

ANDRÉ GERALDO CORNELIO RIBEIRO

**METODOLOGIA PARA DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS
DE COBERTURA COM BASE EM ESTUDO DE CASO
REALIZADO NA MINA DA EMPRESA RIO PARACATU
MINERAÇÃO (RPM) EM PARACATU, MINAS GERAIS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2011

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

R484m
2011

Ribeiro, André Geraldo Cornelio, 1981-
Metodologia para dimensionamento de sistemas de
cobertura com base em estudo de caso realizado na mina da
empresa Rio Paracatu Mineração (RPM) em Paracatu,
Minas Gerais / André Geraldo Cornelio Ribeiro. – Viçosa,
MG, 2011.

xix, 161f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Orientador: Roberto Francisco de Azevedo
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f. 153-161.

1. Solos - Recuperação. 2. Drenagem ácida de minas. 3.
Análise numérica. 4. Solos - Permeabilidade. 5. Áreas
degradadas - Recuperação. 6. Lisímetros.
7. Evapotranspiração. 8. Minas e recursos minerais -
Aspectos ambientais - Paracatu (MG). I. Universidade
Federal de Viçosa. II. Título.

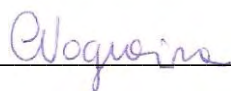
CDD 22. ed. 624.1514

ANDRÉ GERALDO CORNELIO RIBEIRO

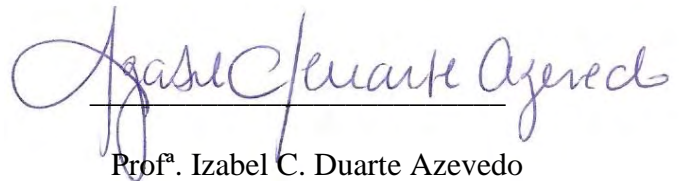
**METODOLOGIA PARA DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS
DE COBERTURA COM BASE EM ESTUDO DE CASO
REALIZADO NA MINA DA EMPRESA RIO PARACATU
MINERAÇÃO (RPM) EM PARACATU, MINAS GERAIS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 31 de Janeiro de 2011.



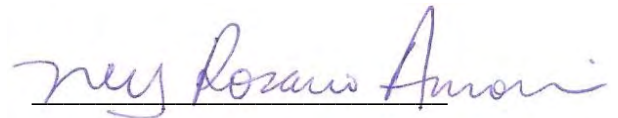
Prof^ª. Christianne de Lyra Nogueira
(Co-orientador)



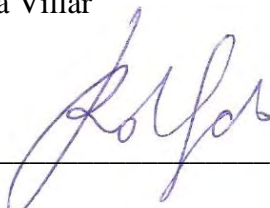
Prof^ª. Izabel C. Duarte Azevedo
(Co-orientador)



Prof. Lúcio Flávio de Souza Villar



Prof^º Ney Rosário Amorim



Prof. Roberto Francisco de Azevedo
(Orientador)

À minha noiva Lindsay,
Aos meus pais José Geraldo e Maria Heloisa,
À minha irmã Érica
Ao meu irmão Ivan (em memória)
À minha Vó Maria (em memória)

AGRADECIMENTOS

A Deus, que me dá força pra seguir vencendo as batalhas e dificuldades passageiras da vida.

Aos meus pais, Maria Heloisa e José Geraldo, a quem agradeço a Deus todos os dias por serem os pais maravilhosos e dedicados que foram e são comigo e com meus irmãos e por não terem medido esforços para que eu chegasse até aqui.

À minha noiva Lindsay, pela confiança e energia depositada durante toda esta jornada e com quem o convívio se traduz na consciência diária de todos os valores pelos quais se deseja viver junto a alguém.

À minha irmã Érica, a quem tenho um carinho especial, pois sempre me apoiou em todas minhas decisões e nos momentos difíceis da minha vida, com amizade, amor e carinho.

Ao meu irmão Ivan (*em memória*), que sempre me admirou e que tenho certeza que onde estiver está sempre me ajudando, me apoiando e protegendo.

A toda minha família, em especial a minha Vó Maria (*em memória*), que hoje se encontra ao lado de Deus, e a quem eu sempre peço sua benção antes de dormir.

À minha adorada sogra Soninha, pelo carinho e apoio que sempre me deu com suas palavras de incentivo e também pelos “JATIVI”.

Ao grande amigo, pai e incentivador, e a quem tenho um enorme respeito professor Roberto Francisco de Azevedo, pela paciência, pela confiança, o qual devo enfatizar que sem sua orientação, ajuda e colaboração essa pesquisa não teria o sucesso desejado.

Aos amigos da república dos “Morangueiros”, pela amizade e companheirismo compartilhados durante todos esses anos.

À empresa RPM pelo apoio e financiamento das minhas despesas de viagem e hospedagem, no custeio do experimento e por acreditar no nosso trabalho;

À Universidade Federal de Viçosa por me proporcionar a oportunidade de participar do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil.

À FAPEMIG, pela concessão da bolsa de estudos.

Aos professores do Departamento de Engenharia Civil, pelos ensinamentos ministrados no curso.

Aos laboratoristas do Departamento de Engenharia Civil, Paulo (Capelão) e Paulo (P3), pela presteza e amizade.

Enfim, a todos os colegas da graduação e da pós-graduação, que de uma maneira ou de outra, tiveram uma participação para que se realizasse este trabalho.

BIOGRAFIA

ANDRÉ GERALDO CORNELIO RIBEIRO, filho de Maria Heloisa Cornélio Ribeiro e José Geraldo de Paiva Ribeiro, nasceu em São Gonçalo do Sapucaí – MG, em 04 de novembro de 1981.

Em 1999, concluiu o segundo grau no Colégio Irmão Lucas (Objetivo), em São Gonçalo do Sapucaí - MG.

Graduou-se Engenheiro Civil, em janeiro de 2005, pela Universidade Federal de Viçosa.

Concluiu o curso de Mestrado em Engenharia Civil na área de concentração em Geotecnia Ambiental, pela Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG

Iniciou, em abril de 2007, o curso de Doutorado em Engenharia Civil, área de concentração em Geotecnia, na Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG.

ÍNDICE

LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE FIGURAS	x
RESUMO	xviii
ABSTRACT	xix
1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 – Considerações Gerais.....	1
1.2 – Objetivo	4
1.3 – Organização da Tese.....	5
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1 – Introdução	7
2.2 – Sistemas de cobertura feitos com solo.....	8
2.3 – Tipos de coberturas de solo	10
2.3.1 – Coberturas convencionais ou prescritivas	11
2.3.2 – Coberturas alternativas ou evapotranspirativas.....	12
2.4 – Vegetação.....	19
2.4.1 – Importância em Projetos de Cobertura.....	19
2.4.2 – Espécies de Plantas.....	19
2.4.3 – Crescimento Vegetativo	20
2.4.4 – Profundidade das Raízes	21
2.4.5 – Índice de Área Foliar.....	22
2.4.6 – Ponto de Murcha	24
2.5 – Importância da interação solo-atmosfera.....	25

2.6 – Modelagem numérica em sistemas de cobertura	27
2.7 – Trabalhos sobre coberturas de solo realizados na RPM	29
3 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS DO PROBLEMA	32
3.1 – Desenvolvimento Teórico.....	32
3.1.1 – Descrição do Volume Elementar do Solo (VES).....	32
3.1.2 – Equações diferenciais do fluxo transiente de ar, água e calor no solo. ...	36
3.1.2.1 – Fase ar	37
3.1.2.2 – Fase vapor	39
3.1.2.3 – Fase líquida	46
3.1.2.4 – Fluxo de Calor.....	49
3.1.3 – Condições iniciais e de contorno.....	50
3.1.3.1 – Condições iniciais	50
3.1.3.2 – Condições de contorno.....	51
3.1.4 – Solução simplificada proposta por Wilson (1990).....	54
3.2 – Solução numérica.....	57
4 - MATERIAS E MÉTODOS.....	59
4.1 – Localização do Experimento	59
4.2 – Concepção do Experimento de Campo.....	60
4.3 – Instrumentação.....	64
4.3.1 – Monitoramento da Infiltração.....	64
4.3.2 – Monitoramento do Perfil de Umidade do Solo	64
4.3.2.1 – Calibração dos WCRs	66
4.3.3 – Monitoramento da Sucção no Solo	67
4.3.3.1 – Calibração dos HDUs.....	68
4.4 – Ensaio de Laboratório	72
4.5 – Análise Numérica	73

4.5.1 – Introdução.....	73
4.5.2 – Modelo Numérico.....	74
4.5.3 – Parâmetros de Entrada do Modelo	77
4.5.3.1 – Parâmetros Climáticos	77
4.5.3.2 – Parâmetros Geotécnicos	80
4.5.3.3 – Parâmetros térmicos	86
4.5.3.4 – Parâmetros de Vegetação	87
4.5.4 – Análise Paramétrica.....	88
4.5.4.1 – Considerações para a obtenção da posição do lençol freático	89
4.5.4.2 – Considerações para a obtenção dos parâmetros vegetais.....	90
4.5.4.3 – Considerações para a obtenção dos parâmetros térmicos	95
5 - APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	97
5.1 – Resultado dos Ensaios de Laboratório.....	97
5.2 – Resultados de Campo.....	98
5.3 – Resultados das Análises Paramétricas	115
5.4 – Resultados das Análises Numéricas	123
5.5 – Comparação dos Resultados (Campo X Modelo 1D e 2D).....	134
6 - CONCLUSÕES.....	149
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	153

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Espécies e densidade de sementes utilizada para compor a cobertura vegetal do experimento (Amorim, 2008).	21
Tabela 4.1	Cronograma das atividades realizadas por Amorim (2008).....	88
Tabela 5.1	Massa específica, Índice de Vazios, Limites de Atterberg e Condutividade Hidráulica dos materiais das coberturas	98
Tabela 5.2	Parâmetros de ajuste das curvas de retenção de água no solo pelo modelo de Fredlund & Xing (1994).	98
Tabela 5.3	Resumo dos Parâmetros de Entrada do VADOSE/W	122

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Imagem ilustrando os dois tanques específicos, um em funcionamento e outro em construção.	3
Figura 1.2	Vista geral do lago de rejeito formado pela Barragem de terra que aparece ao fundo.	3
Figura 2.1	Perfil típico de uma cobertura evapotranspirativa (adaptado de Abichou, et alli, 2004).....	15
Figura 2.2	(a) Perfil típico de uma cobertura evapotranspirativa <i>monolítica</i> ; (b) Perfil típico de uma cobertura evapotranspirativa com <i>barreira capilar</i> (adaptado de Abichou et alli, 2004).	16
Figura 2.3	Perfil de uma barreira capilar inclinada (adaptado de Parent & Cabral 2006).....	18
Figura 2.4	Instrumentação para medição do IAF: (a) LAI-2000 e (b) LAI-2200	24
Figura 2.5	Comparação ER/EP com a Umidade Volumétrica (adaptado Wilson 1990; 1994).	26
Figura 2.6	Comparação ER/EP com o Tempo (adaptado Wilson 1990; 1994). 27	
Figura 2.7	Comparação ER/EP com a Sucção (adaptado Wilson 1990; 1994). 27	
Figura 3.1	Desenho conceitual do Volume Elementar do Solo (Fredlund, 1981).	33
Figura 3.2	Típica curva de retenção de água no solo saturado-insaturado para o caso especial de pressão de ar igual a zero (segundo Lam et al, 1987 apud Wilson, 1990).	36
Figura 3.3	Os componentes individuais de fluxo para o fluxo transiente de massa e calor em um elemento infinitesimal do VES (Wilson, 1990).	37
Figura 3.4	Relação entre a pressão de saturação de vapor da água (P_{Vs}) e a temperatura (T).	43
Figura 4.1	Localização da “Barraginha”, onde foram construídos os sistemas de cobertura. (a) Imagem Google Earth, (b) Vista aproximada (adaptado de Amorim, 2008).	60

Figura 4.2	Seção típica do sistema de cobertura 1(Amorim, 2008).	62
Figura 4.3	Seção típica do sistema de cobertura 2 (Amorim, 2008).	63
Figura 4.4	Vista geral dos experimentos em perspectiva (adaptado de Amorim, 2008).....	64
Figura 4.5	Instrumento para medir umidade em campo WCR utilizado nos experimentos e datalogger, Campbell Scientific, Inc. (Amorim, 2008)	65
Figura 4.6	Escavação de poços na cobertura e retirada de amostras deformadas com auxílio de trados manuais.....	66
Figura 4.7	Unidade de dissipação de calor (EPA, 2002).....	68
Figura 4.8	Compactação das amostras no anel de PVC.	70
Figura 4.9	Colocação do papel filtro e isolamento do corpo de prova.....	70
Figura 4.10	Curvas de acompanhamento da variação do peso do papel filtro: (a) após retirar o papel filtro em contato com o solo (Perda de Umidade) e (b) após retirar da estufa (ganho de umidade) sugerida por Villar (2002).....	71
Figura 4.11	Arranjo geral do experimento (Secção AA')	74
Figura 4.12	Malhas de elementos finitos e condições de contorno para o modelo unidimensional. (a) Sistema de Cobertura 1 e (b) Sistema de Cobertura 2.....	75
Figura 4.13	Malha de elementos finitos e condições de contorno para o modelo bidimensional.	76
Figura 4.14	Precipitação (Estação Meteorológica RPM).....	78
Figura 4.15	Temperatura Máxima e Mínima (Estação Meteorológica RPM).....	79
Figura 4.16	Saldo de Radiação Solar (Estação Meteorológica RPM).....	79
Figura 4.17	Umidade Relativa do Ar Máxima e Mínima (Estação Meteorológica RPM).....	79
Figura 4.18	Velocidade do Vento (Estação Meteorológica RPM).....	80
Figura 4.19	Curva granulométrica do solo superficial (Top Soil) (Amorim, 2008) – NBR 6502/95	81
Figura 4.20	Curva granulométrica do solo siltoso (Amorim, 2008) – NBR 6502/95.....	81

Figura 4.21	Curva granulométrica do solo argiloso (Barreira Hidráulica) (Amorim, 2008) – NBR 6502/95	82
Figura 4.22	Curva granulométrica do solo granular (Barreira Capilar) (Amorim, 2008) – NBR 6502/95	83
Figura 4.23	Curva granulométrica do solo de fundação (trafegabilidade) (Amorim, 2008) – NBR 6502/95	83
Figura 4.24	Curva granulométrica do rejeito (RPM) – NBR 6502/95	83
Figura 4.25	Curva de retenção do solo superficial (top-soil) (Amorim, 2008)...	84
Figura 4.26	Curva de retenção do solo siltoso (Amorim, 2008).	84
Figura 4.27	Curva de retenção do solo argiloso (Amorim, 2008).....	85
Figura 4.28	Curva de retenção do solo granular (Barreira Capilar) (Amorim, 2008).	85
Figura 4.29	Curva de retenção do solo de fundação (Trafegabilidade) (Amorim, 2008).	86
Figura 4.30	Curva de retenção do rejeito (RPM).	86
Figura 4.31	Variação do IAF com um maior decréscimo no período de seca. ...	91
Figura 4.32	Variação do IAF com um menor decréscimo no período de seca. ..	91
Figura 4.33	Crescimento contínuo da raiz ao longo do período de análise.....	92
Figura 4.34	Crescimento contínuo até o fim da germinação e constante no restante do período de análise.	93
Figura 4.35	Função de Umidade Limite típica das plantas (VADOSE/W).	94
Figura 4.36	Funções de Umidade Limite estipuladas para a análise paramétrica.	95
Figura 5.1	Perfil esquemático do sistema de cobertura 1 com a posição dos instrumentos.	99
Figura 5.2	Perfil esquemático do sistema de cobertura 2 com a posição dos instrumentos.	99
Figura 5.3	Curva de Calibração para o WCR 7 (Solo Superficial – Sistema de Cobertura 1).	100
Figura 5.4	Curva de Calibração para o WCR 3 (Solo Siltoso – Sistema de Cobertura 1).	101

Figura 5.5	Curva de Calibração para o WCR 2 (Solo Argiloso – Sistema de Cobertura 1).	101
Figura 5.6	Curva de Calibração para o WCR 4 (Solo de Fundação – Sistema de Cobertura 1).	102
Figura 5.7	Curva de Calibração para o WCR 8 (Solo Superficial – Sistema de Cobertura 2).	102
Figura 5.8	Curva de Calibração para o WCR 5 (Solo Siltoso – Sistema de Cobertura 2).	103
Figura 5.9	Curva de Calibração para o WCR 6 (Solo Granular – Sistema de Cobertura 2).	103
Figura 5.10	Curva de Calibração para o WCR 1 (Solo de Fundação – Sistema de Cobertura 2).	104
Figura 5.11	Variação da Umidade Volumétrica obtida com a leitura dos WCRs do Sistema de Cobertura 1.	105
Figura 5.12	Variação da Umidade Volumétrica obtida com a leitura dos WCRs do Sistema de Cobertura 2.	105
Figura 5.13	Comparação com a calibração feita por Amorim (2008) para a camada de Solo Superficial (WCR 7).	106
Figura 5.14	Comparação com a calibração feita por Amorim (2008) para a camada de Solo Siltoso (WCR 3).	107
Figura 5.15	Comparação com a calibração feita por Amorim (2008) para a camada de Solo Argiloso (WCR 2).	107
Figura 5.16	Comparação com a calibração feita por Amorim (2008) para a camada de Solo de Fundação (WCR 4).	108
Figura 5.17	Comparação com a calibração feita por Amorim (2008) para a camada de Solo Superficial (WCR 8).	108
Figura 5.18	Comparação com a calibração feita por Amorim (2008) para a camada de Solo Siltoso (WCR 5).	109
Figura 5.19	Comparação com a calibração feita por Amorim (2008) para a camada de Solo Granular (WCR 6).	109
Figura 5.20	Comparação com a calibração feita por Amorim (2008) para a camada de Solo de Fundação (WCR 1).	110
Figura 5.21	Curva de Calibração para o HDU 1 (Solo Siltoso – Sistema de Cobertura 1).	111

Figura 5.22	Curva de Calibração para o HDU 2 (Solo Argiloso – Sistema de Cobertura 1).	111
Figura 5.23	Curva de Calibração para o HDU 3 (Solo de Fundação – Sistema de Cobertura 1).	112
Figura 5.24	Curva de Calibração para o HDU 4 (Solo Superficial – Sistema de Cobertura 2).	112
Figura 5.25	Curva de Calibração para o HDU 5 (Solo Granular – Sistema de Cobertura 2).	113
Figura 5.26	Curva de Calibração para o HDU 6 (Solo de Fundação – Sistema de Cobertura 2).	113
Figura 5.27	Varição da Sucção Matricial obtida com a leitura dos HDUs do Sistema de Cobertura 1.	114
Figura 5.28	Varição da Sucção Matricial obtida com a leitura dos HDUs do Sistema de Cobertura 2.	114
Figura 5.29	Resultado da análise paramétrica para determinação da posição inicial do lençol freático.....	115
Figura 5.30	Resultado da análise paramétrica para determinação do valor do IAF para o caso em que há um decréscimo acentuado do IAF no período de seca.	116
Figura 5.31	Resultado da análise paramétrica para determinação do valor do IAF para o caso em que não há um decréscimo acentuado do IAF no período de seca.	117
Figura 5.32	Resultado da análise paramétrica para determinação da profundidade da raiz para o caso de um crescimento contínuo durante todo período de análise.....	118
Figura 5.33	Resultado da análise paramétrica para determinação da profundidade da raiz para o caso de um crescimento contínuo até o fim da germinação e constante no restante do período de análise.....	118
Figura 5.34	Resultado da análise paramétrica para determinação do valor do ponto de murcha das espécies vegetais.	119
Figura 5.35	Resultado da análise paramétrica para avaliar a influência da condutividade térmica na variação da umidade volumétrica nas coberturas.	120
Figura 5.36	Resultado da análise paramétrica para avaliar a influência do calor específico na variação da umidade volumétrica nas coberturas. ...	121

Figura 5.37	Perfil de umidade (Sistema de Cobertura 1) gerado pelo modelo unidimensional referente ao período de Junho de 2007 a Junho de 2008.....	123
Figura 5.38	Perfil de umidade (Sistema de Cobertura 1) gerado pelo modelo unidimensional referente ao período de Junho de 2008 a Junho de 2009.....	124
Figura 5.39	Perfil de umidade (Sistema de Cobertura 1) gerado pelo modelo unidimensional referente ao período de Junho de 2009 a Junho de 2010.....	124
Figura 5.40	Perfil de umidade (Sistema de Cobertura 1) gerado pelo modelo bidimensional referente ao período de Junho de 2007 a Junho de 2008.....	125
Figura 5.41	Perfil de umidade (Sistema de Cobertura 1) gerado pelo modelo bidimensional referente ao período de Junho de 2008 a Junho de 2009.....	125
Figura 5.42	Perfil de umidade (Sistema de Cobertura 1) gerado pelo modelo bidimensional referente ao período de Junho de 2009 a Junho de 2010.....	126
Figura 5.43	Perfil de umidade (Sistema de Cobertura 2) gerado pelo modelo unidimensional referente ao período de Junho de 2007 a Junho de 2008.....	127
Figura 5.44	Perfil de umidade (Sistema de Cobertura 2) gerado pelo modelo unidimensional referente ao período de Junho de 2008 a Junho de 2009.....	127
Figura 5.45	Perfil de umidade (Sistema de Cobertura 2) gerado pelo modelo unidimensional referente ao período de Junho de 2009 a Junho de 2010.....	128
Figura 5.46	Perfil de umidade (Sistema de Cobertura 2) gerado pelo modelo bidimensional referente ao período de Junho de 2007 a Junho de 2008.....	128
Figura 5.47	Perfil de umidade (Sistema de Cobertura 2) gerado pelo modelo bidimensional referente ao período de Junho de 2008 a Junho de 2009.....	129
Figura 5.48	Perfil de umidade (Sistema de Cobertura 2) gerado pelo modelo bidimensional referente ao período de Junho de 2009 a Junho de 2010.....	129

