁻³).

A textura dos dois Latossolos Vermelhos analisados, nas duas profundidades, foi classificada como muito argilosa, o que elevou o volume de água retida na faixa do PMP e tensões superiores em função do aumento relativo da microporosidade (CASTRO et al., 2010; KLEIN; LIBARDI, 2002). O volume de água retido no PMP para os Latossolos é superior a todos os demais solos analisados na bacia do Córrego Marinheiro.

Os percentuais de macroporosidade tiveram nítida influência inversa na CAD. O Perfil 4 (LV) apresentou os maiores valores de macroporos estimados dentre os perfis da bacia e apresentou, também, os menores valores de CAD (Tabela 8).

Beutler et al. (2002) encontraram valores de CAD₁ na faixa de 0,079 cm³.cm⁻³ para solos cobertos com cana-de-açúcar e algodão, com alta correlação positiva entre Ds e CAD. Valores próximos, porém, inferiores aos encontrados para os Latossolos da bacia do Córrego Marinheiro, que por sua vez, também tiveram correlação positiva com a Ds, embora pequena.

Maia (2016) estimou valores médios de CAD₂ para Latossolos Vermelhos em torno de 0,107cm³.cm⁻³. Esses mesmos valores apresentaram baixa correlação negativa com o teor de argila e baixa correlação positiva com a Ds. Cavalieri et al. (2011), ao avaliarem a qualidade física de um Latossolo vermelho argiloso no Mato Grosso do Sul, encontraram valores de CAD₂ entre 0,11 cm³.cm⁻³ e 0,12 cm³.cm⁻³, aproximadamente, na faixa de 0 a 20 cm de profundidade, com significativa correlação com a Ds.

Os valores de CAD₂ estimados para o Luvisolo Crômico (perfil 9) ficaram acima da média na profundidade de 20 cm (0,173 cm³.cm⁻³) e na média na profundidade de 50 cm (0,120 cm³.cm⁻³), quando comparados aos demais solos analisados na bacia do Córrego Marinheiro (ANEXO I). Tendo em vista os valores de

CAD₃ na profundidade de 20 cm, o volume estimado foi de 0,129 cm³.cm⁻³, enquanto que na profundidade de 50 cm o volume estimado foi de 0,100 cm³.cm⁻³.

Luvissolos crômicos de São José do Belmonte-PE, também de textura argilosa, apresentaram valores de CAD₃ inferiores, entre 0,108 cm³.cm⁻³ e 0,110 cm³.cm⁻³ na faixa de 20 cm de profundidade, enquanto na faixa dos 50 cm, os valores de CAD₃ foram um pouco superiores e variaram entre 0,104 cm³.cm⁻³ e 0,112 cm³.cm⁻³ (OLIVEIRA, 2007).

A variável que pode ter interferido nessa pequena diferença é o teor de argila, que apresentou correlação negativa com a CAD. Quando comparados a outros trabalhos, os teores de argila do Luvisolo localizado na bacia do córrego Marinho, 35,3% e 38,6%, respectivamente nas profundidades de 20 cm e 50 cm, ficaram próximos e abaixo dos teores de argila apresentados por Oliveira (2007), de 36% e 40% e abaixo dos teores de argila estimados para os Luvisolos do semiárido pernambucano (40% e 58%).

O Nitossolo Vermelho está entre os perfis que apresentaram valores de CAD intermediários e pouco acima da média estimada na bacia do Córrego Marinho (Figuras 27 e 28, ANEXO I), o que dificulta estabelecer qual atributo físico mais influenciou tal comportamento. Contudo, percebe-se que o perfil 10 também apresentou valores intermediários de Ds, teor de argila e macroporosidade.

Quando comparado aos valores de CAD estimados na literatura, percebe-se que o Nitossolo Vermelho da bacia do córrego Marinho teve um comportamento bem próximo dos demais. Morales (2014), ao analisar Nitossolos Vermelhos Distróficos típicos com diferentes tipos de preparo em Vila Nova do Sul-RS, estimou valores de CAD₂ entre 0,17 cm³.cm⁻³ e 0,20 cm³.cm⁻³ na profundidade de 20 cm, assim como, valores entre 0,13 cm³.cm⁻³ e 0,15 cm³.cm⁻³ na profundidade de 50 cm. Godoy e Lopes-Assad (2002), por sua vez, estimaram valores de CAD em torno de 0,35 cm³.cm⁻³.

Lima (2016) estimou valores de CAD para solos cultivados com cana-de-açúcar, sob dois tipos distintos de preparos e chegou a valores de CAD que variaram entre 0,8 cm³.cm⁻³ e 1,3 cm³.cm⁻³ na profundidade de 20 cm e valores de CAD de 1,0 cm³.cm⁻³ para a profundidade de 50 cm. A variação dos valores de CAD, segundo a autora, estaria sendo influenciada pelo tipo de preparo através de alterações na macroporosidade e na porosidade total, variáveis essas que também

tiveram significativa correlação negativa com a CAD neste trabalho.

1.5 CONCLUSÃO

As diferentes classes de solos avaliadas na bacia do córrego Marinheiro apresentaram valores médios distintos quanto à condutividade hidráulica saturada. Entretanto, houve grande variabilidade de alguns valores estimados para uma mesma classe. Isso indica a necessidade de um aumento do campo amostral, assim como uma caracterização adicional da estrutura do solo.

Os solos da bacia do Córrego Marinheiro que apresentaram os maiores valores de K_0 , assim como os maiores potenciais de recarga do lençol freático foram, em ordem decrescente: o LATOSSOLO VERMELHO Distrófico húmico (Perfil 4), o LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico (Perfil 3) e o CAMBISSOLO HÚMICO Distrófico típico (Perfil 8). Os perfis que apresentaram o menor potencial foram, em ordem decrescente: o CAMBISSOLO FLÚVICO (Perfil 5), o ARGISSOLO AMARELO (Perfil 7), o ARGISSOLO VERMELHO AMARELO (Perfil 2) e o NITOSSOLO VERMELHO (Perfil 10).

As diferentes classes de solos analisadas apresentaram valores distintos de CAD. Tais valores variam em profundidade e estão relacionados principalmente a parâmetros físicos como teor de argila, porosidade total, macroporosidade e microporosidade.

Os solos analisados da bacia do Córrego Marinheiro que apresentaram os maiores volumes médios de água disponível às plantas, na profundidade de 20 cm, foram, em ordem decrescente: o PVA (Perfil 2); o CY (Perfil 5); o TC (Perfil 9); o CX (Perfil 6) e o NV (Perfil 10), sendo esses dois últimos muito próximos entre si. Na Profundidade de 50 cm, os solos que disponibilizam maior volume médio de água disponível às plantas foram, em ordem decrescente: o PVA (Perfil 1); CY (Perfil 5); o NV (Perfil 10); o PA (Perfil 7) e o CX (Perfil 6).

CAPÍTULO 2

Funções de pedotransferência: teste e elaboração de modelos de predição

2.1 INTRODUÇÃO

A caracterização direta de parâmetros físico-hídricos ou hidráulicos como a condutividade hidráulica saturada (k_0) e a capacidade de água disponível (CAD) depende de uma série de análises em laboratório e em campo que, em geral, são demoradas e onerosas. Contudo, o comportamento de tais parâmetros pode ser estimado estatisticamente, a partir de outras propriedades físicas altamente correlacionadas a estas.

Essa possibilidade preditiva indireta tem sido cada vez mais considerada nos trabalhos de caracterização físico-hídrica, através do uso de modelos matemáticos de predição ou de funções de pedotransferência (FPT), também conhecidas como pedofunções ou *pedotransferfunctions* (PTF). O termo *PedotransferFunction* (PTF), segundo Stumpp (2009), foi criado por Bouma e Van Lanem, em 1987.

Funções de pedotransferência são equações capazes de estimar determinados parâmetros físicos de difícil obtenção – como as propriedades de retenção e condutividade hidráulica, a partir de parâmetros de mais fácil obtenção (BUDIMAN, 2003; OLIVEIRA, 2002; PACHEPSKY; RAWLS, 1999).

A avaliação dessa possível correlação entre propriedades hidráulicas e demais parâmetros físicos é geralmente realizada através de análises estatísticas de regressão linear múltipla ou por outros métodos estatísticos. A escolha da análise estatística mais adequada, por sua vez, depende de fatores como o tamanho do conjunto de amostras analisadas e, ainda, do número e dos tipos de parâmetros com os quais se busca identificar alguma correlação existente.

As funções de pedotransferência, quando bem ajustadas e validadas, possibilitam estabelecer predições assertivas quanto ao comportamento de determinadas propriedades hidráulicas do solo. O conhecimento dessas propriedades é de grande importância para o conhecimento das limitações e das potencialidades de cada tipo de solo. Tais informações são capazes de dar suporte a projetos de irrigação, drenagem e, ainda, de auxiliar na definição dos melhores tipos de uso e manejo para cada tipo de solo, visando sua conservação e a conservação da água.

A elaboração dessas funções, no entanto, não é algo trivial, pois depende de uma série de testes estatísticos complexos, que variam de acordo com o conjunto de variáveis e com o número de amostras disponíveis. Em função disso, alguns *softwares* de estatística e alguns bancos de dados contendo parâmetros físicos e físico-hídricos estão sendo cada vez mais utilizados.

Os primeiros trabalhos envolvendo pedofunções que correlacionaram teor de água e textura foram realizados no início do século XX (BRIGGS; MCLANE, 1907; BRIGGS; SHANTZ, 1912).

Os principais tipos de FPT's encontrados na literatura se basearam em métodos de regressão linear múltipla (mais utilizado), regressões não lineares estendidas ou redes neurais artificiais, dentre outros (COSTA, 2012).

No Brasil, têm sido crescentes as pesquisas que vêm trabalhando com modelos de pedotransferência (OLIVEIRA; COSTA, 2005; OLIVEIRA et al., 2005; SANTOS et al., 2005).

Entretanto, o número de bancos de dados no país que contém informações sobre os parâmetros físico-hídricos ainda é pequeno. Em consequência disso, a montagem de modelos adaptados à realidade dos solos tropicais torna-se mais complicada, uma vez que a maior parte das informações disponíveis advém de solos formados sob clima temperado (WÖSTEN; PACHEPSKY, 2001).

A aplicação dessas funções em solos de clima tropical é problemática, tendo em vista as peculiaridades de mineralogia e estrutura desses solos (TOMASELLA et al., 2000). Esse fato só vem salientar a necessidade de se produzir funções de pedotransferência voltadas para a compreensão dos solos tropicais.

No Brasil, trabalhos com funções de pedotransferência são relativamente recentes e surgem a partir da década de 80 (ARRUDA et al., 1987; BERNOUX et al. 1998; MINASNY; HARTEMINK, 2011; OLIVEIRA et al, 2002; REICHERT, 2009; SANTOS et al., 2013; TOMASELLA; HOODNETT, 1997; TOMASELLA et al., 2000).

Dentre as FPT's desenvolvidas para solos brasileiros podemos destacar as propostas por Michelon et al. (2010) e Oliveira et al. (2002) (Tabela 9). Michelon et al. (2010) adotaram metodologia estatística semelhante à adotada neste trabalho, assim como um extenso banco de dados contendo parâmetros físicos de solos do Rio Grande do Sul. Oliveira et al. (2002), por sua vez, além de metodologia

estatística semelhante, propôs modelos a partir de variáveis dependentes iguais às utilizadas nos modelos propostos nesta pesquisa.

Tabela 9. Pedofunções de referência de solos brasileiros selecionadas na literatura.

FPT'S DE REFERÊNCIA PRODUZIDAS PARA SOLOS BRASILEIROS		
SANTA MARIA-RS - MICHELON et al. (2010)	R ²	EMQ ¹
CC3 = - 0,0789 + 0,0362(Ds) + 1,001 (microporosidade) – 0,0004 (AF)	0,93	0,0115
PMP = - 0,1974 + 0,1093 (Dp) + 0,3050 (macrop.) + 0,0011 (silte) + 0,0024 (arg)	0,81	0,0230
PERNAMBUCO – OLIVEIRA et al. (2002)	R ²	EPE
CAD3 = - 0,000021 (areia) + 0,000203 (silte) + 0,000054 (arg) + 0,021656 (Ds)	0,89	0,0244

¹EMQ = Erro Médio Quadrático, método estatístico que serve para minimizar a soma dos quadrados dos desvios (erros); ²EPE = Erro Padrão de Estimativa ou Erro Padrão, auxilia a verificar a confiabilidade da média amostral calculada, medindo a variação entre uma média amostral e uma média da população.

Assim, este trabalho teve como objetivo montar e testar algumas funções de pedotransferência, no intuito de estimar a CAD e a K₀ dos solos da bacia do Córrego Marinheiro em Sete Lagoas-MG.

2.2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.2.1. Área de Estudo

A bacia do Córrego Marinheiro está inserida na sub-bacia do ribeirão Jequitibá, por sua vez, pertencente à bacia hidrográfica do rio das Velhas, afluente do rio São Francisco. Localizada na região central do Estado de Minas Gerais, a 70 Km da capital, Belo Horizonte está situada na zona periurbana do município de Sete Lagoas-MG. A bacia do Marinheiro encontra-se a sudeste da mancha urbana de Sete Lagoas e a oeste do município de Prudente de Moraes (Figura 20).

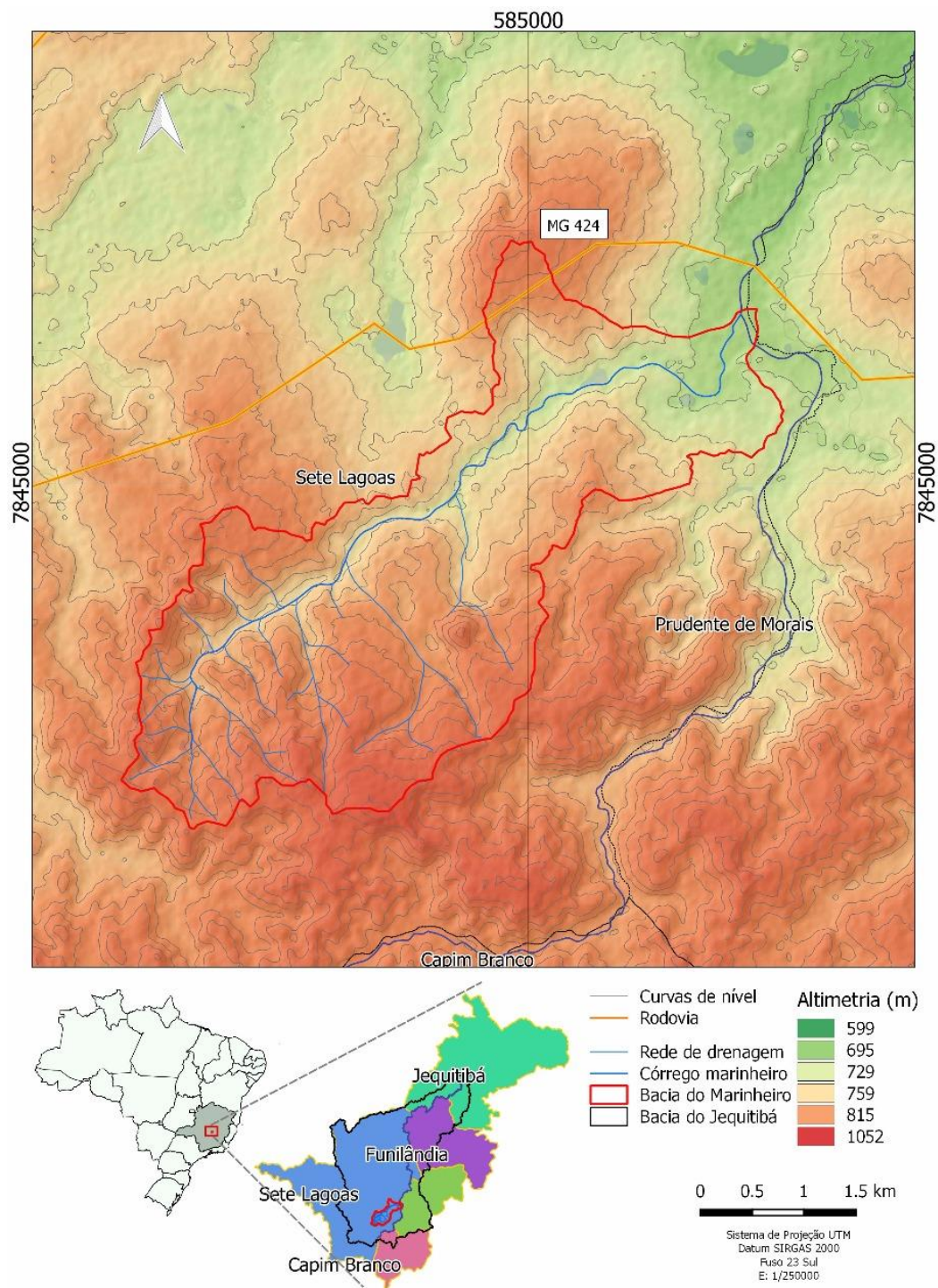


Figura 20. Mapa de localização da bacia do Córrego Marinho, município de Sete Lagoas-MG. Fonte: Oliveira (2016).

Ela encontra-se inserida na depressão São Franciscana e apresenta relevo marcado pela presença de colinas suaves côncavo-convexas, com variação altimétrica na faixa de 700m a 800m (ÁLVARES, 2008).

Seu baixo e médio cursos se encontram em um domínio geomorfológico inferior, constituído por metacalcários da Formação Sete Lagoas, com presença de feições como paredões, sumidouros e cavernas (FILHO et al., 2004).

A geologia local é representada por litotipos do grupo Bambuí originário de sedimentação carbonática e pelítica, representados pela Formação Sete Lagoas (Membros Lagoa Santa e Pedro Leopoldo) e pela Formação Serra de Santa Helena, sobrepostas ao embasamento gnáissico-migmatítico (RIBEIRO, 2003). Segundo Pessoa (1996), os litotipos presentes no membro Pedro Leopoldo localizados a sudeste de Sete Lagoas são formados por calcários de cor cinza a cinza-escuro, com intercalações mais escuras de metapelito, assim como interdigitações de calcários ainda mais escuros, com deformação branda do tipo interestratal. De acordo com Ribeiro et al. (2003), o membro Lagoa Santa sobrepõe o membro Pedro Leopoldo através de falhas de deslocamento onde geralmente se observa grande ocorrência de veios de calcita/quartzo. As rochas encontradas nesse membro são calcarenito, espatitos e calcilutitos (MACHADO, 2011).

Existe uma grande variabilidade de solos na bacia, com a presença das classes dos Neossolos, Cambissolos, Chernossolos, Luvissolos, Gleissolos, Nitossolos, Argissolos e Latossolos (OLIVEIRA, 2016).

O clima regional predominante é o tropical de altitude (Cwb), segundo Köppen (1936), com chuvas no verão, mais concentradas entre os meses de outubro e março. Já entre os meses de abril e agosto, predominam temperaturas mais baixas que coincidem com período de estiagem.

Para a bacia do Córrego Marinho Monteiro (2016) identificou quatro unidades climáticas diferentes, influenciadas pela cobertura do solo, tipo de vegetação e relevo. O autor identificou influência da expansão urbana no microclima da bacia.

Quanto à cobertura vegetal nativa da área, há grande predominância do Cerrado, especialmente os subtipos campos e cerrado típico. Outros tipos vegetacionais que podem ser encontrados na área são as matas de galeria e ciliar com características de Floresta Estacional Semidecidual e Mata Seca (Floresta Decídua) sob afloramento de calcário.

O nível de alteração da cobertura vegetal na área da bacia hidrográfica do Ribeirão Jequitibá (bacia que engloba a bacia do Marinho) é significativa, sendo

maior que 50%. Essa alteração é marcada por um histórico de ocupação associado a atividades agropecuárias, à exploração da madeira nas áreas de Cerrado, e, mais recentemente, a atividades como o cultivo do eucalipto (CHAVES, 2005).

Em trabalho sobre o uso e ocupação da bacia, Santos (2016) identificou áreas onde se destacam atividades de agricultura irrigada, pastoreio e silvicultura, além de dois grupos distintos de vegetação (de porte arbóreo baixo e rasteiro e de porte médio e alto), além de áreas urbanas incipientes no extremo noroeste e nordeste da bacia.

Além do predomínio de médias propriedades rurais, nesta mesma bacia estão situados o Centro Nacional de Pesquisas de Milho e Sorgo – CNPMS (Embrapa Milho e Sorgo), o campus Sete Lagoas da Universidade Federal de São João Del Rey e áreas urbanas e industriais recentes, oriundas da expansão urbana do município de Sete Lagoas.

2.2.2. Metodologia

Para a elaboração das pedofunções utilizou-se um conjunto de dados envolvendo propriedades químicas, físicas e físico-hídricas de dez perfis de solos classificados como: ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Eutrófico nitossólico (P1); ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Eutrófico nitossólico (P2); LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico (P3); LATOSSOLO VERMELHO Distrófico húmico (P4); CAMBISSOLO FLÚVICO Tb Eutrófico típico (P5); CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico (P6); ARGISSOLO AMARELO Distrófico típico (P7); CAMBISSOLO HÚMICO Distrófico típico (P8); LUVISSOLO CRÔMICO Pálico típico (P9) e NITOSSOLO VERMELHO Eutrófico típico (P10) (Oliveira, 2016).

Os dados referentes às propriedades químicas (CTC, MO e ΔpH) foram oriundos de Oliveira (2016) e os dados referentes às propriedades físicas e físico-hídricas elaborados por Amaral et al. (2018) (Tabelas 10e 11).

A escolha dos modelos de referência levou em consideração FPTs que usaram variáveis caracterizadas neste trabalho e que foram elaboradas para prever o comportamento físico-hídrico de solos brasileiros. Assim, foram utilizados, como referência, os modelos propostos por Michelonet al. (2010) e por Oliveira et al. (2002).

Propôs-se então, para este trabalho, dois grupos de pedofunções – Grupo 1 e Grupo 2. Ambos tiveram como variáveis preditas (ou de resposta) os parâmetros físico-hídricos (ou hidráulicos) condutividade hidráulica saturada (K_0) e Capacidade de Água Disponível às plantas (CAD). Esses grupos diferiram entre si quanto às variáveis dependentes. O primeiro grupo teve 21 variáveis dependentes e o segundo grupo teve 15 variáveis. Deste modo, as propriedades consideradas como variáveis dependentes de entrada no Grupo 1 foram: teor de argila; teor de silte; teor de areia; areia grossa; areia fina; diâmetro médio geométrico (DMG); percentual de macroagregados; percentual de microagregados; percentual de agregados maior do que 2 mm; conteúdo de matéria orgânica (MO); CTC; ΔpH , Ds; Dp; porosidade total, macroporosidade, microporosidade, capacidade de campo (CC1, CC2, CC3), e PMP.

Visando tornar os modelos de predição mais práticos, para o Grupo 2 foram excluídas as análises consideradas mais caras, demoradas e de maior dificuldade de execução (CC1, CC2, CC3, macroporosidade, microporosidade e PMP).

Tabela 10. Parâmetros físicos medidos

ID. Perfil	Prof.	Fração areia (%)		Granulometria (%)			Agregados				Densidade (g.cm ⁻³)	
		Grossa	Fina	Areia	Silte	Argila	DMG	Micro (< 0,25mm)	Macro (> 0,25mm)	% > 2mm	Dp	Ds
P1	20 cm	44,33	16,02	60,35	16,59	23,06	3,14	3,95	96,05	78,55	2,65	1,31
	50 cm	29,02	9,31	38,33	18,17	43,49	1,21	11,97	88,03	35,78	2,52	1,48
P2	20 cm	15,54	4,30	19,84	41,27	38,89	4,25	2,58	97,42	94,34	2,42	1,05
	50 cm	8,87	2,83	11,70	42,53	45,77	2,60	5,77	94,23	69,84	2,63	1,32
P3	20 cm	8,77	3,06	11,84	23,89	64,27	2,75	6,15	93,85	73,67	2,69	1,12
	50 cm	11,09	3,88	14,97	45,58	39,46	1,45	18,85	81,15	56,57	2,13	0,96
P4	20 cm	8,14	3,26	11,40	62,13	26,47	3,70	3,19	96,81	86,64	2,41	0,76
	50 cm	9,62	3,68	13,30	14,06	72,64	1,58	12,24	87,76	53,37	2,60	0,92
P5	20 cm	22,10	5,74	27,84	34,42	37,74	1,31	10,82	89,18	38,69	2,57	1,21
	50 cm	1,20	8,04	9,23	47,19	43,57	1,31	11,54	88,46	36,76	2,42	1,57
P6	20 cm	45,73	12,78	58,51	13,16	28,33	3,33	2,42	97,58	79,89	2,41	1,16
	50 cm	43,94	14,96	58,90	19,81	21,29	1,70	9,54	90,46	52,92	2,56	1,48
P7	20 cm	33,17	12,38	45,55	18,10	36,35	3,08	3,38	96,62	77,70	2,45	1,36
	50 cm	29,26	9,72	38,98	13,20	47,82	1,22	7,37	92,63	31,25	2,57	1,45
P8	20 cm	16,48	6,56	23,04	15,79	61,17	4,67	0,00	100,00	97,28	2,53	0,95
	50 cm	17,37	5,28	22,64	16,41	60,95	4,57	0,00	100,00	93,98	2,48	2,17
P9	20 cm	8,31	6,56	14,87	49,77	35,36	4,21	1,17	98,83	91,34	2,46	1,06
	50 cm	4,85	4,46	9,31	52,07	38,62	0,94	14,75	85,25	25,59	2,65	1,40
P10	20 cm	7,08	8,75	15,83	49,57	34,60	4,15	2,09	97,91	91,82	2,45	1,22
	50 cm	5,74	6,10	11,85	47,12	41,03	2,70	4,49	95,51	67,41	2,53	1,23

Tabela 11. Parâmetros físico-hídricos medidos

ID. PERFIL	PROF.	POROSIDADE (cm³.cm⁻³)			UMIDADE (cm³.cm⁻³)							K ₀ (mm.h ⁻¹)
		MICRO	MACRO	TOTAL	CC ₁ (-6KPA)	CC ₂ (-10KPA)	CC ₃ (-33KPA)	PMP (-1500kPa)	CAD ₁	CAD ₂	CAD ₃	
P1	20 cm	0,271	0,220	0,482	0,271	0,249	0,202	0,086	0,185	0,163	0,116	19,19
	50 cm	0,321	0,128	0,427	0,321	0,310	0,287	0,092	0,229	0,218	0,195	31,29
P2	20 cm	0,418	0,182	0,602	0,418	0,402	0,353	0,170	0,249	0,233	0,184	13,07
	50 cm	0,317	0,193	0,513	0,317	0,308	0,277	0,170	0,147	0,137	0,107	7,11
P3	20 cm	0,366	0,215	0,583	0,366	0,341	0,296	0,220	0,146	0,121	0,076	46,16
	50 cm	0,328	0,271	0,589	0,328	0,291	0,245	0,233	0,095	0,058	0,012	43,02
P4	20 cm	0,298	0,395	0,689	0,298	0,279	0,246	0,229	0,069	0,050	0,017	45,28
	50 cm	0,306	0,325	0,638	0,306	0,281	0,246	0,236	0,070	0,045	0,010	73,39
P5	20 cm	0,319	0,200	0,542	0,319	0,308	0,270	0,128	0,191	0,179	0,141	7,23
	50 cm	0,317	0,073	0,398	0,317	0,309	0,281	0,121	0,196	0,188	0,160	1,24
P6	20 cm	0,293	0,257	0,536	0,293	0,275	0,233	0,110	0,183	0,165	0,123	23,00
	50 cm	0,261	0,150	0,423	0,261	0,244	0,208	0,102	0,159	0,142	0,106	7,08
P7	20 cm	0,245	0,267	0,492	0,245	0,234	0,195	0,127	0,118	0,107	0,068	13,21
	50 cm	0,280	0,177	0,455	0,280	0,270	0,234	0,124	0,156	0,146	0,110	3,51
P8	20 cm	0,285	0,293	0,599	0,285	0,265	0,230	0,203	0,082	0,062	0,027	28,49
	50 cm	0,269	0,152	0,420	0,269	0,263	0,254	0,213	0,056	0,050	0,042	56,35
P9	20 cm	0,346	0,229	0,580	0,346	0,335	0,291	0,162	0,184	0,173	0,129	30,43
	50 cm	0,298	0,149	0,472	0,298	0,290	0,263	0,163	0,135	0,127	0,100	6,09
P10	20 cm	0,336	0,197	0,552	0,336	0,328	0,294	0,164	0,173	0,164	0,130	18,89
	50 cm	0,330	0,252	0,551	0,330	0,322	0,290	0,171	0,159	0,151	0,119	15,74

Para análises das variáveis foram utilizadas diferentes técnicas estatísticas. Análise descritiva: média, mediana e desvio padrão; Análise de correlação de Pearson (PEARSON, 1892), regressão linear múltipla (WONNACOTT; WONNACOTT, 1981); métodos de seleção de modelos—realização do teste de análise de variância ANOVA, com $P\text{-valor} < 0,05$ (FISHER; MACKENZIE, 1923) e aplicação do Critério de Informação de AKAIKE (BOZDOGAN, 1987), assim como Erro Médio Quadrático—EMQ. Utilizou-se para tal o software R (R Core team 2015), versão 3.2.5.