Figura 5.49	(a) Balanço Hídrico gerado pelo modelo 2D para o sistema de cobertura 1, (b) Porcentagem da precipitação que incidiu na superfície do sistema de cobertura 1 para cada ano de estudo.....	131
Figura 5.50	(a) Balanço Hídrico gerado pelo modelo 2D para o sistema de cobertura 2, (b) Porcentagem da precipitação que incidiu na superfície do sistema de cobertura 2 para cada ano de estudo.....	132
Figura 5.51	Porcentagem de toda precipitação que incidiu na superfície do sistema de cobertura 1 nos quatro anos de análise.....	133
Figura 5.52	Porcentagem de toda precipitação que incidiu na superfície do sistema de cobertura 2 nos quatro anos de análise.....	133
Figura 5.53	Variação da umidade volumétrica com o tempo para a camada de solo superficial do sistema de cobertura 1 (CAMPO X MODELO).	135
Figura 5.54	Variação da umidade volumétrica com o tempo para a camada de solo siltoso do sistema de cobertura 1 (CAMPO X MODELO)....	135
Figura 5.55	Variação da umidade volumétrica com o tempo para a camada de solo argiloso (barreira hidráulica) do sistema de cobertura 1 (CAMPO X MODELO).....	136
Figura 5.56	Variação da umidade volumétrica com o tempo para a camada de solo de fundação (trafegabilidade) do sistema de cobertura 1 (CAMPO X MODELO).....	136
Figura 5.57	Variação da umidade volumétrica com o tempo para a camada de solo superficial do sistema de cobertura 2 (CAMPO X MODELO).	137
Figura 5.58	Variação da umidade volumétrica com o tempo para a camada de solo siltoso do sistema de cobertura 2 (CAMPO X MODELO)....	137
Figura 5.59	Variação da umidade volumétrica com o tempo para a camada de solo granular (barreira capilar) do sistema de cobertura 2 (CAMPO X MODELO).	138
Figura 5.60	Variação da umidade volumétrica com o tempo para a camada de solo de fundação (trafegabilidade) do sistema de cobertura 2 (CAMPO X MODELO).....	138
Figura 5.61	Erro relativo médio para as diversas camadas dos dois sistemas de cobertura.....	139
Figura 5.62	Variação do grau de saturação dos solos do sistema de cobertura 1 (MODELO 1D).	141

Figura 5.63	Varição do grau de saturação dos solos do sistema de cobertura 1 (MODELO 2D).	141
Figura 5.64	Varição do grau de saturação dos solos do sistema de cobertura 2 (MODELO 1D).	142
Figura 5.65	Varição do grau de saturação dos solos do sistema de cobertura 2 (MODELO 2D).	142
Figura 5.66	Varição da sucção matricial com o tempo para a camada de solo siltooso do sistema de cobertura 1 (CAMPO X MODELO).	144
Figura 5.67	Varição da sucção matricial com o tempo para a camada de solo argiloso (barreira hidráulica) do sistema de cobertura 1 (CAMPO X MODELO).	145
Figura 5.68	Varição da sucção matricial com o tempo para a camada de solo de fundação (trafegabilidade) do sistema de cobertura 1 (CAMPO X MODELO).	145
Figura 5.69	Varição da sucção matricial com o tempo para a camada de solo siltooso do sistema de cobertura 2 (CAMPO X MODELO).	146
Figura 5.70	Varição da sucção matricial com o tempo para a camada de solo granular (barreira capilar) do sistema de cobertura 1 (CAMPO X MODELO).	146
Figura 5.71	Varição da sucção matricial com o tempo para a camada de solo de fundação (trafegabilidade) do sistema de cobertura 2 (CAMPO X MODELO).	147
Figura 5.72	Erro relativo médio para as diversas camadas dos dois sistemas de cobertura.....	147

RESUMO

RIBEIRO André Geraldo Cornelio, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, janeiro de 2011. **Metodologia para Dimensionamento de Sistemas de Cobertura com Base em Estudo de Caso Realizado na Mina da Empresa Rio Paracatu Mineração (RPM) em Paracatu, Minas Gerais.** Orientador: Roberto Francisco de Azevedo. Co-orientadores: Christianne de Lyra Nogueira e Izabel Christina d’Almeida Duarte Azevedo.

Há cerca de quatro anos foram projetados e construídos dois sistemas de cobertura do tipo evapotranspirativo na Rio Paracatu Mineração (RPM), em Paracatu, Minas Gerais (Amorim, 2008). Um sistema de cobertura foi feito com uma camada barreira hidráulica e o outro com uma camada barreira capilar, ambos com sistemas de monitoramento compostos por medidores de escoamento superficial, lisímetros para medir a infiltração e instrumentação geotécnica para monitorar a umidade e a sucção nas diferentes camadas de solo. Estes experimentos foram implantados na mina, em uma região chamada de “Barraginha”, onde se localizava o reservatório que serviu para receber os rejeitos provenientes da operação da planta piloto da mina. Esta tese versou sobre a análise numérica, feita pelo método dos elementos finitos através do programa VADOSE/W, dos dois sistemas de cobertura. Inicialmente, foi necessário fazer a calibração no campo tanto dos medidores de umidade, quanto dos de sucção, para verificar a calibração anteriormente feita por Amorim (2008) no laboratório. O estudo numérico foi feito por um período de aproximadamente três anos com modelos uni e bi-dimensionais das coberturas. Preliminarmente, foram feitas análises paramétricas com alguns parâmetros do modelo numérico sobre cujos valores se tinham incerteza, para verificar a influência de cada um deles. Em seguida, compararam-se os resultados numéricos com os obtidos no campo. Essas comparações indicaram uma boa concordância entre os resultados, tanto com a modelagem uni, quanto com a modelagem bi-dimensional dos sistemas de cobertura. Por fim, baseado nos resultados obtidos, propôs-se uma metodologia para o dimensionamento de sistemas de cobertura feitos com solo.

ABSTRACT

RIBEIRO, André Geraldo Cornelio, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, January 2011. **Methodology for the Design of Cover Systems Based on the Case Study Conducted at Site Rio Paracatu Mineração (RPM) in Paracatu, Minas Gerais.** Adviser: Roberto Francisco de Azevedo. Co-Advisers: Christianne de Lyra Nogueira and Izabel Christina d'Almeida Duarte Azevedo.

Nearly four years ago, two experimental cover systems of the evapotranspirative type, have been designed and built in Rio Paracatu Mineração (RPM), Paracatu, Minas Gerais (Amorim, 2008). One cover system was made with a hydraulic barrier layer and the other with a capillary barrier layer, both with monitoring systems consisting of a runoff meter, lysimeters to measure infiltration and geotechnical instrumentation to monitor volumetric water content and suction in the different soil layers. These experiments were carried out at the mine site, in a region called "Barraginha," that served as reservoir to receive the tailings during the operation of the pilot plant of the mine. This thesis dealt with numerical analyses, made by the finite element method using the program VADOSE/W, of the two cover systems. Initially, it was necessary to calibrate in the field both the water content and the suction meters, to verify the calibration previously made in the laboratory by Amorim (2008). The numerical study was carried out during a period of approximately three years with one and two-dimensional models of the covers. Preliminarily, parametric analyses were made to check the influence of some model parameters whose values were uncertain. Next, the numerical results were compared with those obtained in the field. These comparisons indicate good agreement between the results, both with the one and two-dimensional models of the cover systems. Finally, based on the results obtained, a methodology for the design of cover systems made with soil is presented.

1- INTRODUÇÃO

1.1 – Considerações Gerais

A História do Brasil tem íntima relação com a busca e o aproveitamento dos seus recursos minerais, que sempre contribuíram com importantes insumos para a economia nacional, fazendo parte da ocupação territorial e da história nacional (Farias, 2002).

A mineração, como atividade industrial, é indispensável para a manutenção e melhoria do nível de vida, sendo fundamental para o desenvolvimento de uma sociedade equânime, desde que seja operada com responsabilidade social, estando sempre presentes os preceitos do desenvolvimento sustentável.

Anualmente, a indústria de mineração explora centenas de milhões de toneladas de solo e rocha para extrair bens minerais. Normalmente, a maior parte desse material explorado é resíduo (estéril e/ou rejeito).

Quando nos resíduos de mineração existem determinados minerais sulfetados que, em presença de água e oxigênio, são oxidados, gera-se uma solução aquosa ácida denominada drenagem ácida de minas (DAM) que, ao lixiviar, produz um percolado rico em metais dissolvidos e ácido sulfúrico. Caso esse percolado alcance corpos hídricos, pode contaminá-los, tornando-os impróprios para o uso por um longo tempo, mesmo depois de cessadas as atividades de mineração. Trata-se de um dos mais graves impactos ambientais associados à atividade de mineração (Amorim, 2008).

A ocorrência de DAM ocorre, principalmente, na extração de ouro, carvão, cobre, zinco e urânio, bem como na disposição inadequada dos resíduos destas operações. Portanto, evitar que as superfícies de rejeitos e/ou estéreis que contém minerais sulfetados fiquem expostas às condições oxidantes em presença de água é fundamental para a prevenção e minimização da DAM.

A empresa Rio Paracatu Mineração (RPM) atua há cerca de 25 anos na produção de ouro no município de Paracatu, em Minas Gerais. A mineração iniciou com a produção anual de 6,0 Mt. Em expansões sucessivas ocorridas em 1995, 1997 e 2001 a produção passou para 18,0 Mt/ano. Como o minério tinha baixa dureza, a

lavra no Morro do Ouro era feita com tratores e escavadeiras, sem a utilização de explosivos. A reserva inteira era considerada minério e era enviada para a planta de processo (beneficiamento).

Em 2005 a produção apresentava a mais baixa relação material escavado/minério do mundo: em média 0,45g de minério para 1,0 t de material escavado (SRK, 2005). Até meados de 2007, a RPM operava em um sistema não convencional de lavra a céu aberto que permitiu explorar o Morro do Ouro sem que fossem produzidas grandes quantidades de estéreis.

Em 2009 viabilizou-se um projeto de expansão que passará a produção para 80 Mt/ano e estenderá a vida útil da mina por, no mínimo, mais 20 anos. Com essa expansão, o local aonde existia o Morro do Ouro se tornará uma cava com cerca de 350 m de profundidade. A lavra da zona mineralizada exigirá o decapeamento de, no mínimo, 200 m de solo gerando um grande volume de estéril. Esse novo plano de lavra mudará o plano de fechamento da mina, introduzindo a necessidade de descomissionamento não só das áreas lavradas, da barragem de rejeitos e dos tanques específicos, mas também da cava e da pilha de estéril de 200 Mt que será gerada.

No processo de beneficiamento do minério, o ouro e os minerais sulfetados são concentrados em três estágios. Os rejeitos desse processo (30% em peso) contêm 20% a 30% de sulfetos e são depositados de forma subaquática em pequenos reservatórios revestidos por uma camada de argila e/ou geomembrana de Polietileno de Alta Densidade (PEAD), denominados de “tanques específicos” (Figura 1.1). Adiciona-se cal a esses rejeitos para manter o seu pH entre 6 e 7. Os rejeitos de flotação (cerca de 70% em peso) são parcialmente divididos em dois espessadores para a recuperação de água. A porção grosseira (underflow), com 30% de teor de sólidos, é enviada por gravidade para o reservatório da barragem de rejeitos com área de cerca de 800,0 há (Figura 1.2). Calcário britado é adicionado a esses rejeitos da flotação para melhorar as suas características geoquímicas após disposição. O ouro está presente na forma livre no minério lixiviado e também está associado à arsenopirita (FeAsS), à pirita (FeS₂) e à calcopirita (CuFeS₂).



Figura 1.1 – Imagem ilustrando os dois tanques específicos, um em funcionamento e outro em construção.



Figura 1.2 – Vista geral do lago de rejeito formado pela Barragem de terra que aparece ao fundo.

O objetivo do descomissionamento de minas consiste na reabilitação da área minerada de forma a garantir que o fechamento da mina não comprometa a qualidade ambiental do futuro. Dessa maneira, limita-se a extensão de eventuais passivos de natureza ambiental, seja para o minerador, seja para a sociedade (Amorim, 2008).

No caso da mineração RPM, a solução apontada como viável para descomissionar as estruturas (áreas mineradas, reservatório da barragem e tanques específicos e, com a expansão, pilha de estéril, cava e novo reservatório de rejeitos) passa por cobri-las com sistemas de cobertura capazes de reduzir a infiltração de água e a entrada de oxigênio nas mesmas. Como o plano de expansão exigirá o decapeamento de uma grande quantidade de solo, é conveniente que este material seja utilizado nos sistemas de coberturas das estruturas mencionadas.

Em vista da necessidade de se estudar sistemas de cobertura feitos com solo, há cerca de 5 anos, viabilizou-se com a RPM a construção de um experimento em uma das áreas da empresa para se estudar “*in situ*” o desempenho de sistemas de cobertura. Amorim (2008) descreve o projeto, a construção e o desempenho durante o primeiro ano desse experimento que consistiu na construção de dois sistemas de cobertura na mina da empresa Rio Paracatu Mineração, feitos na região denominada “Barraginha”, que serviu para receber os rejeitos da planta piloto da mina durante cerca de 10 anos.

O presente trabalho dá continuidade ao trabalho de Amorim (2008), no que se diz respeito ao monitoramento da instrumentação instalada, servindo como base para o estudo de uma metodologia para o dimensionamento de sistemas de cobertura.

1.2 – Objetivo

O principal objetivo desse trabalho é o desenvolvimento de uma metodologia para dimensionamento de sistemas de cobertura que utiliza modelos numéricos, como o implementado no programa VADOSE/W, e a forma de obtenção de parâmetros proposta nesta tese.

Os objetivos específicos são:

- Continuar o monitoramento dos dois sistemas de cobertura iniciado por Amorim (2008), em particular, dos medidores de conteúdo de água e de sucção nas diferentes camadas de solo;
- Realizar calibrações no campo dos reflectômetros para medir conteúdo de água (WCR) e das unidades de dissipação de calor para medir sucção (HDU);

- Desenvolver, com base nos dados obtidos em campo, modelos numéricos uni e bi-dimensionais dos sistemas de cobertura, usando o programa VADOSE/W do pacote GeoSlope, que utiliza o método dos elementos finitos.
- Realizar análises paramétricas, com o objetivo de determinar a influência dos parâmetros vegetais, parâmetros geotécnicos, parâmetros térmicos e parâmetros climáticos no ajuste do modelo.
- Comparar os resultados numéricos obtidos com os modelos uni e bi-dimensional dos sistemas de cobertura com os resultados monitorados no campo por cerca de três anos;

1.3 – Organização da Tese

Esta Tese foi dividida em seis capítulos:

- No Capítulo 2, Revisão Bibliográfica, apresenta-se uma breve revisão sobre sistemas de cobertura de solos, trabalhos sobre análises numéricas de sistemas de cobertura, bem como trabalhos anteriormente desenvolvidos na RPM, em Paracatu.
- No Capítulo 3; Fundamentos Teóricos do Problema, apresenta-se de maneira resumida uma abordagem das principais equações que estudam o fluxo de ar, água, vapor de água e calor no solo e sua interação com a atmosfera, bem como as condições iniciais e de contorno destas equações.
- No Capítulo 4, Materiais e Métodos, descrevem-se primeiramente a concepção do experimento de campo desenvolvida por Amorim (2008), em seguida a metodologia para a calibração dos instrumentos já instalados no campo (WCR e HDU), os ensaios de laboratório para determinação dos parâmetros do solo e, por fim, os estudos feitos para determinar alguns parâmetros dos modelos numéricos dos sistemas de coberturas.
- No Capítulo 5, Apresentação e Discussão dos Resultados, apresenta-se e analisam-se os resultados obtidos em todas as fases do trabalho, compreendendo desde os resultados dos ensaios iniciais de caracterização e determinação dos parâmetros do solo, das calibrações dos instrumentos de campo, das análises

paramétricas, os resultados obtidos com os modelos numéricos e as comparações com os resultados de campo.

- Por fim, no Capítulo 6, Conclusões, apresentam-se as conclusões obtidas no desenvolver dos trabalhos.

São apresentadas também as referências bibliográficas utilizadas, que serviram como subsídio para as informações contidas nesta tese.

2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – Introdução

O descomissionamento de minas é uma tarefa multidisciplinar podendo ser concebida para projetos, minas em operação, minas abandonadas ou em vias de exaustão. Seu objetivo é a reabilitação da área minerada de forma a garantir que o fechamento da mina não comprometa a qualidade ambiental do futuro e limite a extensão de eventuais passivos de natureza ambiental, seja para o minerador, seja para a sociedade.

Segundo Amorim (2008), o plano de fechamento de mina procura consolidar, ainda que parcialmente, os custos sociais gerados pela operação e não apropriados pelo mercado de forma a internalizá-los no processo decisório da empresa de mineração. Logo, o objetivo geral de um plano típico de fechamento de mina contempla a definição de objetivos e metas que deverão ser materializadas no projeto de reabilitação. O plano se baseia em opções técnicas, econômicas e sociais, na legislação vigente (no caso brasileiro, EIA, RIMA e PRAD), nos compromissos formalizados durante o processo de licenciamento ambiental e em consultas junto à comunidade. Sob o enfoque restrito da empresa mineradora, manifesta-se a preocupação que o plano de fechamento elimine ou minimize o passivo ambiental, atual ou potencial, da empresa frente a possíveis demandas futuras.

Qualquer que seja a razão que leve ao descomissionamento de uma mina, os problemas da recuperação de áreas degradadas e reutilização do terreno devem ter posição de destaque. No âmbito da mineração, a recuperação de áreas degradadas é geralmente entendida como o conjunto de ações que visam tornar a área apta para outro uso, não necessariamente idêntico ao que antecedeu a atividade de mineração. A possibilidade de um novo uso requer que a área apresente condições de estabilidade física, química e, em alguns casos, biológica, quando, por exemplo, a utilização futura da área será para fins de conservação ambiental e de ecossistemas.

Nas últimas décadas, observou-se uma crescente conscientização quanto à gravidade, ao risco e a magnitude dos custos associados ao passivo ambiental legado por gerações passadas. Com relação à mineração, a demanda por garantias

financeiras está associada à necessidade de minimizar o risco de que, ao final da vida útil da mina, a empresa não tenha interesse ou capacidade financeira para custear o plano de fechamento.

Uma das tecnologias muito utilizadas para o descomissionamento de minas são coberturas construídas com solo e/ou geossintéticos. Com base neste contexto, o presente capítulo apresenta uma breve revisão de sistemas de coberturas construídos com solo, a influência e importância da vegetação nos projetos das coberturas e o uso de modelagem numérica em sistemas de cobertura.

2.2 – Sistemas de cobertura feitos com solo

A drenagem ácida de mina (DAM) pode contaminar as águas superficiais e subterrâneas em comunidades próximas ao local da mina, se medidas preventivas e de controle não são tomadas. Portanto, é fundamental limitar a acessibilidade de água e oxigênio para o resíduo e, com isso, reduzir a produção de DAM.

Naturalmente, cobrir os resíduos com uma camada de solo com baixa condutividade hidráulica limita a acessibilidade de água aos mesmos. Além disso, quando a cobertura de solo está com o conteúdo de água próximo da sua saturação, a acessibilidade de oxigênio também é restrita. Assim, uma cobertura de solo de granulação fina com condutividade hidráulica baixa e grau de saturação alto, reduz simultaneamente o ingresso de água e oxigênio aos resíduos (Yanful et al. , 2006).

O uso de sistemas de cobertura com solo não é novo, alguns pesquisadores como Brown (1970); Nicholson et al. (1989); Aubertin et al. (1995a), b; Khire et al. (1997); Chapuis (2002); Mbonimpa et al. (2003); etc., têm estudado diversos sistemas de cobertura com diferentes tipos de solo e diferentes espessuras de camadas.

O desafio para a construção de um sistema de cobertura com solo para resíduos reativos de minas acima do lençol freático é a manutenção de um elevado grau de saturação da cobertura por um longo período de tempo. Para fazer isso, tanto a drenagem descendente da água contida nos poros das camadas de solo do sistema de cobertura em direção aos resíduos quanto a evaporação ascendente desta água em direção à atmosfera, especialmente durante os períodos de seca, devem ser impedidos ou ao menos minimizados. Nicholson et al. (1991) sugeriu que a escolha dos solos a

serem usados no sistema de cobertura deve ser apropriada e recomendou mais estudo sobre os processos hidráulicos que regem o fluxo em meios porosos.

Yanful (1993) observou que um sistema de cobertura composto por várias camadas de solo colocadas sobre um rejeito gerador de ácido foi capaz de reduzir o fluxo de oxigênio em 98%. Essa cobertura consistiu de uma camada intermediária de material fino, que serviu como camada de retenção de umidade, e duas camadas protetoras de material grosseiro acima e abaixo desta barreira.

A colocação de camadas de solo grosseiro, ou camadas capilares, acima e abaixo da camada barreira, geralmente ajuda a preservar o grau de saturação dessa camada em condições climáticas variadas (Rasmuson e Eriksson, 1986; Collin, 1987; Yanful e Aube, 1993; Benson et al., 1994; Shackelford et al., 1994; Choo e Yanful, 2000). A função das camadas capilares será mais discutida posteriormente.

Sistemas de coberturas com várias camadas de solo também têm sido estudados nos últimos 15 anos em uma série de investigações de campo. Coberturas de duas e três camadas de solo foram construídas sobre resíduos de rocha geradores de ácido nas Minas Rum Jungle, na Austrália (Harries e Ritchie, 1987); Heath Steele, em New Brunswick, EUA (Yanful et al., 1993a,b); Equity Silver, em British Columbia, Canadá (O’Kane et al., 1998) e Bersbo, na Suécia (Lundgren, 1997). Experimentos de um sistema de cobertura com três camadas de solo sobre rejeitos geradores de ácido foram construídos no local descomissionado perto de Rouyn-Noranda, Québec em 1990 e monitorados por um período de mais de três anos (Yanful e St-Arnaud, 1991; Yanful et al., 1994). As três camadas consistiram de uma camada superior de areia fina, uma camada intermediária de argila siltosa compactada e uma camada inferior de areia grossa. Uma camada de cascalho foi colocada sobre a camada superior de areia fina para evitar a sua erosão. Dados medidos no campo indicaram que a camada barreira de argila siltosa, compactada com desvio de umidade de +2%, manteve seu grau de saturação em aproximadamente 95% e a condutividade hidráulica em aproximadamente 1×10^{-7} cm/s durante os três anos do monitoramento. Como resultado, a cobertura reduziu significativamente a difusão de oxigênio e a percolação de água, e permitiu que somente 4% da precipitação infiltrasse para a camada de rejeito (Woysner and Yanful, 1995).

Em todos os sistemas de cobertura com solo, descritos acima, a camada barreira tinha baixa permeabilidade e permanecia praticamente saturada devido à

presença de camadas protetoras de material grosseiro, as quais funcionaram como camadas de quebra de capilaridade para condições climáticas semi-áridas.

Sistemas de cobertura de resíduos de mina com solo que não usam o conceito de camada capilar também têm sido investigados. Por exemplo, O’Kane e Waters (2003) obtiveram resultados significantes ao avaliarem o desempenho de um sistema de cobertura do tipo “armazenamento-e-liberação” (“store-and-release”), variando a inclinação da camada superficial, para redução da geração de ácido em climas áridos.