As variáveis físicas preditoras que apresentaram baixa correlação e significância com as variáveis hidráulicas preditas foram descartadas na composição dos modelos. Sendo assim, apenas as variáveis que apresentaram maior interferência no comportamento hidráulico foram consideradas para a elaboração das funções de regressão múltipla. Variáveis de entrada muito correlacionadas entre si, como valores percentuais complementares, como, por exemplo, a microporosidade e a macroporosidade, tiveram uma das variáveis desconsideradas para entrar nas funções.

Para avaliação dos modelos preditivos propostos, foram analisados os coeficientes de determinação dos modelos (R^2), que explicam o quanto uma variável predita pode ser explicada por um conjunto de regressores ou variáveis preditoras.

Para comparar os resultados dos modelos propostos com modelos encontrados na literatura, optou-se pelo cálculo do Erro Médio quadrático (EMQ).

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1. Análise descritiva

Os resultados quanto à análise descritiva foram organizados por classe de solo e por profundidade. No quadro II são apresentados valores médios, desvio padrão e mediana (ANEXO II, no Quadro II.1).

As variáveis preditas CAD_1 , CAD_2 , CAD_3 e PMP apresentaram distribuição normal, atendendo às exigências da regressão linear múltipla.

2.3.2. Análise de correlação e significância

Os quadros completos referentes à análise de correlação de Pearson e análise de significância ANOVA encontram-se na seção ANEXO II, Quadros II.2 e II.3. No entanto, aqui são apresentadas em destaque as variáveis preditoras que apresentaram correlação e significância aceitável (p valor $< 0,05$) em relação às variáveis preditas.

2.3.3. Parâmetros de maior correlação e significância referente às variáveis preditoras

Condutividade hidráulica saturada (K_0).

Na Figura 21 é apresentada as correlações entre Condutividade hidráulica saturada e as variáveis: teor de argila, porosidade total, macroporosidade e PMP, respectivamente.

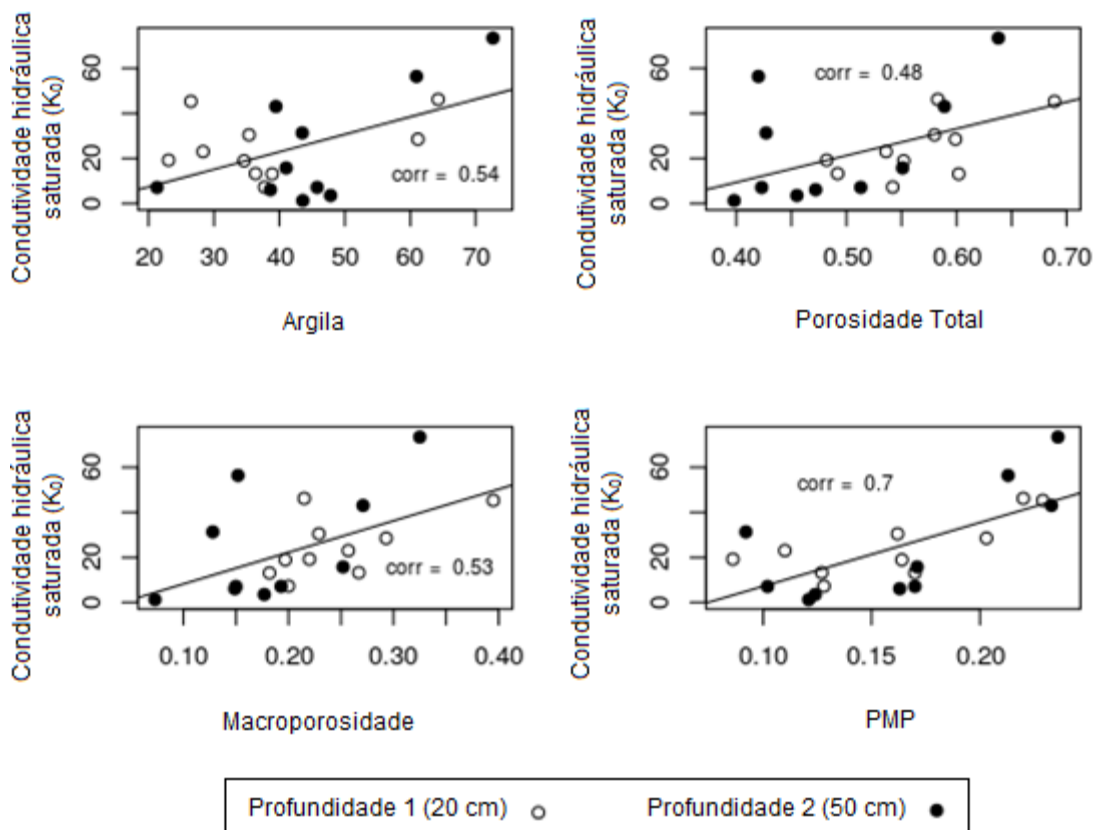


Figura 21: Valores de dispersão entre K_0 e variáveis dependentes de maior significância.

Observou-se uma correlação linear positiva para todas as variáveis avaliadas. As correlações entre as variáveis K_0 e teor de argila, porosidade total e macroporosidade são consideradas moderadas. Já entre aK_0 e PMP (0,7) é considerada forte (DANCEY; REIDY, 2006).

2.3.4. Parâmetros de maior correlação e significância com a CAD_1

Na Figura 22 são apresentadas as correlações significativas da variável CAD_1 com as variáveis: microporosidade, macroporosidade, CC_1 , CC_2 , CC_3 e PMP.

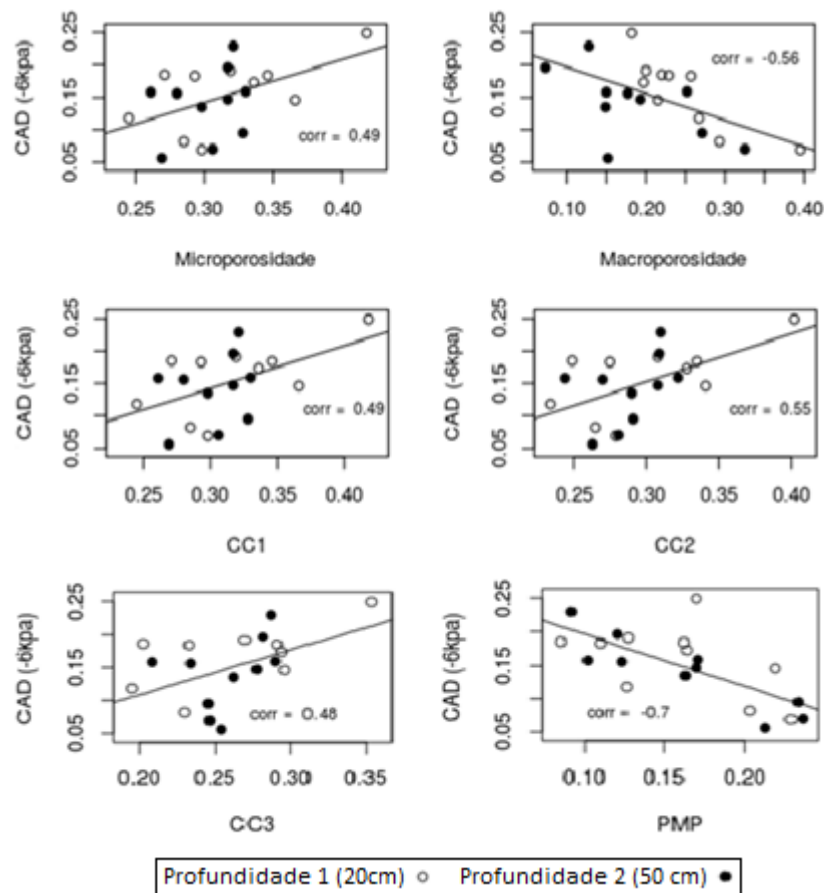


Figura 22. Gráficos de dispersão entre CAD_1 e variáveis dependentes de maior significância.

Há uma correlação linear moderada entre as variáveis CAD_1 e Microporosidade e entre as variáveis CAD_1 e CC_1 (ambas de 0,49). Entre as variáveis CAD_1 e macroporosidade há uma correlação linear de -0,56, e uma correlação linear de 0,55 entre as variáveis CAD_1 e CC_2 . Entre as variáveis CAD_1 e CC_3 há uma correlação de 0,48. Todas as correlações citadas anteriormente são consideradas moderadas. Por outro lado, entre as variáveis CAD_1 e PMP há uma

correlação linear negativa forte (-0,7).

Michelon et al. (2010) também identificaram forte correlação entre a microporosidade e a retenção de água, para altos e para baixos potenciais. Identificaram, ainda, forte correlação dos atributos argila e areia com a retenção, sendo a primeira positiva e a segunda negativa. Já aqui, a microporosidade se mostrou mais fortemente correlacionada com altos potenciais. Esse comportamento corrobora com o observado por Hillel (1998) e Assadet al. (2001), onde nos elevados potenciais, forças de capilaridade são mais fortes que as de adsorção, fazendo com que atributos estruturais sejam capazes de influenciar mais na retenção da água no solo.

Individualmente, argila e areia não tiveram correlação significativa com a retenção, mas, em conjunto com a macroporosidade, apresentaram forte correlação e sustentaram a base dos modelos elaborados.

2.3.5. Parâmetros de maior correlação e significância com a CAD₂

Na Figura 23 são apresentadas as correlações significativas entre aCAD₂ e as variáveis macroporosidade, CC₂, CC₃ e PMP.

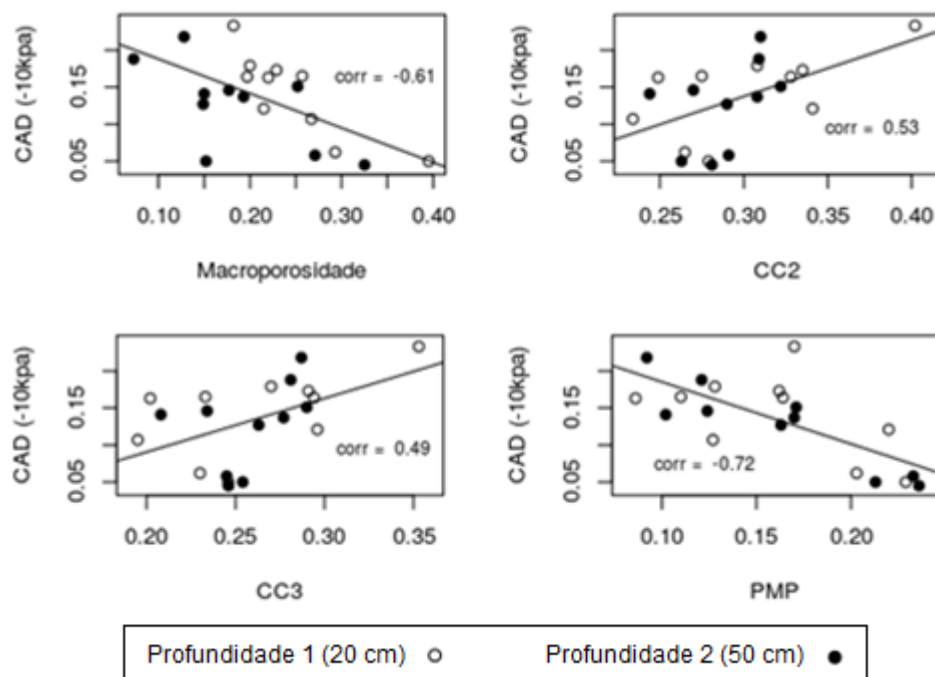


Figura 22. Gráficos de dispersão entre CAD₂ e variáveis dependentes de maior significância. Fonte: Imagem feita pelo autor.

Há uma correlação linear negativa entre as variáveis CAD_2 e macroporosidade (-0,61). Entre as variáveis CAD_2 e CC_2 há uma correlação linear positiva (0,53). Outra correlação positiva foi identificada entre as variáveis CAD_2 e CC_3 (0,49), sendo todas essas correlações consideradas moderadas, segundo Dancey & Reidy (2006). Entretanto, destacou-se a forte correlação linear negativa entre as variáveis CAD_2 e PMP (-0,72).

2.3.6. Parâmetros de maior correlação e significância com a CAD_3

Os gráficos de dispersão apresentados abaixo são apenas das variáveis correlacionadas significativamente com a variável CAD_3 . São elas: macroporosidade, CC_2 , CC_3 e PMP.

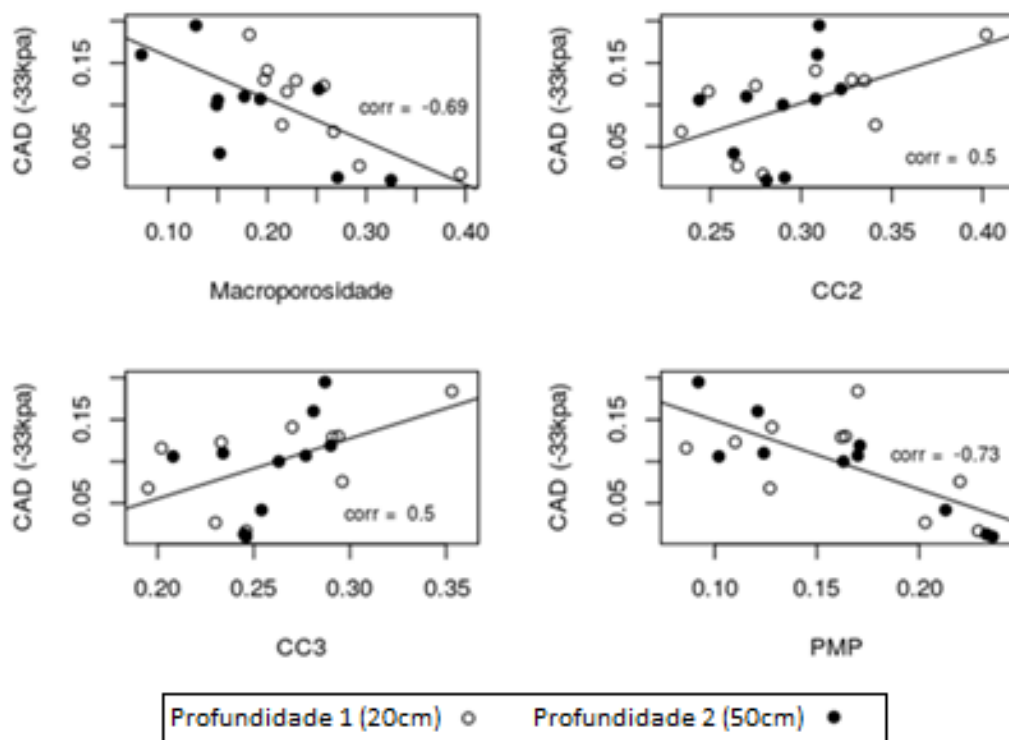


Figura 23. Gráficos de dispersão entre CAD_3 e variáveis dependentes de maior significância. Fonte: imagem feita pelo autor.

Há uma correlação linear moderada entre as variáveis CAD_3 e macroporosidade (-0,69). Entre as variáveis CAD_3 e CC_2 há uma correlação linear de 0,5 e, também, há uma mesma correlação linear de 0,5 entre as variáveis CAD_3 e CC_3 , todas consideradas moderadas. Entretanto destaca-se a forte correlação

linear negativa entre as variáveis CAD_3 e PMP (-0,73).

2.3.7 Funções de pedotransferência de referência

Os modelos ou FPT's feitos para estimar a CAD dos solos de Pernambuco (OLIVEIRA et al., 2002), quando testados para estimar os valores de CAD_3 na bacia do córrego Marinheiro, não apresentaram resultados satisfatórios. Observou-se que esses modelos subestimaram os valores de CAD_3 medidos entre 72% e 98%. Para melhor visualização do ajuste dos modelos selecionados, observe os valores do EMQ calculados (Tabela 12).

Tabela 12. Valores de água disponível (CAD) estimados pelas FPT, em $cm^3.cm^{-3}$ e cálculo do Erro Médio Quadrático (EMQ).

PERFIL	PROF. (cm)	FPT OLIVEIRA et al. (2002)	FPT AUTOR	CAD MEDIDO	EMQ. FPT DE REF.	EMQ. FPT AUTOR
		CAD	CAD			
P1	20	0,00004	0,201	0,116	0,0126	0,0093
	50	0,00006	0,217	0,195	0,0125	0,0094
P2	20	0,00003	0,285	0,184	0,0111	0,0099
	50	0,00005	0,184	0,107	0,0098	0,0099
P3	20	0,00004	0,195	0,076	0,0097	0,0101
	50	0,00003	0,175	0,012	0,0099	0,0099
P4	20	0,00002	0,169	0,017	0,0106	0,0087
	50	0,00002	0,129	0,010	0,0114	0,0076
P5	20	0,00004	0,208	0,141	0,0124	0,0070
	50	0,00007	0,189	0,160	0,0117	0,0073
P6	20	0,00003	0,216	0,123	0,0103	0,0079
	50	0,00005	0,199	0,106	0,0098	0,0078
P7	20	0,00005	0,157	0,068	0,0096	0,0077
	50	0,00005	0,175	0,110	0,0103	0,0077
P8	20	0,00003	0,137	0,027	0,0100	0,0083
	50	0,00012	0,140	0,042	0,0119	0,0075
P9	20	0,00004	0,220	0,129	0,0144	0,0070
	50	0,00006	0,174	0,100	0,0137	0,0065
P10	20	0,00005	0,217	0,130	0,0155	0,0070
	50	0,00005	0,199	0,119	0,0142	0,0064

Quanto às FPT's elaboradas para os solos de Santa Maria, quando usadas para estimar a CAD_3 dos solos da bacia, ora subestimaram, ora superestimaram os valores medidos em cerca de 2% a 15%. Para melhor visualização do ajuste dos modelos selecionados, observe os valores do EMQ calculados (Tabela 13).

Tabela 13. Valores de CAD estimados por FPT's, em $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$.

PERFIL	PROF. (cm)	FPT MICHELON et al. (2002)			FPT AUTOR	CAD MEDIDO	EMQ. FPT DE REF.	EMQ. FPT AUTOR
		PMP	CC3	CAD	CAD			
P1	20	0,099	0,233	0,135	0,201	0,116	0,004	0,009
	50	0,163	0,292	0,129	0,217	0,195	0,004	0,009
P2	20	0,150	0,376	0,226	0,285	0,184	0,004	0,010
	50	0,188	0,285	0,098	0,184	0,107	0,005	0,010
P3	20	0,212	0,327	0,115	0,195	0,076	0,005	0,010
	50	0,098	0,282	0,185	0,175	0,012	0,005	0,010
P4	20	0,077	0,246	0,168	0,169	0,017	0,003	0,009
	50	0,177	0,259	0,082	0,129	0,010	0,002	0,008
P5	20	0,151	0,282	0,131	0,208	0,141	0,002	0,007
	50	0,201	0,292	0,091	0,189	0,160	0,002	0,007
P6	20	0,070	0,251	0,181	0,216	0,123	0,001	0,008
	50	0,110	0,230	0,120	0,199	0,106	0,001	0,008
P7	20	0,096	0,211	0,115	0,157	0,068	0,001	0,008
	50	0,159	0,250	0,091	0,175	0,110	0,001	0,008
P8	20	0,154	0,238	0,084	0,137	0,027	0,001	0,008
	50	0,192	0,267	0,075	0,140	0,042	0,001	0,008
P9	20	0,141	0,304	0,162	0,220	0,129	0,001	0,007
	50	0,197	0,268	0,072	0,174	0,100	0,001	0,007
P10	20	0,148	0,299	0,151	0,217	0,130	0,000	0,007
	50	0,153	0,293	0,140	0,199	0,119	0,000	0,006

2.3.8. Funções de pedotransferência elaboradas

Os modelos elaborados para predição das variáveis físico-hídricas K_0 e CAD foram divididas em dois grupos, denominados grupos 1 e 2 (Tabela 14).

Observa-se que, para nenhum dos três modelos elaborados, a profundidade foi significativa pois a capacidade de água disponível das amostras das profundidades 1 e 2 não diferem em média, a um nível de 5% de significância.

Tabela 14. FPT'S produzidas para os solos da bacia do Córrego Marinheiro.

GRUPO 1		R2	EMQ
$K_0 = - 35,842 + 0,746 (\text{argila}) + 134,004 (\text{macroporosidade})$		0,49	12,90
$CAD_1 = 0,039 - 0,003 (\text{argila}) - 0,002 (\text{silte}) - 0,246 (\text{macroporosidade}) + 1,114 (CC2)$		0,85	0,02
$CAD_2 = 0,087 - 0,002 (\text{argila}) - 0,377 (\text{macroporosidade}) + 0,698 (CC2)$		0,70	0,00
$CAD_3 = 0,045 - 0,002 (\text{argila}) - 0,001 (\text{silte}) - 0,0378 (\text{macroporosidade}) + 0,910 (CC2)$		0,81	0,02
GRUPO 2		R2	EMQ

$K_0 = -58,55 + 0,69 (\text{argila}) + 102,09 (\text{porosidade total})$	0,40	14,05
$CAD_1 = 644,37 - 6,44 (\text{areia}) - 6,44 (\text{silte}) - 6,44 (\text{argila})$	0,29	0,04
$CAD_2 = 760,96 - 7,61 (\text{areia}) - 7,61 (\text{silte}) - 7,61 (\text{argila})$	0,35	0,04
$CAD_3 = 858,55 - 8,58 (\text{areia}) - 8,58 (\text{silte}) - 8,58 (\text{argila})$	0,43	0,04

Observa-se que os modelos elaborados para predição da condutividade hidráulica saturada apresentaram um coeficiente de determinação (R^2) muito baixo (inferior a 50%), tanto no grupo 1 quanto no grupo 2, tendo em vista a elevada variabilidade dos valores de K_0 estimados.

Quanto às FPT's produzidas para predição dos volumes de capacidade de água disponível, nota-se que os modelos do grupo 1 apresentaram coeficientes de determinação bem mais satisfatórios (entre 0,70 e 0,85) quando comparados aos modelos do grupo 2 (cujo R^2 variou entre 0,29 e 0,43). Isso demonstra que o esforço estatístico realizado no grupo 2, no intuito de eliminar os modelos variáveis dependentes de difícil caracterização (macroporosidade e umidade no potencial de -10kPa), não foi eficiente.

Por outro lado, outros autores, ao trabalharem com modelos de predição para retenção de água no solo, concluíram que FPT's que trabalham com atributos texturais e estruturais apresentaram melhores resultados do que aqueles modelos que consideraram apenas atributos texturais (BRUAND, 2003; MOJOURD et al., 2008).

Os modelos propostos no grupo 1 permitiram, no entanto, a eliminação parcial de métodos tradicionais de caracterização de parâmetros físico-hídricos, como é o caso do extrator de Richards (apontado como sendo um método restrito a poucos laboratórios no país e que apresenta alto custo de manutenção) e do WP4.

Quando comparados aos modelos de referência, os coeficientes de determinação dos modelos elaborados para a bacia do Córrego Marinheiro se mostram inferiores. Isso pode estar relacionado tanto à diversidade de solos analisados na bacia do Córrego Marinheiro, quanto, também, ao pequeno número de amostras utilizados em relação aos demais trabalhos. Na literatura pesquisada, foi comum encontrar modelos propostos para grupos texturais, por exemplo.

Por outro lado, os valores de Erro Médio Quadrático (EMQ) apresentados pelas FPT's elaboradas no grupo 1 se mostraram bastante satisfatório e próximo daqueles apresentados pelos modelos de referência (Tabelas 12, 13 e 14). Os

gráficos de relação 1:1 também são bem ilustrativos para comparar o ajuste dos modelos produzidos.