Nos casos citados acima, as coberturas de solo não foram usadas em projetos de descomissionamento de resíduos de minas em climas temperados. Segundo Yanful et al. (2006), dois motivos principais justificam essa tendência:

- Primeiro, o alto custo inicial de um sistema de cobertura com solo: por exemplo, para uma área de rejeitos de 20 ha, o custo da instalação de uma cobertura de solo com três camadas é estimado entre \$100,000-\$250,000 por hectare, enquanto que o custo de implementação de um sistema de cobertura de água para a mesma área é \$120,000 por hectare. Embora estas estimativas sejam somente para custos de construção, elas mostram que, geralmente, o custo inicial de construção de uma cobertura de solo é maior do que o de uma cobertura de água. No entanto, com frequência não é possível se adotar sistemas de cobertura com água porque, ou a hidrogeologia, ou a topografia, ou ambas, não permitem.
- A segunda desvantagem da cobertura de solo é a incerteza sobre o seu desempenho em longo prazo, uma vez que existe muito pouca informação disponível a respeito do desempenho em longo prazo de sistemas de coberturas com solo.

Custos significantes de manutenção e impactos ambientais prejudiciais podem ocorrer se uma cobertura não é corretamente projetada e construída (Yanful et al., 2006).

2.3 – Tipos de coberturas de solo

Os sistemas de cobertura com solo podem ser divididos em dois tipos: convencionais (ou prescritivos) e alternativos (ou evapotranspirativos).

2.3.1 – Coberturas convencionais ou prescritivas

Esses sistemas de coberturas utilizam camadas com baixa condutividade hidráulica para minimizar a infiltração de água e, com isso, maximizam o escoamento superficial e a evaporação. Os componentes básicos destes sistemas de cobertura são uma camada para controle de erosão e plantio, normalmente feita com solo orgânico, sobreposta a uma camada de material de baixa condutividade hidráulica (barreira hidráulica ou camada barreira) que, se necessário, pode ser construída sobre uma camada de fundação. Eventualmente, uma camada de drenagem de líquidos pode ser inserida entre a primeira camada e a barreira hidráulica e, se os resíduos produzem gases, uma camada de drenagem de gases pode ser adicionada abaixo da barreira hidráulica. Algumas camadas podem ter mais de uma função como, por exemplo, a camada de fundação que também pode servir como camada de drenagem dos gases. A experiência tem mostrado que este tipo de cobertura pode apresentar vulnerabilidades e limitações, como: mau funcionamento causado pelo ressecamento e consequente fissuramento da camada barreira; grandes investimentos para a sua construção e manutenção; durabilidade, seu desempenho pode piorar com o tempo devido à degradação pela erosão superficial, etc. (EPA, 1999).

A camada superficial para o controle da erosão e plantio permite o crescimento de cobertura vegetal que, além da transpiração, fornece ao sistema uma proteção contra a erosão, na medida em que reduz os impactos da chuva e diminui a velocidade dos ventos na superfície da cobertura. No entanto, em regiões áridas, é muito difícil estabelecer e manter uma vegetação consistente na superfície do sistema de cobertura. Em tais condições, tem sido utilizada uma camada de cascalho para substituir a camada de cobertura vegetal. Dependendo da granulometria, o cascalho pode ser altamente resistente à erosão provocada pelo vento e/ou pela chuva (Amorim, 2008).

A camada de drenagem de líquidos tem duas funções:

- Reduzir a carga hidráulica sobre a camada barreira, minimizando assim a infiltração;
- Drenar a água que infiltra pela camada superficial, permitindo a esta absorver maior volume de água e, consequentemente, diminuir o escoamento superficial.

Os materiais utilizados nas camadas de drenagem são solos sem coesão (areias e cascalhos) e ou geossintéticos (Qian et alli, 2002). Se a camada de drenagem é feita de solo é recomendado espessura e inclinação mínimas de, respectivamente, 30 cm e 4% e coeficiente de permeabilidade maior que 1×10^{-2} cm/s. Além disso, é necessário que o material drenante se enquadre também como filtro, ou seja, que ao mesmo tempo seja drenante e não permita a migração das partículas de solos adjacentes para os seus vazios. Caso não haja disponibilidade de solos que atendam a estes critérios, faz-se necessário a utilização de geonets, geotêxtil ou geocompostos (Qian et alli, 2002).

A camada de barreira hidráulica (camada barreira) tem como função minimizar a percolação da água através do sistema e indiretamente promover a drenagem ou armazenagem da água em camadas superiores, aumentando a evapotranspiração e o escoamento superficial. A barreira hidráulica, se trabalhada de forma saturada ou próxima da saturação, minimiza, também, a percolação de gases. Entretanto, camadas de argilas compactadas podem apresentar trincas (ou fissuras) causadas por ressecamento ou por recalques diferenciais que, naturalmente, aumentariam significativamente a condutividade hidráulica da camada barreira.

Segundo Qian et alli (2002), alguns estados americanos exigem que a inclinação da última camada do sistema de cobertura seja maior que 4% e menor que 25% para prevenir a formação de poças.

2.3.2 – Coberturas alternativas ou evapotranspirativas

Este tipo de sistema de cobertura normalmente consiste em uma camada superficial para controle de erosão e plantio de vegetação, que garantirá a evapotranspiração principalmente durante a estação de crescimento das plantas; uma camada de solo pouco compactado, normalmente chamada de camada de armazenamento-e-liberação; e, se for o caso, uma camada de solo com granulometria mais grosseira (barreira capilar). Por fim, abaixo desta camada, se necessário, uma camada de fundação. As principais características de uma cobertura evapotranspirativa são:

- Funcionam como estruturas naturais;

- Possuem maior vida útil;
- Têm manutenção mais fácil;
- Têm menor custo de implantação.

A camada armazenamento-e-liberação deverá ser capaz de acumular a água de infiltração durante o período chuvoso e liberá-la de volta para a atmosfera por evapotranspiração durante os períodos de estiagem. Ela deve ser suficientemente espessa para que o acréscimo de umidade durante o período de armazenamento não alcance a sua base, uma vez que, se isso acontecer, a água poderá chegar aos resíduos. Esta capacidade de armazenamento é função do tipo de solo, da espessura da camada e das condições meteorológicas locais.

Nos Estados Unidos para que haja aprovação pelas agências reguladoras do projeto de uma cobertura evapotranspirativa, é necessário avaliar se existe equivalência hidráulica entre o desempenho dessa cobertura e o de uma cobertura convencional (EPA, 2002). A equivalência hidráulica requer que a percolação gerada a partir da base da cobertura evapotranspirativa seja menor ou igual àquela que seria gerada pela cobertura convencional ou prescritiva. Para a medida da percolação é indicado construir lisímetros logo abaixo da última camada do sistema de cobertura.

Lisímetros são tanques inseridos na superfície do solo, preenchidos com o mesmo solo do local e com vegetação, e têm sido muito usados em agronomia para medir capacidade de armazenamento de água no solo, evapotranspiração, etc. No caso de sistemas de cobertura, lisímetro é também um recipiente normalmente colocado imediatamente abaixo desse sistema, preenchido com um solo mais drenante que os utilizados no sistema de cobertura e ligado ao exterior por uma tubulação que recolhe o líquido que passa através da cobertura, flui pela tubulação e possibilita a medição da vazão. Entretanto, nem sempre é possível construir estes lisímetros e, mesmo quando é possível, suas medições podem estar sujeitas a diversas críticas tais como: o solo dentro do lisímetro é diferente do da camada logo acima dele, o que cria uma interface artificial que influencia o regime de fluxo e, conseqüentemente, a vazão medida é diferente da vazão real. Da mesma forma, o regime de fluxo é influenciado porque a tubulação para medição da vazão é aberta para a atmosfera e, com isso, cria uma carga de pressão nula dentro do lisímetro, diferentemente da situação real sem o lisímetro (Parent & Cabral 2006).

Enquanto o desempenho das coberturas convencionais decresce com o tempo em consequência do ressecamento e erosão, o desempenho das coberturas alternativas tende a melhorar com o tempo, porque as raízes tendem a se desenvolver horizontal e verticalmente, estabilizando a vegetação e aumentando a transpiração e a proteção contra a erosão. A expectativa de vida de uma cobertura evapotranspirativa é de milhares de anos, porque elas estão mais próximas do que ocorre normalmente na natureza. Para o caso das coberturas convencionais, a vida útil é incerta (Langoni, 2002).

Segundo Abichou et alli (2004), na cobertura evapotranspirativa a vegetação tem papel fundamental, uma vez que as raízes são as principais responsáveis por retirar a água armazenada nos solos destas coberturas.

O princípio de funcionamento de coberturas evapotranspirativas é mostrado na Figura 2.1.

O balanço hídrico da cobertura pode ser representado pela equação 2.1 (Abichou, et alli, 2004):

$$P_t = P - R - S - T - E - L \quad (2.1)$$

Em que:

P_t = percolação;

P = precipitação;

R = escoamento superficial;

S = armazenamento de água no perfil;

T = transpiração;

E = evaporação;

L = drenagem lateral.

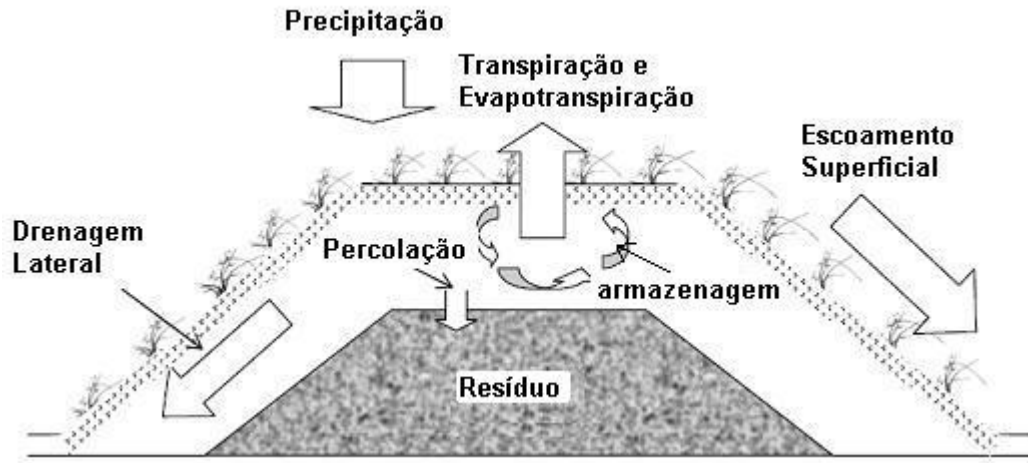


Figura 2.1 – Perfil típico de uma cobertura evapotranspirativa (adaptado de Abichou, et alli, 2004).

O armazenamento de água pode ser incrementado com a seleção de solos apropriados, com o aumento da espessura da camada e/ou a colocação de uma barreira capilar. A maximização da transpiração pode ser alcançada selecionando a vegetação adequada, sua extensão e densidade.

Vieira (2005) relata que projetos de coberturas evapotranspirativas têm se mostrado mais viáveis em regiões de climas áridos e semi-áridos. Qian et alli (2002) comentam que os termos áridos e semi-áridos não são rígidos e devem ser verificados para cada localidade. Mencionam, ainda, que Tornthwaite (1948) utiliza como índice de umidade a precipitação anual subtraída da evapotranspiração e que, de acordo com esse índice, o clima árido estaria entre, aproximadamente, (-150) e (-100) milímetros por ano e o semi-árido entre (-100) e (-50) milímetros. Considerando este critério e a transpiração entre 100 e 200 mm por ano, a cidade de Paracatu estaria em região de semi-árida a árida.

Existem dois tipos básicos de coberturas evapotranspirativas: coberturas *monolíticas* e coberturas com *barreiras capilares* (Abichou et alli, 2004) (Figura 2.2).

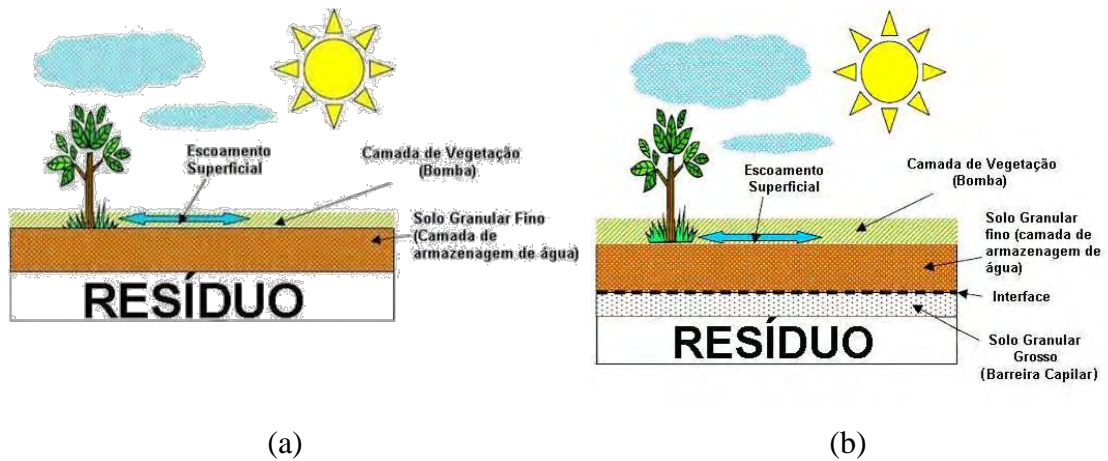


Figura 2.2 – (a) Perfil típico de uma cobertura evapotranspirativa *monolítica*; (b) Perfil típico de uma cobertura evapotranspirativa com *barreira capilar* (adaptado de Abichou et alli, 2004).

As coberturas evapotranspirativas *monolíticas* são formadas por uma camada de solo para plantio de espécies vegetais, maximizando a transpiração; uma camada de armazenamento-e-liberação; e, se necessário, uma camada de solo de fundação. Como as camadas de armazenamento-e-liberação são normalmente construídas com areias siltosas, siltes, e siltes argilosos, as coberturas evapotranspirativas *monolíticas* só podem ser economicamente viáveis quando uma grande quantidade destes solos está disponível no local onde se construirá o sistema de cobertura (Benson e Khire, 1995).

As coberturas evapotranspirativas com *barreiras capilares* são formadas por uma camada de solo para plantio; uma camada de armazenamento-e-liberação; uma camada de solo para funcionar como barreira capilar; e, se necessário, uma camada de solo de fundação. A sucção na interface entre a camada de armazenamento-e-liberação e a camada barreira capilar é igual. Como a barreira capilar é formada com um solo mais grosseiro, seu grau de saturação é bem baixo e sua condutividade hidráulica é bem menor do que o da camada de armazenamento-e-liberação. Por este motivo, a barreira capilar é um contorno pouco drenante para a camada de armazenamento-e-liberação e, com isso, aumenta a sua capacidade de armazenamento de água, sem aumentar o fluxo de água para as camadas subjacentes.

Entretanto, se a camada de armazenamento-e-liberação não for adequadamente dimensionada, em caso de chuvas intensas e prolongadas, mesmo com a barreira capilar, a frente de saturação pode alcançar a sua base. Conseqüentemente, a sucção na interface entre as duas camadas diminui e ultrapassa o ponto a partir do qual a

condutividade hidráulica da camada de armazenamento-e-liberação fica menor do que a da barreira capilar. Nesta circunstância, a barreira capilar passa a ser um contorno mais drenante, quase satura, e facilita a infiltração de água nas camadas subjacentes. Quando isso ocorre, costuma-se dizer que houve “quebra da barreira capilar”. Por este motivo, muitos autores, Benson e Khire, (1995); Morris e Stormont (1997); etc., recomendam o uso de barreira capilar, sobretudo em regiões áridas e semi-áridas.

Segundo Dwyer (2003) e Carlsson (2002), além da quebra da barreira capilar, ainda existem dois problemas importantes com relação ao uso de coberturas evapotranspirativas com barreira capilar:

- Primeiro, o solo fino não deve migrar para dentro dos vazios do solo grosso da barreira capilar. Para mitigar esse problema uma manta de geotêxtil pode ser utilizada na interface entre esses dois solos, funcionando como uma camada de transição.
- Segundo, consideram que elevadas precipitações também poderão atrapalhar o perfeito funcionamento das coberturas evapotranspirativas, uma vez que a camada de solo superior poderá ganhar mais umidade do que a evapotranspiração consegue retirar do perfil.

Nyhan et al. (1993) relataram que a percolação numa barreira capilar construída abaixo de uma camada de argila siltosa, é cerca de 11 vezes menor que a percolação que ocorre numa mesma barreira capilar construída acima de uma camada de silte, ou seja, barreiras capilares têm melhor desempenho se o contraste entre a condutividade hidráulica da barreira capilar e da camada de armazenamento-e-liberação for maior.

Stormont et al (1999) conduziram uma série de ensaios de infiltração em laboratório em barreiras capilares feitas com cascalho com finos e com areia grossa. Os autores concluíram que a barreira formada pela areia grossa foi mais eficiente que a com cascalho com finos, ou seja, barreiras capilares parecem ser mais eficientes se forem construídas com um material mais uniforme.

Caso apareçam trincas na camada de armazenamento-e-liberação, a eficiência da cobertura poderá ser comprometida. Assim, devem ser tomadas precauções na seleção do solo para esta camada. Siltes argilosos, siltes arenosos e algumas argilas

siltosas são mais adequadas para este fim que solos ricos em argilas ativas que normalmente ressecam e trincam com mais facilidade. Se forem utilizadas argilas, elas devem ser lançadas com um teor de umidade baixo para minimizar este fenômeno. Naturalmente a camada de plantio sobre a camada de armazenamento-e-liberação diminui estes problemas de ressecamento.

Segundo Parent & Cabral (2006), projetar uma cobertura com barreira capilar inclinada é interessante no sentido de se criar uma drenagem lateral na camada de armazenamento-e-liberação o que retarda a infiltração de água na barreira capilar (Figura 2.3). Se a infiltração vertical uniformemente distribuída na superfície da camada tiver valor mais baixo que a condutividade hidráulica saturada do material fino, parte da água será retida em função das forças capilares enquanto outra parte irá drenar lateralmente. A capacidade de desvio é definida como o fluxo máximo que a barreira capilar pode desviar e o comprimento do desvio é uma medida horizontal, a partir do topo do talude, até onde a água começa a infiltrar verticalmente no perfil (Figura 2.3). A capacidade de desvio e o comprimento de desvio dependem da função condutividade hidráulica dos materiais que compõem a cobertura (solo fino e barreira capilar), da espessura da camada, da infiltração e da inclinação da interface solo fino/barreira capilar. Ross (1990), apud Parent & Cabral (2006), comenta que na zona do perfil, depois do comprimento de desvio, o sistema da barreira capilar está em equilíbrio, isto é, em regime permanente, portanto o gradiente hidráulico, os perfis de sucção e a infiltração, que cruzam a interface, permanecem constantes.

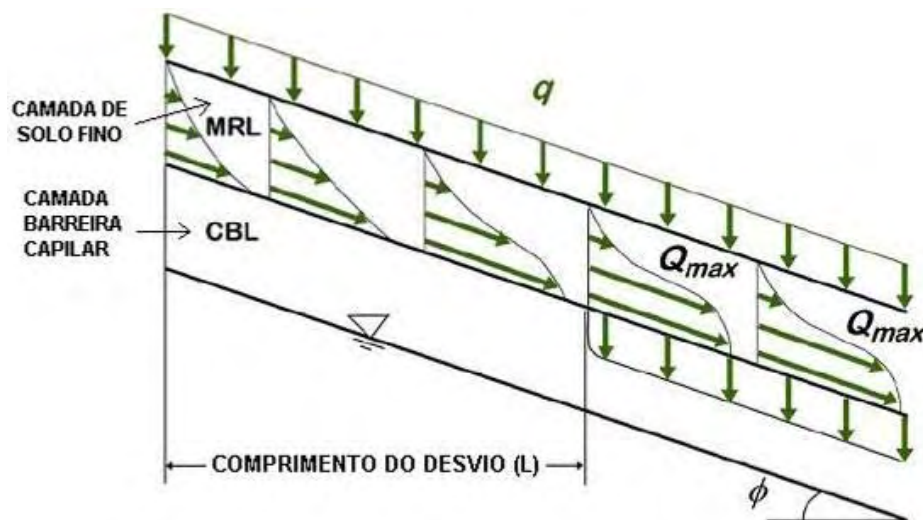


Figura 2.3 – Perfil de uma barreira capilar inclinada (adaptado de Parent & Cabral 2006).

2.4 – Vegetação

2.4.1 – Importância em Projetos de Cobertura

Segundo a EPA (2002), a vegetação possui várias funções em projetos de cobertura:

- As folhas interceptam parte das chuvas antes do impacto com o solo, reduzindo a energia da água e, conseqüentemente, o potencial de erosão;
- A vegetação também ajuda a dissipar a energia dos ventos;
- O sistema radicular raso das plantas aumenta a resistência da camada superficial contra os agentes erosivos (água e ventos);
- A vegetação promove a transpiração da água incrementando a capacidade de armazenamento dos solos da cobertura e minimizando o escoamento superficial e a drenagem por estes solos;
- Uma superfície bem vegetada é geralmente considerada mais natural e mais agradável esteticamente do que uma superfície sem vegetação.

2.4.2 – Espécies de Plantas

As espécies das plantas podem variar dependendo do clima, uso do solo em longo prazo, tipo do rejeito, limitações do projeto, etc. Pode ser interessante utilizar uma mistura de espécies que poderá maximizar o número de dias de transpiração bem como a quantidade total de água a ser retirada. Deve-se ter em mente os objetivos do pós-fechamento da área, quando é desejável que a vegetação exija a menor manutenção possível e tenha sustentabilidade em longo prazo. Talvez por isso, alguns pesquisadores defendem a plantação somente de espécies nativas. Ensaio com a mistura de espécies nativas e não nativas têm fornecido bons resultados quando se pensa em redução ou eliminação da quantidade de água na cobertura. A transpiração começa a ocorrer após as plantas iniciarem o crescimento e desenvolvimento, mas para se pensar em estabilidade vegetal, deve-se esperar que se estabeleça uma comunidade de plantas mais maduras. Uma comunidade pode levar de três, cinco ou mais anos para se desenvolver. (ITRC (2003)).