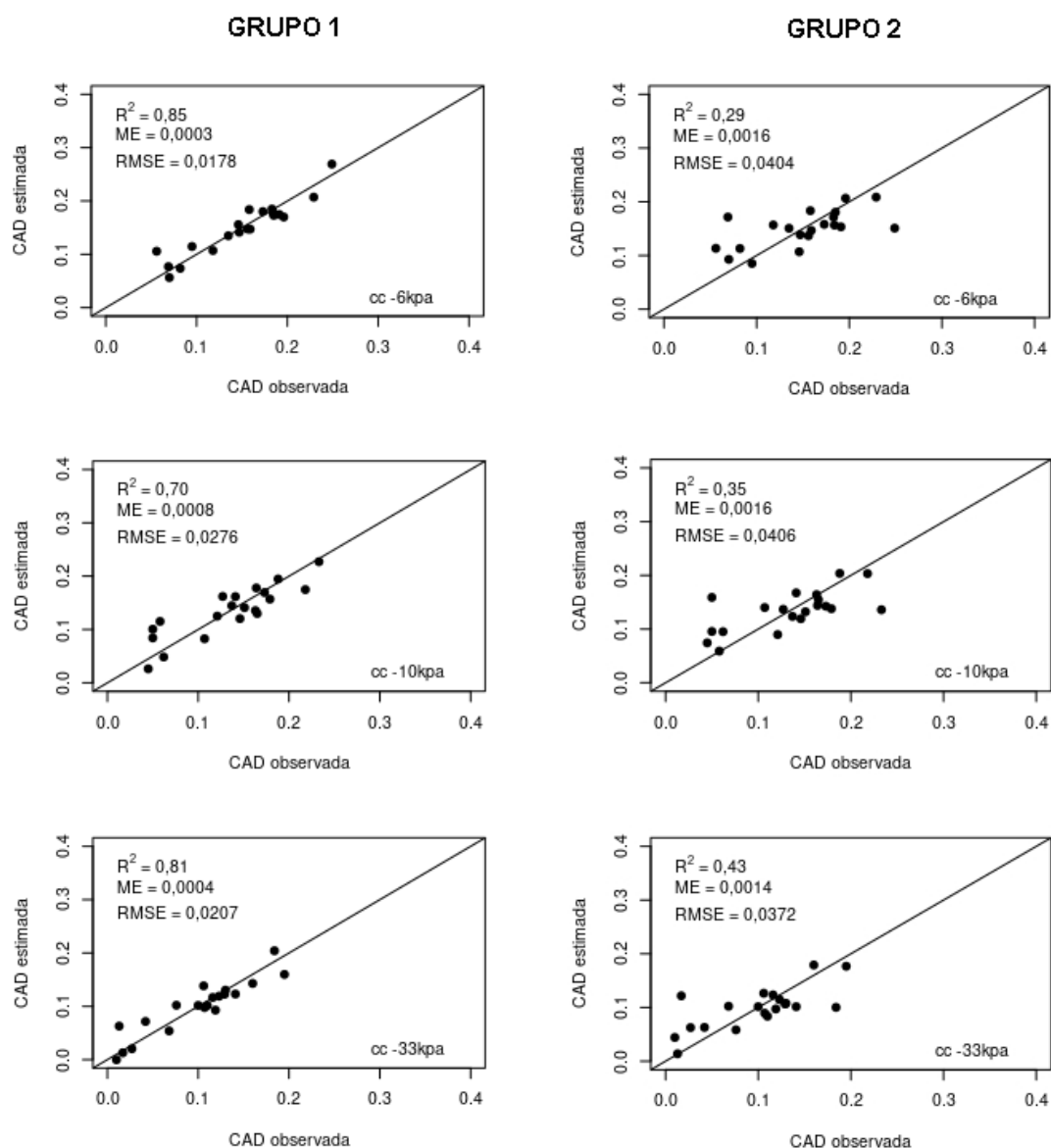


Figura 24. Comparação entre os valores observados e estimados segundo os modelos do grupo 1 e 2.

2.4 CONCLUSÃO

Dentre as propriedades físicas caracterizadas, aquelas que apresentaram maior grau de correlação com as variáveis preditas K_0 foram: teor de argila, porosidade total e macroporosidade. Dentre as propriedades físicas que apresentaram forte correlação com a CAD estão: a macroporosidade e a microporosidade, sendo a primeira uma correlação inversa e a segunda uma correlação direta.

Os valores de K_0 medidos para os diferentes solos da bacia do Córrego Marinho apresentaram, em geral, elevada variabilidade, o que dificultou a modelagem através da regressão linear múltipla. Por esse motivo, as FPT's propostas para predição de K_0 apresentaram baixos coeficientes de determinação, de 0,40 e 0,49.

Para a estimativa de CAD_1 , CAD_2 e CAD_3 , entretanto, foi possível propor modelos que apresentaram um R^2 de 0,85, 0,70 e 0,81, respectivamente. O ajuste desses modelos através do cálculo do Erro Médio Quadrático (EMQ) se mostrou satisfatório, sinalizando que a caracterização da CAD pode ser realizada com boa precisão através de FPT's elaboradas para a bacia do Córrego Marinho, cujas variáveis dependentes foram: argila, silte, macroporosidade e a umidade retida sob tensão de -10kPa.

Quanto às funções selecionadas na literatura, o modelo elaborado para os solos de Santa Maria-RS apresentou potencial preditivo satisfatório, quando rodado a partir dos parâmetros físicos da bacia do Córrego Marinho. Os atributos desse modelo foram: areia fina, silte, argila, densidade do solo, densidade de partículas, macroporosidade, microporosidade e porosidade total.

2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A caracterização físico-hídrica, realizada nos solos da bacia do Córrego Marinho, apresentou diferenças significativas quanto ao comportamento dos parâmetros hidráulicos analisados. Isto é, numa mesma bacia hidrográfica, diferentes solos apresentaram distintos comportamentos quanto à dinâmica da água na sua matriz porosa. Isso confirma que diferentes solos numa mesma bacia hidrográfica oferecem diferentes níveis de potencial para a recarga hídrica e para a disponibilidade de água ao desenvolvimento das plantas.

Os dados físico-hídricos levantados, quando associados a outras informações tais como o relevo, posição na paisagem, cobertura do solo, tipo de manejo, entre outras, podem oferecer grande subsídio à tomada de decisões no âmbito da gestão dos recursos hídricos.

Futuros estudos na área da bacia podem ser realizados para obter uma maior amostragem dos ensaios de infiltração, assim como, validar os modelos de predição elaborados para CAD, que, por sua vez, apresentaram um bom ajuste. Dependendo dessa validação, os modelos propostos podem ser utilizados para estimar parâmetros físico-hídricos em solos da região com características paisagísticas semelhantes.

Agradecimentos

Agradecimento especial à Fapemig pelo provimento de recursos necessários à realização dessa pesquisa, assim como, ao Programa de Pós-Graduação de Geografia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, S. L.; REICHERT, J. M.; SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; BLUME, E. **Variabilidade espacial de propriedades físico-hídricas do solo, da produtividade e da qualidade de grão de trigo em Argissolo Franco Arenoso sob plantio direto.** *Ciência Rural*, vol. 33, n. 2, p. 275-282. 2003.
- ADAMS, W. A. **The effect of organic matter on the bulk density and true densities of some uncultivated podzolic soils.** *Journal of Soil Science*, vol. 24, p. 10-17. 1973.
- ALMEIDA, B. G.; DONAGEMMA, G. K.; RUIZ, H. A.; BRAIDA, J. A.; VIANA, J. H. M.; REICHERT, J. M. M.; OLIVEIRA, L. B.; CEDDIA, M. B.; WADT, P. G. S.; FERNANDES, R. B. A.; PASSOS, R. R.; DECHEN, S. C. F.; KLEIN, V. A.; TEIXEIRA, W. G. **Padronização de Métodos para Análise Granulométrica no Brasil.** (Comunicado técnico 66). Rio de Janeiro: Embrapa. 2012.
- ÁLVARES, K. V. **Rede de avaliação e capacitação para a implementação dos planos diretores participativos.** Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2008.
- ANDRADE, C. L. T.; BORGES JUNIOR, J. C. F.; COUTO, L. **Características Físico-hídricas e dinâmica de água no solo.** In: ALBUQUERQUE, P. E. P.; DURÃES, F. O. M. **Uso e manejo de irrigação, Brasília:** Embrapa Informações Tecnológicas, p.71-149. 2008.
- ANDRADE, R. S.; STONE, L. F. **Estimativa da umidade na capacidade de campo em solos sob Cerrado.** *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol.15, n.2, p.111-116. 2011.
- ARRUDA, F. B.; ZULLO JÚNIOR, J.; OLIVEIRA, J. B. **Parâmetros de solo para o cálculo da água disponível com base na textura do solo.** *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, vol.11, n.1, p. 11-15, maio/jun. 1987.
- ASSAD, M. L. L.; SANS, L. M. A.; ASSAD, E. D.; ZULLO, J. **Relação entre água retida e conteúdo de areia total em solos brasileiros.** *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, vol.9, n.3, p.588-596. 2001.
- ASSIS, R. L.; LANÇAS, K. P. **Avaliação dos atributos físicos de um Nitossolo vermelho distroférrico sob sistema plantio direto, preparo convencional e mata nativa.** *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, vol. 29, p. 515-522. 2005.
- BAGARELLO, V.; PROVENZANO, G. **Factors affecting field and laboratory measurement of saturated hydraulic conductivity.** *Transactions of the ASAE*, vol. 39, n.1, p.153-159. 1996.
- BANTON, O. **Field and laboratory-determined hydraulic conductivities considering anisotropy and core surface area.** *Soil Science Society of America Journal*, vol. 57, n. 1, p. 10-15. 1993.
- BASTOS, S. R.; MENDONÇA, E. de SÁ.; ALVAREZ V., V. H.; CORRÊA, M. M.; COSTA, L. M. **Formação e estabilização de agregados do solo influenciados por ciclos de umedecimento e secagem após adição de compostos orgânicos**

com diferentes características hidrofóbicas. Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol. 29. p. 21-31. 2005.

BEARE, M. H.; HENDRIX, P. F.; COLEMAN, D. C. **Water-stable aggregates and organic matter fractions in conventional and no-tillage soils.** Soil Science Society of American Journal, Madison, vol. 58, p. 777-786. 1994.

BERNARDES, R. S.; **Condutividade hidráulica de três solos da Região Norte Fluminense.** 2005. 80f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Disponível em:<http://www.uenf.br/Uenf/Downloads/PRODVEGETAL_3434_1152014807.pdf>. Acesso em jun. 2018.

BERNOUX, M.; ARROUAYS, D.; CERRI, C.; VOLKOFF, B.; JOLIVET, C. **Bulk densities of Brazilian Amazon soils related to other soil properties.** Soil Science Society of America Journal, Madison, vol. 62, n. 3, p. 743-749. 1998.

BETIM, L. S. **Caracterização da condutividade hidráulica dos solos e estudo da vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos da sub bacia do córrego Palmital – Viçosa-MG.** 2013. 186f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. UFV. Minas Gerais. 2013. BETIM, L. S.; MARQUES, E. A. G; CARVALHO, V. E. D.; COSTA, R. A.; PAES, B. S. T; REZENDE, K. S.; de ALMEIDA, V. R. L; MARQUES, A. L. Caracterização da condutividade hidráulica dos solos típicos de uma microbacia representativa da zona da mata de Minas Gerais. In: XVII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. **Resumo.** Bonito - MS. 2012

BIELSCHOWSKY, C; BARBOSA, A. C.; ALVES, L. Da SILVA JUNIOR, G. C. **Determinação da condutividade hidráulica de campo em solos com diferentes texturas utilizando o método do permeâmetro IAC.** Cadernos de estudos geoambientais (CADEGEO). INEA. Rio de Janeiro. 2012

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. In: KLUTE, A. (ed.). **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods.** Madison: ASA-SSSA, p. 363-375. 1986.

BLEUTER, A. N.; CENTURION, J. F.; SOUZA, Z. M.; ANDRIOLI, I.; ROQUE, C. G. **Retenção de água em dois tipos de Latossolos sob diferentes usos.** Revista Brasileira de Ciência dos Solos, vol. 26, p. 829-834. 2002.

BOUMA, J. **Using soil survey data for quatitative land evaluation.** Advances in Soil Science, vol. 9, p. 177-213. 1989.

BOZDOGAN, H. Model selection na Akaike's information criterion (AIC): The general theory and its analytical extensions. Psychometrika. n.52. p.345-370, 1987.

BRADY, N. C. **Elementos da natureza e propriedades dos solos.** 3ª ed. Porto Alegre: Bookman. 2013.

BRANDÃO, V. S.; CECÍLIO, R. A.; PRUSK, F. F.; da SILVA, D. D. **Infiltração da água no solo.** 3ª ed. Viçosa: Ed. UFV. 2006.

BRIGGS, L. J.; MCLANE, J. W. **The moisture equivalent of soils.** Washington: USDA, Bureau of Soils. Bulletin, vol. 45, n. 31. 1907.

BRIGGS, L. J.; SHANTZ, H. L. **The wilting coefficient and its indirect measurement.** *Botanical Gazette*, vol. 53, p. 20-37. 1912.

BRUAND, A.; FERNÁNDEZ, P. P., Duval, O. **Use of class pedotransfer functions based on texture and bulk density of clods to generate water retention curves.** *Soil Use and Management*, vol.19, p. 232-242. 2003. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1475-2743.2003.tb00309.x>>. Acesso em: 13 jan. 2010. doi: 10.1079/SUM2003196.

BUDIMAN, M.; MCBRATNEY, A. B.; MENDONÇA-SANTOS, M. de L.; SANTOS, H. G. dos. **Revisão sobre funções de pedotransferência (PTFs) e novos métodos de predição de classes e atributos do Solo.** Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 2003.

CARVALHO, L. A. **Condutividade hidráulica do solo no campo: as simplificações do método do perfil instantâneo.** 2002. 86f. Dissertação (Mestrado em Agronomia). ESALQ. Piracicaba - SP. 2002.

CASTRO, E. **Estudo hidrogeoquímico ambiental em região cárstica no município Sete Lagoas – Minas Gerais: Investigação da contaminação das águas superficiais e subterrâneas por nitrato e atrazina, na área do Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo da Embrapa.** 2011.890f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2011.

CASTRO, O. M; VIEIRA, S. R.; SIQUEIRA, G. M. **Atributos físico-hídricos de um Latossolo Vermelho eutroférico sob diferentes sistemas de manejo.** *Bragantia*, Campinas, vol. 69, n. 2, p. 433-443. 2010.

CAVALIERI, K. M. V; CARVALHO, L. A.; da SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L.; TORMENA, C. A. **Qualidade física de três solos sob colheita mecanizada de cana-de-açúcar.** *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, vol. 35, p.1541-1549. 2011.

CELLIGOI, A.; SOUZA, R. V. B.; MEDEIROS, H. R.; LAMÔNICA, D.; MACHADO, A. C. Utilização do permeâmetro Guelph na determinação da condutividade hidráulica da zona não-saturada do aquífero freático nas imediações do lixão de Londrina – PR. **XIV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas.** Curitiba-PR. 2006.

CENTURION, J. F.; ANDRIOLI, I. **Regime hídrico de alguns solos de Jaboticabal.** *Revista Brasileira de Ciência do solo*, vol. 24, p. 701-709. 2000.

CHAVES, R. M. **Mapeamento da vegetação e uso do solo da bacia hidrográfica do Ribeirão Jequitibá.** 2005. 38f. Monografia (Especialista em Geoprocessamento) - Curso de especialização em geoprocessamento. Departamento de Cartografia. IGC/UFMG. Belo Horizonte. 2005.

CHENU, C.; BISSONAI, Y.; ARROUAYS, D. **Organic matter influence on Clay watability and soil aggregate stability.** *Soil Science Society of America Journal*.vol. 64, n. 4, p.1479-1486. 2000.

CLAESSEN, M. E. C. (Org.). **Manual de métodos de análise de solo.** 2. ed. rev. E atual. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 212 p. 1997.

COOPER, M.; VIDAL-TORRANO, P. **Caracterização morfológica, micromorfológica e físico-hídrica de solos com horizonte B nítico**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol. 29, p. 581-595. 2005.

COSTA, A. **Retenção e disponibilidade de água em solos de Santa Catarina: avaliação e geração de funções de pedotransferência**. 2012. 423 f. Tese (Doutorado em Manejo do Solo) - Centro de ciências agroveterinárias. Curso de Pós Graduação em Manejo do Solo da Universidade do Estado de Santa Catarina. Lages - SC. 2012.

COUTO, L.; SANS, L. M. A. **Características físico-hídricas e disponibilidade de água no solo. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo**, Circular técnica, 21, 2002.

CRESSWELL, H. P.; GREEN, T. W.; MCKENZIE, N. J. **The adequacy of pressure plate apparatus for determining soil water retention**. Soil Science Society of America Journal, vol. 72, n. 1, p. 41-49. 2008.

Da SILVA, J. R. L; MONTENEGRO, A. A. A.; dos SANTOS, T. E. M. **Caracterização física e hidráulica de solos em bacias experimentais do semiárido brasileiro, sob manejo conservacionista**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. Campina Grande, vol. 16, n. 1, p. 27–36. 2012.

DECAGON DEVICES, INC. **Operator's manual WP4C Dewpoint Potentiometer. Pulmann: Decagon Devices**, vol 4, n. 131, p. 521-524. 2005.

DICK, D.P. **Caracterização de óxidos de ferro e adsorção de fósforo na fração argila de horizontes B Latossólicos**. 1986. 196f. Dissertação - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 1986.

DONAGEMMA, G. K.; CAMPOS, D. V. B. de; CALDERANO, S. B.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. H. M. (Org.) **Manual de métodos de análises de solos**. 2^a.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. Documentos / Embrapa Solos; vol. 132. 230 p. 2011.

DOURADO NETO, D.; van LIER, Q. J.; van GENUCHTEN, M. T.; REICHARDT, K.; METSELAAR, K.; NIELSEN, D. R. **Alternative Analytical Expressions for the General van Genuchten - Mualem and van Genuchten - Burdine Hydraulic Conductivity Models**. Vadose Zone Journal, Madison, WI, vol. 10, n. 2, p. 618-623. 2011.

ELRICK, D. E.; REYNOLDS, W. D.; TAN, K. A. **Hydraulic conductivity measurements in the unsaturated zone using improved well analyses**. Ground Water Monit. p.184-193. 1989.

EMBRAPA - AGEITEC. **Agência Embrapa de Informação Tecnológica**. Disponível em <<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/>>. Acesso em: 24, jul. 2017.

ESPÍRITO SANTO, A. F., **Condutividade hidráulica saturada em função do tipo e uso do solo e método de determinação**. 2011. 48f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de agronomia e medicina veterinária – UNB. Brasília-DF, 2011.

FERREIRA, M. M. Caracterização física do solo. In: VAN LIER, Q. J. **Física do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 103-152. 2010.

FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURI, N. **Mineralogia da fração argila e estrutura de Latossolos da região sudeste do Brasil**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol. 23, p. 507-514. 1999.

FERREIRA, S. T. **Avaliação da relação entre a condutividade hidráulica do solo saturado com parâmetros físicos de um Latossolo vermelho distrófico submetido a dois diferentes manejos**. Dissertação (Mestrado em Física) - Universidade Estadual de Ponta Grossa. Programa de Pós-Graduação em Ciências. 2008.

FILHO, F. A. F.; FILHO, C. H. R. M.; ILÁRIO, J. C.; Oliveira S. O.; SANTOS, T. F. **Hipótese para a formação do carste ao sul de Sete Lagoas - Minas Gerais**. Sociedade Excursionista Espeleológica – SEE - EMOP - UFOP. 2004.

FISHER, R. A.; MACKENZIE, W. A., Studies in crop variation. II. The manurial response of different potato varieties. J. Agric. Sci., v.13. p.311-320, 1923.

FONTES, M. P. F.; CAMARGO, O. A.; SPOSITO, G. **Eletroquímica das partículas coloidais e sua relação com a mineralogia de solos altamente intemperizados**. Scientia Agricola, vol. 58, n. 3, p. 627-646. 2001.

FREIRE, M. B. G. dos S.; RUIZ, H. A.; RIBEIRO, M. R.; FERREIRA, P. A.; ALVAREZ V., V. H.; FREIRE, F. J. **Condutividade Hidráulica de solos de Pernambuco em resposta à condutividade elétrica e RAS da água de irrigação**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, vol. 7, n. 1, p. 45-52. 2003.

GHIBERTO, P. J; MORAES, S. O. **Comparação de métodos de determinação da condutividade hidráulica em um Latossolo vermelho-amarelo**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol. 35, p.1177-1188. 2011.

GODOY, M. J. S.; LOPES-ASSAD, M. L. **Aptidão agrícola de terras com estimativa de risco climático para a cultura do milho utilizando geoprocessamento**. Revista Brasileira de Ciência do solo, vol. 26, p. 685-694. 2002.

GRIGOLON, G. B. **Curva de retenção de água no solo determinada a partir de um número mínimo de pares de umidade e tensão na câmara de Richards**. 2013. 82 f. Dissertação (Mestrado em Ciência), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2013.

GUERRA, A. J. T. **O papel da matéria orgânica e dos agregados na erodibilidade dos solos**. Anuário do Instituto de Geociências. Departamento de Geografia. IGEO-UFRJ, vol. 13, p. 43 - 52. 1990.

HILLEL, D. **Environmental soil physics**. Massachusetts: Academic Press, 771p. 1998.

HILLEL, D. **Fundamentals of Soil Physics**. San Diego: Academic Press, 413 p. 1980.

JURY, W. A.; GARDNER, W. R.; GARDNER, W. H. **Soil physics**. New York: John Wiley and Sons. 1991.

KÄMPF, N.; CURI, N. Formação e evolução do solo (pedogênese). In: KER, J. C.; CURI, N.; SCHAEFER, C. E. G. R.; VIDAL-TORRADO, P. (eds.). **Pedologia: fundamentos**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 207-302. 2012.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia: relações solo-planta**. São Paulo: Ceres, 262p. 1979.

KLEIN, V. A. **Física do solo**. Passo Fundo: EDIUPF. 2008.

KLEIN, V. A.; BASEGGIO, M.; MADALOSSO, T.; MARCOLIN, C. D. **Textura do solo e a estimativa do teor de água no ponto de murcha permanente com o psicrômetro**. Ciência Rural, vol. 40, n. 7, p. 1550-1556. 2010.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. **Faixa de umidade menos limitante ao crescimento vegetal e sua relação com a densidade do solo ao longo do perfil de um Latossolo Roxo**. Ciência Rural, vol.30, p.959-964. 2000.

KOOREVAAR, P. MENELIK, G.; DIRKSEN, C. **Elements of Soil Physics**. New York, Elsevier, 228p. 1983.

KOPPEN, W. Das geographische System der Klimate. In: KOPPEN, W., R. G. (eds.): **Handbuch der Klimatologie – Gebruder Borntrager**, Berlin, vol. 1, p. 1 – 44. 1936.

LIBARDI, P. L. Água no solo. In: VAN LIER, Q. J. **Física do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 103-152. 2010.

LIBARDI, P. L. **Determinação da condutância hidráulica e da pressão de borbulhamento de cápsulas porosas para tensiômetros**. Nota de aula. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. 1999.

LIBARDI, P. L.; GONÇALVES, A. D. M. A. **Análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo**. Revista Brasileira de Ciências do Solo, vol. 37, n. 5, p. 1174-1184. 2013.

LIMA, C. C. de. **Caracterização com preparo convencional e profundo do solo para cana-de-açúcar: atributos físicos e sistemas radicular**. Instituto Agrônomo. Curso de Pós-Graduação em Agricultura Tropical e Subtropical. Campinas, SP. 2016.

MACHADO, D. A. **Caracterização Hidrogeológica e vulnerabilidade Natural das águas Subterrâneas no entorno do Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo – Sete Lagoas/MG**. 2011. 107 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2011.

MAIA, F. C. O. **Curva de retenção e capacidade de água disponível em Latossolos**. Monografia (Engenharia Agrônoma) 2016. 52 f. Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da UnB. Brasília. 2016.

MAJOU, H. A.; BRUAND, A.; DUVAL, O.; BAS, C. LES; VAUTIER, A. **Prediction of soil water retention properties after stratification by combining texture, bulk density and the type of horizon**. Soil Use and Management, vol. 24, p. 383- 391, 2008. doi: 10.1111/j.1475-2743.2008.00180.x.

MARQUES, J. D. O.; TEIXEIRA, W. G.; REIS, A. M.; CRUZ JUNIOR, O. F.; MARTINS, G. C. **Avaliação da condutividade hidráulica do solo saturada utilizando dois métodos de laboratório numa topossequência com diferentes coberturas vegetais no Baixo Amazonas.** Revista Acta Amazonica. vol. 38, n. 2., p. 193-206. 2008:

MICHELON, C. J.; CARLESSO, R.; de OLIVEIRA, Z. B.; KNIES, A. E.; PETRY, M. T.; MARTINS, J. D. **Funções de pedotransferência para estimativa da retenção de água em alguns solos do Rio Grande do Sul.** Ciência Rural. Santa Maria – RS, vol. 40, n.4, p. 848-853. 2010.

MINASNY, B.; HARTEMINK, A. E. **Predicting soil properties in the tropics.** Earth-Science Reviews, vol. 106, p. 52-62. 2011.

MIRANDA, J. P. L. **Propriedades físico-hídricas de um solo submetido a cultivos perenes e a pousio em ambiente agrícola serrano – Bom Jardim (RJ).** 2008. 123 f. Dissertação (Mestrado em Geografia). Programa de Pós-Graduação em Geografia. UFRJ. 2008.

MONTEIRO, H. C. **Uso da terra e variações de temperatura e umidade relativa do ar na bacia do córrego Marinheiro, Sete Lagoas-MG.** 2016. 138 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Programa de Pós-Graduação em Geografia. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2016.

MORALES, C. A. S. **Preparos e atributos físicos dos solos para plantio de eucalipto.** 2014. Tese (Doutorado). CCR-UFSM. Santa Maria, RS. 2014.

MUALEM, Y. **A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media.** Water Resources Research, Washington, DC, vol. 12, n. 3, p. 513-522. 1976.

MUGGLER, C. C. **Polygenetic Oxisols on tertiary surfaces, Minas Gerais, Brazil: soil genesis and landscape development.** 1998. 186 f. Tese - Wageningen, Wageningen Agricultural University. 1998.

NEMES, A.; RAWLS, W. J.; PACHEPSKY, Y. A.; **Influence of organic matter on the estimation of saturated hydraulic conductivity.** Soil Science Society of American Journal, vol. 69, p. 1330-1337. 2005.

NETO, A. A.; FERNANDES, E. J. **Condutividade hidráulica de um Latossolo vermelho em pousio e cultivo intensivo.** Pesquisa Agropecuária Brasileira. Brasília, vol. 40, n. 8, p. 797 – 802. 2005.