Segundo a EPA (2002), apud Amorim (2008), para a seleção da vegetação apropriada para um determinado local, as seguintes recomendações devem ser seguidas:

- Plantas nativas com baixo crescimento (menor que 1 m de altura) e gramíneas são recomendadas para manter a estabilidade ecológica em longo prazo;
- As plantas selecionadas devem sobreviver às condições climáticas locais;
- As plantas devem possuir raízes profundas o suficiente para remover a umidade da camada superficial, mas, não tão profunda que possa afetar as demais camadas da cobertura;
- As plantas devem ser capazes de crescerem com a mínima quantidade adicional de nutrientes e com pouca, ou nenhuma, manutenção;
- A comunidade vegetal deveria ser suficientemente diversa para promover a proteção contra a erosão durante todas as estações do ano e sob uma variedade de condições;
- As plantas não devem atrair espécies animais escavadoras.

2.4.3 – Crescimento Vegetativo

Segundo a EPA (2002), as plantas e a transpiração são ativas somente durante a estação de crescimento vegetativo da comunidade, ao passo que a evaporação da água na superfície do solo ocorre durante todo o ano.

Mudanças no potencial de transpiração ocorrem durante o ano associadas com a precipitação, vento, pressão atmosférica e flutuação da temperatura. Na estação de crescimento vegetativo, diferentes espécies iniciam e alcançam o pico de crescimento em tempos variados. As plantas podem responder de forma alternada dependendo de condições climáticas favoráveis ou não, na mesma estação de crescimento.

Para aplicações práticas, é importante escolher comunidades de espécies que possam responder bem a todas as condições durante a estação de crescimento e assim, maximizar a transpiração. Assim, é interessante incluir uma mistura de espécies que estarão ativas durante as estações quentes e frias de forma que a transpiração na cobertura possa estar presente em qualquer período do ano.

Nos dois sistemas de cobertura utilizados no presente trabalho, Amorim (2008) realizou o plantio de uma mistura de espécies vegetais conforme a Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Espécies e densidade de sementes utilizada para compor a cobertura vegetal do experimento (Amorim, 2008).

Espécie	Semeadura (g/m²)
Crotalária (<i>Crotalaria spectabilis</i>)	5
Capim gordura (<i>Melinis minutiflora</i>)	10
Nabo (<i>Raphanus sativus</i>)	5
Aveia Preta (<i>Avena stringosa</i>)	10
Stylosantes	2,5
Feijão Guandu (<i>Cajanus indicus</i>)	5

O plantio foi realizado em Novembro de 2007, mas a germinação das espécies só ocorreu no início de Março de 2008.

Devido à interferência de espécies nativas no entorno do experimento, em Dezembro de 2008 Amorim (2008) notou a presença de outras espécies que não foram selecionadas para o plantio. Esse foi um dos motivos pelo qual nesta tese realizou-se uma análise paramétrica para definir de uma maneira mais aproximada quais eram os parâmetros vegetais (IAF, Profundidade da Raiz e Ponto de Murcha), necessários para ajustar o modelo numérico.

2.4.4 – Profundidade das Raízes

Segundo a EPA (2002), dados locais sobre a estrutura, a densidade e a profundidade das raízes podem ser difíceis de serem obtidos. A profundidade real das raízes é usualmente controlada pelas propriedades do solo e não somente pelo potencial da planta. Assim pode ser interessante a utilização de modelos que consideram o crescimento das raízes limitado pelas propriedades do solo. Em geral, a grama tem a maioria das suas raízes juntas formando uma densa rede de raízes fibrosas a meio metro da superfície do solo. Amorim (2008) mediu o tamanho das raízes de algumas espécies encontradas no experimento depois da germinação. O autor encontrou, em média, profundidades em torno de 30 a 40 cm. Entretanto, em função do aparecimento de outras espécies, conforme mencionado no parágrafo

anterior, também havia incerteza no valor da profundidade das raízes. Por isso, nesta tese também se fez uma análise paramétrica para ver a influência desse parâmetro nos resultados numéricos.

2.4.5 – Índice de Área Foliar

Segundo a EPA (2002), o índice de área foliar (IAF) é a área total das folhas por unidade de área de solo e é o maior controlador da transpiração. Área foliar é muito importante na absorção da radiação e na realização da fotossíntese durante o período diurno e em ciclos sazonais. Geralmente, o IAF varia de praticamente zero até 10, mas pode sofrer grandes variações. Por exemplo, durante o período de crescimento vegetativo o IAF pode começar nulo, atingir um valor máximo e cair eventualmente até zero. Essa variação é importante em muitos modelos, uma vez que controla a transpiração das plantas. Com o crescimento área foliar, as plantas aumentam o uso da água. Em geral, espécies que tem maior taxa de crescimento em termos de biomassa têm maior quantidade de folhas, normalmente mais finas, e, conseqüentemente, têm maiores IAF, resultando em maiores taxas de transpiração.

O IAF é usado pelo VADOSE/W de forma a reduzir a quantidade de radiação líquida que intercepta a superfície do solo, que por sua vez, reduz a evaporação real calculada. Em outras palavras, o índice de área foliar controla a forma como a energia na superfície é dividida entre o que está disponível para a evaporação direta a partir do solo e a que está disponível para a transpiração das plantas.

Os métodos de medição e estimação do IAF são geralmente classificados na literatura como diretos e indiretos. Daughtry (1990) descreve diferentes métodos diretos de medição do IAF, entre os quais:

- a) método de delineamento da folha;
- b) método com base na combinação de formas e tamanhos-padrão;
- c) método de cálculo com base em medidas lineares;
- d) método com base na relação entre área e massa foliar;
- e) método da planimetria óptica.

Os métodos de medição indireta do IAF são, usualmente, baseados na medição da atenuação de radiação pelo dossel (cobertura vegetal), a partir da teoria de transferência de radiação. Welles (1990) e Welles & Cohen (1996) descrevem uma série de instrumentos e métodos para realizar estas medições, entre os quais estão as fotografias hemisféricas, o sensor quântico de linha, DEMON, e o LAI-2000. Em geral, os métodos de medida direta apresentam maior precisão, mas são mais laboriosos que os indiretos. O equipamento LAI-2000 (Figura 2.4a), e sua versão mais recente, o LAI-2200 (Figura 2.4b), vem sendo amplamente utilizados em áreas florestais, devido à sua praticidade para estimar o IAF. Entre os autores que utilizaram esta técnica estão Vertessy et al. (1995), Chen & Cihlar (1996), Hingston et al. (1998), Ares & Fownes (2000), Barclay et al. (2000) e Linhares et al. (2000).

O LAI-2000 e LAI-2200 calculam o IAF e outros atributos da cobertura vegetal a partir de medições de radiação feitas por meio de um sensor óptico "olho de peixe" (148° de campo de visão). Esse sensor mede, simultaneamente, a radiação difusa em cinco bandas angulares distintas (0-130, 16-280, 32-430, 47-580 e 61-740). O sensor é constituído de cinco fotodiodos, cujas superfícies ativas estão arranjadas em anéis concêntricos. A imagem do dossel, em forma quase hemisférica, é projetada dentro desses anéis, o que permite para cada intervalo angular, a medição da radiação na banda e no ângulo zenital conhecido. Um filtro óptico restringe a transmissão radiativa para comprimentos de onda menores que 490 nm (LI-COR, 1992). Alguns estudos mostram que os equipamentos LAI-2000 e LAI-2200, quando utilizados em áreas florestais, subestimam o IAF quando este está acima de 2,0, sendo indicada a calibração do equipamento para as condições de uso local com base em amostras destrutivas (Chen et al., 1991; Battaglia, 1998). A violação de algumas preposições para utilização destes equipamentos seria uma das causas dessa subestimativa, como a distribuição não aleatória das folhas no dossel (Chen et al., 1991).

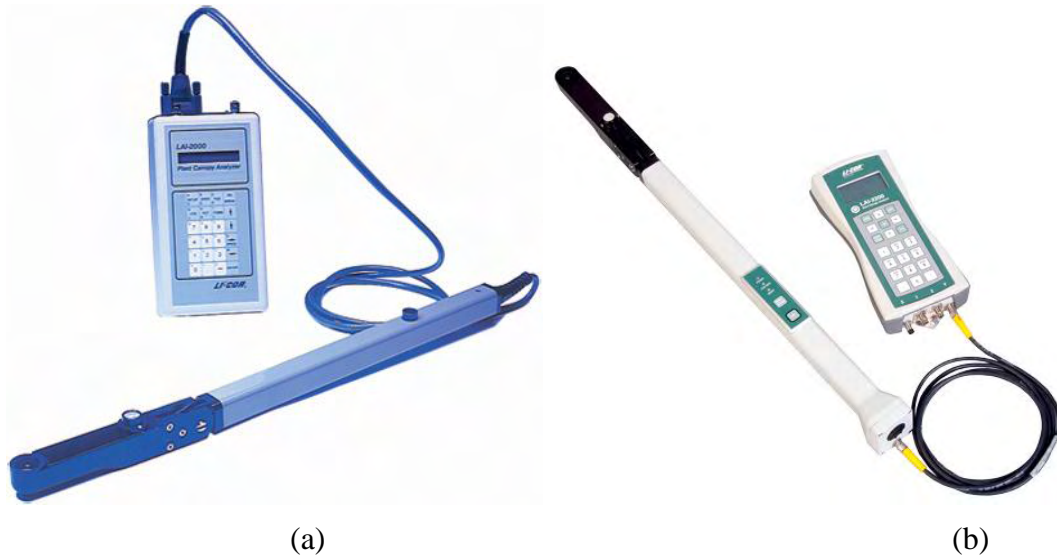


Figura 2.4 – Instrumentação para medição do IAF: (a) LAI-2000 e (b) LAI-2200

2.4.6 – Ponto de Murcha

Segundo a EPA (2002), o ponto de murcha do solo é o teor de umidade volumétrico abaixo do qual as plantas não conseguem mais extrair água do solo. A rigor, o ponto de murcha não é um valor único dentro de uma massa de solo, porque, mesmo quando o solo se encontra com umidade maior que a correspondente ao ponto de murcha, nem toda água contida nos poros está disponível para as plantas. Isto porque as forças atrativas entre as moléculas de água e as partículas de argila do solo em microporos podem ser muito maiores que a capacidade de extração das plantas. De forma simplificada, para toda a massa de solo, se costuma definir o ponto de murcha como a umidade volumétrica correspondente à sucção igual a 1500 kPa que é o valor normalmente assumido como a máxima capacidade de extração de água do solo pelas plantas.

No entanto, o ponto de murcha varia de acordo com as características do solo e das plantas. Solos com elevados teores de argilo minerais podem ter um valor de ponto de murcha maior que o dos solos grosseiros. Algumas espécies de plantas são mais bem adaptadas para remover a umidade do solo e, portanto, elas têm um ponto de murcha menor. Em camadas de solos rasos a redução da água continua além do ponto de murcha por causa da evaporação. As camadas de solos profundos não são afetadas pela evaporação direta e permanecem com o valor do ponto de murcha original, mencionado acima.

2.5 – Importância da interação solo-atmosfera

Modelos isotérmicos que não consideram esta interação podem ser usados para prever respostas de um sistema de cobertura de solo em curto prazo; entretanto, uma análise de longo prazo, sob condições climáticas diversas, a modelagem solo-atmosfera de transporte de água e calor acoplados deve ser usada para analisar as coberturas de solo (Swanson et al., 2003).

A umidade volumétrica dentro de um sistema de cobertura é função das propriedades hidráulicas dos solos que o compõem e de fatores climáticos que controlam o fluxo de água que progride através deste sistema. Esse fluxo de água vai se desenvolver como resultado da precipitação ou evaporação, e da sucção nos solos que compõem o sistema de cobertura (Yanful et al., 2006). Portanto, se nos modelos de comportamento estes pontos forem desprezados, os perfis de pressão e as umidades volumétricas nas camadas de solo do sistema de cobertura podem desviar significativamente daqueles obtidos teoricamente (Barbour, 1990).

Swanson et al. (2003) realizaram uma modelagem solo-atmosfera de uma cobertura de solo em uma mina de resíduos gerando ácido num clima alpino úmido. Eles confirmaram que o fluxo de vapor foi o mecanismo de fluxo dominante próximo a superfície da cobertura, poucos dias após o início da secagem. Os mesmos autores advertem sobre o perigo de subestimar a perda de água das coberturas ignorando a Evaporação Real (ER). Essas conclusões enfatizaram a necessidade de examinar o transporte acoplado de água e calor em análise e projeto de sistemas de cobertura de solo.

Embora a ER não fosse incorporada na maioria dos estudos iniciais em sistemas de cobertura feitos com solo (Akindunni et al., 1991; Nicholson et al., 1991; Shackelford et al., 1994; Bussière et al., 1995; MucMullen et al., 1997; Mbonimpa et al., 2003), todos estes estudos reconheceram sua importância.

No presente trabalho, o movimento de água líquida e vapor de água, devido à evaporação no interior de uma cobertura de solo, é incluído nas análises numéricas realizadas com o programa VADOSE/W. Este programa determina o valor da evaporação acoplando a umidade e o calor na superfície do solo com as condições climáticas apresentadas acima da superfície do solo.

Tradicionalmente, a modelagem de fluxo evaporativo tem sido limitada para métodos que prevêem a ER baseada num valor de Evaporação Potencial (EP) que é

“a quantidade máxima de vapor de água susceptível de se evaporar de uma superfície de água pura, na unidade de tempo e nas condições atmosféricas existentes.”

Esta abordagem forma a base do método de Penman (1948), amplamente utilizado, que admite que o solo superficial esteja sempre saturado. Outros métodos tais como o método de Thornthwaite (1948) baseado na temperatura e o método de Priestly-Taylor (1972) baseado na energia, também preveem a EP, mas eles são específicos para certos locais e novamente fazem a suposição fundamental que o solo superficial está saturado.

Normalmente se diz que a ER é igual à EP quando o solo está saturado; e que a taxa ER diminui em relação à EP a medida que o solo dessatura em sua superfície.

Wilson (1990, 1994), usando no laboratório uma câmara climática controlada, plotou ER/EP versus o tempo, umidade volumétrica e poro-pressão para três diferentes tipos de solo (silte, areia e argila plástica) sob as mesmas condições climáticas. Quando ER/EP foi plotado contra o tempo ou a umidade volumétrica, o autor não encontrou uma relação única entre a taxa ER/EP para os três solos (Figuras 2.5 e 2.6). No entanto, quando a relação entre ER/EP foi plotada versus a sucção dos solos, as curvas ER/EP para todos os três solos praticamente coincidiram (Figura 2.7).

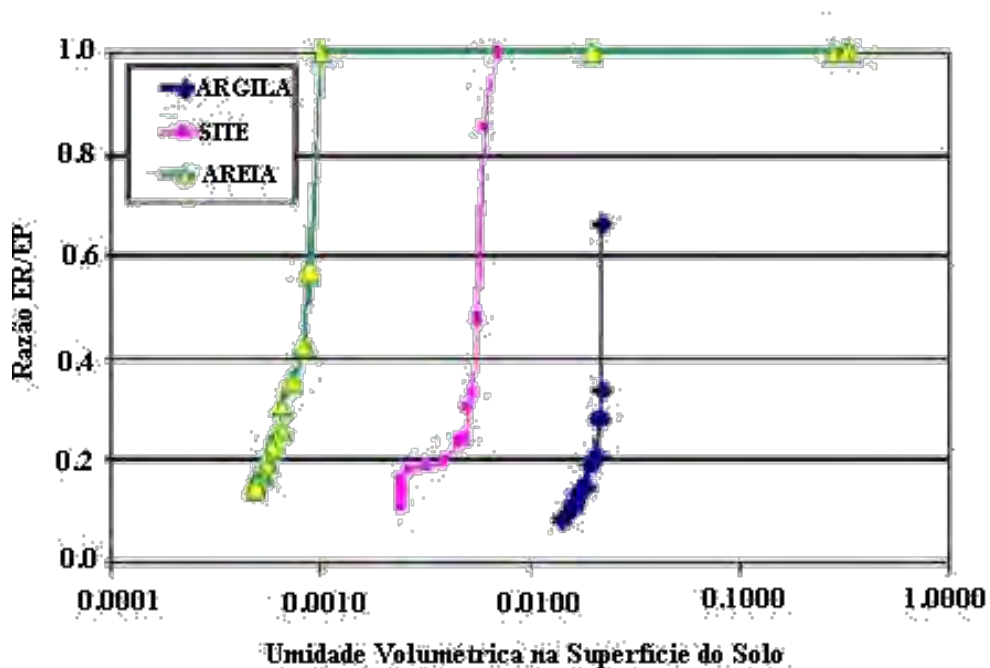


Figura 2.5 – Comparação ER/EP com a Umidade Volumétrica (adaptado Wilson 1990; 1994).

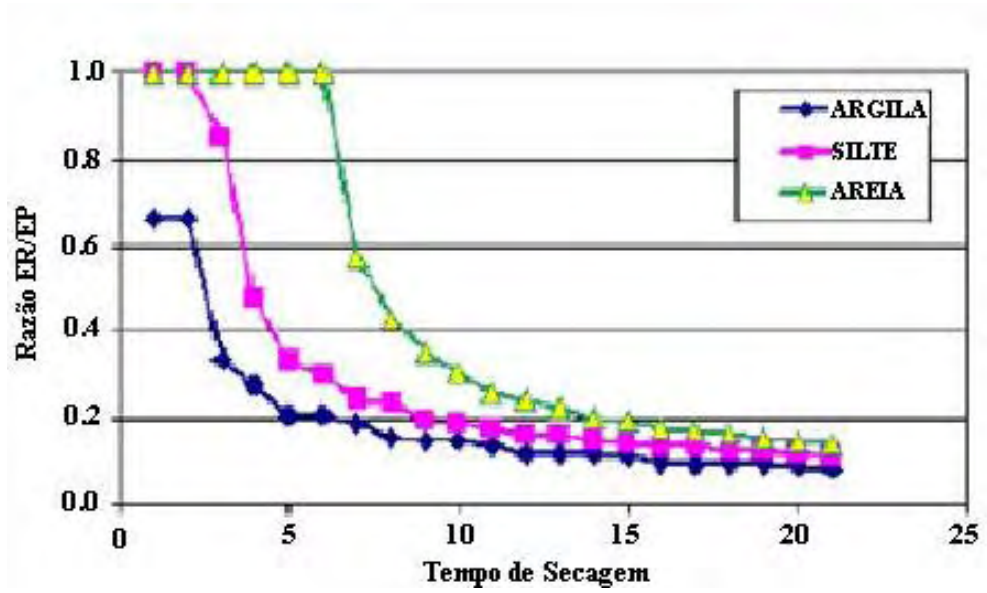


Figura 2.6 – Comparação ER/EP com o Tempo (adaptado Wilson 1990; 1994).

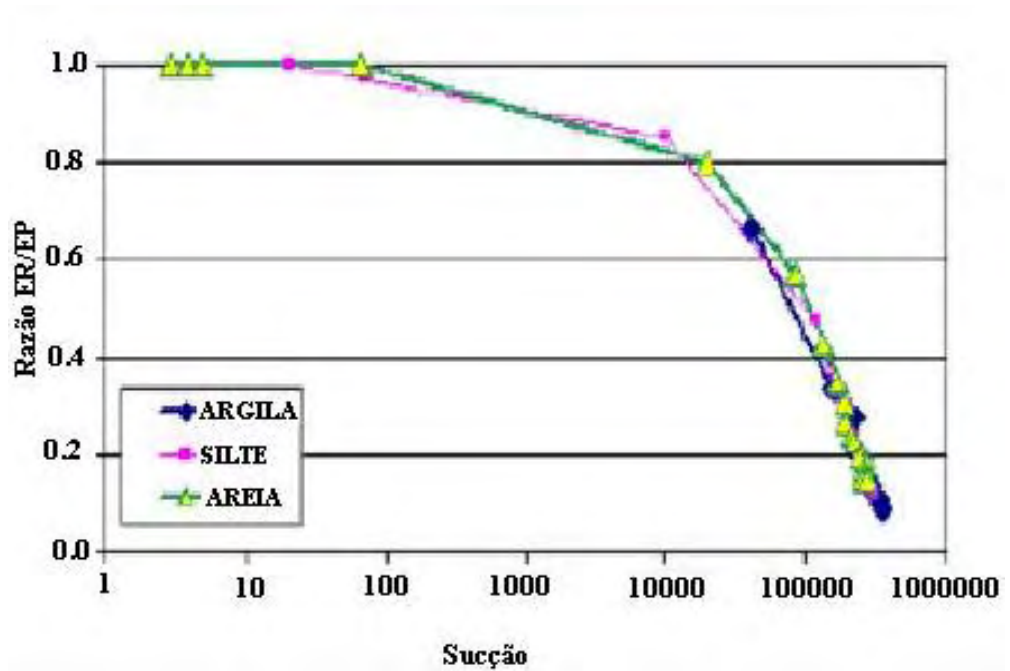


Figura 2.7 – Comparação ER/EP com a Sucção (adaptado Wilson 1990; 1994).

2.6 – Modelagem numérica em sistemas de cobertura

Alguns pesquisadores têm destacado o importante papel da modelagem numérica nas análises de sistemas de coberturas com diferentes camadas de solo. McMullen et al. (1997) observaram que, como o comportamento hidráulico de um

sistema de cobertura em camada é complexo, cálculos computadorizados baseados em modelos numéricos devem ser usados para estabelecer as configurações ótimas.

Bussière et al. (1995) analisaram coberturas com diferentes tipos de materiais, e apresentaram como os métodos numéricos podem ser usados para avaliar o desempenho de barreiras capilares.

Mbonimpa et al. (2003) explicaram os benefícios do uso de simulações numéricas para prever o comportamento de sistemas de cobertura de solo. Os autores apresentaram exemplos de cálculos de fluxo de oxigênio em sistemas de cobertura e sugeriram que as mudanças fundamentais das propriedades da cobertura e parâmetros de projeto, tais como o grau de saturação da barreira e a espessura das diversas camadas, poderiam ser uma forma eficaz de prever o desempenho da cobertura.

Yanful et al. (2002) apresentaram resultados que mostram um bom ajuste entre os dados de evaporação experimental e simulações numéricas obtidas usando o modelo solo-atmosfera SoilCover (Geo-Analysis 2000 Ltd., 2000).

Swanson et al. (2003) relataram os resultados de simulações numéricas para prever o desempenho do sistema de cobertura de solo na Mina Equity Silver, British Columbia, Canadá. Os autores avaliaram a capacidade do modelo SoilCover (Geo-Analysis 2000 Ltd., 2000) para simular condições de campo e encontraram um ajuste razoável entre os resultados numéricos e de campo.

McCartney e Zornberg (2003) apresentam resultados da análise numérica para uma cobertura evapotranspirativa construída em um clima semi-árido. Eles observaram que o modelo numérico apresentou resultados precisos no início das análises, mas depois os resultados só concordaram em tendência, mas não em magnitude. A percolação medida em campo e calculada numericamente foi semelhante. Os resultados da simulação foram sensíveis às propriedades hidráulicas do solo, mas não foram influenciados pela seleção diferente de radiação solar, velocidade do vento ou da consideração de histerese na curva de retenção de água dos solos. Os autores concluíram que a modelagem numérica é uma ferramenta importante para analisar o desempenho dos sistemas de cobertura.

Após uma descrição detalhada sobre todas as singularidades dos modelos, os autores do ITRC (2003), apresentam conclusões e recomendações, algumas das quais estão sumarizadas abaixo (apud Amorim, 2008):

- O item fluxo não deveria ser considerado sozinho como o principal resultado da modelagem numérica da cobertura. O aspecto mais importante na modelagem é a possibilidade de visualizar resultados de vários cenários através das análises de sensibilidade, em que os diversos parâmetros embutidos no projeto são modificados. Por último, o modelo deve ajudar a estabelecer um projeto mais realista com respeito à espessura das camadas de solo, grau de compactação do solo, tipos de vegetação etc;
- É importante ser bastante criterioso para com os parâmetros de entrada dos modelos de forma que os mesmos sejam os mais realistas possíveis, mas com viés conservador, de forma a fornecerem resultados mais confiáveis para a avaliação do projeto proposto;
- Modelos que incorporam a equação de Richard deverão ser sempre utilizados em projetos de coberturas, uma vez que, na maioria dos casos, os solos que compõem o sistema de cobertura encontram-se não-saturados;
- Dados climáticos de entrada do modelo devem ser diários ou horários e não mensais;
- A capacidade dos modelos em estimar ou simular precisamente as medidas de campo está relacionada à limitação de cada modelo, mas também a complexidade e o número de fatores envolvidos nas análises, tais como: evapotranspiração, escoamento superficial e fluxos preferenciais;
- É importante e sempre recomendável a utilização de medidas diretas para reduzir as incertezas dos modelos.

2.7 – Trabalhos sobre coberturas de solo realizados na RPM

De 2003 a 2005 a SRK do Canadá realizou um trabalho de monitoramento na cobertura do Tanque Específico III, na mina da RPM, em Paracatu (SRK, 2003 e SRK, 2005), O trabalho consistiu no seguinte:

- Montagem de uma estação meteorológica completa, automatizada, capaz de coletar dados da temperatura do ar, umidade relativa, velocidade dos ventos, direção dos ventos, radiação e precipitação. Os dados obtidos nesta estação forma utilizados na presente tese;

- Monitoramento geotécnico através da instalação de instrumentos de medida de sucção e umidade no interior do reservatório e da cobertura do tanque específico III;
- Medição no campo, com o permeâmetro de Guelph, da condutividade hidráulica do solo usado na cobertura deste tanque;
- Coleta de amostras deste solo para a realização de ensaios geotécnicos;
- Modelagem unidimensional do sistema de cobertura do tanque específico III com o software SoilCover usando as condições climáticas monitoradas pela estação meteorológica e os dados obtidos nos ensaios de laboratório;
- Posteriormente, foi feita uma recalibração do modelo utilizando os resultados obtidos com o sistema monitoramento geotécnico.

A partir dos resultados numéricos obtidos com o modelo concluiu-se que:

- Os perfis de umidade do solo foram próximos daqueles medidos em campo;
- Os resultados numéricos indicaram que 45% da precipitação que caiu sobre a superfície do tanque escoaram superficialmente, 31% infiltraram no solo da cobertura e 24% foram consumidos pela evaporação. Estes resultados mostram que o escoamento superficial foi elevado porque a cobertura não tinha vegetação. O que poderia parecer vantagem, uma vez que indica menor quantidade de água se infiltrando na cobertura, pode se tornar um problema na medida em que este fato aumenta também a erosão superficial da cobertura. Simulações considerando uma cobertura vegetal adequada indicam que o escoamento superficial se reduziria sem aumentar a infiltração, uma vez que essa redução seria compensada pelo acréscimo na transpiração;
- Na relação do teor de umidade volumétrico com o tempo observou-se, para cada instrumento, que o rejeito se encontrava quase saturado em todo o período de monitoramento o que ocasionou fluxo por difusão de baixo para cima em épocas de estiagem com a conseqüente ascensão dos sais para a superfície;
- A ineficiência da camada de cobertura como barreira para a passagem de oxigênio também foi comprovada pelo grau de saturação do solo de cobertura apresentar-se, em períodos de seca, abaixo de 80%, valor considerado o mínimo necessário para praticamente impedir a passagem de oxigênio;

- Concluiu-se que o aumento da espessura da camada do solo de cobertura não traria vantagens significantes quanto à melhoria do desempenho da mesma e no incremento da sua capacidade de armazenamento de água.

Amorim (2008) realizou uma análise numérica inicial dos sistemas de cobertura do experimento estudados no presente trabalho. A análise foi feita com um modelo numérico unidimensional e concluiu que as variações de umidade volumétrica com o tempo medidas no campo nas diferentes camadas dos dois sistemas de cobertura não concordaram com as previstas pelo modelo numérico, de tal forma que, no campo, os solos estavam mais úmidos do que no modelo numérico.

Como já foi dito, a presente tese é uma continuidade do trabalho de Amorim (2008).

3- FUNDAMENTOS TEÓRICOS DO PROBLEMA

Neste Capítulo apresentam-se as equações que estudam o fluxo de ar, água, vapor de água e calor no solo e sua interação com a atmosfera, bem como as condições iniciais e de contorno destas equações. Apresenta-se, também, uma versão simplificada destas equações e características básicas de como elas são resolvidas numericamente pelo programa VADOSE/W do pacote Geo Slope, usado nesta tese.

3.1 – Desenvolvimento Teórico

Diversos autores têm acoplado o fluxo de água no solo com a transferência do vapor de água na atmosfera acima do solo (Sasamori, 1970; Sophocleous, 1978 e 1979; Milly and Eagleson, 1980 e 1982; Milly, 1984a and 1984b; Camillo et al, 1983; and Passerat De Silans et al, 1989). Estes trabalhos são baseados nas equações de Philip e Vries (1957) para fluxos simultâneos de umidade e calor em meios porosos que consideram o solo. Por este motivo, sua aplicação em engenharia geotécnica é consideravelmente limitada.

Wilson (1990) formulou as equações de fluxo usando uma abordagem mecânica para descrever o fluxo de ar, água, vapor de água e calor no solo. A Lei de Fick é utilizada para descrever o fluxo de ar e vapor de água, a Lei de Darcy para descrever o fluxo de água líquida e a Lei de Fourier para descrever o fluxo de calor. A lei de Dalton é usada para descrever a transferência de vapor de água na atmosfera acima do solo, ou seja: *"na mistura gasosa, a pressão de cada componente é independente da pressão dos demais, a pressão total (P) é igual à soma das pressões parciais dos componentes"*.

Para uma melhor compreensão, todas as equações de fluxo para o solo apresentadas neste capítulo são dadas na forma unidimensional, apesar de no presente trabalho terem sido feitas análises uni e bi-dimensional dos sistemas de cobertura com o programa VADOSE.

3.1.1 – Descrição do Volume Elementar do Solo (VES).

Quando não-saturado, o volume elementar do solo (VES) é considerado, como proposto por Fredlund (1981), tendo quatro fases distintas (Figura 3.1):

1. Partículas de Solo
2. Fase Líquida da Água
3. Película contrátil ou menisco
4. Fase ar e de vapor d'água

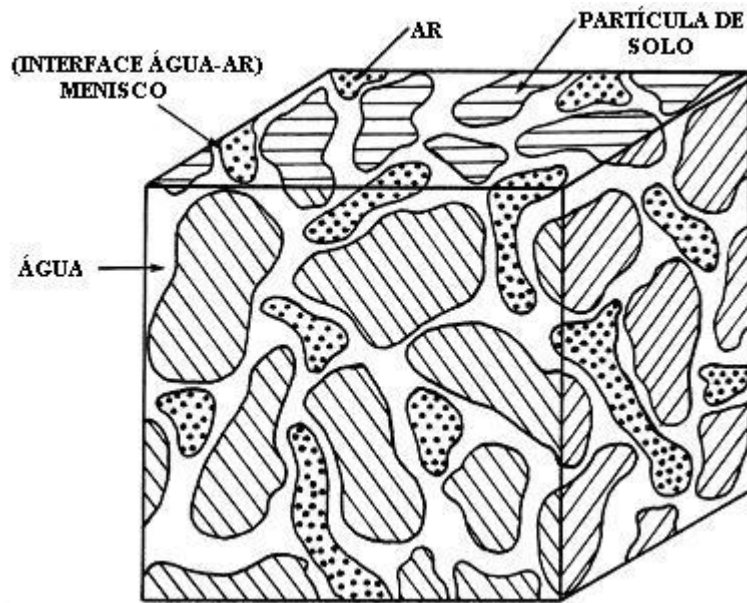


Figura 3.1 – Desenho conceitual do Volume Elementar do Solo (Fredlund, 1981).

Quando acréscimos de tensão são aplicados no solo, a sua estrutura se deforma, alterando o volume de vazios, e, conseqüentemente, a película contrátil (menisco), até o equilíbrio de forças ser atingido. Simultaneamente, ocorrem fluxos nas fases líquida e de ar que ocupam os vazios, que têm que atender ao princípio da continuidade que, de maneira geral, estabelece que *“a quantidade de massa que sai menos a quantidade que entra é igual à quantidade de massa retida, ou liberada, por unidade de volume e tempo”*

Na dedução das equações de continuidade que descrevem os fluxos de ar, água, vapor de água e calor esse princípio tem que ser sempre respeitado. Além disso, as seguintes hipóteses são assumidas (Wilson, 1990):

1. Um elemento infinitesimal do VES é considerado contínuo, apesar do VES ser descontínuo.

2. As partículas sólidas são indeformáveis.
3. O fluxo de água no solo devido ao gradiente de pressão osmótica é desprezado.
4. Os coeficientes de permeabilidade para as fases líquida e de ar, são funções da umidade volumétrica e do grau de saturação.
5. A histerese nas relações entre o coeficiente de permeabilidade e a sucção matricial, bem como nas relações entre a umidade volumétrica e a sucção, não é considerada.
6. O equilíbrio termodinâmico local prevalece em todo momento em qualquer ponto no solo entre a fase líquida e fase de vapor da água.
7. A temperatura dentro do solo permanece acima do ponto de congelamento e abaixo do ponto de ebulição da água em todo momento.
8. O efeito de uma dupla camada difusa ou de fluido adsorvido ao redor das partículas de solo não é considerado.
9. A dissolução do ar na fase líquida da água também não é considerada.

As variáveis de estado, em termos de tensão, são: a tensão normal líquida, $(\sigma - u_a)$, em que σ é o tensor das tensões totais; e a sucção mátrica $(u_a - u_w)$, em que u_a é a pressão de ar nos poros e u_w é a pressão de água nos poros. No caso particular unidimensional, estas variáveis são $(\sigma_y - u_a)$ e a sucção $(u_a - u_w)$, onde σ_y = tensão total na direção y, vertical.

A variação do estado de tensão e a variação do estado de deformação pode ser relacionada tal como proposto por Fredlund and Morgenstern (1976) assumindo que a variação do volume total do VES não-saturado, ΔV , é dada por:

$$\Delta V = [m_1^S d(\sigma_y - u_a) + m_2^S d(u_a - u_w)] V \quad (3.1)$$

em que:

m_1^S é O módulo de compressibilidade da estrutura do solo quando $(u_a - u_w)$ é zero.

m_2^S é O módulo de compressibilidade da estrutura do solo quando $(\sigma_y - u_a)$ é zero.

A variação de volume da fase líquida do VES não-saturado, ΔV_w , é escrita como:

$$\Delta V_w = [m_1^w d(\sigma_y - u_a) + m_2^w d(u_a - u_w)] V \quad (3.2)$$

em que:

m_1^w é a inclinação da curva $(\sigma_y - u_a)$ versus volume de água quando $(u_a - u_w)$ é zero.

m_2^w é a inclinação da curva $(u_a - u_w)$ versus volume de água quando $(\sigma_y - u_a)$ é zero.

Finalmente, a variação de volume da fase gasosa, similarmente as duas primeiras, também pode ser escrita da forma:

$$\Delta V_a = [m_1^a d(\sigma_y - u_a) + m_2^a d(u_a - u_w)]V \quad (3.3)$$

em que:

m_1^a é a inclinação da curva $(\sigma_y - u_a)$ versus volume de ar quando $(u_a - u_w)$ é zero.

m_2^a é a inclinação da curva $(u_a - u_w)$ versus volume de ar quando $(\sigma_y - u_a)$ é zero.

Como a fase sólida é incompressível pode-se dizer que:

$$\Delta V = \Delta V_w + \Delta V_a \quad (3.4)$$

As Equações 3.1, 3.2 e 3.3, descrevem as relações constitutivas para o VES em condições não-saturadas. Quando o solo está saturado, a relação constitutiva para a fase ar (Equação 3.3) desaparece e as Equações 3.1 e 3.2 convergem para uma única relação constitutiva para o VES saturado:

$$\Delta V = \Delta V_w = m_v d(\sigma_y - u_w) V$$

$$\text{ou} \quad (3.5)$$

$$d\theta = \frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta V_w}{V} = m_v d(\sigma_y - u_w)$$

em que:

$d\theta$ é Variação na umidade volumétrica;

m_v é Coeficiente de variação de volume utilizado na mecânica dos solos saturados

(ou seja, $m_1^s = m_1^w = m_v$)

A Figura 3.2 (segundo Lam et al, 1987) ilustra a transição das condições não-saturadas para as condições saturadas para a relação constitutiva na fase líquida.

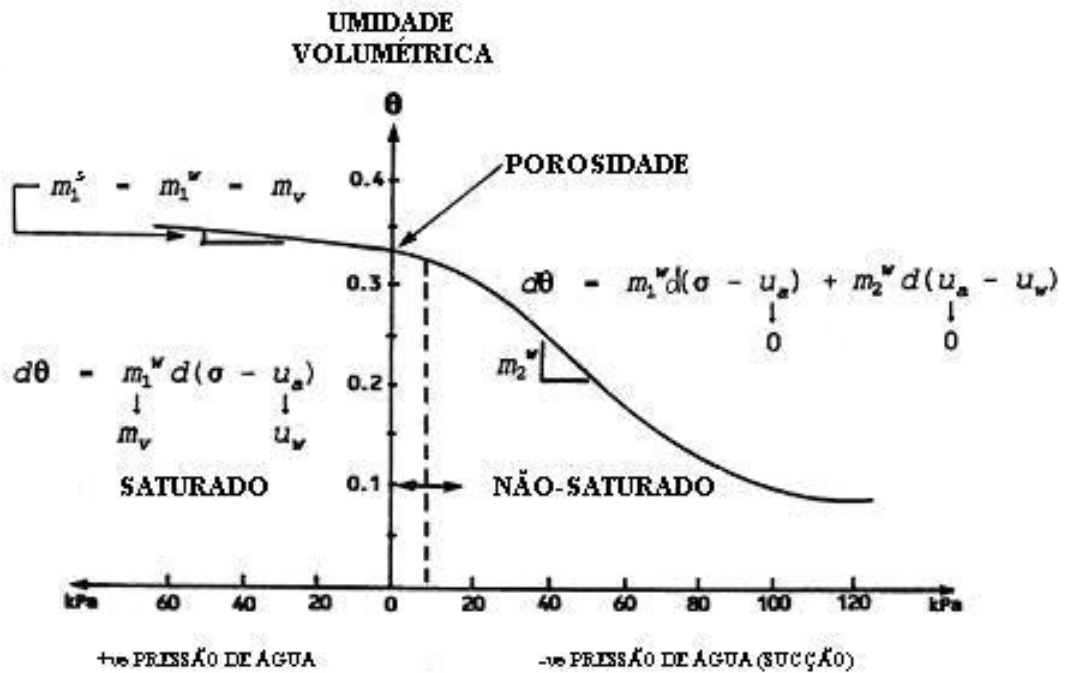


Figura 3.2 – Típica curva de retenção de água no solo saturado-insaturado para o caso especial de pressão de ar igual a zero (segundo Lam et al, 1987 apud Wilson, 1990).

3.1.2 – Equações diferenciais do fluxo transiente de ar, água e calor no solo.

Na Figura 3.3 apresentam-se os componentes individuais de fluxos de ar, vapor de água, água e calor na entrada e saída de um elemento infinitesimal do VES que servirão de base para a montagem das equações apresentadas a seguir.

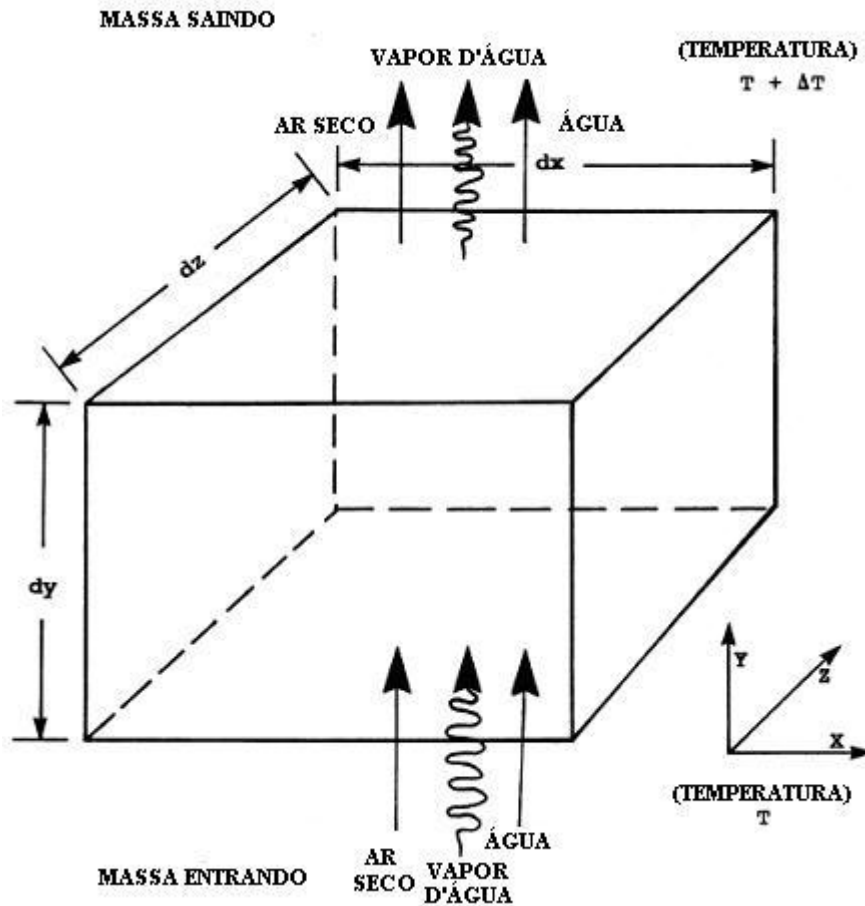


Figura 3.3 – Os componentes individuais de fluxo para o fluxo transiente de massa e calor em um elemento infinitesimal do VES (Wilson, 1990).

Na dedução das equações do fluxo de ar e de fluxo de vapor de água se faz uso da primeira lei de Fick:

$$J = -D \frac{\partial n}{\partial y} \quad (3.6)$$

Que estabelece que J , quantidade de material que atravessa uma área unitária perpendicular à direção na qual tem lugar a difusão por unidade de tempo, é proporcional ao gradiente da concentração n . A constante de proporcionalidade, D , coeficiente de difusão, é característico tanto do material em difusão, quanto do meio no qual a difusão se processa.

3.1.2.1 – Fase ar

Fazendo uso da primeira lei de Fick, do princípio da continuidade, considerando a massa de ar, inclusive o vapor de água, e a variação com o tempo da relação constitutiva da fase ar, Equação 3.4, Dakshanamurthy e Fredlund (1981) obtiveram a equação diferencial da continuidade da fase ar como:

$$\frac{\partial u_a}{\partial t} = C_a \frac{\partial u_w}{\partial t} + C_T \frac{\partial T}{\partial t} + C_a^v \frac{\partial^2 u_a}{\partial Y^2} \quad (3.7)$$

em que:

$$C_a = \frac{-\frac{m_2^a}{m_1^a}}{\left(1 - \frac{m_2^a}{m_1^a}\right) + (1-S) \frac{n}{m_1^a (u_a + u_{atm})}}, \text{ é um coeficiente de pressão associado da}$$

fase ar;

S = grau de saturação;

n = porosidade;

$$C_T = \frac{1}{T} \left[\frac{(1-S)n(u_a + u_{atm})}{(1-R_a)(u_a + u_{atm})m_1^a + (1-S)n} \right], \text{ é um coeficiente de temperatura da}$$

fase ar;

$$R_a = \frac{m_2^a}{m_1^a};$$

T = temperatura absoluta, ou seja, medida na escala Kelvin;

$$C_a^v = \frac{D^*RT}{W_a} \left[\frac{1}{(1-R_a)(u_a + u_{atm})m_1^a + (1-S)n} \right], \text{ é um coeficiente de consolidação}$$

da fase ar;

$D^* = D/g$ = a transmissão constante de proporcionalidade para a fase ar;

D = uma transmissão constante para a fase ar tendo as mesmas unidades que o coeficiente de permeabilidade;

W_a = peso molecular do ar (28.8 g/mol);

R = constante universal dos gases (8.31447 J/(mol.K));

g = aceleração da gravidade (9.81 cm²/s);

u_{atm} = pressão atmosférica (101.3 kPa)

A Equação 3.7 tem três funções incógnitas $u_a(y,t)$, $u_w(y,t)$ e $T(y,t)$, e naturalmente, outras equações são necessárias para que ela possa ser resolvida.

3.1.2.2 – Fase vapor

O fluxo de vapor de água através do elemento infinitesimal do solo não-saturado é uma resposta a gradientes de pressão na fase ar. Dois mecanismos são responsáveis pelo transporte de vapor de água na fase ar:

1. A difusão das moléculas de água devido a um gradiente na pressão do vapor de água, análogo à difusão de um soluto químico em água sob um gradiente de concentração.
2. A advecção das moléculas de água na fase vapor por meio do fluxo de ar na estrutura dos poros causado por um gradiente na pressão total de ar, análogo a advecção de um soluto químico em água corrente sob um gradiente hidráulico.

Além disso, deve-se observar que o fluxo de moléculas de vapor de água não é restrito ao ar contido nos poros do solo não-saturado. Moléculas de vapor de água também podem fluir para ou da fase líquida contida nos poros do solo não-saturado. Esse fluxo que se dá através da película contrátil (ou menisco) é definido como fluxo de interface e deve ser considerado juntamente com os mecanismos de difusão e advecção.