OLIVEIRA, A. R. de. **Relações solo-paisagem e modelo de predição de solos da bacia do córrego Marinheiro, Sete Lagoas (MG).** 2016. 74 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Programa de pós-graduação em Geografia. IGC-UFMG. 2016.

OLIVEIRA, C. A. S.; COSTA, W. A. Modelos de ajuste e métodos para determinação de curva característica de um Latossolo Vermelho-Amarelo. **CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, Recife, PE.** Anais Recife: SBCS. 2005.

OLIVEIRA, L. B. **Mineralogia, micromorfologia, gênese e classificação de Luvisolos e planossolos desenvolvidos de rochas metamórficas no semi -**

árido do nordeste brasileiro. 2007. 169 f. Tese – Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, UFV Viçosa, MG. 2007.

OLIVEIRA, L. B. RIBEIRO, M. R.; JACOMINE, P. K. T.; RODRIGUES, J. J. V.; MARQUES, F. A. **Funções de pedotransferência para predição da umidade retida a potenciais específicos em solos do Estado de Pernambuco.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, vol. 26, n. 2, p. 315-323. 2002.

OLIVEIRA, L. B.; FONTES, M. P. F.; RIBEIRO, M. R.; KER, J. C. Funções de pedotransferência para estimativa da umidade retida a potenciais específicos por Luvisolos do nordeste brasileiro. **Congresso Brasileiro De Ciência Do Solo**, 30, Recife, PE. Anais Recife: SBCS. 2005.

PACHEPSKY, Y. A.; RAWLS, W. J. **Accuracy and reliability of pedotransfer functions as affected by grouping soils.** Soil Science Society of America Journal. vol. 63, n. 6, p. 1748 – 1756. 1999.

PAES, J. L. A. **Dispersão e condutividade hidráulica em solos de Pernambuco, em resposta à saturação por sódio e à concentração salina da solução.** 2012. 74 f. Dissertação. Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, UFV Viçosa, MG. 2012.

PANOSO, L. A.; RAMOS, D. P.; BRANDÃO, M. **Solos do Campo Experimental da Embrapa Milho e Sorgo: suas características e classificação no novo sistema brasileiro.** Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento. Rio de Janeiro. RJ. n.5. 92 p. 2002.

PARAHYBA, R. da B. V. **Geoambientes, litotopossequência e características físico-hídricas de solos arenosos da Bacia do Tucano, Bahia.** Recife, 2013. 269 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Programa de Pós-graduação em Geografia. UFPE, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Recife. 2013.

PEARSON, K. The grammar of Science. J. M. Dent and Company. Londres. 1892.

PÉREZ, D. V.; SIMÃO, S. M.; SALANTINO, A. **Identificação e caracterização da repelência à água em alguns solos brasileiros.** Revista Brasileira de Ciência do Solo. vol. 22, p. 197 – 207. 1998.

PESSOA, P. F. P. **Caracterização Hidrogeológica da região cárstica de Sete Lagoas – MG: potencialidades e risco.** 1996. 101 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrologia, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1996.

PETERS, A.; DURNER, W. **A simple model for describing hydraulic conductivity in unsaturated porous media accounting for film and capillary flow.** Water Resources Research. vol. 44. 2008.

PETERS, A.; DURNER, W. **Simplified evaporation method for determining soil hydraulic properties.** Journal of Hydrology. vol. 356, n. 1- 2, p.147–162. 2008.

PORTUGAL, A. F.; COSTA, O. D. V.; da COSTA, L. M.; dos SANTOS, B. C. M. **Atributos químicos e físicos de um Cambissolo Háplico Tb distrófico sob**

diferentes usos na zona da mata mineira. Revista Brasileira de Ciências do Solo, vol. 32, p. 249 – 258. 2008.

PORTUGAL, A. F.; COSTA, O. V.; da COSTA, L. M.; do SANTOS, B. C. M. **Características químicas e físicas de um Argissolo submetido a diferentes usos agrícolas.** Revista Ceres, vol. 54, n. 315, p. 412 – 421. 2007.

R CORE TEAM R: **A language and environment for statistical computing.** R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.URL <http://www.R-project.org/>. 2015.

RAGAB, R.; COOPER J. D. **Variability of unsaturated zone water transport parameters.** Botanical Gazette, Chicago, vol. 53, n. 1, p. 20-37. 1912.

RAGAB, R.; COOPER, J. D. **Variability of unsaturated zone water transport parameters: implications for hydrological modelling. 1. In situ measurements,** vol.148, p.109-131. 1993.

RAWLS, W. J.; PACHEPKY, Y. A.; RITCHIE, J. C.; SOBECKI, T. M.; BLOODWORTH, H. **Effect of soil organic carbon on soil water retention.** Geoderma, vol. 116, p. 61 – 76. 2003.

REICHARDT, K. **Processo de transferência no sistema solo-planta-atmosfera.** 4.ed. Campinas: Fundação Cargill, 466p. 1985.

REICHERT, J. M.; ALBUQUERQUE, J. A.; KAISER, D. R.; REINERT, D. J.; URACH, F. L.; CARLESSO, R. **Estimation of water retention and availability in soils of Rio Grande do Sul.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol. 33, p.1547 – 1560. 2009.

REINERT, D, J.; REICHERT, J, M. **Propriedades físicas do solo.** Universidade Federal de Santa Maria. Centro de Ciências Rurais. Santa Maria - RS. 2006.

RESENDE, M.; CURI, N.; LANI, J. L. Tropical soils: implications on sustainable development. In: **SCIENCE for Sustainable Development in Latin America and the Caribbean.**Rio de Janeiro, Academia Brasileira de Ciências, não paginado. 1999.

REYNOLDS, W. D; ELRICK, D. E.**In situ measurement of field saturated hydraulic conductivity, sorptivity and the α -parameter using Guelph permeameter.**Soil Science, vol.140. 1985. University of Guelph, Guelph, Ontario. 1986.

RIBEIRO, J. H.; TULLER, M. P.; FILHO A. D.; PADILHA, A. V.; CORDÓBA C. V. Projeto VIDA: **Mapeamento geológico, região de Sete Lagoas, Pedro Leopoldo, Matozinhos, Lagoa Santa, Vespasiano, Capim Branco, Prudente Moraes, Confins e Funilândia, Minas Gerais – Relatório final, escala final 1:50 000.**2 Ed., Belo Horizonte: CPRM, 54p. 2003.

RIBEIRO, K. D; MENEZES, S. M.; MESQUITA, M. G. B. F.; SAMPAIO, F. M. T. **Propriedades físicas do solo, influenciadas pela distribuição de poros, de seis classes de solos da região de Lavras-MG.** Ciência e agrotecnologia, Lavras, vol. 31, n. 4, p. 1167 – 1175. 2007.

RICHARDS, L. A. Physical conditions of water in soil. In: BLACK, C. A. (ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society for Testing and Materials. p. 128 – 152. 1965.

ROSSI, C.; NIMMO, J. R. **Modeling of soil water retention from saturation to oven dryness**. Water Resources Research, Washington, DC, vol. 30, n. 3, p. 701 – 708. 1994.

SANTOS, D. F. M. **Dinâmica do uso e cobertura do solo nos municípios de Sete Lagoas e Prudente de Moraes-MG: uma análise espacial do crescimento urbano**. 2016. 57f. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais) - Programa de pós-Graduação em Geografia. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2016.

SANTOS, E. E. F.; RIBEIRO, M. R. **Influência da irrigação e do cultivo nas propriedades de um Latossolo e um Argilossolo da região do submédio São Francisco: atributos morfológicos e físicos**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol. 24, p. 875 – 884. 2000.

SANTOS, H. G.; OLIVEIRA, J. B.; LUMBRERAS, J. F.; dos ANJOS, L. H. C.; COELHO, M. R.; JACOMINE, P. K. T.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, V. A. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Embrapa. 3ª ed. 2013.

SANTOS, M. L. M.; MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B. Predição e mapeamento de capacidade de retenção de água do solo usando funções de pedotransferência e modelagem quantitativa. **Congresso Brasileiro De Ciência Do Solo**, 30., Recife, PE. Anais Recife: SBSCS. 2005.

SANTOS, W. J. R.; CURI, N.; SILVA, S. H. G.; ARAÚJO, E. F.; MARQUES, J. J. **Pedotransfer functions for water retention in different soil classes from the center - southern Rio Grande do Sul State**. Ciência e Agrotecnologia, Lavras, vol. 37, n. 1, p. 49 – 60. 2013.

SCANLON, B. R.; ANDRASKI, B. J.; BILSKIE, J. Miscellaneous Methods for Measuring Matric or Water Potential. In: DANE, J. H.; TOPP, C. (eds). **Methods of soil analysis**. Madison: soil Science Society of America, 4. Physical methods, p. 643 – 970. 2002.

SCHEINOST, A. C; SINOWSKI, W.; AUERSWALD, K. **Regionalization of soil water retention curves in a highly variable soils cape, I. Developing a new pedotransfer function**. Geoderma, vol. 78, p. 129-143. 1997.

SCHERPINSKI, C.; URIBE-OPAZO, M. A.; VILAS BOAS, M. A.; SAMPAIO, S. C.; JOHANN, J. A. **Variabilidade espacial da condutividade hidráulica e da infiltração de água no solo**. Acta Scientiarum Agronomy, vol. 32, p. 7 – 13. 2010.

SILVA, M. L. N.; BLANCANEUX, P.; CURI, N.; LIMA, J. M.; MARQUES, J. J. G. S. M.; CARVALHO, A. M. **Estabilidade e resistência de agregados de Latossolo Vermelho-Escuro cultivado com sucessão milho-adubo verde**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, vol. 33, p. 97 – 103. 1998.

SOIL SURVEY MANUAL. Washington, D.C.: U.S. Department of Agriculture. 503p. Agriculture handbook, n. 18). 1951.

SOTO, M. A.; CHANG, K. H.; VILAR, O. M. **Análise do método do permeâmetro Guelph na determinação da condutividade hidráulica saturada.** Águas subterrâneas, vol. 23, n. 01, p.137 – 152. 2009.

SOUZA, M. S. **Caracterização do intervalo hídrico ótimo de três solos da região norte fluminense.** 2004. 72 f.Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes-RJ. 2004.

SPERA, S. T.; REATTO, A.; CORREIA, J. R.; de BRITO SIMM, K. M. C.; MILHOMEN, A. S. **Características físicas dos solos e a ocorrência de fitofisionomias de Cerrado na Bacia do Rio Jardim – DF.**Pesquisa em Andamento.Embrapa. 1999.

STUMPP, C.; ENGELHARDT, S.; HOFMANN, M. **Evaluation of pedotransfer functions for estimating soil hydraulic properties of prevalent soils in a catchment of the Bavarian Alps.** European Journal of Forest Research, Heidelberg, vol. 128, n. 6, p. 609 – 620. 2009.

TEIXEIRA, W. G. **Land use effects on Soil Physical and Hydraulic Properties of a Clayey Ferralsol in the Central Amazon.** 2001. 255 f. Tese (Doutorado) - University of Bayreuth. Bayreuth – Alemanha. 2001.

THAKUR, V. K. S.; SREEDEEP, S.; ASCE, D. N. S. M. **Parameters affecting soil-water characteristic curves of fine-grained soils.**Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Asce, vol. 4, n. 131, p. 521-524. 2005.

TOMASELLA, J.; HODNETT, M. G.; ROSSATO, L. **Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in Brazilian soils.** Soil Science Society of America Journal, Madison, vol. 64, n. 1, p. 327-338. 2000.

TOMASELLA, J.; HOODNETT, M. G. **Estimating unsaturated hydraulic conductivity of Brazilian soils using soil water retention data.** Soil Science, Baltimore, vol. 162, p: 703 – 712. 1997.

VAN GENUCHTEN, M. T. **A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils.** Soil Science Society of American Journal, Madison, WI, vol. 44, p. 892-898. 1980.

Van LIER, Q. J. **Física do solo.** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2010.

VIANA, J. H. M. **Determinação da densidade de solos e de horizontes cascalhentos.** Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo. Comunicado técnico, 154. 2008.

VIEIRA, M. L.; KLEIN, V. A. Propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. Revista Brasileira de Ciência do Solo. vol. 31, p. 1271 – 1280. 2007.

WONNACOTT, T. H.; WONNACOTT, R. J., Estatística aplicada à economia e à administração.Editora. 1981

WÖSTEN, J. H. M.; PACHEPSKY, Y. A. **Pedotransfer functions bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics.** Journal of Hydrology, Amsterdam, vol. 251, n. 3-4, p. 123 – 150. 2001.

YASSUDA, E. R. **Gestão de recursos hídricos: fundamentos e aspectos institucionais.** Revista da Administração Pública, vol. 27, n. 2, p. 5 – 18. 1993.

YODER, R. E. **A direct method of aggregate analysis of soil and a study of the physical nature of erosion losses.** Journal of America Society of Agronomy, vol. 28, p. 337 – 357. 1936.

ZHANG, Z. F.; GROENEVELT, P. H.; PARKIN, G. W. **The well - shape factor for the measurement of soil hydraulic properties using the Guelph Permeameter.** Department of Land Resource Science, University of Guelph, Guelph, Ontario, Canada. Soil & Tillage Research, vol. 49, p. 219 – 221. 1998.

ANEXO I

Tabela I. 1. Valores medidos de condutividade hidráulica saturada, em mm.h^{-1} .

Perfil	Classe	Profundidade (cm)	Média	Mediana	DP
1	PVA	20	19,20	20,10	17,87
		50	31,27	20,70	32,85
2	PVA	20	13,07	7,60	11,06
		50	7,13	6,60	2,94
3	LV	20	46,13	20,20	47,28
		50	43,03	43,60	11,26
4	LV	20	45,27	19,30	47,51
		50	73,37	67,30	19,23
5	CY	20	7,20	6,10	4,26
		50	1,23	0,10	1,96
6	CX	20	23,00	19,40	7,75
		50	7,10	7,70	3,74
7	PA	20	13,20	14,50	8,62
		50	3,53	2,90	3,59
8	CH	20	28,53	27,20	16,74
		50	56,33	61,60	21,10
9	TC	20	30,43	27,40	17,84
		50	6,10	2,00	8,07
10	NV	20	18,90	16,90	11,33
		50	15,73	17,60	9,14

Tabela I. 2.Valores de CTC medidos em laboratório.

Perfil	Classe	Profundidade (cm)	Média
1	PVA	20	7,86
		50	6,48
2	PVA	20	12,72
		50	13,53
3	LV	20	9,81
		50	4,96
4	LV	20	15,94
		50	9,40
5	CY	20	12,21
		50	7,33
6	CX	20	4,32
		50	3,67
7	PA	20	8,10
		50	7,27
8	CH	20	15,02
		50	10,54
9	TC	20	16,43
		50	11,01
10	NV	20	13,63
		50	12,90

Tabela I. 3. Valores medidos de ΔpH ($\text{pH}^{\text{água}} - \text{pH}^{\text{KCl}}$).

Perfil	Classe	Profundidade (cm)	Média
1	PVA	20	-1,1
		50	-1
2	PVA	20	-0,9
		50	-1,1
3	LV	20	-1
		50	-1,5
4	LV	20	-0,5
		50	-1,1
5	CY	20	-0,9
		50	-1,4
6	CX	20	-1,5
		50	-1,6
7	PA	20	-0,7
		50	-1
8	CH	20	-0,7
		50	-1,2
9	TC	20	-1
		50	-1,2
10	NV	20	-1
		50	-1,2

Tabela I. 4.Valores medidos para densidade de partícula, em g.cm⁻³.

Perfil	Classe	Profundidade (cm)	Média
1	PVA	20	2,65
		50	2,52
2	PVA	20	2,42
		50	2,63
3	LV	20	2,69
		50	2,13
4	LV	20	2,41
		50	2,6
5	CY	20	2,57
		50	2,42
6	CX	20	2,41
		50	2,56
7	PA	20	2,45
		50	2,57
8	CH	20	2,53
		50	2,48
9	TC	20	2,46
		50	2,65
10	NV	20	2,45
		50	2,53

Tabela I. 5. Valores medidos para densidade do solo, em g.cm^{-3} .

Perfil	Classe	Profundidade (cm)	Média	Mediana	DP
1	PVA	20	1,31	1,32	0,01
		50	1,48	1,51	0,03
2	PVA	20	1,05	1,03	0,02
		50	1,32	1,28	0,03
3	LV	20	1,12	1,14	0,03
		50	0,96	0,95	0,03
4	LV	20	0,76	0,76	0,03
		50	0,92	0,92	0,01
5	CY	20	1,21	1,23	0,03
		50	1,57	1,57	0,02
6	CX	20	1,16	1,12	0,05
		50	1,48	1,53	0,08
7	PA	20	1,36	1,35	0,05
		50	1,45	1,44	0,01
8	CH	20	0,95	0,94	0,01
		50	2,17	1,13	0,18
9	TC	20	1,06	1,06	0,00
		50	1,4	1,39	0,04
10	NV	20	1,22	1,27	0,07
		50	1,23	1,25	0,03

Tabela I. 6. Valores medidos para Diâmetro Médio Geométrico (DMG), em mm.

Perfil	Classe	Profundidade (cm)	Média	Mediana	DP
1	PVA	20	3,14	3,13	0,07
		50	1,21	1,24	0,18
2	PVA	20	4,25	4,23	0,05
		50	2,60	2,65	0,18
3	LV	20	2,75	2,85	0,18
		50	1,45	1,45	0,13
4	LV	20	3,70	3,64	0,11
		50	1,59	1,68	0,18
5	CY	20	1,31	1,28	0,15
		50	1,30	1,24	0,24
6	CX	20	3,33	3,22	0,42
		50	1,70	1,69	0,18
7	PA	20	3,08	3,12	0,39
		50	1,22	1,20	0,10
8	CH	20	4,67	4,67	0,04
		50	4,57	4,53	0,09
9	TC	20	4,21	4,26	0,10
		50	0,94	0,82	0,25
10	NV	20	4,15	4,16	0,08
		50	2,70	2,85	0,48

Tabela I. 7. Valores percentuais da análise granulométrica e classificação textural das classes analisadas.

Classe	Profundidade (cm)	Areia	Silte	Argila	Classificação textural
PVA	20	60,35	16,59	23,06	Franco-argiloarenosa
	50	38,33	18,17	43,49	Franco-argiloarenosa
PVA	20	19,84	41,27	38,89	Argila
	50	11,70	42,53	45,77	Argila
LV	20	11,84	23,89	64,27	Muito argilosa
	50	14,97	45,58	39,46	Muito argilosa
LV	20	11,40	62,13	26,47	Muito argilosa
	50	13,30	14,06	72,64	Muito argilosa
CY	20	27,84	34,42	37,74	Franco-argilosa
	50	9,23	47,19	43,57	Franco-argilossiltosa
CX	20	58,51	13,16	28,33	Franco-argiloarenosa
	50	58,90	19,81	21,29	Franco-argiloarenosa
PA	20	45,55	18,10	36,35	Argiloarenosa
	50	38,98	13,20	47,82	Argiloarenosa
CH	20	23,04	15,79	61,17	Muito argilosa
	50	22,64	16,41	60,95	Muito argilosa
TC	20	14,87	49,77	35,36	Franco-argilossiltosa
	50	9,31	52,07	38,62	Franco-argilossiltosa
NV	20	15,83	49,57	34,60	Franco-argilossiltosa
	50	11,85	47,12	41,03	Argilossiltosa

Tabela I. 8. Valores percentuais da análise granulométrica da fração areia.

Perfil	Classe	Profundidade (cm)	Areia grossa	Areia fina
1	PVA	20	44,33	16,02
		50	29,02	9,31
2	PVA	20	15,54	4,30
		50	8,87	2,83
3	LV	20	8,77	3,06
		50	11,09	3,88
4	LV	20	8,14	3,26
		50	9,62	3,68
5	CY	20	22,10	5,74
		50	1,20	8,04
6	CX	20	45,73	12,78
		50	43,94	14,96
7	PA	20	33,17	12,38
		50	29,26	9,72
8	CH	20	16,48	6,56
		50	17,37	5,28
9	TC	20	8,31	6,56
		50	4,85	4,46
10	NV	20	7,08	8,75
		50	5,74	6,10

Tabela I. 9. Valores percentuais de macro agregados e microagregados.

Perfil	Classe	Profundidade (cm)	Macro agregados (> 0,25mm)			Micro agregados (< 0,25mm)		
			Média	Mediana	DP	Média	Mediana	DP
1	PVA	20	96,05	96,23	0,42	3,95	3,77	0,42
		50	88,03	87,91	1,41	11,97	12,09	1,41
2	PVA	20	97,42	97,45	0,05	2,58	2,55	0,05
		50	94,23	94,00	0,44	2,92	1,47	2,67
3	LV	20	93,86	93,14	1,46	6,14	6,86	1,46
		50	81,15	82,48	2,89	18,85	17,52	2,89
4	LV	20	96,81	96,74	0,19	3,19	3,26	0,19
		50	87,76	87,67	0,76	12,24	12,33	0,76
5	CY	20	89,18	89,29	1,02	10,82	10,71	1,02
		50	88,46	88,27	1,99	11,54	11,73	1,99
6	CX	20	97,58	97,35	0,95	2,42	2,65	0,95
		50	90,46	90,56	1,25	9,54	9,44	1,25
7	PA	20	96,62	96,59	1,19	3,38	3,41	1,19
		50	92,63	91,26	3,37	7,37	8,74	3,37
8	CH	20	99,26	99,27	0,10	0,74	0,73	0,10
		50	100,13	100,17	0,19	-0,13	-0,17	0,19
9	TC	20	98,83	98,90	0,12	1,17	1,10	0,12
		50	85,25	84,98	2,13	14,75	15,02	2,13
10	NV	20	97,91	97,81	0,24	2,09	2,19	0,24
		50	95,51	96,01	1,71	4,49	3,99	1,71

Tabela I. 10. Valores estimados de microporosidade, macroporosidade e porosidade total, em $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$.

Perfil	Classe	Prof.	Ds	Porosidade		
				Micro	Macro	Total
		cm	g.cm-3	cm3.cm-3		
1	PVA	20	1,31	0,271	0,220	0,482
		50	1,48	0,321	0,128	0,427
2	PVA	20	1,05	0,418	0,182	0,602
		50	1,32	0,317	0,193	0,513
3	LV	20	1,12	0,366	0,215	0,583
		50	0,96	0,328	0,271	0,589
4	LV	20	0,76	0,298	0,395	0,689
		50	0,92	0,306	0,325	0,638
5	CY	20	1,21	0,319	0,200	0,542
		50	1,57	0,317	0,073	0,398
6	CX	20	1,16	0,293	0,257	0,536
		50	1,48	0,261	0,150	0,423
7	PA	20	1,36	0,245	0,267	0,492
		50	1,45	0,280	0,177	0,455
8	CH	20	0,95	0,285	0,293	0,599
		50	1,25	0,269	0,152	0,420
9	TC	20	1,06	0,346	0,229	0,580
		50	1,4	0,298	0,149	0,472
10	NV	20	1,22	0,336	0,197	0,552
		50	1,23	0,330	0,252	0,551

Tabela I. 11. Valores de CAD estimados, em $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ para os solos da bacia do Córrego Marinheiro, nas profundidades de 20 e 50 cm.