- *Fluxo devido à difusão de vapor*

Com base no princípio da continuidade e na primeira Lei de Fick, a equação da continuidade de vapor de água, pode ser escrita como (Philip and de Vries, 1957; de Vries, 1975; Milly et al, 1980; e Fredlund and Dakshanamurthy 1982):

$$\frac{\partial m_{DV}}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial y} \left(D_v \frac{\partial P_v}{\partial y} \right) \quad (3.8)$$

em que,

P_v = pressão do vapor de água, kPa;

$D_v = (\alpha)(\beta) \left(D_{\text{vap}} \frac{W_w}{RT} \right)$ é o coeficiente de difusão do vapor de água no solo;

α = fator de tortuosidade do solo (Lai et al, 1976).

β = área de seção transversal do solo disponível para o fluxo de vapor [i.e., $(1-S)n$];

$D_{\text{vap}} = 0.229 \times 10^{-4} \left[1 + \frac{T}{273} \right]^{1.75}$ é a difusividade molecular do vapor d'água no ar (Kimball et al, 1976);

T = Temperatura Absoluta (K);

W_w = Peso molecular da água (18.0151g/mol);

$\frac{\partial m_{DV}}{\partial t}$ é a variação em massa de vapor d'água por unidade de volume de solo devido a difusão de vapor.

- ***Fluxo devido à advecção de vapor***

Mais uma vez usando a primeira lei de Fick e o princípio da continuidade, a variação da massa de ar na unidade de elemento do solo devido à difusão se dá de acordo com (Dakshanarnurthy e Fredlund, 1981a):

$$\frac{\partial m_{DA}}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial y} \left(D_A \frac{\partial P}{\partial y} \right) \quad (3.9)$$

em que,

$\frac{\partial m_{DA}}{\partial t}$ é a variação da massa de ar na unidade de elemento do solo, devido à difusão do ar;

$D_A = (\alpha)(\beta) \left(D_{\text{vap}} \frac{W_a}{RT} \right)$, é o coeficiente de difusão da massa de ar através do solo;

P = pressão total na fase de massa de ar, i.e., $u_{\text{atm}} + u_a$.

O fluxo de massa de vapor de água dentro do fluxo de ar pode ser calculado como uma fração desse fluxo de massa de ar como:

$$\frac{\partial m_{AV}}{\partial t} = -\frac{\gamma_V}{\gamma_A} \frac{\partial m_{DA}}{\partial t} \quad (3.10)$$

em que,

∂m_{AV} é a Variação em massa de vapor d'água na unidade de elemento do solo devido à advecção de vapor.

$\gamma_V = \frac{W_w P_V}{RT}$ é a densidade do vapor de água na massa de ar à pressão de vapor P_V ;

$\gamma_A = \frac{W_a P}{RT}$ é a densidade da fase de massa de ar à pressão total P .

Substituindo as densidades de unidade na Equação 3.10 e a expressão que define o coeficiente de difusão da massa de ar, D_A , e combinando com a Equação 3.9 obtém-se:

$$\frac{\partial m_{AV}}{\partial t} = -\left(\frac{W_w P_V}{W_a P}\right) \frac{\partial}{\partial y} \left[(\alpha)(\beta) (D_{\text{vap}}) \left(\frac{W_a}{RT}\right) \frac{\partial P}{\partial y} \right] \quad (3.11)$$

A Equação 3.11 pode ser simplificada caso a pressão atmosférica seja suposta constante. Nesse caso, $\partial P = \partial u_a$, o que, considerando a expressão do coeficiente de difusão do vapor de água, D_v , conduz a:

$$\frac{\partial m_{AV}}{\partial t} = -\frac{P_V}{P} \frac{\partial}{\partial y} \left[D_v \frac{\partial u_a}{\partial y} \right] \quad (3.12)$$

que corresponde a equação do fluxo transiente por advecção do vapor de água devido a um gradiente de pressão total do ar.

- ***Fluxo combinado devido à difusão e advecção***

A variação total na massa de vapor de água na unidade de elemento do solo devido à advecção e à difusão é determinada somando as Equações 3.8 e 3.12, ou seja:

$$\frac{\partial m_{DAV}}{\partial t} = - \left[\frac{\partial}{\partial y} \left(D_v \frac{\partial P_v}{\partial y} \right) + \frac{P_v}{P} \frac{\partial}{\partial y} \left(D_v \frac{\partial u_a}{\partial y} \right) \right] \quad (3.13)$$

Se a variação de volume de ar no solo for desprezada, a variação da pressão de ar nos poros é igual à variação da pressão de vapor (i.e., $\partial u_a = \partial P_v$) e a Equação 3.13 reduz-se a:

$$\frac{\partial m_{DAV}}{\partial t} = - \left(\frac{P + P_v}{P} \right) \frac{\partial}{\partial y} \left(D_v \frac{\partial P_v}{\partial y} \right) \quad (3.14)$$

- ***Fluxo na interface água líquida-vapor***

A fase líquida da água está presente no solo nas temperaturas e pressões encontradas em terrenos naturais. Moléculas de água no estado líquido podem vaporizar e vice-versa, em resposta a variações das pressões e/ou da temperatura da água no solo.

Edlefsen e Anderson (1943) fornecem a seguinte relação termodinâmica:

$$P_v = P_{v_s} h_r \quad (3.15)$$

em que,

P_v é a pressão do vapor de água dentro dos poros;

$h_r = e^{\frac{\Psi g W_w}{RT}}$ é a umidade relativa na superfície do solo;

Ψ é o potencial total na fase líquida da água correspondente à sucção total (m).

$P_{v_s} = 0,61078 \cdot \exp \left[\frac{17,269 \times (T - 273,15)}{T - 35,85} \right]$ é a pressão de saturação de vapor da água

no solo, na temperatura T (Figura 3.4) (Soares, 2000).

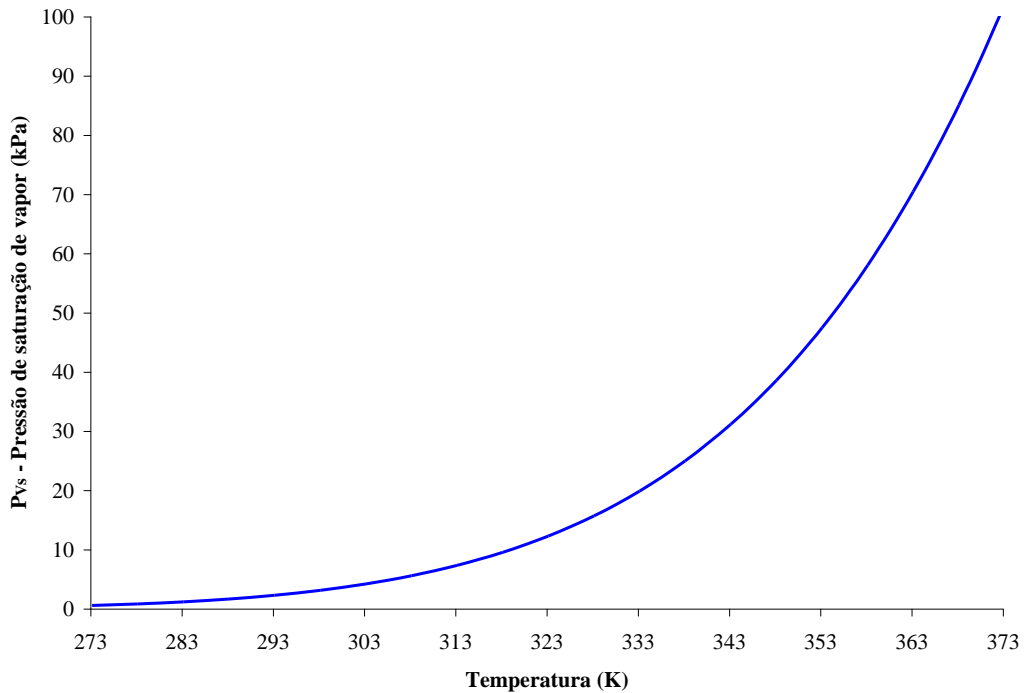


Figura 3.4 – Relação entre a pressão de saturação de vapor da água (P_{Vs}) e a temperatura (T).

O fluxo na interface representa uma variação no armazenamento e tem que ser considerado na equação de continuidade do vapor de água. Por exemplo, sob condições de fluxo permanente a variação em massa do vapor de água na unidade de elemento do solo devido à difusão e advecção tem que ser equilibrada pelo fluxo na interface. Esse é o caso quando ocorre evaporação no estado permanente através da superfície de um solo com lençol freático em uma profundidade constante abaixo da superfície. Se o volume de ar ' V_a ' permanece constante e a pressão de vapor ' P_v ', apesar de constante for menor que a pressão atmosférica, moléculas de água em forma de vapor devem fluir para a atmosfera através da interface água-ar dos poros do solo.

No entanto, se a pressão de vapor e o volume de ar não permanecerem constantes em relação ao tempo, a Equação 3.13 é insuficiente para descrever o fluxo total de vapor. Esse seria o caso, por exemplo, de situações transientes nas quais a temperatura e/ou a sucção total do solo variam com o tempo. Nesse caso, a massa de vapor de água armazenada na fase ar do elemento infinitesimal muda, mesmo que não ocorra difusão e/ou advecção do vapor através do elemento.

A variação em armazenamento ou massa do vapor de água devido a variações de pressão de vapor ‘ P_v ’ ou densidade de vapor ‘ γ_v ’ e variações no volume de ar nos vazios ‘ V_a ’ pode ser expressado pela equação:

$$\frac{\partial m_{TV}}{\partial t} = \gamma_v \frac{\partial \frac{V_a}{V}}{\partial t} + \frac{V_a}{V} \frac{\partial \gamma_v}{\partial t} \quad (3.16)$$

em que,

$\frac{\partial m_{TV}}{\partial t}$ é a variação em massa de vapor devido as variações de volume de vazios de ar ‘ V_a/V ’ e pressão de vapor ‘ P_v ’;

$\frac{\partial \gamma_v}{\partial t}$ é a taxa de variação da densidade do vapor de água;

$\frac{\partial \frac{V_a}{V}}{\partial t}$ é a taxa de variação de volume na fase ar do elemento.

A variação na massa de vapor dentro da unidade de elemento dada pela Equação 3.16 é fornecida pela soma do fluxo de difusão-advecção, Equação 3.13, com o fluxo de vapor da interface água-ar $\frac{\partial m_{IPF}}{\partial t}$. Portanto, o fluxo total na interface é dado por:

$$\frac{\partial m_{TV}}{\partial t} = \frac{\partial m_{IPF}}{\partial t} + \frac{\partial m_{DAV}}{\partial t} \quad (3.17)$$

ou

$$\frac{\partial m_{IPF}}{\partial t} = -\frac{\partial m_{DAV}}{\partial t} + \frac{\partial m_{TV}}{\partial t} \quad (3.18)$$

em que,

$\frac{\partial m_{IPF}}{\partial t}$ é o fluxo de vapor de água na interface por unidade de tempo na unidade de elemento do solo, kg/seg.

Substituindo as Equações 3.13 e 3.16 tem-se:

$$\frac{\partial m_{\text{IPF}}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(D_v \frac{\partial P_v}{\partial y} \right) + \frac{P_v}{P} \frac{\partial}{\partial y} \left(D_v \frac{\partial u_a}{\partial y} \right) + \gamma_v \frac{\partial \frac{V_a}{V}}{\partial t} + \frac{V_a}{V} \frac{\partial \gamma_v}{\partial t} \quad (3.19)$$

em que,

$$\frac{\partial \gamma_v}{\partial t} = \frac{W_w}{R} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{P_v}{T} \right) = \frac{W_w}{R} \left[\frac{1}{T} \frac{\partial P_v}{\partial t} - \frac{P_v}{T^2} \frac{\partial T}{\partial t} \right];$$

$$\frac{V_a}{V} = (1-S)n;$$

Da Equação 3.3:

$$\frac{\partial \frac{V_a}{V}}{\partial t} = m_1^a \frac{\partial (\sigma_y - u_a)}{\partial t} + m_2^a \frac{\partial (u_a - u_w)}{\partial t} \quad (3.20)$$

Fazendo-se as devidas substituições na Equação 3.19, obtém-se:

$$\begin{aligned} \frac{\partial m_{\text{IPF}}}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial y} \left(D_v \frac{\partial P_v}{\partial y} \right) + \frac{P_v}{P} \frac{\partial}{\partial y} \left(D_v \frac{\partial u_a}{\partial y} \right) + \\ & \frac{P_v W_v}{RT} \left[m_1^a \frac{\partial (\sigma_y - u_a)}{\partial t} + m_2^a \frac{\partial (u_a - u_w)}{\partial t} \right] + \frac{(1-S)n W_v}{R} \left[\frac{1}{T} \frac{\partial P_v}{\partial t} - \frac{P_v}{T^2} \frac{\partial T}{\partial t} \right] \end{aligned} \quad (3.21)$$

Supondo que a sucção osmótica não varia com o tempo, a derivada em relação ao tempo de pressão de vapor P_v pode ser obtida, usando-se a Equação 3.15, como:

$$\frac{\partial P_v}{\partial t} = h_r \frac{\partial P_{v_s}}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} + P_{v_s} \frac{\partial h_r}{\partial (u_a - u_w)} \frac{\partial (u_a - u_w)}{\partial t} + \frac{\partial h_r}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.22)$$

Substituindo esta equação na Equação 3.21 obtêm-se a equação geral de continuidade da fase ar que inclui difusão, advecção, fluxo de vapor de água e fluxo através da interface (menisco ou película contráctil) dada por:

$$\begin{aligned} \frac{\partial m_{IPF}}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial y} \left(D_V \frac{\partial P_V}{\partial y} \right) + \frac{P_V}{P} \frac{\partial}{\partial y} \left(D_V \frac{\partial u_a}{\partial y} \right) + \\ &\frac{P_V W_w}{RT} \left[(m_2^a - m_1^a) \frac{\partial u_a}{\partial t} - m_2^a \frac{\partial u_a}{\partial t} \right] + \\ &\frac{(1-S)nW_w}{R} \left[\left(h_r \frac{P_{Vs}}{\partial T} - \frac{P_V}{T} + P_{Vs} \frac{\partial h_r}{\partial T} \right) \frac{\partial T}{\partial t} + P_{Vs} \frac{\partial h_r}{\partial (u_a - u_w)} \frac{\partial (u_a - u_w)}{\partial t} \right] \end{aligned} \quad (3.23)$$

3.1.2.3 – Fase líquida

A lei de Darcy e o princípio da continuidade são usados para formular a equação da continuidade da fase líquida:

$$\frac{\partial \frac{V_w}{V}}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial y} \left[k_w \frac{\partial h_w}{\partial y} \right] \quad (3.24)$$

em que,

k_w é o coeficiente de permeabilidade como uma função da sucção mátrica, $(u_a - u_w)$;

$h_w = Y + \frac{u_w}{\gamma_w g}$ é a carga hidráulica total;

Y é a carga de elevação;

γ_w é a massa específica da água.

Entretanto, o fluxo na interface água-ar também deve ser incluído, resultando na equação:

$$\frac{\partial \frac{V_w}{V}}{\partial t} + \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial m_{IPF}}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial y} \left[k_w \frac{\partial h_w}{\partial y} \right] \quad (3.25)$$

Ou, substituindo nesta a Equação 3.21:

$$\frac{\partial}{\partial t} \frac{V_w}{V} = \frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial y} \left[k_w \frac{\partial h_w}{\partial y} \right] - \frac{1}{\gamma_w} \left[\frac{\partial}{\partial y} \left(D_v \frac{\partial P_v}{\partial y} \right) + \frac{P_v}{P} \frac{\partial}{\partial y} \left(D_v \frac{\partial u_a}{\partial y} \right) + \frac{P_v W_w}{RT} \left[m_1^a \frac{\partial (\sigma_y - u_a)}{\partial t} + m_2^a \frac{\partial (u_a - u_w)}{\partial t} \right] + \frac{(1-S)nW_w}{R} \left[\frac{1}{T} \frac{\partial P_v}{\partial t} - \frac{P_v}{T^2} \frac{\partial T}{\partial t} \right] \right] \quad (3.26)$$

Equação que descreve a variação na umidade volumétrica em função do fluxo combinado nas fases líquida e vapor.

A transpiração da vegetação pode ser incluída como um termo de fluxo, bombeamento, S , na Equação 3.26 que fica igual a (Whistler et al, 1968; Molz e Remson, 1970; Molz, 1981):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial y} \left[k_w \frac{\partial h_w}{\partial y} \right] - \frac{1}{\gamma_w} \left[\frac{\partial}{\partial y} \left(D_v \frac{\partial P_v}{\partial y} \right) + \frac{P_v}{P} \frac{\partial}{\partial y} \left(D_v \frac{\partial u_a}{\partial y} \right) + \frac{P_v W_w}{RT} \left[m_1^a \frac{\partial (\sigma_y - u_a)}{\partial t} + m_2^a \frac{\partial (u_a - u_w)}{\partial t} \right] + \frac{(1-S)nW_w}{R} \left[\frac{1}{T} \frac{\partial P_v}{\partial t} - \frac{P_v}{T^2} \frac{\partial T}{\partial t} \right] - S \right] \quad (3.27)$$

Substituindo o lado esquerdo da Equação acima pela derivada no tempo da equação constitutiva da fase líquida, Equação 3.2, obtêm-se:

$$m_1^w \frac{\partial (\sigma_y - u_a)}{\partial t} + m_2^w \frac{\partial (u_a - u_w)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial y} \left[k_w \frac{\partial h_w}{\partial y} \right] - \frac{1}{\gamma_w} \left[\frac{\partial}{\partial y} \left(D_v \frac{\partial P_v}{\partial y} \right) + \frac{P_v}{P} \frac{\partial}{\partial y} \left(D_v \frac{\partial u_a}{\partial y} \right) + \frac{P_v W_w}{RT} \left[m_1^a \frac{\partial (\sigma_y - u_a)}{\partial t} + m_2^a \frac{\partial (u_a - u_w)}{\partial t} \right] + \frac{(1-S)nW_w}{R} \left[\frac{1}{T} \frac{\partial P_v}{\partial t} - \frac{P_v}{T^2} \frac{\partial T}{\partial t} \right] - S \right] \quad (3.28)$$

Supondo-se a tensão total σ_y constante, alcança-se:

$$\begin{aligned} \left[m_2^a \frac{P_V W_w}{RT} + m_2^w \right] \frac{\partial u_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left[k_w \frac{\partial h_w}{\partial y} \right] + \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial}{\partial y} \left(D_V \frac{\partial P_V}{\partial y} \right) + \\ \frac{P_V}{\gamma_w P} \frac{\partial}{\partial y} \left(D_V \frac{\partial u_a}{\partial y} \right) + \left[\frac{P_V W_w}{\gamma_w RT} (m_2^a - m_1^a) + (m_2^w - m_1^w) \right] \frac{\partial u_a}{\partial t} + \\ \frac{(1-S)nW_w}{\gamma_w RT} \frac{\partial P_V}{\partial t} + \frac{(1-S)n W_w P_V}{\gamma_w RT^2} \frac{\partial T}{\partial t} + S \end{aligned} \quad (3.29)$$

Como $u_w = (h - y)\gamma_w g$ e $\partial u_w / \partial t = \gamma_w g (\partial h_w / \partial t)$, esta ultima equação pode ser escrita em termos da carga total como:

$$\begin{aligned} \frac{\partial h_w}{\partial t} = C_w \frac{\partial}{\partial y} \left(k_w \frac{\partial h_w}{\partial y} \right) + C_w^{VP1} \frac{\partial}{\partial y} \left(D_V \frac{\partial P_V}{\partial y} \right) + C_w^{a1} \frac{\partial}{\partial y} \left(D_V \frac{\partial u_a}{\partial y} \right) + \\ C_w^{a2} \frac{\partial u_a}{\partial t} + C_w^{VP2} \frac{\partial P_V}{\partial t} + C_w^S S \end{aligned} \quad (3.30)$$

em que,

$$C_w = \frac{1}{\gamma_w g \left[\frac{m_2^a W_w P_V}{\rho_w RT} + m_2^w \gamma_w \right]} \quad \text{é o coeficiente associado com a consolidação}$$

devido ao fluxo de liquido;

$$C_w^{VP1} = \frac{1}{\gamma_w g \left[m_2^a \frac{W_w P_V}{RT} + m_2^w \gamma_w \right]} \quad \text{é o coeficiente associado com a consolidação}$$

devido à difusão de vapor;

$$C_w^{a1} = \frac{P_V}{\gamma_w g \left[m_2^a \frac{W_w P_V}{RT} + m_2^w \gamma_w \right]} \quad \text{é o coeficiente associado com a consolidação}$$

devido à advecção de vapor;

$$C_w^{a2} = \frac{P_V W_w (m_2^a - m_1^a) + (m_2^w - m_1^w)}{RT \gamma_w g \left[m_2^a \frac{W_w P_V}{RT} + m_2^w \gamma_w \right]} \quad \text{é um coeficiente interativo associado com a}$$

fase ar;

$$C_w^{VP2} = \frac{W_w(1-S)n}{RT\gamma_w g \left[m_2^a \frac{W_w P_v}{RT} + m_2^a \lambda_w \right]}$$

é um coeficiente interativo associado com a

fase vapor;

$C_w^S = C_w$ é o coeficiente de consolidação devido ao consumo de água pelas plantas.

A Equação 3.30 é uma forma completa da equação da continuidade da fase líquida. Em geral em aplicações práticas ela é pouco usada por ser difícil de obter todos os parâmetros necessários para sua utilização.

A Equação 3.30 tem cinco funções incógnitas $u_a(y,t)$, $h_w(y,t)$, $T(y,t)$, $P_v(y,t)$ e $P_{vs}(T)$. Juntamente, com as Equações 3.7, 3.15 e 3.23 forma um conjunto de quatro equações, ainda insuficiente para ser resolvido. Portanto, é necessário que se tenha uma equação para descrever a transferência de calor na massa de solo.

3.1.2.4 – Fluxo de Calor

A fluxo de calor no solo ocorre através de três mecanismos: condução, convecção e calor latente devido à mudança de fase.

A condução de calor é o transporte de calor entre as partículas de solo e através dos fluidos dos poros. A transferência condutiva de calor ocorre independente de haver transporte de massa.

A fluxo de calor através de convecção é feita por transferência de massa na fase ar e nas fases de vapor e líquida da água.

A transferência de calor latente é a energia consumida ou liberada quando a água no solo muda da fase líquida para vapor, ou vice-versa.