ID. PERFIL	SIGLA	PROF.	CAD ₁	CAD ₂	CAD ₃
P1	PVA	20 cm	0,185	0,163	0,116
		50 cm	0,229	0,218	0,195
P2	PVA	20 cm	0,249	0,233	0,184
		50 cm	0,147	0,137	0,107
P3	LV	20 cm	0,146	0,121	0,076
		50 cm	0,095	0,058	0,012
P4	LV	20 cm	0,069	0,050	0,017
		50 cm	0,070	0,045	0,010
P5	CY	20 cm	0,191	0,179	0,141
		50 cm	0,196	0,188	0,160
P6	CX	20 cm	0,183	0,165	0,123
		50 cm	0,159	0,142	0,106
P7	PA	20 cm	0,118	0,107	0,068
		50 cm	0,156	0,146	0,110
P8	CH	20 cm	0,082	0,062	0,027
		50 cm	0,056	0,050	0,042
P9	TC	20 cm	0,184	0,173	0,129
		50 cm	0,135	0,127	0,100
P10	NV	20 cm	0,173	0,164	0,130
		50 cm	0,159	0,151	0,119

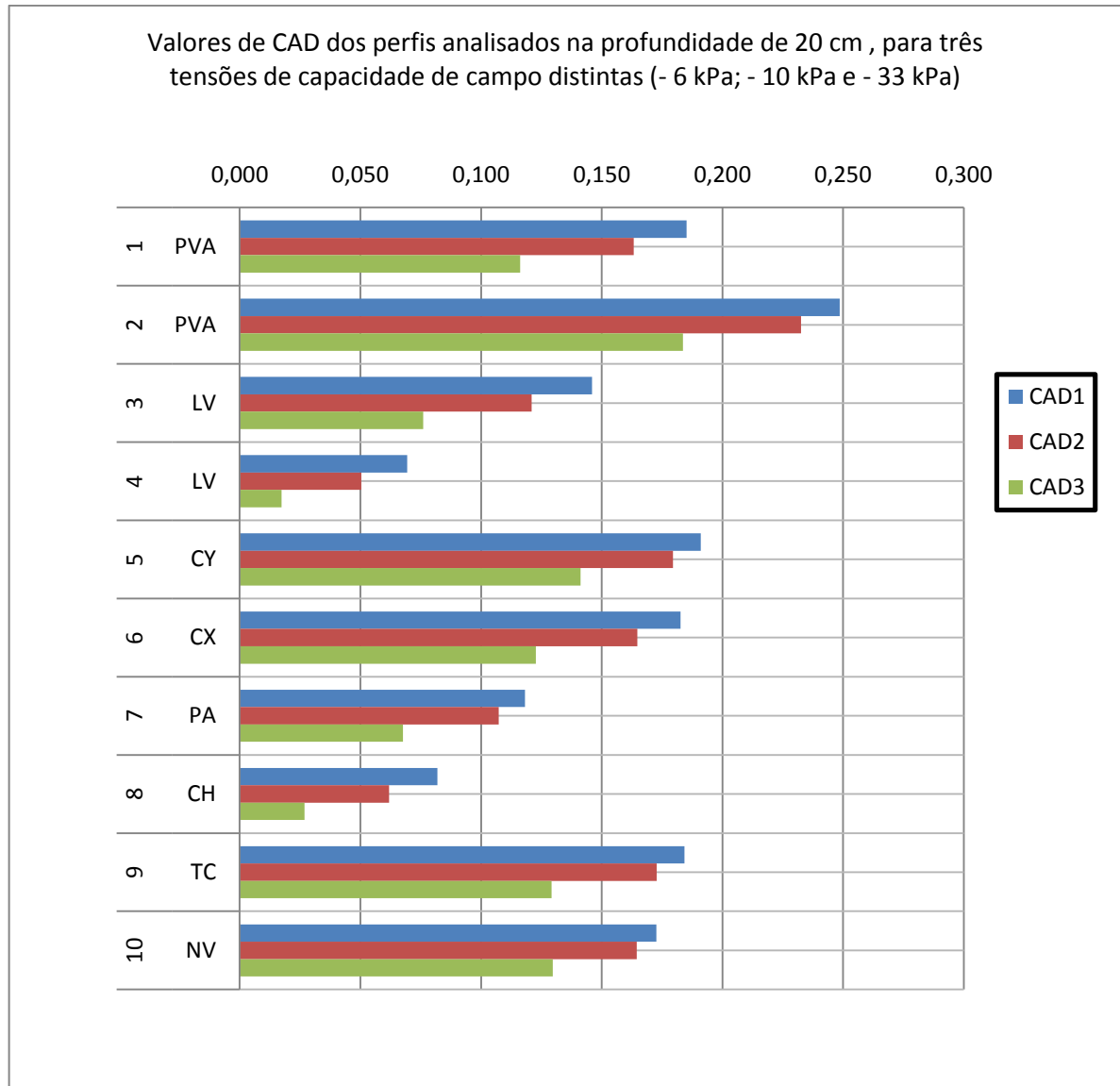


Figura 25. Valores de CAD dos perfis analisados na profundidade de 20 cm, para três tensões de capacidade de campo distintas (- 6 kPa; - 10 kPa e - 33 kPa).Fonte: Autor

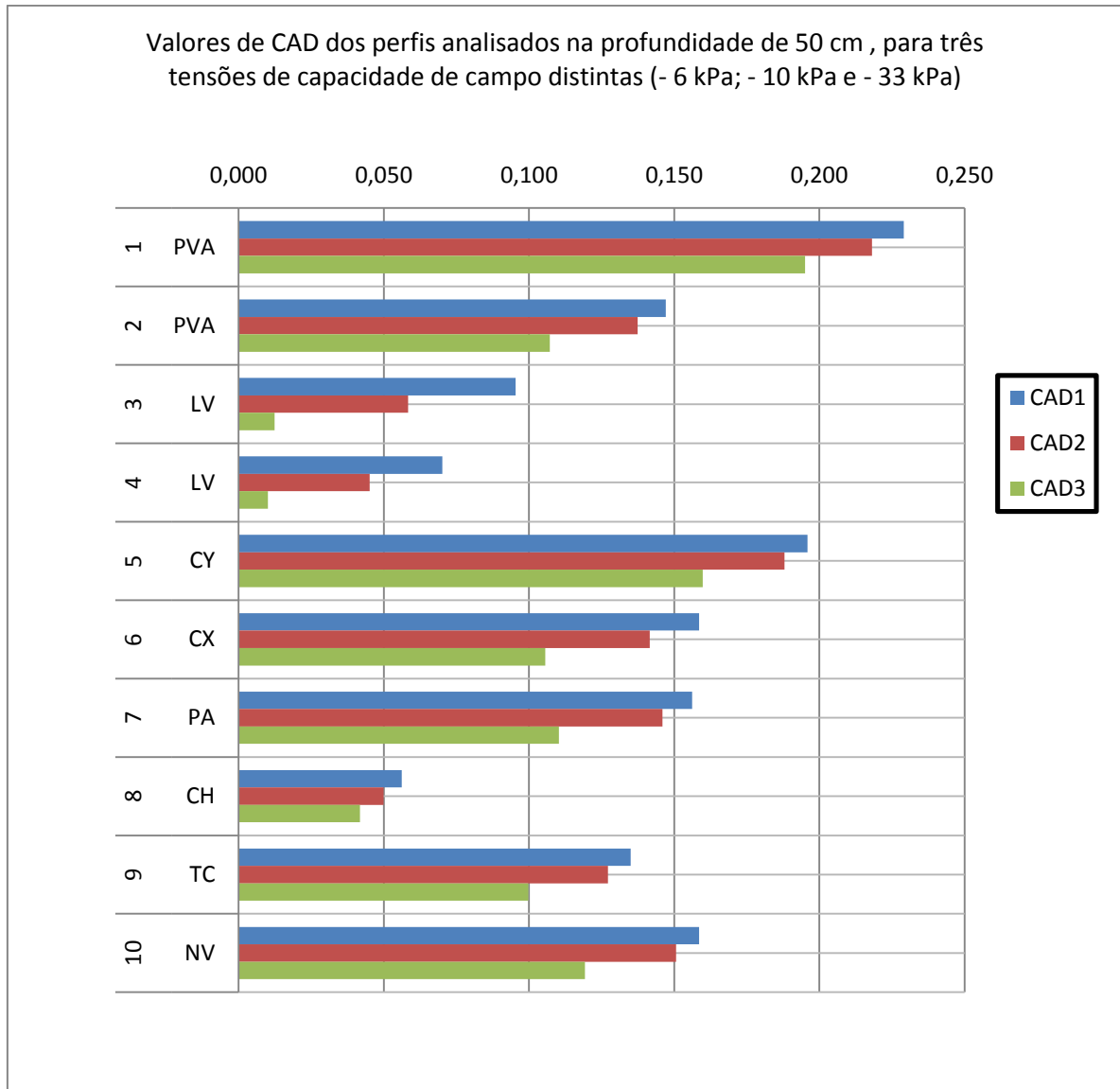


Figura 26. Valores de CAD dos perfis analisados na profundidade de 20 cm, para três tensões de capacidade de campo distintas (- 6 kPa; - 10 kPa e - 33 kPa). Fonte: Imagem feita pelo autor.

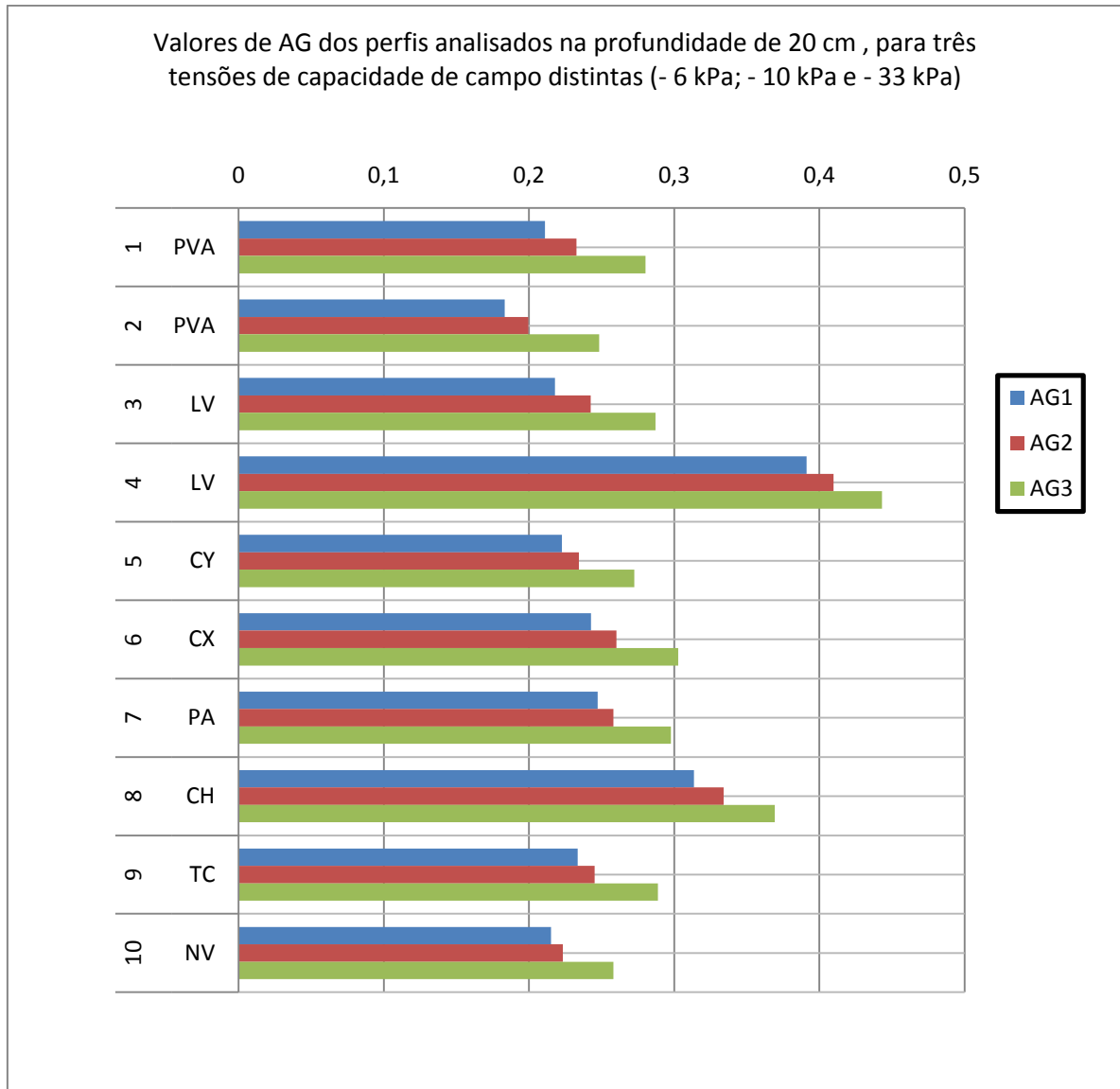


Figura 27. Valores de AG dos perfis analisados na profundidade de 20 cm, para três tensões de capacidade de campo distintas (- 6 kPa; - 10 kPa e - 33 kPa). Fonte: Autor.

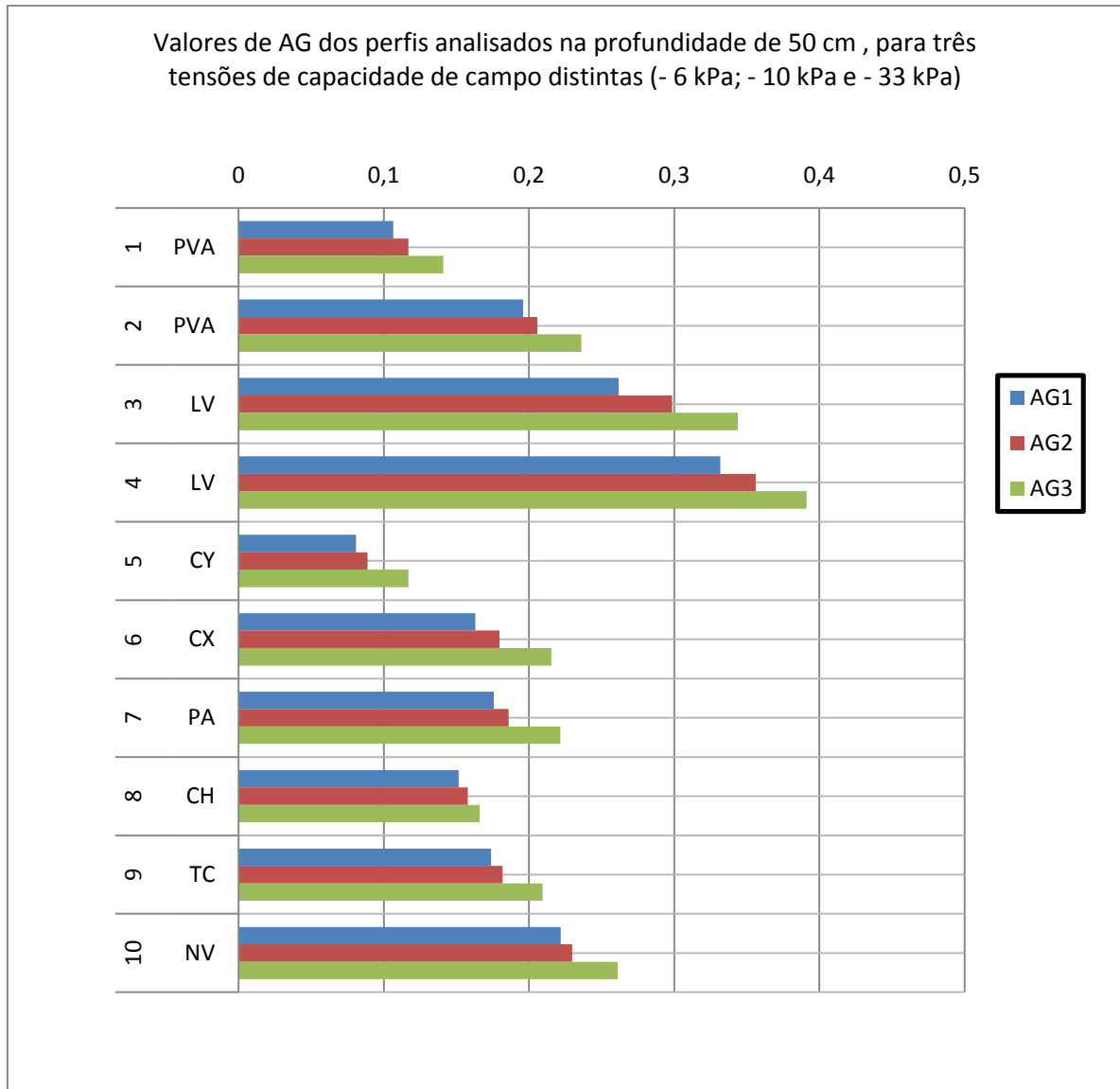


Figura 28. Valores de AG dos perfis analisados na profundidade de 20 cm, para três tensões de capacidade de campo distintas (- 6 kPa; - 10 kPa e - 33 kPa). Fonte: Autor.

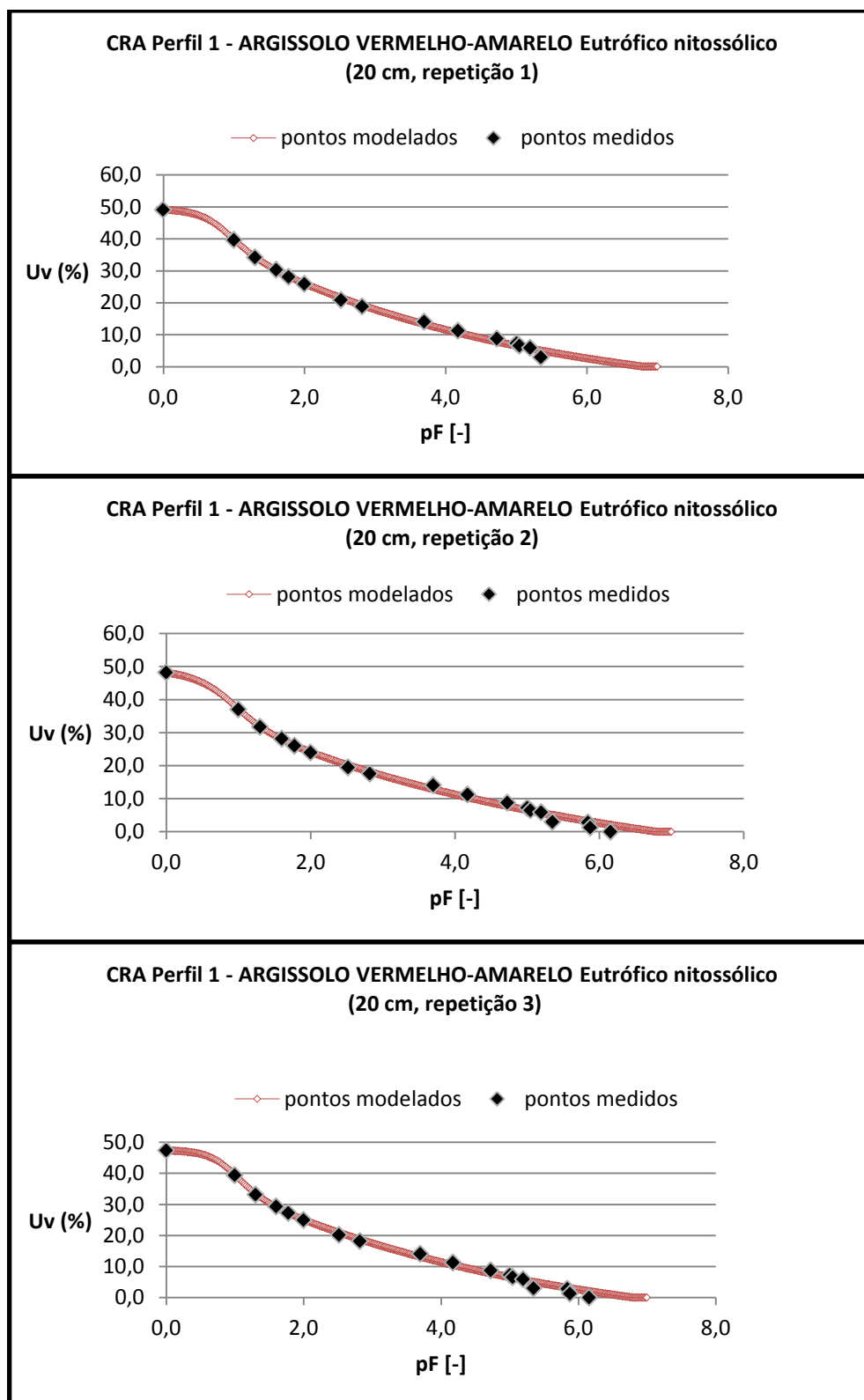


Figura 29. Curvas de retenção de água no solo modeladas para o Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico nitossólico (perfil 1), na profundidade de 20 cm, repetições 1, 2 e 3. Fonte: Autor.

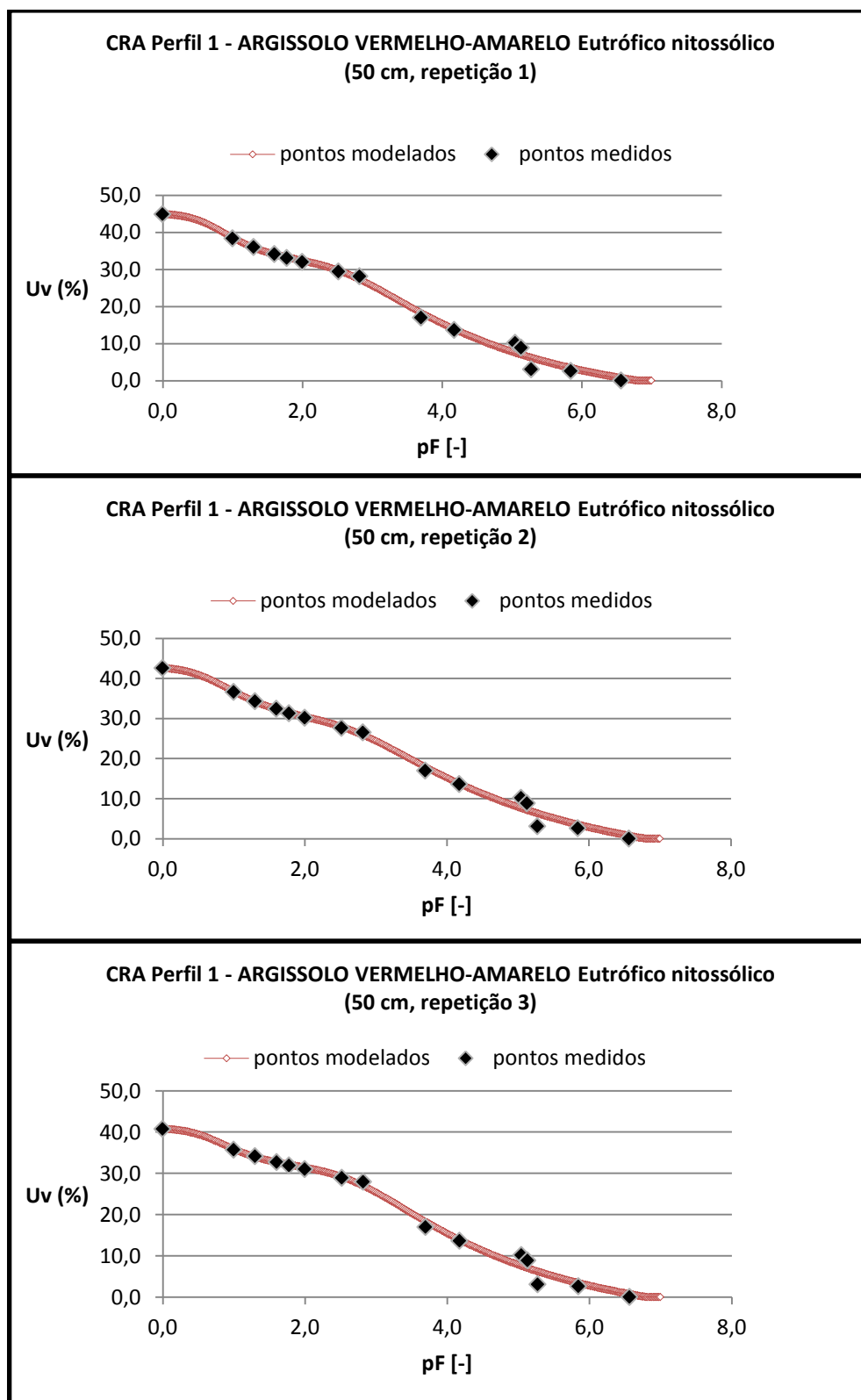


Figura 30. Curvas de retenção de água no solo modeladas para o Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico nitossólico (perfil 1), na profundidade de 50 cm, repetições 1, 2 e 3. Fonte: Autor.

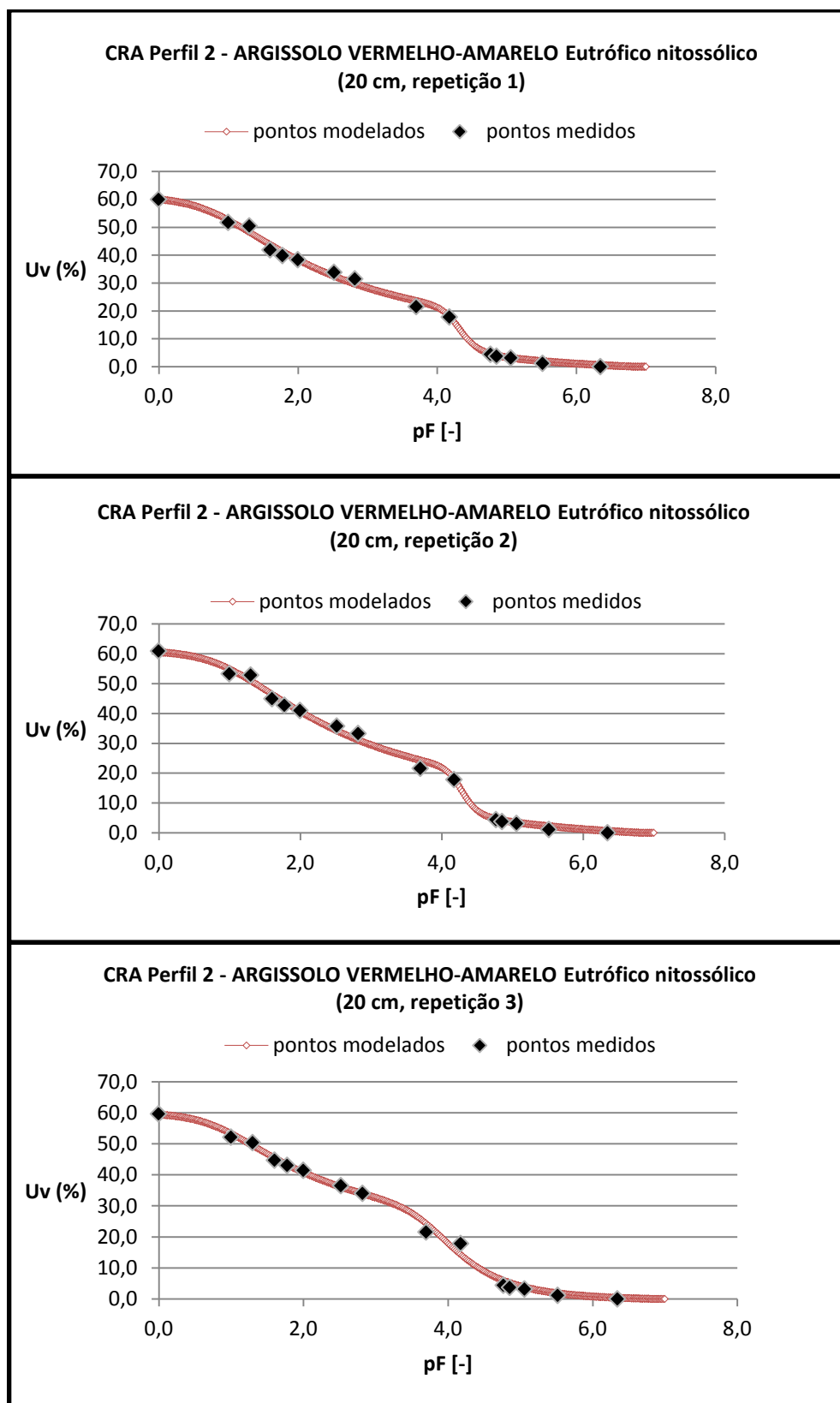


Figura 31. Curvas de retenção de água no solo modeladas para o Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico nitossólico (perfil 2), na profundidade de 20 cm, repetições 1, 2 e 3. Fonte: Autor.

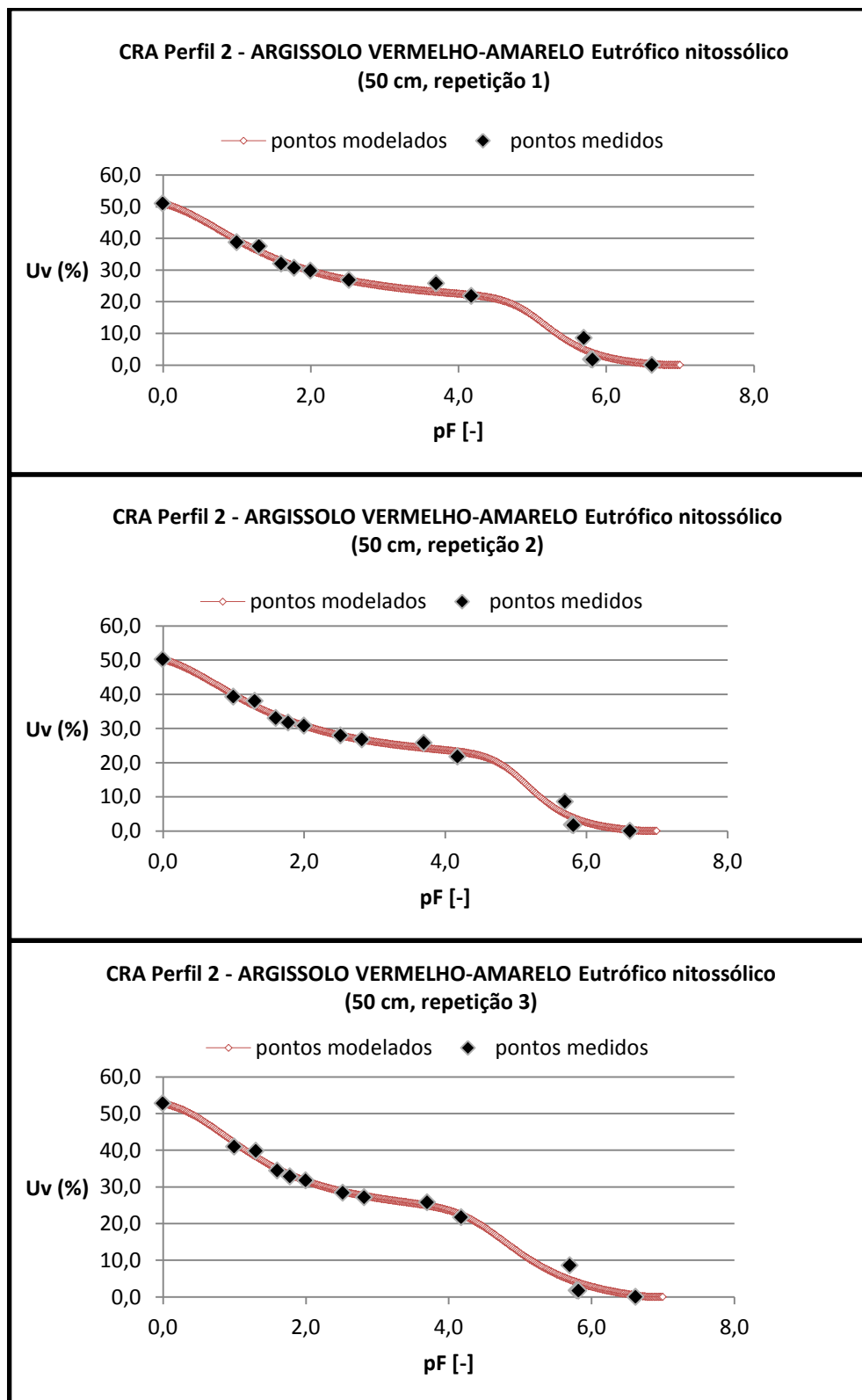


Figura 32. Curvas de retenção de água no solo modeladas para o Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico nitossólico (perfil 2), na profundidade de 50 cm, repetições 1, 2 e 3. Fonte: Autor.

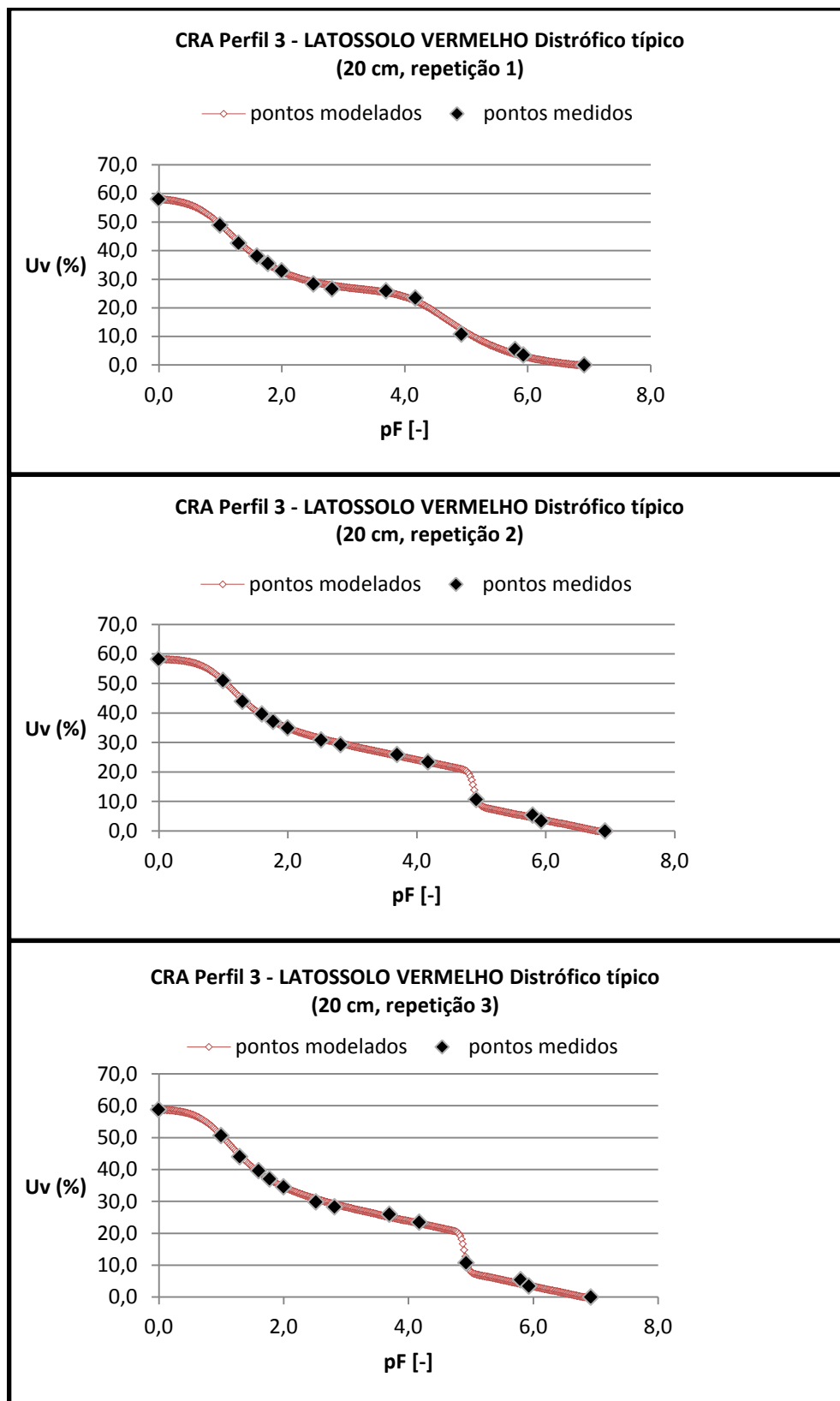


Figura 33. Curvas de retenção de água no solo modeladas para o Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico (perfil 3), na profundidade de 20 cm, repetições 1, 2 e 3. Fonte: Autor.

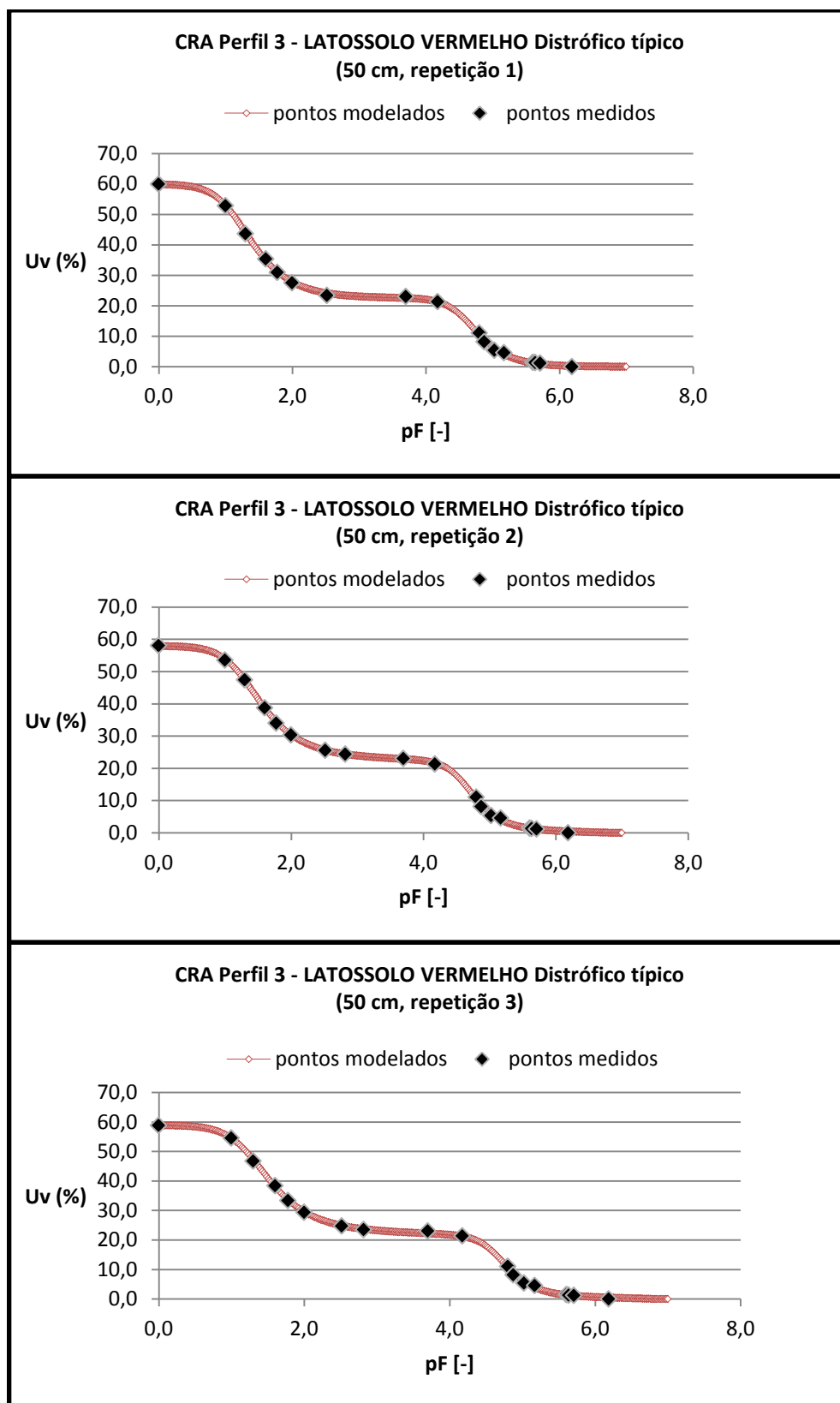


Figura 34. Curvas de retenção de água no solo modeladas para o Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico (perfil 3), na profundidade de 50 cm, repetições 1, 2 e 3. Fonte: Autor.

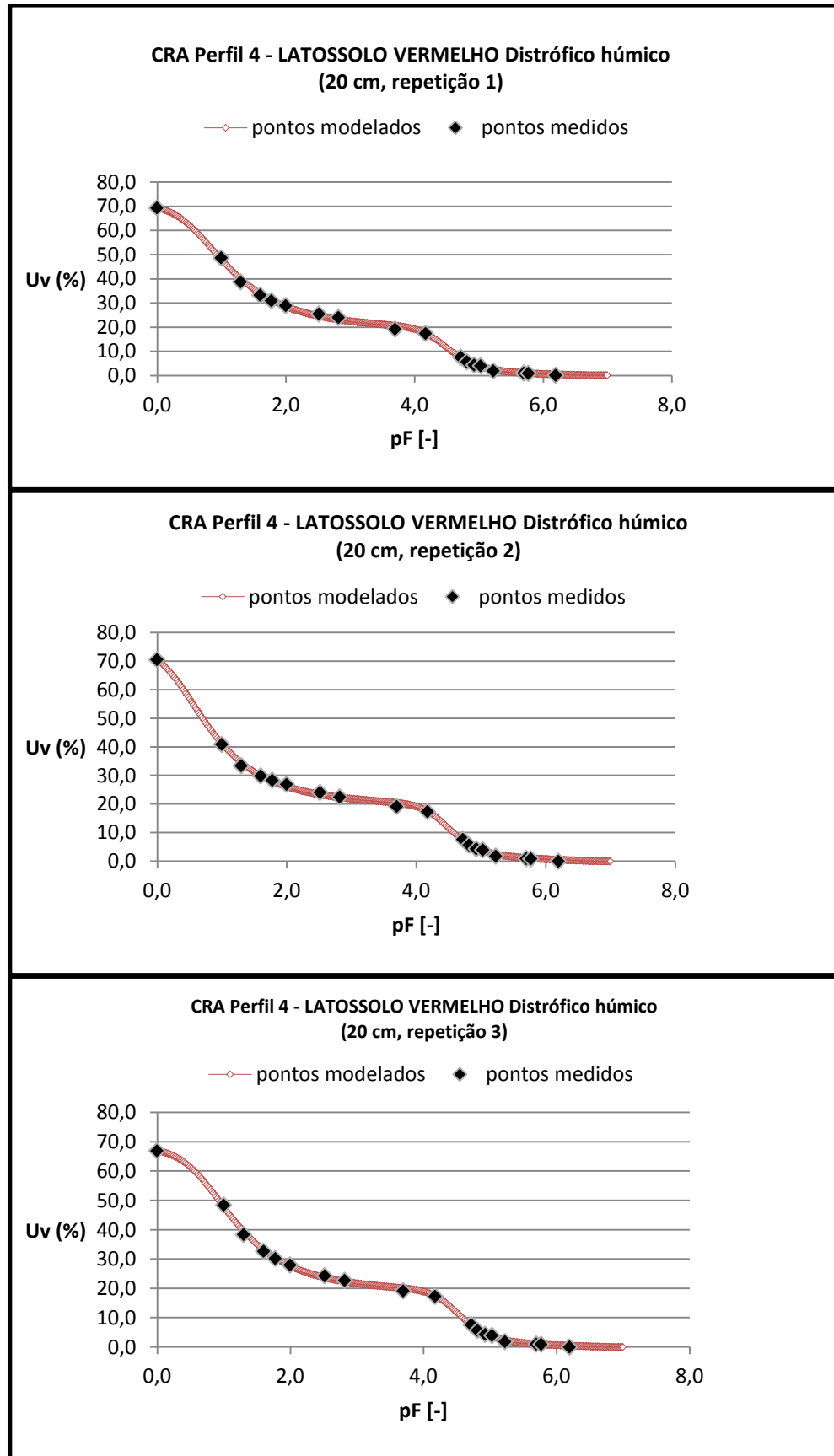


Figura 35. Curvas de retenção de água no solo modeladas para o Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico (perfil 4), na profundidade de 20 cm, repetições

1, 2 e 3. Fonte: Autor.

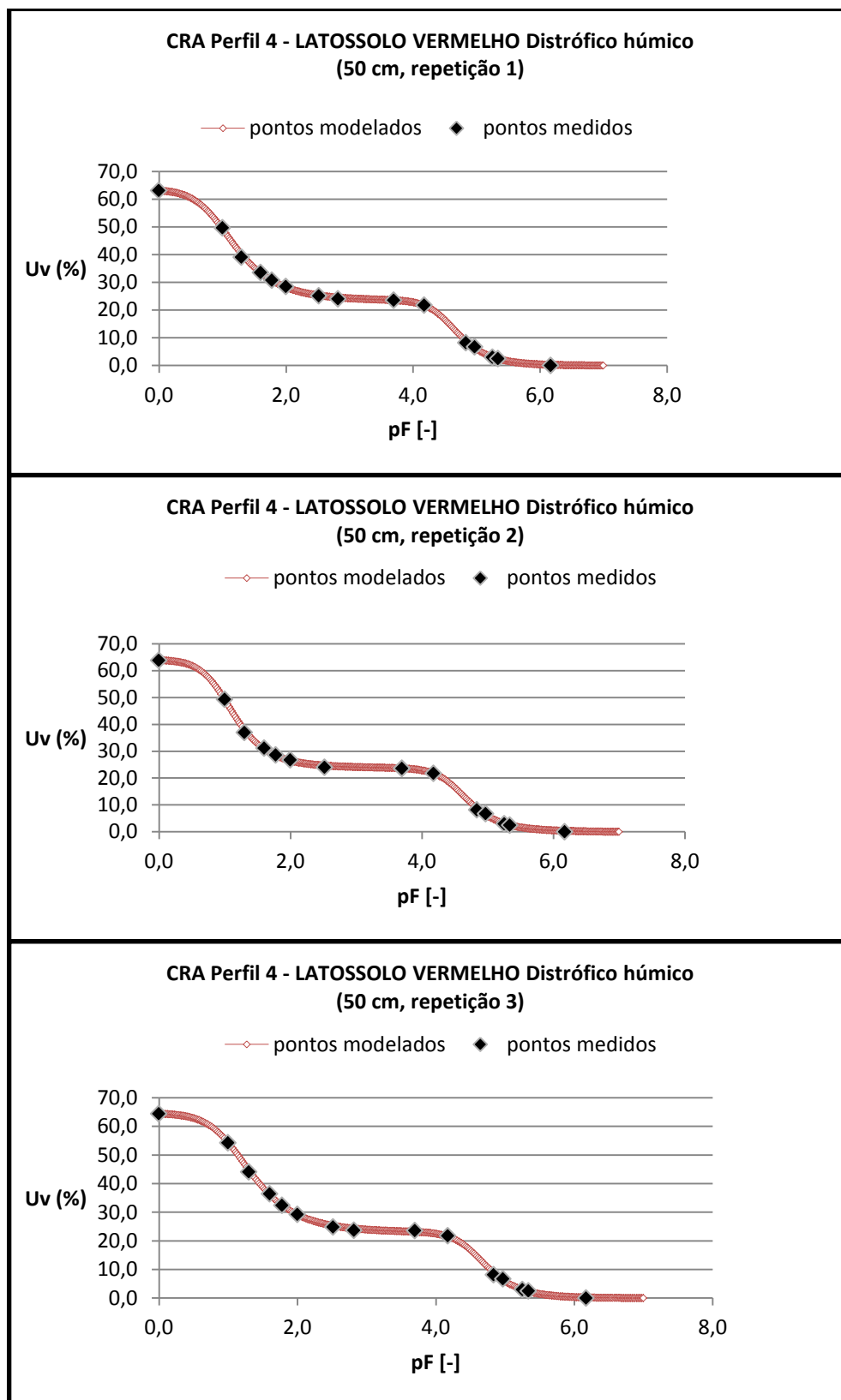


Figura 36. Curvas de retenção de água no solo modeladas para o Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico (perfil 4), na profundidade de 50 cm, repetições 1, 2 e 3. Fonte: Autor.

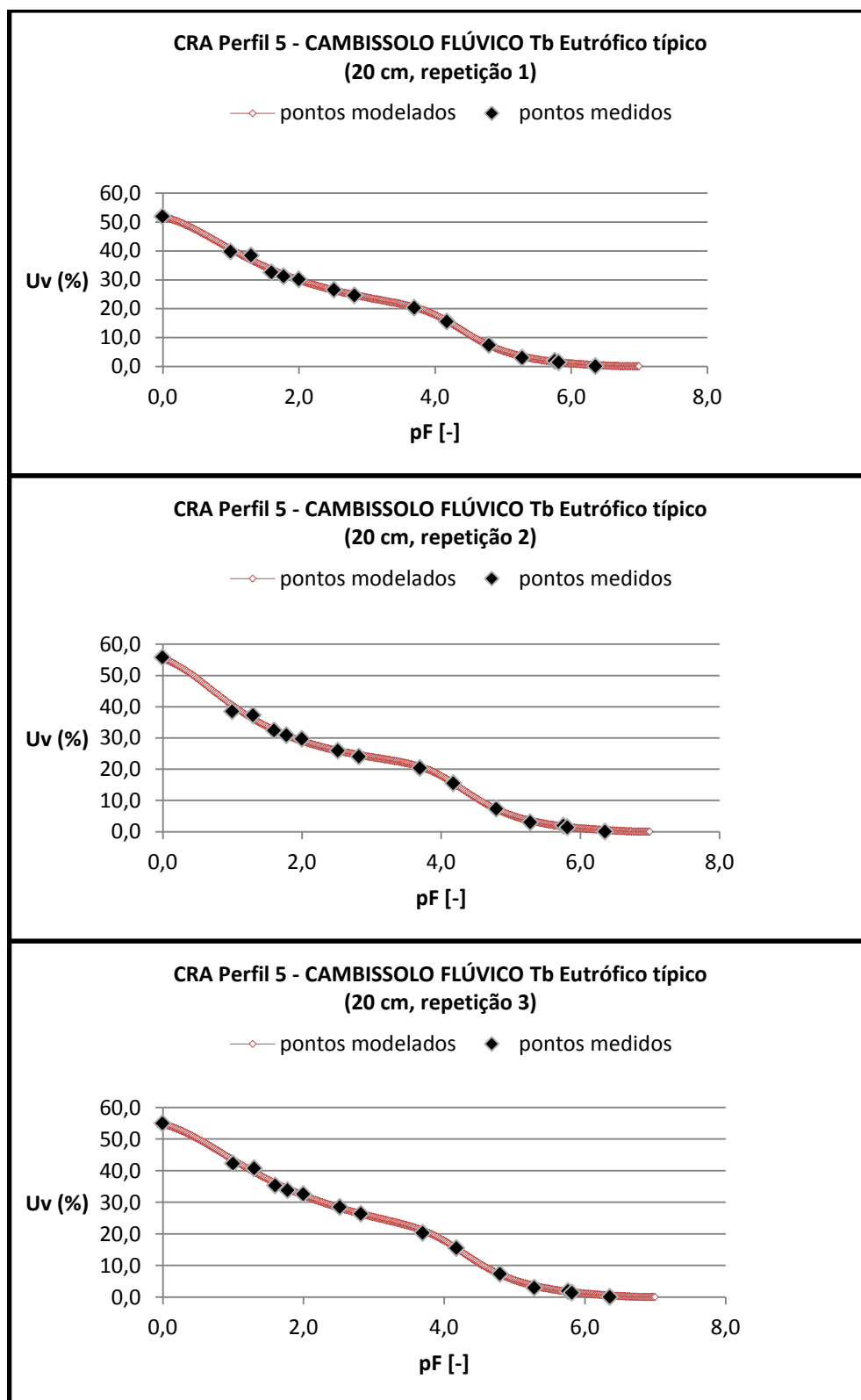


Figura 37. Curvas de retenção de água no solo modeladas para o Cambissolo Flúvico Tb Eutrófico típico (perfil 5), na profundidade de 20 cm, repetições 1, 2 e 3. Fonte: Autor.

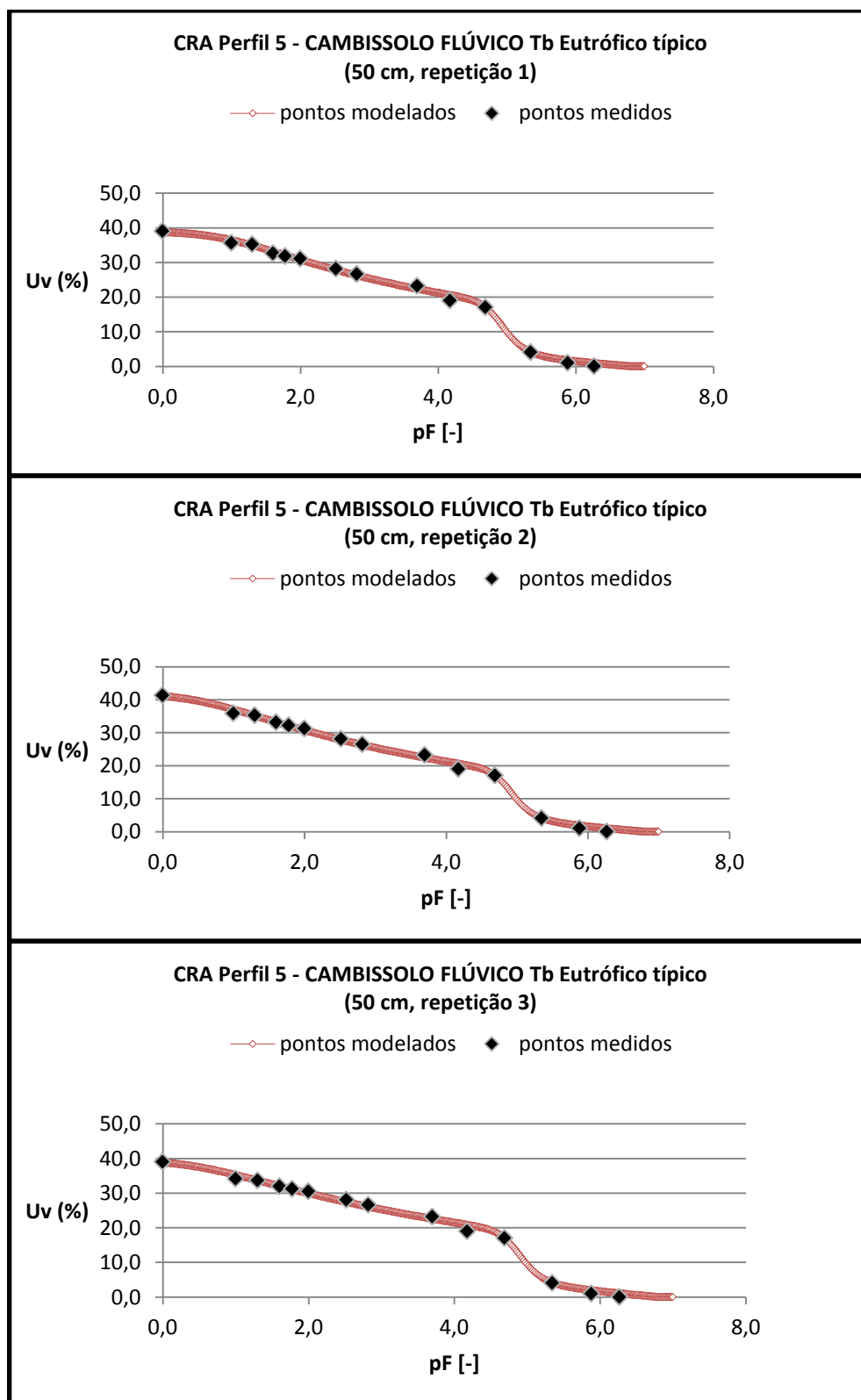


Figura 38. Curvas de retenção de água no solo modeladas para o Cambissolo Flúvico Tb Eutrófico típico (perfil 5), na profundidade de 50 cm, repetições 1, 2 e 3. Fonte: Autor.