Desprezando-se o fluxo de calor convectivo, e usando a Lei de Fourier, a equação para o fluxo de calor em solo não-congelando pode ser escrita como (Wilson, 1990):

$$\zeta \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) - L_v \frac{\partial m_{IPF}}{\partial t} \quad (3.31)$$

em que,

λ é a condutividade térmica;

L_v é o calor latente de vaporização.

O erro cometido ao desconsiderar o termo do fluxo de calor convectivo na Equação 3.38 é pequeno porque o termo convectivo é normalmente 2 ou 3 vezes menor que os demais termos (Jame e Norum, 1980; Andersland e Anderson, 1978; Nixon, 1975).

Substituindo o fluxo de calor na interface pela Equação 3.23, obtêm-se:

$$\zeta \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) - L_v \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial y} \left(D_v \frac{\partial P_v}{\partial y} \right) + \frac{P_v}{P} \frac{\partial}{\partial y} \left(D_v \frac{\partial u_a}{\partial y} \right) + \\ \frac{P_v W_v}{RT} \left[(m_2^a - m_1^a) \frac{\partial u_a}{\partial t} - m_2^a \frac{\partial u_a}{\partial t} \right] + \\ \frac{(1-S)nW_v}{R} \left[\left(h_r \frac{P_{vs}}{\partial T} - \frac{P_v}{T} + P_{vs} \frac{\partial h_r}{\partial T} \right) \frac{\partial T}{\partial t} \right. \\ \left. + P_{vs} \frac{\partial h_r}{\partial (u_a - u_w)} \frac{\partial (u_a - u_w)}{\partial t} \right] \end{array} \right\} \quad (3.32)$$

O conjunto formado pelas três equações diferenciais 3.7, 3.30 e 3.32, e a equação 3.15, tem quatro funções incógnitas $P(y,t)$ ou $u_a(y,t)$, $h_w(y,t)$ ou $u_w(y,t)$, $T(y,t)$ e $P_v(y,t)$. Pode, portanto, ser resolvido univocamente, desde que sejam dadas as condições iniciais e de contorno apropriadas para o problema em análise.

3.1.3 – Condições iniciais e de contorno

3.1.3.1 – Condições iniciais

As condições iniciais consistem em se conhecer as pressões de ar, de água e a temperatura no tempo zero, ou seja: $u_a(y,0)$, $u_w(y,0)$ e $T(y,0)$. Conhecendo-se estas funções determina-se $P_v(y,0)$ por meio da Equação 3.15.

3.1.3.2 – Condições de contorno

As condições de contorno para as equações da fase ar e da fase líquida da água podem ser definidas com base na pressão atmosférica que é imposta como uma carga de pressão, e na precipitação líquida, ou seja, a precipitação menos o escoamento superficial, que é considerada como um fluxo imposto na superfície.

O fluxo de vapor de água do solo para a atmosfera pode ser descrito pelo método de Penman-Wilson (Penman, 1948; Wilson, 1990):

Penman (1948) propôs um método de cálculo da evaporação potencial através usando o balanço de energia no solo:

$$Q = E + H \quad (3.33)$$

em que,

$E = f(u)(e_s - e_a)$ é o fluxo evaporativo para o ar (evaporação);

$H = \nu f(u)(T_s - T_a)$ é o fluxo de calor sensível para o ar; sendo que,

$f(u) = 0.35(1 + 0.15U_a)$ ($\text{mm}^3/\text{kN.dia}$) e U_a é a velocidade do vento em km/h;

T_s é a temperatura da superfície do solo ($^{\circ}\text{C}$);

e_s é a pressão de vapor na superfície em kPa;

e_a é a pressão de vapor no ar acima da superfície do solo em kPa;

ν é a constante psicrométrica ($0,0008 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, psicrômetro não-aspirado);

T_a é a temperatura do ar acima da superfície do solo ($^{\circ}\text{C}$).

$Q = (1 - A)I_S - e[I_{ld} - \tau T_s^4]$ é a energia radiante disponível na superfície em mm/dia, e:

A (Albedo) é a medida da reflexão das ondas curtas solares: $A=1$ reflexão total; $A=0$ nenhuma reflexão;

I_S é a radiação de ondas curtas recebidas;

e é a emissividade (capacidade de um objeto emitir ondas infra-vermelhas. Varia entre 0, refletida por um espelho, até 1, corpo negro teórico. Nos solos é da ordem de 0.9 a 0.98) (μm);

I_{ld} é a radiação atmosférica de ondas longas recebidas;

τ é a constante de Stefan-Boltzman ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$);

A equação apresentada por Penman (1948) para calcular as taxas de evaporação é dada por:

$$E = \frac{\Gamma Q + E_a v}{\Gamma + v} \quad (3.34)$$

em que,

$$E_a = f(u)(e_{sa} - e_a).$$

e_{sa} é a pressão de vapor de saturação da temperatura média do ar, usualmente em mm.Hg;

Γ é a inclinação da curva pressão de vapor de saturação *versus* temperatura média do ar (Figura 3.4).

A principal vantagem do Método de Penman é necessitar apenas de parâmetros meteorológicos de rotina tais como temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento. A principal desvantagem do método é que calcular a evaporação potencial (máxima) assumindo que o solo está saturado. Com isso, o método superestima a evaporação em superfícies de solos não-saturados. Essa deficiência pode ser superada se a umidade relativa na superfície do solo não-saturado for conhecida, como proposto por Wilson (1990).

As pressões de saturação do vapor na superfície do solo (P_{VsS}) à temperatura T_S e pressão de saturação do vapor do ar (P_{VaS}) na temperatura T_a , podem ser escritas em função das umidades relativas como:

$$P_{VsS} = Ae_s \quad (3.35)$$

$$P_{VaS} = Be_a \quad (3.36)$$

em que,

$$A = 1/h_r.$$

h_r , umidade relativa na superfície do solo

$$B = 1/(\text{umidade relativa do ar}).$$

Substituindo os valores de E e H na Equação 3.33 têm-se:

$$Q = f(u)(e_s - e_a) + v f(u)(T_s - T_a) \quad (3.37)$$

Se a diferença entre T_s e T_a for pequena, pode-se escrever:

$$\Gamma(T_s - T_a) = P_{VsS} - P_{VaS} \quad (3.38)$$

ou,

$$\Gamma(T_s - T_a) = Ae_s - Be_a \quad (3.39)$$

A substituição da Equação 3.39 na Equação 3.37 resulta em:

$$Q = f(u)(e_s - e_a) + v \frac{f(u)}{\Gamma}(Ae_s - Be_a) \quad (3.40)$$

Reorganizando a Equação 3.40 tem-se:

$$Q = f(u) e_s \left(\frac{vA}{\Gamma} + 1 \right) - f(u) e_a \left(\frac{vB}{\Gamma} + 1 \right) \quad (3.41)$$

ou:

$$Q = f(u) (e_s - e_a) \left(\frac{vA}{\Gamma} + 1 \right) + f(u) e_a \left(\frac{vA}{\Gamma} + 1 \right) - f(u) e_a \left(\frac{vB}{\Gamma} + 1 \right) \quad (3.42)$$

Agrupando os termos desta última equação, encontra-se:

$$Q = E \left(\frac{vA}{\Gamma} + 1 \right) + f(u) e_a \left(\frac{vA}{\Gamma} + \frac{vB}{\Gamma} \right) \quad (3.43)$$

Ou, explicitando o fluxo evaporativo:

$$E = \frac{\Gamma Q + E_a v}{\Gamma + vA} \quad (3.44)$$

em que,

$$E_a = f(u) e_a (B - A)$$

A Equação 3.44 descreve a evaporação da superfície do solo com base na radiação real, velocidade do vento e umidades relativas do ar e da superfície do solo. A expressão reduz-se para forma convencional de Penman quando $A = 1$ (i.e., umidade relativa igual a 100% para uma superfície saturada).

A umidade relativa da superfície do solo é avaliada ao resolver a Equação 3.44 simultaneamente com a Equação 3.30 (ou uma forma simplificada desta equação) para o fluxo de umidade no solo.

Temperaturas ao longo da profundidade no solo são necessárias para a solução da Equação 3.30. Consequentemente, a Equação 3.32 deve ser também resolvida. A temperatura da superfície do solo pode ser estimada pela equação:

$$T_s = T_a + \frac{1}{vf(u)}(Q - E) \quad (3.45)$$

que fornece uma condição de contorno para a Equação 3.32.

3.1.4 – Solução simplificada proposta por Wilson (1990)

A solução simultânea das quatro equações é trabalhosa e exige a obtenção de parâmetros que, na maioria das aplicações, são difíceis de serem obtidos. As equações para o fluxo no ar (3.7), e nas fases vapor e líquida da água (3.30), são rigorosas e muito dos seus termos podem ser considerados secundários.

Assim, Wilson (1990) propôs algumas hipóteses para minimizar a complexidade das equações de transferência de massa.

Primeiro, assumiu que as variações da pressão de ar induzidas pela variação de volume na fase líquida da água e na estrutura do solo são pequenas e podem ser desprezadas. Ou seja, o ar nos poros do solo é contínuo, sua pressão é constante e

igual à pressão atmosférica. Essa é provavelmente uma suposição razoável para a maioria dos solos que não estão com grau de saturação elevado, ou seja, com a fase ar oclusa. Nesses casos, a Equação 3.7 de continuidade da fase ar se torna uma identidade.

A segunda simplificação consistiu em desprezar o fluxo de vapor na interface água líquida-vapor e supor a variação da pressão de ar nos poros igual à variação da pressão de vapor. Nesses casos, a Equação 3.13 passa a ser a equação de continuidade da fase vapor de água ao invés da Equação 3.23

A equação diferencial parcial para o fluxo de calor, 3.32, mantém-se inalterada com a ressalva que o termo correspondente ao fluxo de água na interface vapor-líquido é definido pela Equação 3.13.

Em resumo, somente duas equações diferenciais parciais acopladas serão usadas para descrever o fluxo transiente de água líquida, vapor de água e calor no solo. São elas:

- *Para Fluxo de Umidade:*

$$\frac{\partial h_w}{\partial t} = C_w^1 \frac{\partial}{\partial y} \left(k_w \frac{\partial h_w}{\partial y} \right) + C_w^2 \frac{\partial}{\partial y} \left(D_v \frac{\partial P_v}{\partial y} \right) \quad (3.46)$$

em que:

$$C_w^1 = \frac{1}{(\gamma_w)^2 \text{ gm}_2^w}$$

$$C_w^2 = \frac{(P + P_v)}{P (\gamma_w)^2 \text{ g m}_2^w}$$

- *Para Fluxo de Calor:*

$$C_v \gamma_s \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) - L_v \left(\frac{P + P_v}{P} \right) \frac{\partial}{\partial y} \left(D_v \frac{\partial P_v}{\partial y} \right) \quad (3.47)$$

Estas duas equações diferenciais 3.46 e 3.47, e a equação 3.15, tem três funções incógnitas $h_w(y,t)$ ou $u_w(y,t)$, $T(y,t)$ e $P_v(y,t)$. Pode, portanto, ser resolvido

univocamente, desde que sejam dadas as condições iniciais de temperatura e carga de pressão, e condições de contorno apropriadas, conforme descrito anteriormente.

As equações governantes de transferência de calor e massa no solo são não-lineares. Os coeficientes de permeabilidade ‘ k_w ’, difusão de vapor ‘ D_v ’, condutividade térmica ‘ λ ’, consolidação ‘ C_w^1 e C_w^2 ’, e o calor específico volumétrico ‘ $C_v \gamma_s$ ’ variam com a posição vertical devido a variações na pressão, temperatura e umidade volumétrica. Portanto, não existe uma solução exata para este sistema de equações diferenciais que deve ser resolvido por meio de métodos numéricos.

A solução do sistema de equações do fluxo de calor e umidade no solo e entre o solo e a atmosfera pode ser resolvido com as seguintes etapas:

- valores iniciais de carga hidráulica e temperatura devem ser fornecidos em todos os pontos;
- os valores de P_v necessários para a solução das Equações 3.46 e 3.47 são fornecidos pela Equação 3.15;
- uma vez conhecidos os parâmetros climáticos e as funções das espécies que compõem o recobrimento vegetal, as condições de fluxo na superfície são definidas da seguinte maneira:
 - ✓ A evaporação real calculada pela Equação 3.44 é modificada segundo a Equação 3.48 de tal forma que uma parcela da energia disponível seja dividida com as plantas.

$$E = \left(\frac{\Gamma Q + E_a v}{\Gamma + vA} \right) \exp(-0,4 \cdot IAF) \quad (3.48)$$

onde IAF é o índice de área foliar.

- ✓ A transpiração real, T_r , é calculada segundo a Equação 3.49:

$$T_r = \frac{2 [E(-0,21 + 0,7\sqrt{IAF})]}{R_T} \left(1 - \frac{y}{R_T} \right) A_n \text{ FPM} \quad (3.49)$$

em que

R_T é a espessura total da zona de raiz;

y é a profundidade do ponto em questão;

A_n é a área de contribuição do ponto em questão.

FPM é uma função que relaciona a capacidade da planta retirar água do solo com a sucção no solo.

- ✓ O fluxo de água é definido pela precipitação menos a evapo-transpiração, calculada pela soma das equações (3.48) e (3.49). Se esse balanço for negativo, um fluxo negativo (evaporativo) é aplicado na superfície.

Se o balanço for positivo, um fluxo positivo (infiltração) é aplicado na superfície, o problema é resolvido e as cargas de pressão na superfície são calculadas. Ainda no mesmo intervalo de tempo, o problema volta a ser resolvido, só que com a condição de cargas de pressão prescritas na superfície ao invés de fluxo prescrito. Nessa condição, o fluxo na superfície é calculado e a solução é repetida até que a carga de pressão aplicada gere um fluxo igual à infiltração. Quando isso ocorre, o escoamento superficial é calculado igual à precipitação, menos a evapotranspiração, menos a infiltração e a solução prossegue para um outro intervalo de tempo.

- a temperatura na superfície do solo é obtida pela Equação 3.45.

Em resumo, as Equações, 3.15, 3.44, 3.45, 3.46 e 3.47 tem que ser resolvidas simultaneamente, juntamente com as condições de contorno, em cada etapa do tempo, a partir de uma condição inicial.

3.2 – Solução numérica

Wilson (1990) resolveu o problema unidimensional descrito nos itens anteriores usando uma formulação explícita do Método das Diferenças Finitas.

Joshi (1993) usou a mesma formulação simplificada proposta por Wilson (1990) só que generalizada para o caso bidimensional. Para obter a solução numérica do problema, usou o Método dos Elementos Finitos, conjugado com o Método das Diferenças Finitas para fazer a integração no tempo.

A versão do programa VADOSE/W usado nessa tese, segue as hipóteses e a abordagem teórica apresentada neste Capítulo. Em particular, faz uso das equações simplificadas propostas por Wilson (1990), mas usa a solução numérica bi-dimensional desenvolvida por Joshi (1993).

4- MATERIAS E MÉTODOS

Como relatado no Capítulo 1 do presente trabalho, os dois sistemas de cobertura construídos com solo e monitorados por Amorim (2008), serviram de base para o desenvolvimento desta tese. Em vista disso, neste Capítulo 4 assuntos descritos detalhadamente por Amorim (2008) só serão abordados de forma resumida, com o propósito de facilitar a leitura desta tese. Já os assuntos inéditos desenvolvidos neste trabalho serão abordados com detalhes.

4.1 – Localização do Experimento

O experimento foi realizado na mina da empresa Rio Paracatu Mineração (RPM), na cidade de Paracatu, localizada na região noroeste do Estado de Minas Gerais, há cerca de 488 Km de Belo Horizonte-MG e 239 Km de Brasília-DF. A área escolhida para implantação do experimento, chamada de “Barraginha”, foi um pequeno reservatório construído para receber os rejeitos provenientes da operação da planta piloto da mina (Figura 4.1).



(a) Vista Geral



(b) Vista mais próxima

Figura 4.1 – Localização da “Barraginha”, onde foram construídos os sistemas de cobertura. (a) Imagem Google Earth, (b) Vista aproximada (adaptado de Amorim, 2008).

4.2 – Concepção do Experimento de Campo

O experimento consistiu em cobrir a área na qual foram depositados os rejeitos na Barraginha com dois tipos de sistemas de coberturas evapotranspirativas

(Amorim, 2008). Como os rejeitos não tinham suficiente capacidade de carga para suportar o tráfego do maquinário necessário para a construção dos sistemas de cobertura fez-se necessário lançar sobre os rejeitos uma camada de solo com aproximadamente 1,4 m de espessura, sem controle de compactação, denominada de camada de fundação, que possibilitou a construção dos sistemas de cobertura.

Esses sistemas tiveram as seguintes características:

- Sistema de cobertura 1: composta por uma camada de 15 cm de solo orgânico que se sobrepõe a uma camada de 50 cm de material siltoso que, por sua vez, é sobreposta a uma camada de 50 cm de argila compactada (barreira hidráulica). Sabe-se que a expansão da mina gerará uma grande quantidade de saprolitos que, ao serem compactados, poderão funcionar como uma barreira hidráulica. Ou seja, atualmente a mina tem um grande potencial de geração de material argiloso, o que induziu o direcionamento dos estudos no sentido da utilização destes materiais.
- Sistema de cobertura 2: composta por uma camada de 15 cm de solo orgânico que se sobrepõe a uma camada de 50 cm de material siltoso que, por sua vez, é sobreposta a uma camada de 50 cm de cascalho (barreira capilar). Essa camada tem a finalidade de aumentar a capacidade de armazenamento de água da camada superior além de minimizar o efeito da ascensão de sais a partir dos rejeitos. Este sistema visa simular uma cobertura que possivelmente pode ser aplicada à região do reservatório de rejeitos.

As Figuras 4.2 e 4.3 ilustram as seções típicas dos dois sistemas de cobertura, enquanto que a Figura 4.4 apresenta em perspectiva uma vista geral do experimento.

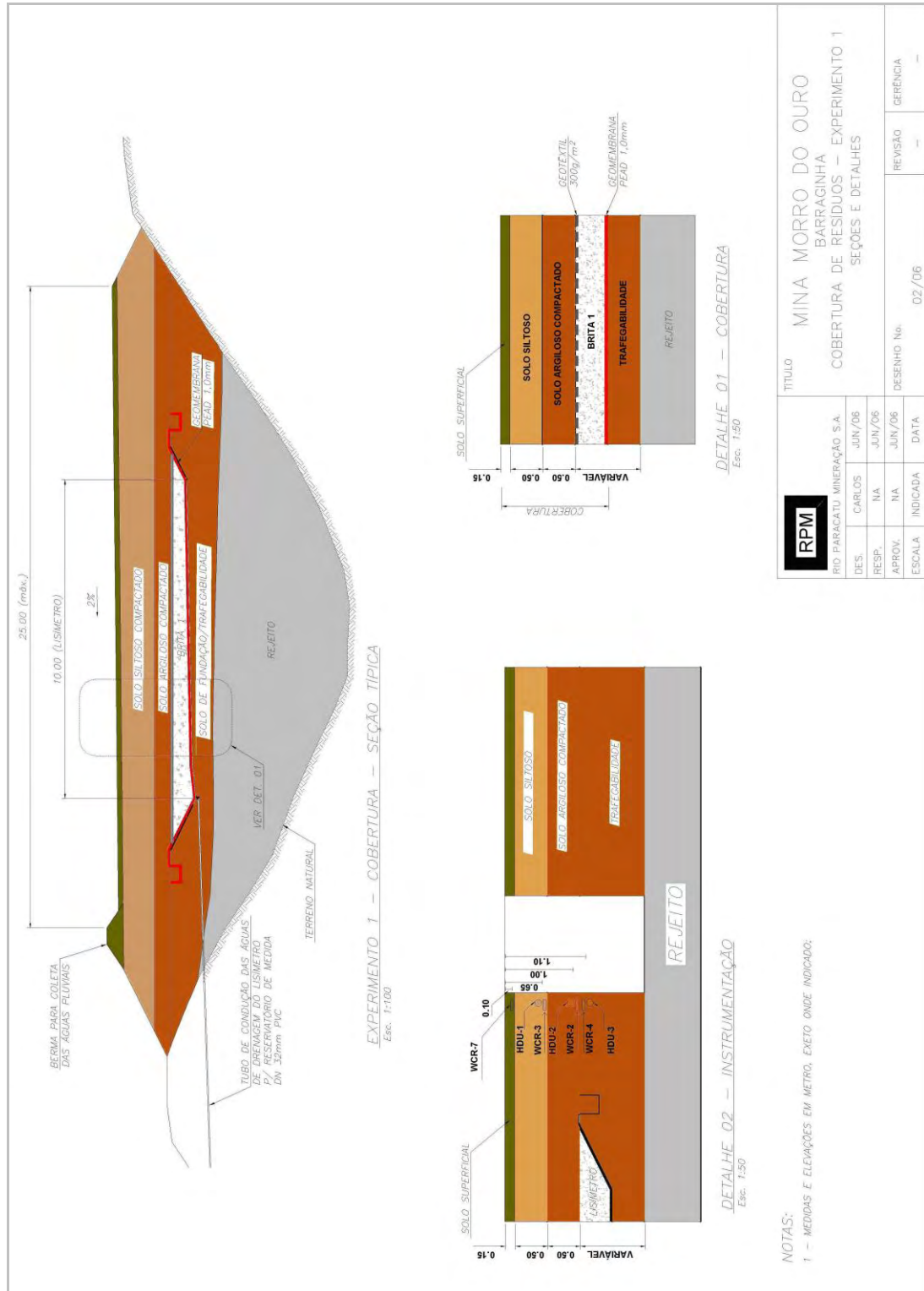
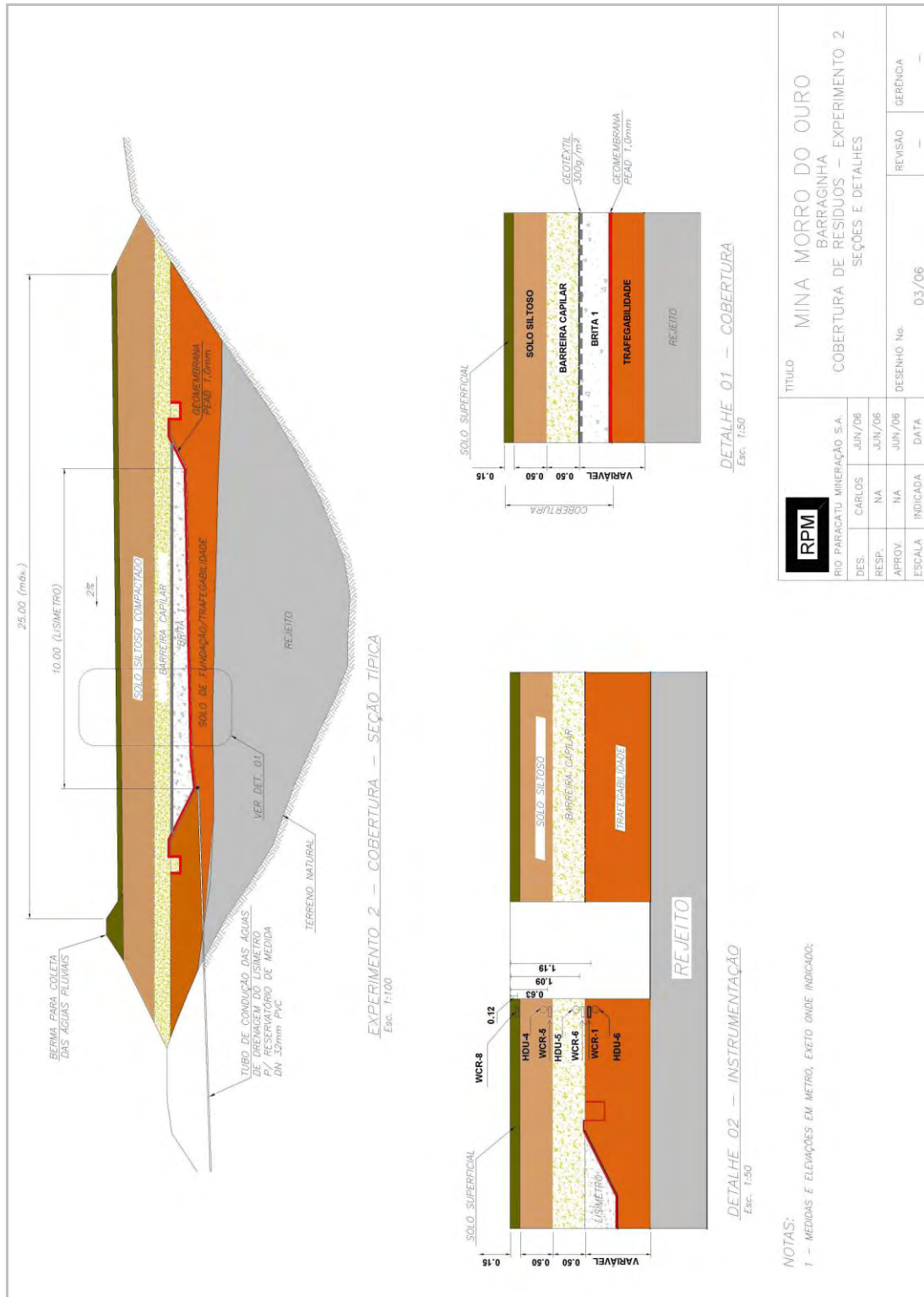


Figura 4.2 – Seção típica do sistema de cobertura 1 (Amorim, 2008).