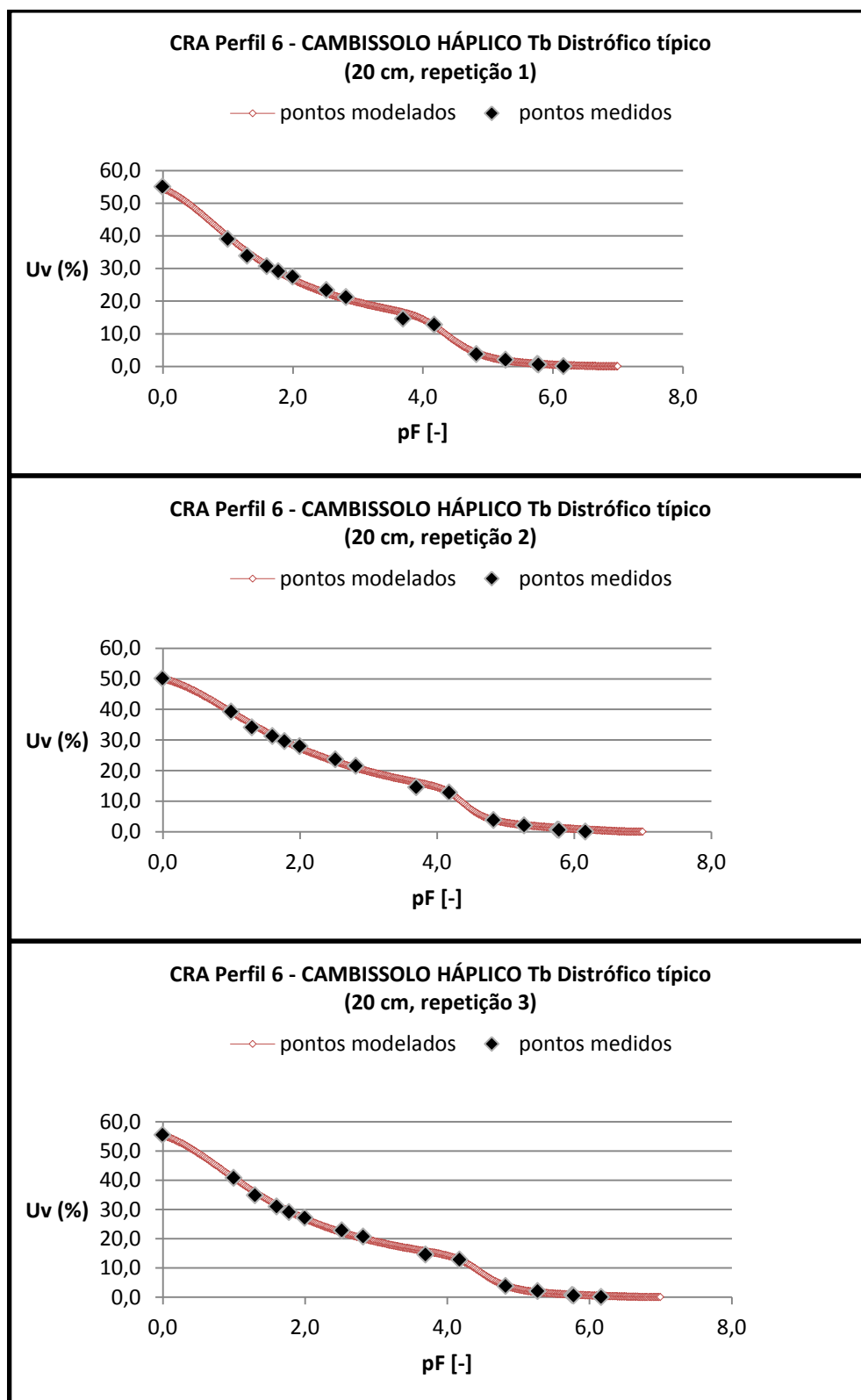


Figura 39. Curvas de retenção de água no solo modeladas para o Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico (perfil 6), na profundidade de 20 cm, repetições 1, 2 e 3. Fonte: Autor.

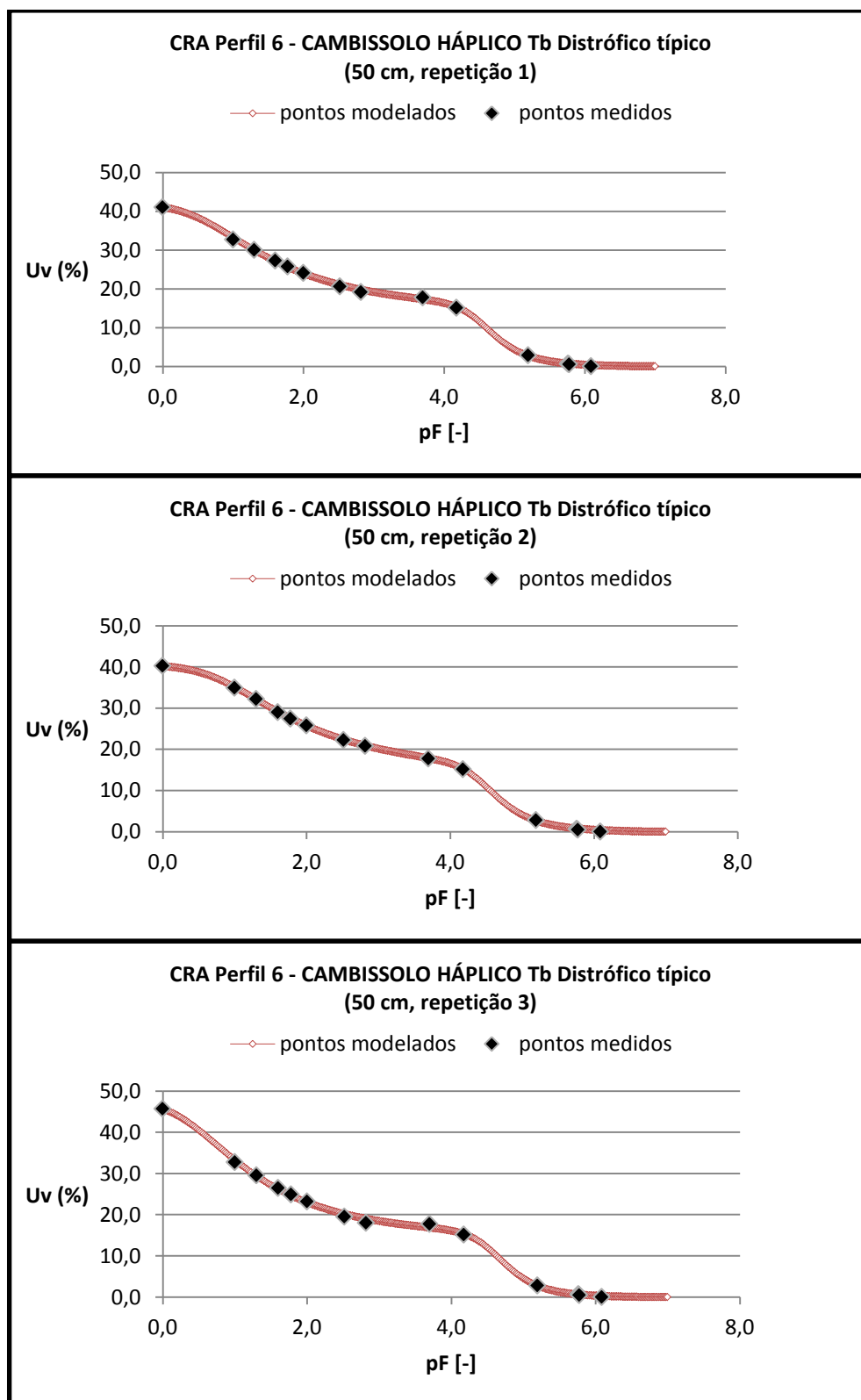


Figura 40. Curvas de retenção de água no solo modeladas para o Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico (perfil 6), na profundidade de 50 cm, repetições 1, 2 e 3. Fonte: Autor.

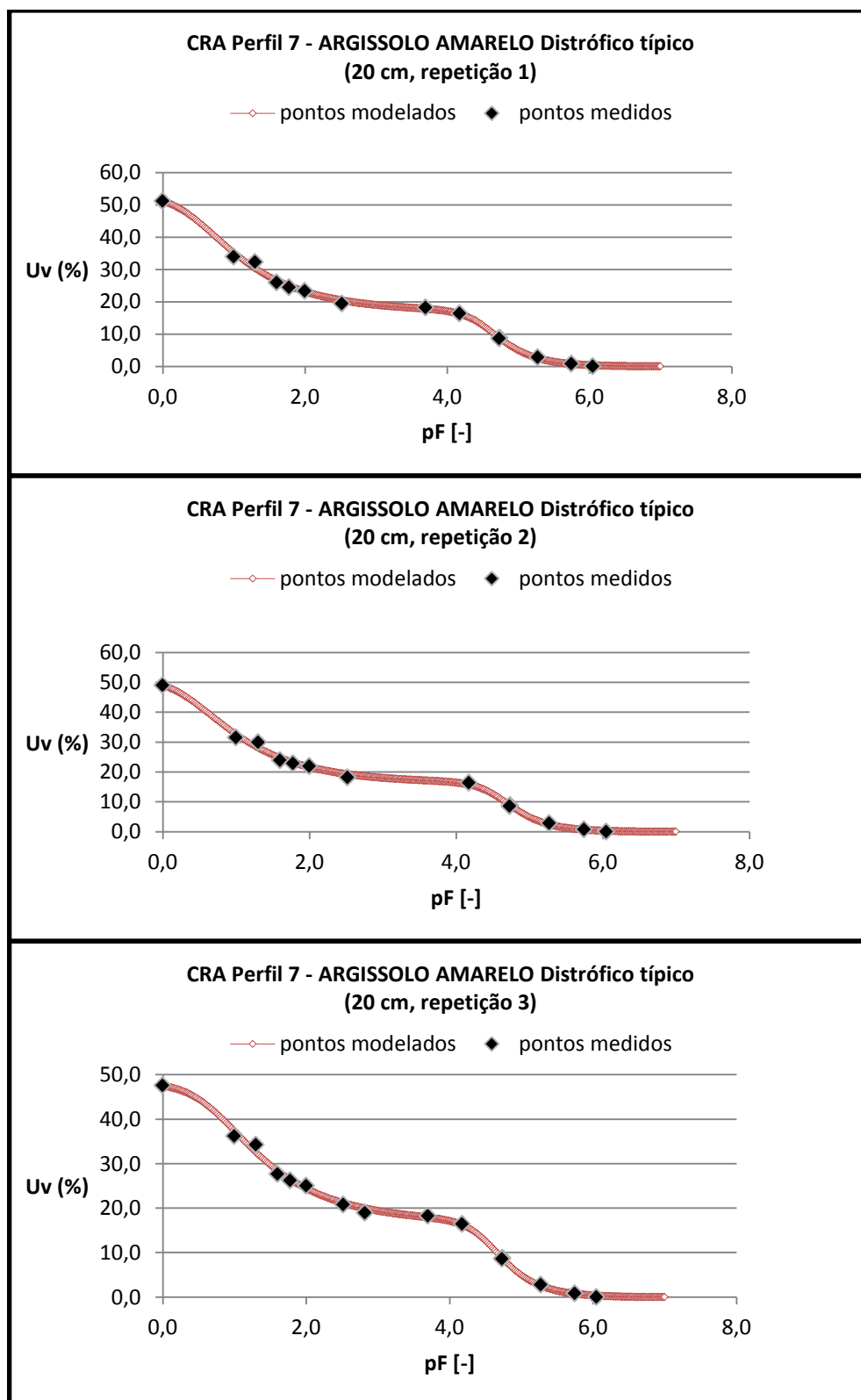


Figura 41. Curvas de retenção de água no solo modeladas para o Argissolo Amarelo Distrófico típico (perfil 7), na profundidade de 20 cm, repetições 1, 2 e 3. Fonte: Autor.

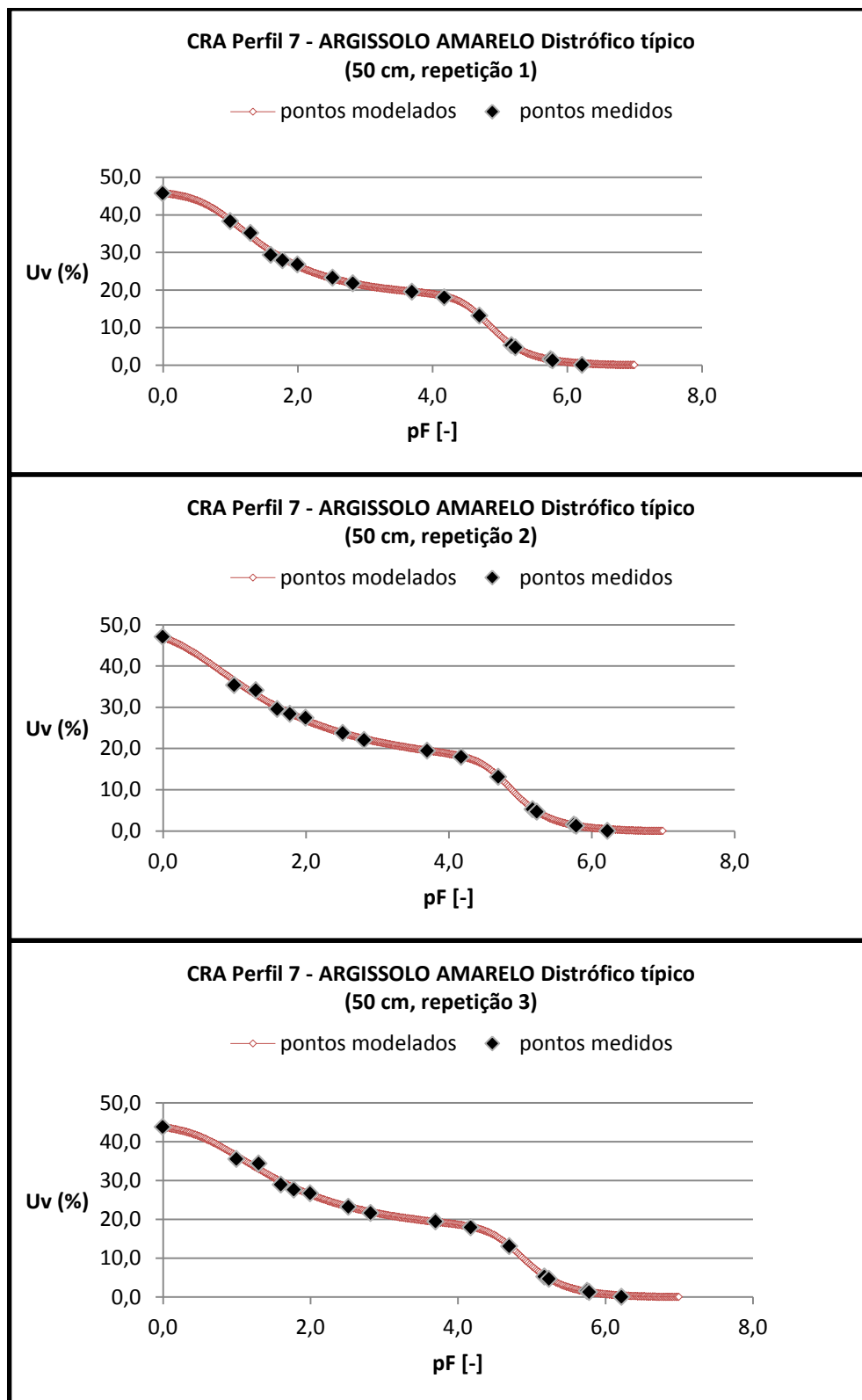


Figura 42. Curvas de retenção de água no solo modeladas para o Argissolo Amarelo Distrófico típico (perfil 7), na profundidade de 50 cm, repetições 1, 2 e 3. Fonte: Autor.

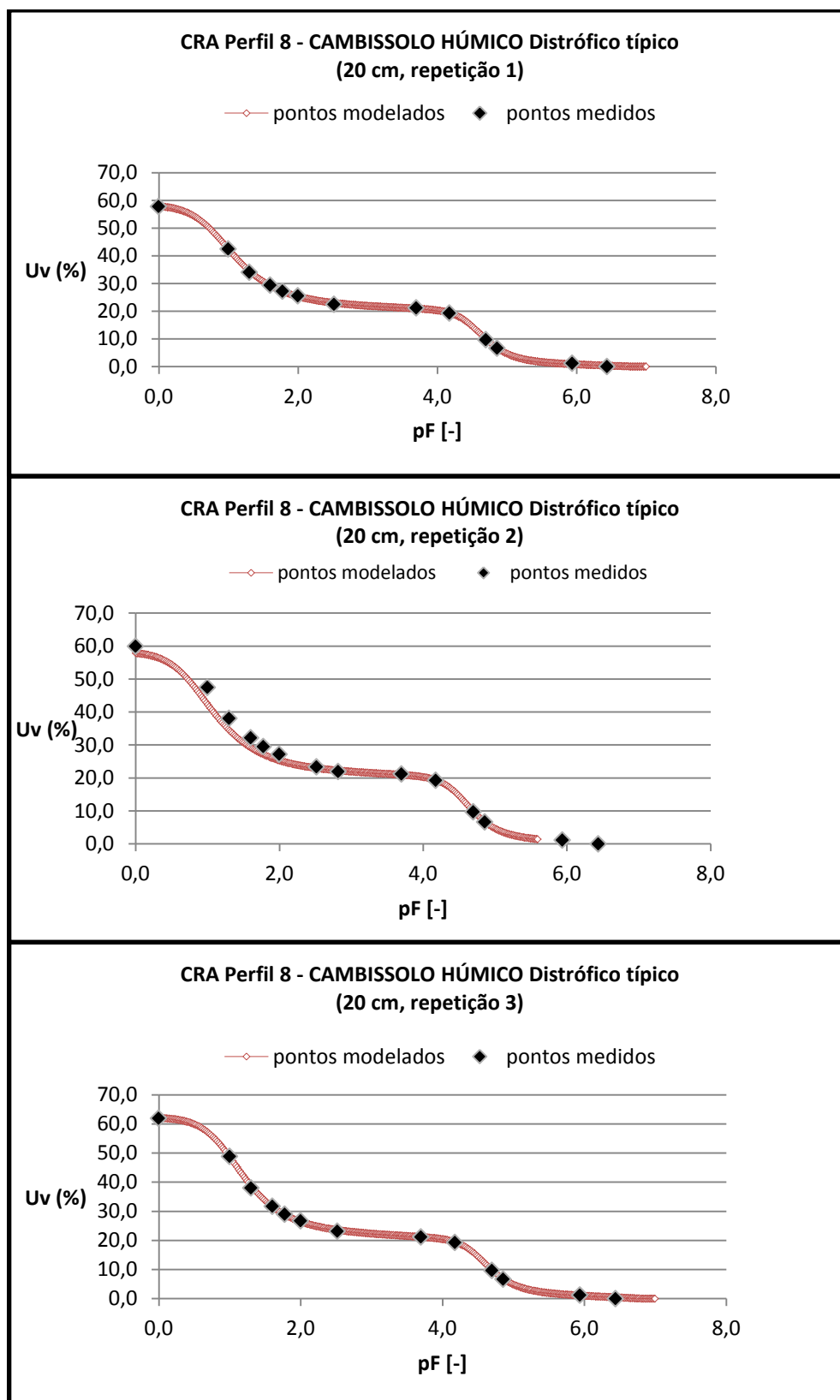


Figura 43. Curvas de retenção de água no solo modeladas para o Cambissolo Húmico Distrófico típico (perfil 8), na profundidade de 20 cm, repetições 1, 2 e 3. Fonte: Autor.

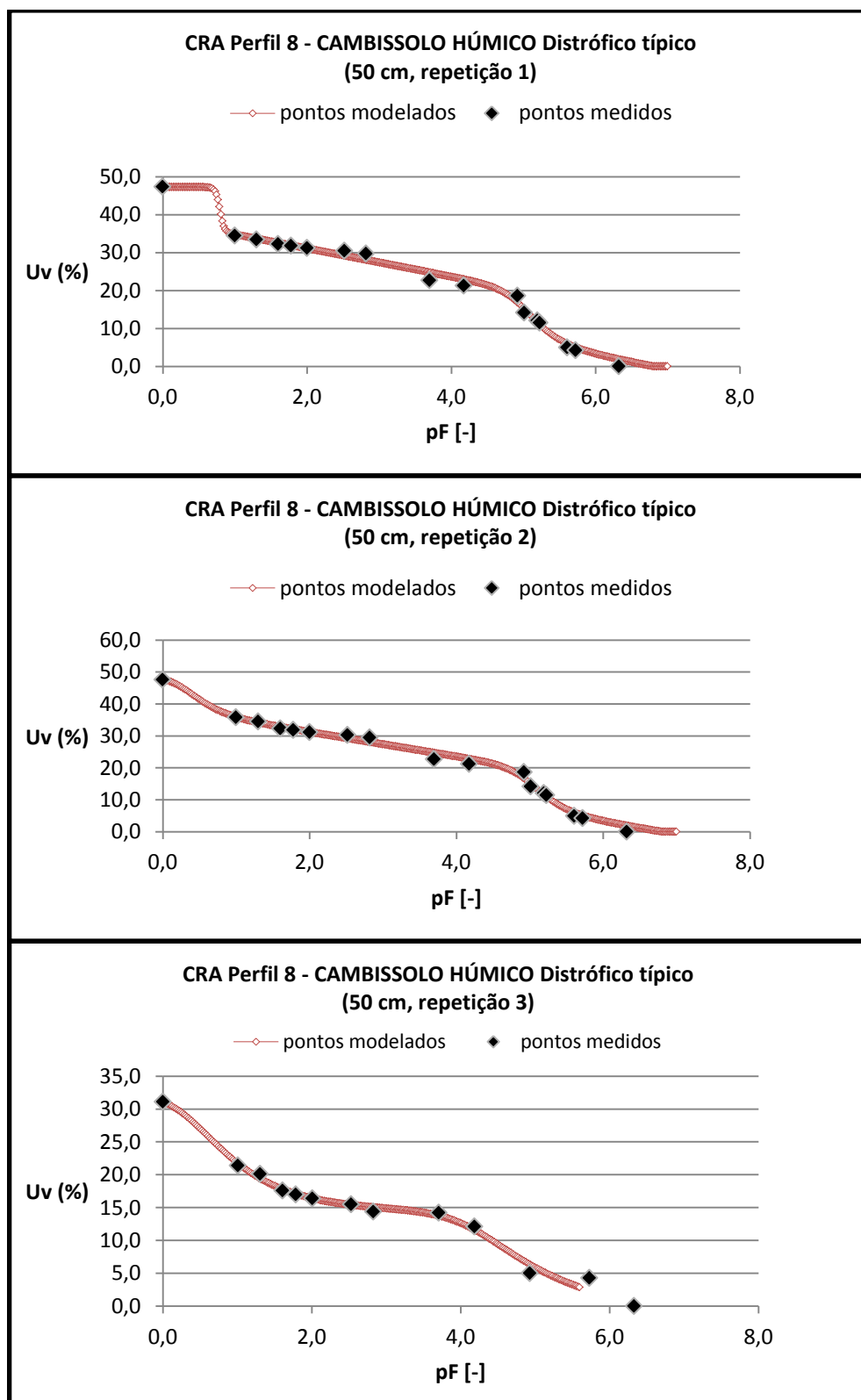


Figura 44. Curvas de retenção de água no solo modeladas para o Cambissolo Húmico Distrófico típico (perfil 8), na profundidade de 50 cm, repetições 1, 2 e 3. Fonte: Autor.

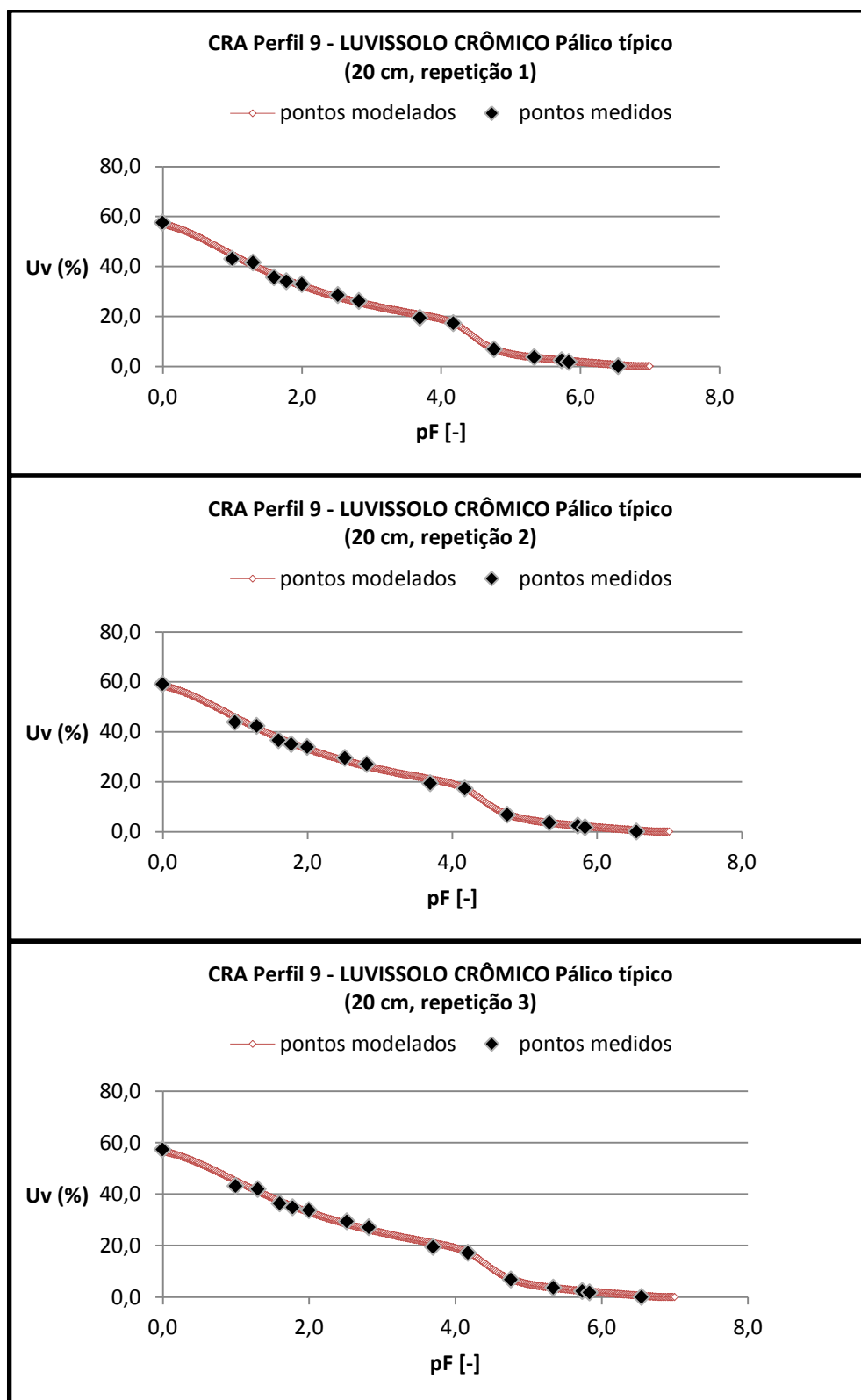


Figura 45. Curvas de retenção de água no solo modeladas para o Luvissoilo Crômico Pálico típico (perfil 9), na profundidade de 20 cm, repetições 1, 2 e 3. Fonte: Autor.

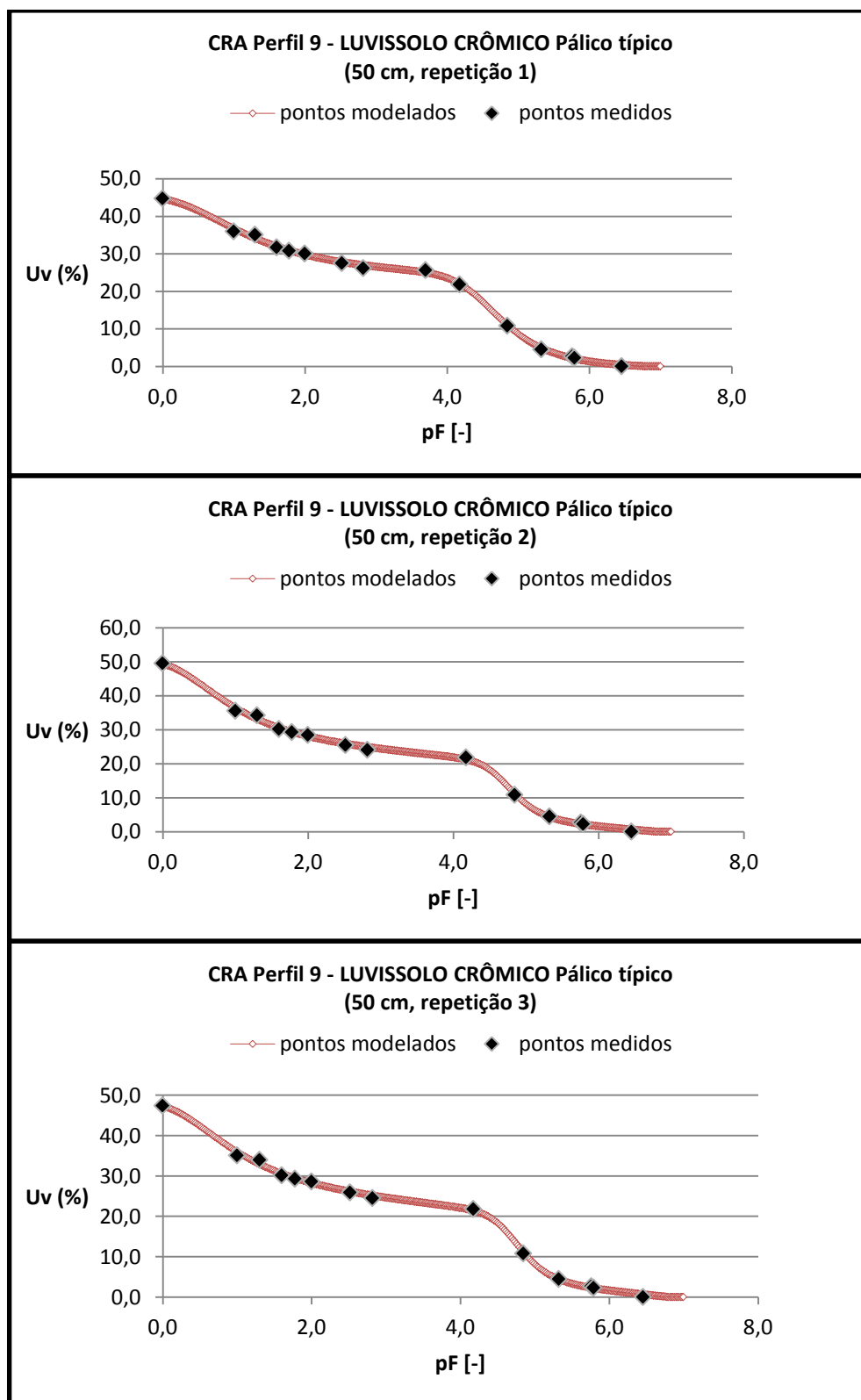


Figura 46. Curvas de retenção de água no solo modeladas para o Luvissoilo Crômico Pálico típico (perfil 9), na profundidade de 50 cm, repetições 1, 2 e 3. Fonte: Autor.

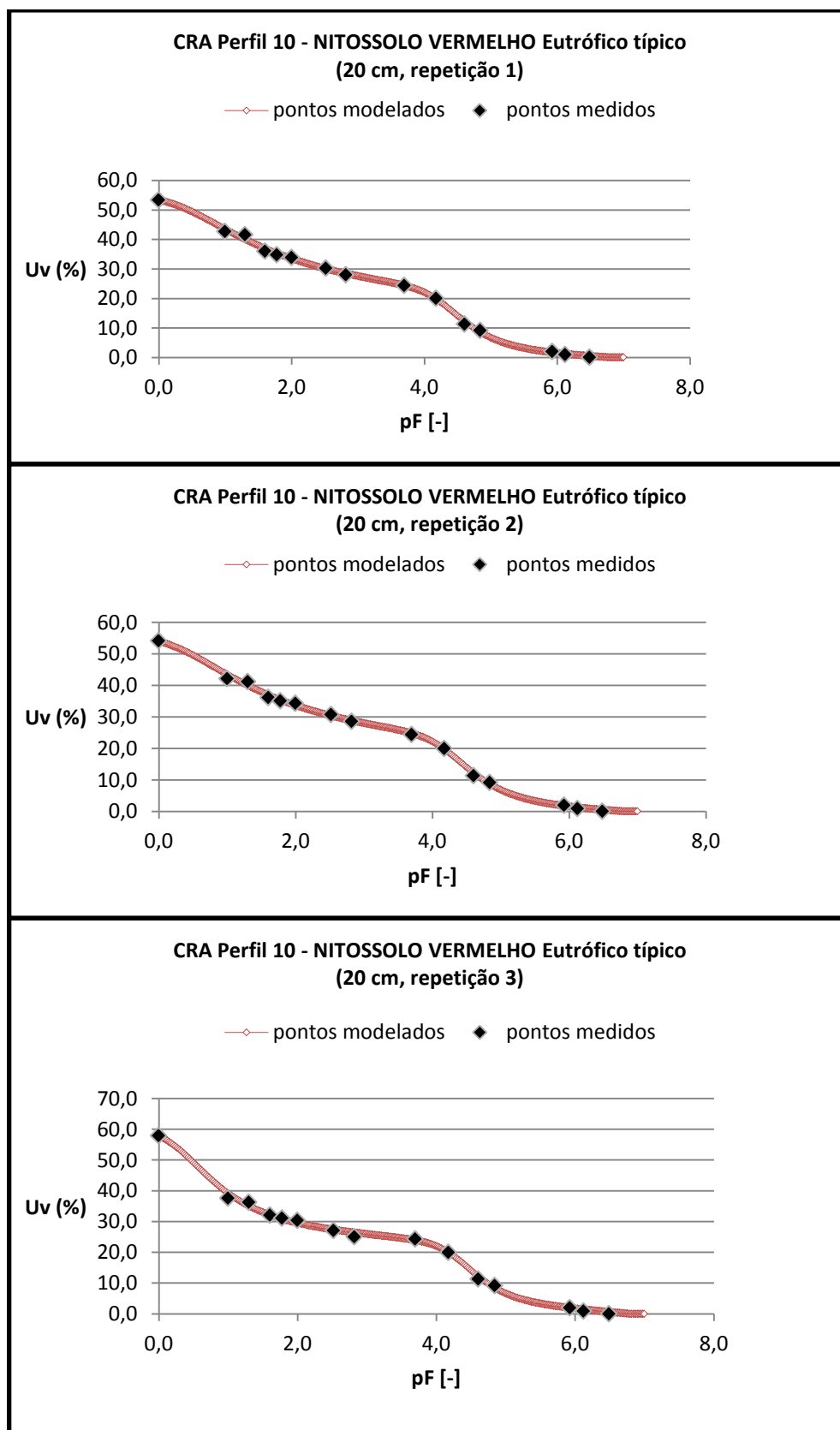


Figura 47. Curvas de retenção de água no solo modeladas para o Nitossolo Vermelho Eutrófico típico (perfil 10), na profundidade de 20 cm, repetições 1, 2 e 3. Fonte: Autor.

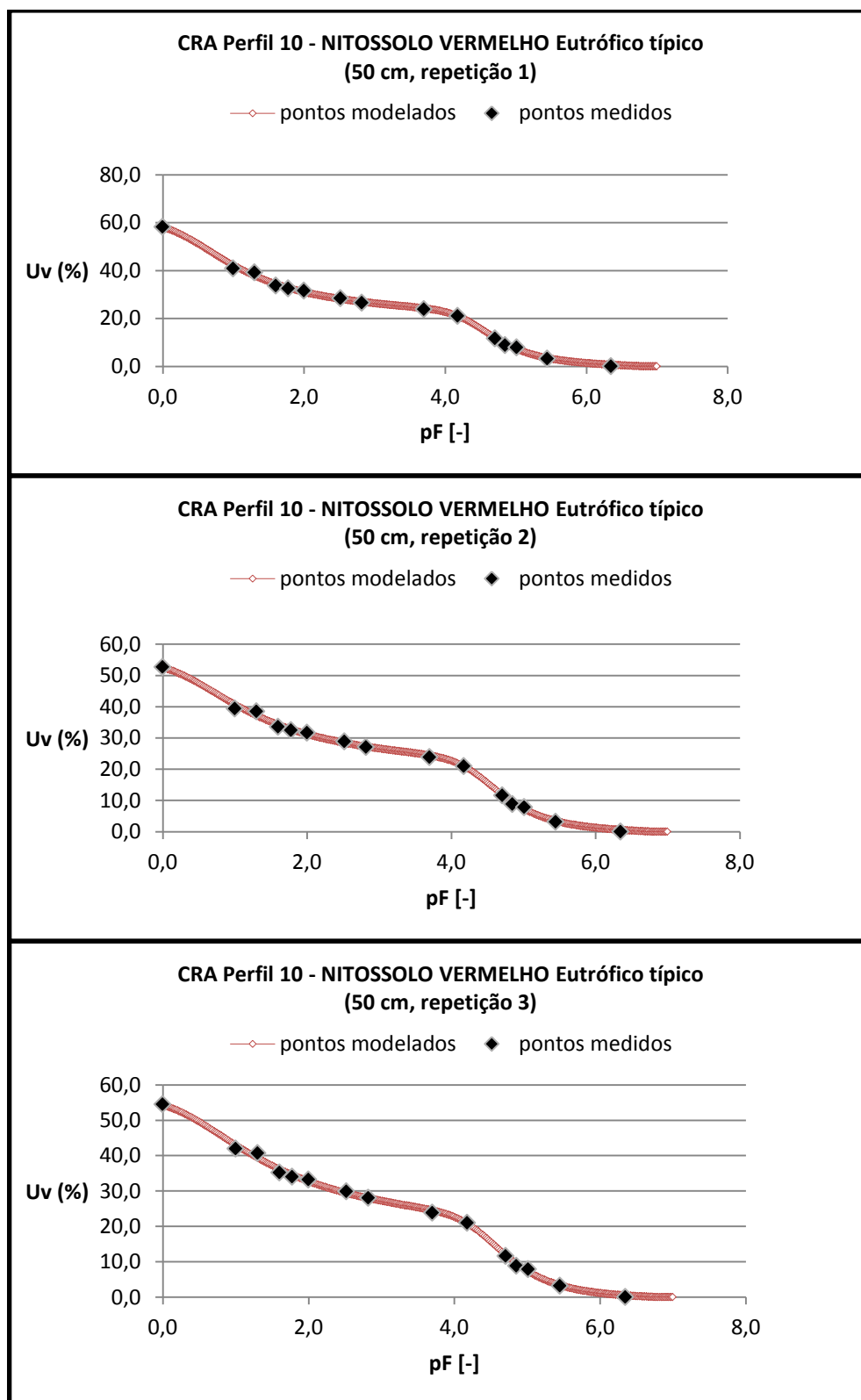


Figura 48. Curvas de retenção de água no solo modeladas para o Nitossolo Vermelho Eutrófico típico (perfil 10), na profundidade de 50 cm, repetições 1, 2 e 3. Fonte: Autor.

ANEXO II

Quadro II. 1.Resultado de análise estatística descritiva das variáveis preditas: CAD e k_0 , com profundidade da amostra, médias, medianas e desvio padrão.

		Perfis do solo				
		(1,2,7) (média, dp, mediana)	(5,6,8) (média, dp, mediana)	(3,4) (média, dp, mediana)	(9) (média, dp, mediana)	(10) (média, dp, mediana)
K	Profundidade 1	15,150	19,573	45,72	30,430	18,890
		3,497	11,038	0,624	-	-
		13,210	23,000	-	-	-
	Profundidade 2	13,970	21,560	58,200	6,090	15,74
		15,107	30,273	21,475	-	-
		7,110	7,080	-	-	-
CAD (-6kpa)	Profundidade 1	0,184	0,152	0,107	0,184	0,173
		0,065	0,061	0,054	-	-
		0,185	0,183	-	-	-
	Profundidade 2	0,177	0,137	0,082	0,135	0,159
		0,045	0,072	0,018	-	-
		0,156	0,158	-	-	-
CAD (-10kpa)	Profundidade 1	0,168	0,135	0,085	0,173	0,164
		0,063	0,064	0,050	-	-
		0,163	0,165	-	-	-
	Profundidade 2	0,167	0,126	0,051	0,127	0,151
		0,044	0,070	0,009	-	-
		0,146	0,141	-	-	-
CAD (-33kpa)	Profundidade 1	0,123	0,097	0,046	0,129	0,130
		0,058	0,061	0,042	-	-
		0,116	0,123	-	-	-
	Profundidade 2	0,137	0,103	0,011	0,100	0,119
		0,050	0,059	0,002	-	-
		0,110	0,106	-	-	-

Quadro II. 2.Matriz de correlação com destaque para variáveis que apresentaram maior correlação.

MATRIZ PEARSON	DMG	AGREG. >2 mm	MACRO AGREG.	MICRO AGREG.	Ds	Dp	AG	AF	AREIA	SILTE	ARGILA	MO	CTC	ΔpH	Pt	MICRO.P	MACRO.P	CC1	CC2	CC3	PMP
DMG	1.00	0.97	0.90	-0.90	-0.11	-0.14	-0.04	-0.03	-0.04	0.03	0.01	0.73	0.55	0.40	0.37	0.13	0.34	0.13	0.15	0.13	0.28
AGREGADOSMAIOR2MM	0.97	1.00	0.83	-0.83	-0.22	-0.20	-0.01	-0.04	-0.02	0.03	-0.01	0.70	0.48	0.35	0.47	0.15	0.44	0.15	0.13	0.09	0.34
MACROAGREGADOS	0.90	0.83	1.00	-1.00	0.04	0.13	0.14	0.16	0.15	-0.13	-0.04	0.63	0.50	0.44	0.18	-0.03	0.23	-0.03	0.04	0.04	0.00
MICROAGREGADOS	-0.90	-0.83	-1.00	1.00	-0.04	-0.13	-0.14	-0.16	-0.15	0.13	0.04	-	-	-	-	0.03	-0.23	0.03	-0.04	-0.04	0.00
DENSIDADESOLO	-0.11	-0.22	0.04	-0.04	1.00	0.19	0.20	0.29	0.23	-0.31	0.07	0.31	0.33	0.36	0.88	-0.38	-0.74	-0.38	-0.26	-0.10	-0.37
DENSIDADEPARTICULA	-0.14	-0.20	0.13	-0.13	0.19	1.00	0.10	0.07	0.09	-0.31	0.25	-	0.19	0.15	0.17	-	-0.14	-0.20	-0.14	-0.07	-0.04
AREIAGROSSA	-0.04	-0.01	0.14	-0.14	0.20	0.10	1.00	0.84	0.99	-0.70	-0.44	0.33	0.61	0.19	0.36	-	-0.52	-0.05	-0.52	-0.54	-0.61
AREIAFINA	-0.03	-0.04	0.16	-0.16	0.29	0.07	0.84	1.00	0.90	-0.50	-0.56	0.23	0.56	0.27	0.52	-	-0.55	-0.22	-0.55	-0.53	-0.59
AREIA	-0.04	-0.02	0.15	-0.15	0.23	0.09	0.99	0.90	1.00	-0.68	-0.48	-	-	-	-	-	-0.54	-0.09	-0.54	-0.55	-0.62
SILTE	0.03	0.03	-0.13	0.13	-0.31	-0.31	-0.70	-0.50	-0.68	1.00	-0.32	0.33	0.54	0.11	0.32	0.46	0.06	0.46	0.49	0.50	0.29
ARGILA	0.01	-0.01	-0.04	0.04	0.07	0.25	-0.44	-0.56	-0.48	-0.32	1.00	0.02	0.16	0.15	0.14	0.14	0.04	0.14	0.12	0.20	0.58
MATÉRIAORGÂNICA	0.73	0.70	0.63	-0.63	-0.31	-0.19	-0.33	-0.23	-0.32	0.33	0.02	1.00	0.73	0.42	0.54	0.26	0.40	0.26	0.28	0.27	0.35
CTC	0.55	0.48	0.50	-0.50	-0.33	0.15	-0.61	-0.56	-0.62	0.54	0.16	0.73	1.00	0.68	0.54	0.36	0.33	0.36	0.41	0.44	0.45
DELTAPH	0.40	0.35	0.44	-0.44	-0.36	0.17	-0.19	-0.27	-0.22	0.11	0.15	0.42	0.68	1.00	0.48	0.07	0.46	0.07	0.10	0.09	0.24
POROSIDADETOTAL	0.37	0.47	0.18	-0.18	-0.88	-0.20	-0.36	-0.52	-0.41	0.32	0.14	0.54	0.54	0.48	1.00	0.42	0.84	0.42	0.32	0.21	0.67
MICROPOROSIDADE	0.13	0.15	-0.03	0.03	-0.38	-0.14	-0.52	-0.55	-0.54	0.46	0.14	0.26	0.36	0.07	0.42	1.00	-0.09	1.00	0.98	0.92	0.28
MACROPOROSIDADE	0.34	0.44	0.23	-0.23	-0.74	-0.20	-0.05	-0.22	-0.09	0.06	0.04	0.40	0.33	0.46	0.84	-0.09	1.00	-0.09	-0.20	-0.29	0.55
CC1	0.13	0.15	-0.03	0.03	-0.38	-0.14	-0.52	-0.55	-0.54	0.46	0.14	0.26	0.36	0.07	0.42	1.00	-0.09	1.00	0.98	0.92	0.28
CC2	0.15	0.13	0.04	-0.04	-0.26	-0.07	-0.54	-0.53	-0.55	0.49	0.12	0.28	0.41	0.10	0.32	0.98	-0.20	0.98	1.00	0.97	0.20
CC3	0.13	0.09	0.04	-0.04	-0.10	-0.04	-0.61	-0.59	-0.62	0.50	0.20	0.27	0.44	0.09	0.21	0.92	-0.29	0.92	0.97	1.00	0.22
PMP	0.28	0.34	0.00	0.00	-0.37	-0.21	-0.67	-0.81	-0.72	0.29	0.58	0.35	0.45	0.24	0.67	0.28	0.55	0.28	0.20	0.22	1.00
CAD1	-0.15	-0.19	-0.02	0.02	0.05	0.09	0.22	0.33	0.25	0.08	-0.42	-	-	-	-	0.49	-0.56	0.49	0.55	0.48	-0.70
CAD2	-0.14	-0.20	0.02	-0.02	0.14	0.13	0.20	0.33	0.23	0.10	-0.42	-	-	-	-	0.45	-0.61	0.45	0.53	0.49	-0.72
CAD3	-0.15	-0.24	0.02	-0.02	0.26	0.16	0.17	0.31	0.20	0.09	-0.38	-	-	-	-	0.45	-0.69	0.39	0.50	0.50	-0.73
CONDUTIVIDADEHIDRAULICA	0.24	0.32	0.03	-0.03	-0.21	-0.14	-0.20	-0.39	-0.25	-0.18	0.54	0.26	0.09	0.12	0.48	0.04	0.53	0.04	-0.06	-0.03	0.70

Quadro II. 3.Matriz com valores do teste de significância (p valor < 0,05).

ANOVA (P-VALOR < 0,05)	DMG	AGREG. >2mm	MACRO AGREG.	MICRO AGREG.	Ds	Dp	AG	AF	AREIA	SILTE	ARGILA	MO	CTC	ΔpH	Pt	MICRO.P	MACRO.P	CC1	CC2	CC3	PMP
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.65	0.55	0.87	0.89	0.87	0.88	0.97	0.00	0.01	0.08	0.10	0.57	0.15	0.57	0.53	0.57	0.23
AGREGADOS_MAIOR_2MM	0.00	0.00	0.00	0.00	0.36	0.39	0.96	0.87	0.94	0.89	0.96	0.00	0.03	0.14	0.04	0.52	0.05	0.52	0.58	0.71	0.14
MACRO_AGREGADOS	0.00	0.00	0.00	0.00	0.87	0.59	0.56	0.49	0.53	0.60	0.87	0.00	0.03	0.05	0.45	0.92	0.34	0.92	0.87	0.87	0.98
MICRO_AGREGADOS	0.00	0.00	0.00	0.00	0.87	0.59	0.56	0.49	0.53	0.60	0.87	0.00	0.03	0.05	0.45	0.92	0.34	0.92	0.87	0.87	0.98
DENSIDADE_SOLO	0.65	0.36	0.87	0.87	0.00	0.42	0.39	0.22	0.33	0.19	0.76	0.18	0.15	0.12	0.00	0.10	0.00	0.10	0.26	0.67	0.11
DENSIDADE_PARTICULA	0.55	0.39	0.59	0.59	0.42	0.00	0.69	0.76	0.69	0.19	0.29	0.42	0.51	0.47	0.40	0.57	0.40	0.57	0.76	0.86	0.37
AREIA_GROSSA	0.87	0.96	0.56	0.56	0.39	0.69	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.15	0.00	0.41	0.12	0.02	0.82	0.02	0.01	0.00	0.00
AREIA_FINA	0.89	0.87	0.49	0.49	0.22	0.76	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.32	0.01	0.25	0.02	0.01	0.35	0.01	0.02	0.01	0.00
AREIA	0.87	0.94	0.53	0.53	0.33	0.69	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.17	0.00	0.36	0.07	0.01	0.69	0.01	0.01	0.00	0.00
SILTE	0.88	0.89	0.60	0.60	0.19	0.19	0.00	0.02	0.00	0.00	0.16	0.16	0.02	0.65	0.17	0.04	0.79	0.04	0.03	0.02	0.22
ARGILA	0.97	0.96	0.87	0.87	0.76	0.29	0.05	0.01	0.03	0.16	0.00	0.94	0.51	0.53	0.56	0.55	0.85	0.55	0.61	0.40	0.01
MATERIA_ORGANICA	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.42	0.15	0.32	0.17	0.16	0.94	0.00	0.00	0.07	0.01	0.28	0.08	0.28	0.23	0.25	0.13
CTC	0.01	0.03	0.03	0.03	0.15	0.51	0.00	0.01	0.00	0.02	0.51	0.00	0.00	0.00	0.01	0.12	0.15	0.12	0.07	0.05	0.05
DELTA_PH	0.08	0.14	0.05	0.05	0.12	0.47	0.41	0.25	0.36	0.65	0.53	0.07	0.00	0.00	0.03	0.76	0.04	0.76	0.68	0.71	0.32
POROSIDADE_TOTAL	0.10	0.04	0.45	0.45	0.00	0.40	0.12	0.02	0.07	0.17	0.56	0.01	0.01	0.03	0.00	0.06	0.00	0.06	0.17	0.37	0.00
MICROPOROSIDADE	0.57	0.52	0.92	0.92	0.10	0.57	0.02	0.01	0.01	0.04	0.55	0.28	0.12	0.76	0.06	0.00	0.70	0.00	0.00	0.00	0.23
MACROPOROSIDADE	0.15	0.05	0.34	0.34	0.00	0.40	0.82	0.35	0.69	0.79	0.85	0.08	0.15	0.04	0.00	0.70	0.00	0.70	0.40	0.22	0.01
CC1	0.57	0.52	0.92	0.92	0.10	0.57	0.02	0.01	0.01	0.04	0.55	0.28	0.12	0.76	0.06	0.00	0.70	0.00	0.00	0.00	0.23
CC2	0.53	0.58	0.87	0.87	0.26	0.76	0.01	0.02	0.01	0.03	0.61	0.23	0.07	0.68	0.17	0.00	0.40	0.00	0.00	0.00	0.40
CC3	0.57	0.71	0.87	0.87	0.67	0.86	0.00	0.01	0.00	0.02	0.40	0.25	0.05	0.71	0.37	0.00	0.22	0.00	0.00	0.00	0.35
PMP	0.23	0.14	0.98	0.98	0.11	0.37	0.00	0.00	0.00	0.22	0.01	0.13	0.05	0.32	0.00	0.23	0.01	0.23	0.40	0.35	0.00
CAD1	0.52	0.41	0.93	0.93	0.82	0.70	0.34	0.16	0.28	0.73	0.06	0.60	0.56	0.50	0.20	0.03	0.01	0.03	0.01	0.03	0.00
CAD2	0.57	0.40	0.92	0.92	0.57	0.58	0.40	0.16	0.32	0.69	0.07	0.67	0.69	0.57	0.12	0.05	0.00	0.05	0.02	0.03	0.00
CAD3	0.52	0.31	0.92	0.92	0.27	0.51	0.48	0.19	0.39	0.70	0.10	0.60	0.71	0.53	0.05	0.09	0.00	0.09	0.02	0.02	0.00
CONDUTIVIDADE_HIDRAULICA	0.30	0.17	0.91	0.91	0.38	0.57	0.39	0.09	0.28	0.44	0.01	0.27	0.72	0.60	0.03	0.85	0.02	0.85	0.81	0.90	0.00