RPM		TÍTULO		MINA MORRO DO OURO	
RIO PARACATU MINERAÇÃO S.A.		BARRAGINHA		COBERTURA DE RESÍDUOS – EXPERIMENTO 2	
DES.	CARLOS	JUN/06	SEÇÕES E DETALHES		
RESP.	NA	JUN/06	DESENHO No.	03/06	REVISÃO
APROV.	NA	JUN/06	DATA	03/06	GERÊNCIA
ESCALA	INDICADA				

Figura 4.3 – Seção típica do sistema de cobertura 2 (Amorim, 2008).

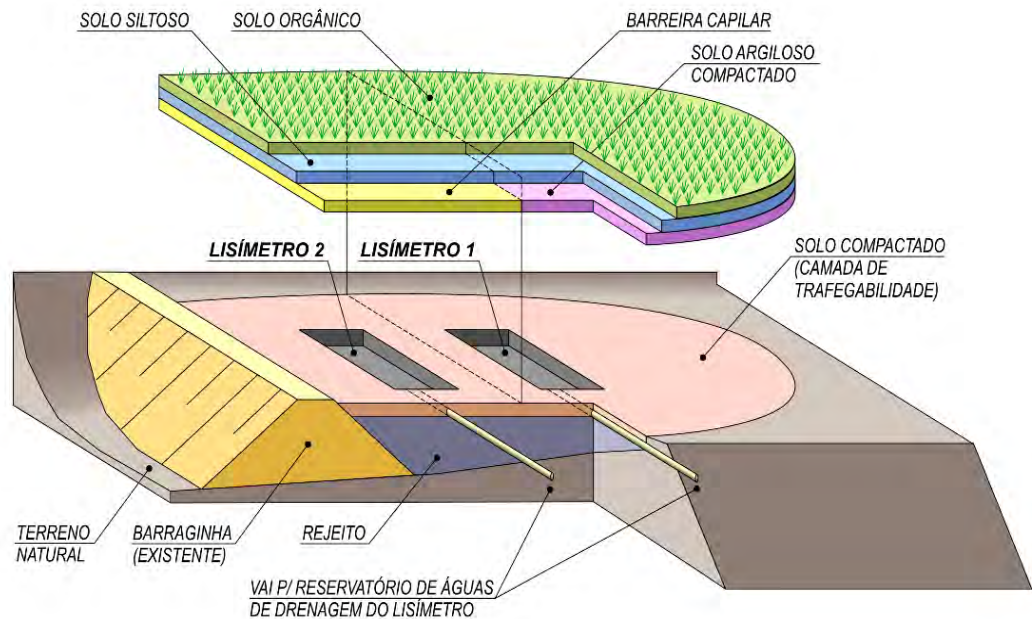


Figura 4.4 – Vista geral dos experimentos em perspectiva (adaptado de Amorim, 2008)

4.3 – Instrumentação

4.3.1 – Monitoramento da Infiltração

Os lisímetros colocados logo abaixo dos sistemas de cobertura foram escavados na camada de fundação e concebidos por Amorim (2008) para quantificar a vazão de água que passasse pelas coberturas. Segundo recomendação da EPA (2002), quanto maiores forem os lisímetros mais representativos serão os resultados por eles medidos. Por este motivo, foram feitos lisímetros retangulares com aproximadamente 12m de comprimento e 10m de largura.

4.3.2 – Monitoramento do Perfil de Umidade do Solo

O teor de umidade de cada camada dos solos que compõem os sistemas de cobertura foi medido utilizando-se instrumentos elétricos do tipo WCR (water content reflectometer) (Figura 4.5). Estes aparelhos medem a umidade do solo a

partir do tempo que um pulso eletromagnético leva para caminhar por suas duas hastes de comprimento conhecido. Esse tempo é inversamente relacionado com a constante dielétrica do meio no qual as hastes estão inseridas, sendo que a constante dielétrica da água é bem maior que a dos sólidos e do ar. Portanto, a constante dielétrica de um solo depende da quantidade relativa entre sólidos, água e ar desse solo. Assim, quanto maior for a quantidade de água do solo, maior será sua constante dielétrica e menor será a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas nas hastes. Portanto, o teor de umidade do solo em volta do WCR poderá ser determinado por meio de uma correlação entre tempo de propagação ao longo do medidor e o teor de umidade do solo. No entanto, as medições feitas com estes instrumentos, apesar de adequadas, podem ter alguma imprecisão porque dependem de muitos fatores tais como, o contato entre as hastes e o solo, o comprimento das hastes, o comprimento do seu embutimento, etc. (Marinho et al, 2005). Chandler et al (2004) mencionam que os instrumentos mais adequados para medir a umidade de solos no campo são os TDR (time domain reflectometers). No entanto, apresentam resultados de comparações entre medições de campo de teor de umidade feitas com TDR e WCR calibrados no próprio campo. As comparações são boas e de certa forma validam o uso dos WCRs.



Figura 4.5 – Instrumento para medir umidade em campo WCR utilizado nos experimentos e datalogger, Campbell Scientific, Inc. (Amorim, 2008)

4.3.2.1 – Calibração dos WCRs

Naturalmente, os WCRs devem ser calibrados de acordo com as condições locais do solo (Marinho et al. 2005). Amorim (2008) calibrou os WCRs antes de serem instalados no campo, inserindo-os em amostras dos diversos solos, compactadas de acordo com as condições que eles deveriam ter no campo. As amostras eram inicialmente saturadas e, em seguida, levadas para uma estufa, de onde, de tempos em tempos, eram retiradas para se fazer leituras de voltagem e teor de umidade, e colocadas de volta. O conjunto dessas medições permitia a montagem das curvas de calibração.

Como, por um lado, não se tinha certeza se as compactações das diferentes camadas no campo foram feitas rigorosamente iguais às que haviam sido feitas durante a calibração dos WCRs e, por outro lado, as comparações entre os resultados de campo e da análise numérica inicial feita por Amorim (2008) não foram satisfatórias, no presente trabalho realizou-se uma nova calibração dos WCRs, com os instrumentos já instalados no campo, da seguinte forma:

- Em três diferentes épocas do ano, chuvosa; intermediária e seca; foram retiradas no campo com um trado manual amostras deformadas de todos os solos que compunham os dois sistemas de cobertura (Figura 4.6).



Figura 4.6 – Escavação de poços na cobertura e retirada de amostras deformadas com auxílio de trados manuais

- Imediatamente após a sua retirada, as amostras eram pesadas para a determinação do seu peso úmido (solo + água);
- Em seguida, eram levadas para a estufa para a determinação do seu peso seco (solo);
- Com o peso úmido e o peso seco, determinava-se a umidade gravimétrica (w);
- Determinava-se a umidade volumétrica pela equação (4.1)

$$\theta = w \cdot \frac{\gamma_d}{\gamma_w} \quad (4.1)$$

Onde:

θ = Umidade volumétrica (%)

w = Umidade gravimétrica (%)

γ_d = Peso específico seco (g/cm³) (determinado por Amorim, 2008)

γ_w = Peso específico da água (g/cm³)

- Faziam-se as leituras dos instrumentos WCRs no mesmo dia da retirada das amostras;
- Com as umidades volumétricas e as leituras, foram obtidos três pontos de calibração para cada solo dos sistemas de cobertura, com os quais foram feitas novas curvas de calibração.

4.3.3 – Monitoramento da Sucção no Solo

Amorim (2008) instalou sensores do tipo HDU (heating dissipation units) (Figura 4.7) para medir a sucção matricial em cada camada de solo dos dois sistemas de cobertura. Esses sensores consistem em uma resistência elétrica e um medidor de temperatura ambos inseridos numa peça cerâmica. O princípio de funcionamento consiste em inserir o sensor no solo, garantindo um bom contato solo/sensor de forma que a umidade do sensor fique igual à do solo. Em seguida, aplica-se uma energia elétrica constante na resistência durante certo tempo (por exemplo, 50 milampères durante 30 segundos) e, simultaneamente, mede-se o aumento da temperatura no interior da peça cerâmica. Como a água conduz calor muito mais

rapidamente que o ar, o aumento de temperatura é controlado pelo teor de umidade do conjunto peça cerâmica/solo. O teor de umidade do solo se relaciona com a sua sucção, portanto, pode-se relacionar o aumento da temperatura do sensor com a sucção do solo. Aumentos de temperatura mais elevados (3-5 °C) significam menor dissipação de calor, menor umidade da peça cerâmica e, conseqüentemente, maiores sucções.



Figura 4.7 – Unidade de dissipação de calor (EPA, 2002)

4.3.3.1 – Calibração dos HDUs

A calibração dos HDUs deve ser feita da seguinte maneira:

- Inserir o HDU em uma amostra de solo nas mesmas condições que o solo se encontra no campo;
- Aplicar uma sucção conhecida na amostra;
- Esperar a estabilização da sucção no interior da amostra, bem como a estabilização da umidade no conjunto cerâmica/solo;
- Fazer a leitura da variação de temperatura do HDU;
- Correlacionar essa variação de temperatura com a sucção aplicada.

Amorim (2008) não pode realizar este procedimento por não dispor em Paracatu, onde estavam e ainda estão os instrumentos e o sistema de aquisição de dados, de uma forma conveniente para aplicar sucção em amostras nas quais os HDU fossem colocados antes de serem instalados no campo.

No presente trabalho, também não foi possível seguir tal procedimento, porque os instrumentos já se encontravam instalados no campo. Devido a isso, estudou-se uma metodologia para uma calibração do HDU já instalado em campo usando o método do papel filtro. Naturalmente, este procedimento é limitado pelo fato de não ser baseado em uma medição direta da sucção. No entanto, dada as circunstâncias, foi o único possível. Tal procedimento foi feito da seguinte maneira:

- As mesmas amostras coletadas em três datas diferentes para a calibração dos WCRs foram usadas para a calibração dos HDUs;
- As amostras foram levadas para o laboratório, homogeneizadas, e umedecidas de acordo com os teores de umidades de campo;
- Em seguida, procedeu-se a compactação (Figura 4.8) de três corpos de prova para cada amostra retirada em campo nas diferentes camadas dos sistemas de cobertura nas três datas especificadas acima. Tal procedimento foi feito buscando o mesmo peso específico seco (γ_d) de campo;
- Procedeu-se então a colocação de dois papéis filtro, um na face superior e outro na inferior de cada corpo de prova, e este conjunto era imediatamente envolto em filme plástico (Figura 4.9), devidamente identificado e levado à câmara úmida em uma caixa de isopor, onde permaneceu por 7 dias.



Figura 4.8 – Compactação das amostras no anel de PVC.



Figura 4.9 – Colocação do papel filtro e isolamento do corpo de prova

- Após o período de 7 dias, os corpos de prova foram abertos, e os papéis filtro foram retirados com auxílio de uma pinça, não devendo ficar exposto ao ar por mais que 5 segundos, e pesados em uma balança analítica com precisão de 0,0005g. A partir daí, começou-se a monitorar a perda de umidade do papel por uns cinco minutos, com leituras durante o primeiro minuto de 10 em 10 segundos, depois de 30 em 30 segundos, conforme sugerido por Villar (2002). Com estes dados, montou-se um gráfico (Figura 4.10) de variação do peso versus a raiz do tempo e assim foi possível fazer uma extrapolação para o tempo t igual a zero. Em seguida, o papel filtro úmido foi colocado na estufa a uma temperatura de 105°C, por um período mínimo de 2 horas, e novamente pesado para obtenção do seu peso seco, sendo que o ganho de umidade também foi monitorado para se conseguir o valor no tempo $t = 0$. Conhecida a umidade do papel filtro, utilizou-se das curvas de calibração para determinação do valor da sucção do corpo de prova. No presente trabalho não foi realizado o ensaio de calibração do papel filtro, tendo-se utilizado as curvas de calibração de Chandler et al. (1992), dadas pelas equações 4.2 e 4.3:

$$\text{Sucção (kPa)} = 10^{(4.842 - 0.0622w)}, \text{ para umidades do papel filtro } \leq 47\%. \quad (4.2)$$

$$\text{Sucção (kPa)} = 10^{(6.050 - 2.48 \cdot \log w)}, \text{ para umidades do papel filtro } > 47\%. \quad (4.3)$$

em que w é o teor de umidade do papel filtro.

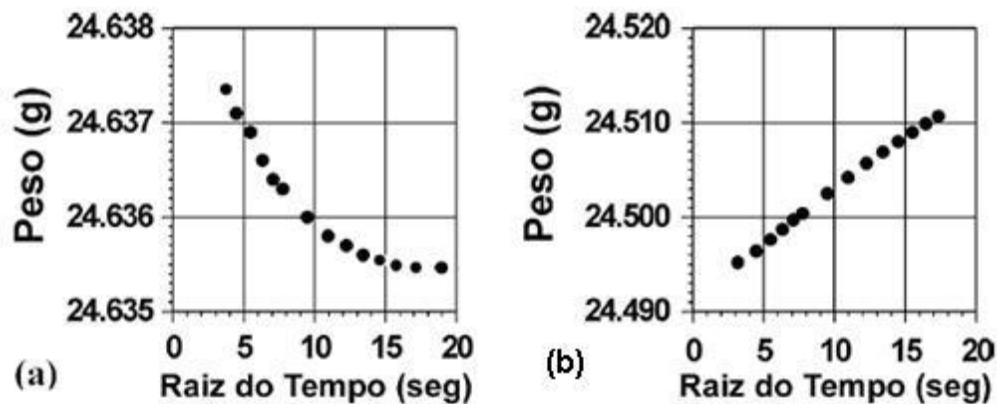


Figura 4.10 – Curvas de acompanhamento da variação do peso do papel filtro: (a) após retirar o papel filtro em contato com o solo (Perda de Umidade) e (b) após retirar da estufa (ganho de umidade) sugerida por Villar (2002).

- Com as leituras dos instrumentos (HDU), feitas no mesmo dia da retirada das amostras em campo, e com os valores de sucção determinados como descrito acima, foram obtidos os pontos de calibração para cada solo dos sistemas de cobertura e conseqüentemente as curvas de calibração.

4.4 – Ensaio de Laboratório

Como explanado anteriormente, o presente trabalho utilizou-se do experimento de Amorim (2008) para ajustar dois modelos numéricos (uni e bi-dimensionais) através do programa VADOSE/W do pacote Geo Slope (2002), com o objetivo de propor uma metodologia para dimensionamento de sistemas de cobertura de solo. Para tanto, necessitou-se obter dentre outros parâmetros, a curva de retenção de água e o coeficiente de permeabilidade saturado para todos os solos que compõe os sistemas de cobertura do experimento através de ensaios de laboratório.

Os ensaios para determinação das curvas de retenção de água foram feitos com o uso da técnica do papel filtro e, também, com o extractor de Richards em amostras indeformadas extraídas no campo após a construção do experimento.

Os ensaios para determinação do coeficiente de permeabilidade dos solos na condição saturada foram feitos com permeômetros de carga constante no solo da camada barreira capilar e variável para os demais solos.

Esses ensaios foram feitos por Amorim (2008).

No presente trabalho, os ensaios para determinação da permeabilidade saturada foram refeitos, para se conferir os valores obtidos por Amorim (2008), principalmente para o solo argiloso do sistema de cobertura 1.

Os pontos das curvas de retenção obtidos experimentalmente foram ajustados pela equação de Fredlund and Xing (1994) (Equações 4.4 e 4.5), uma vez que o programa VADOSE/W utiliza-se de tal equação para ajustar as curvas de retenção de água no solo.

$$\theta(\psi) = \theta_s \cdot C(\psi) \cdot \left[\frac{1}{\ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right]} \right]^m \quad (4.4)$$

$$C(\psi) = \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{\psi_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{\psi_r}\right)} \right] \quad (4.5)$$

em que, θ_s é o conteúdo de umidade volumétrica correspondente ao grau de saturação de 100%, $C(\psi)$ é uma função de correção que considera o limite superior de sucção, e ψ_r é o valor de sucção correspondente ao conteúdo de umidade volumétrica residual, θ_r .

Os parâmetros “n”, “m” e “a” são parâmetros de ajuste, e foram obtidos com o auxílio do programa Excel.

4.5 – Análise Numérica

4.5.1 – Introdução

A análise numérica dos sistemas de cobertura foi feita com modelos uni e bi-dimensional utilizando-se o programa VADOSE/W do pacote Geo Slope (2002).

Como já exposto, a versão do programa VADOSE usada nesta tese, segue a teoria apresentada no Capítulo 3 e, em particular, faz uso das equações simplificadas propostas por Wilson (1990). A solução numérica do programa VADOSE é semelhante à de que usou a mesma formulação simplificada proposta por Wilson (1990) só que para o caso bi-dimensional. Para obter a solução numérica do problema, Joshi (1993) usou o Método dos Elementos Finitos para fazer a discretização espacial e o Método das Diferenças Finitas Implícito para fazer a integração no tempo.

O que o programa VADOSE acrescenta ao trabalho de Joshi (1993) é um uso mais favorável na medida em que apresenta uma variedade maior de opções de elementos finitos, funções de propriedades, etc. No entanto, os fundamentos teóricos são, rigorosamente, os mesmos.

A seguir são apresentados os modelos numéricos construídos no VADOSE/W, bem como os parâmetros de entrada e as condições de contorno utilizadas.

4.5.2 – Modelo Numérico

A partir da secção AA' (Figura 4.11), desenvolveu-se a malha de elementos finitos bidimensional englobando os dois sistemas de cobertura. Nas Figuras 4.12 e 4.13 são apresentadas, respectivamente, as malhas de elementos finitos e as condições de contorno para os modelos uni e bi-dimensionais usados no presente trabalho.

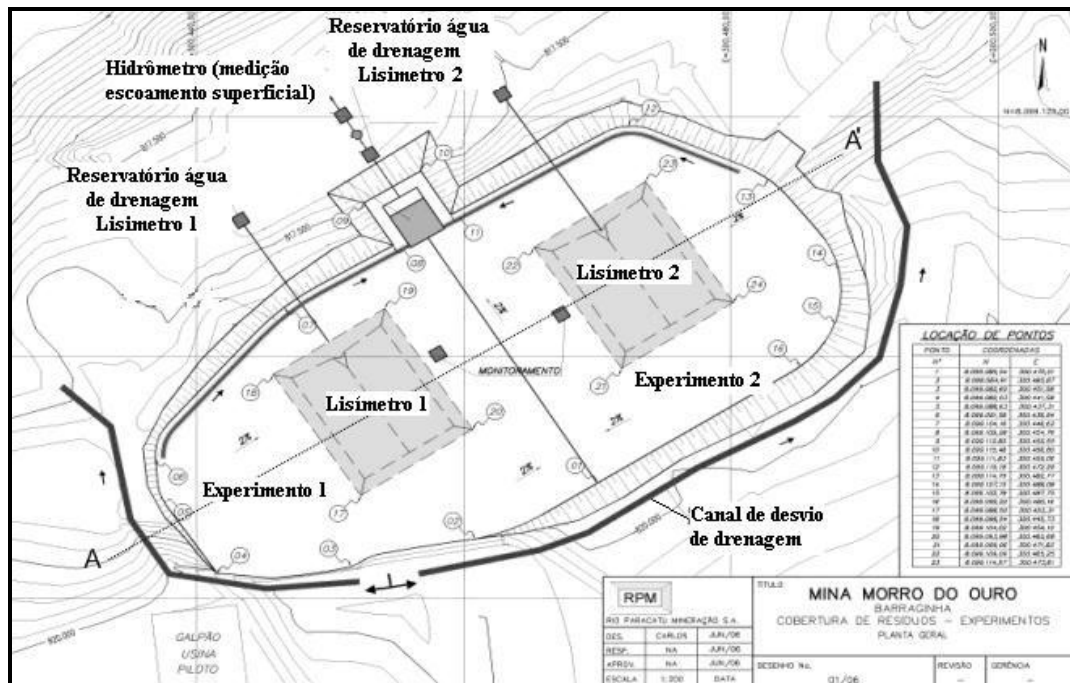


Figura 4.11 – Arranjo geral do experimento (Secção AA')

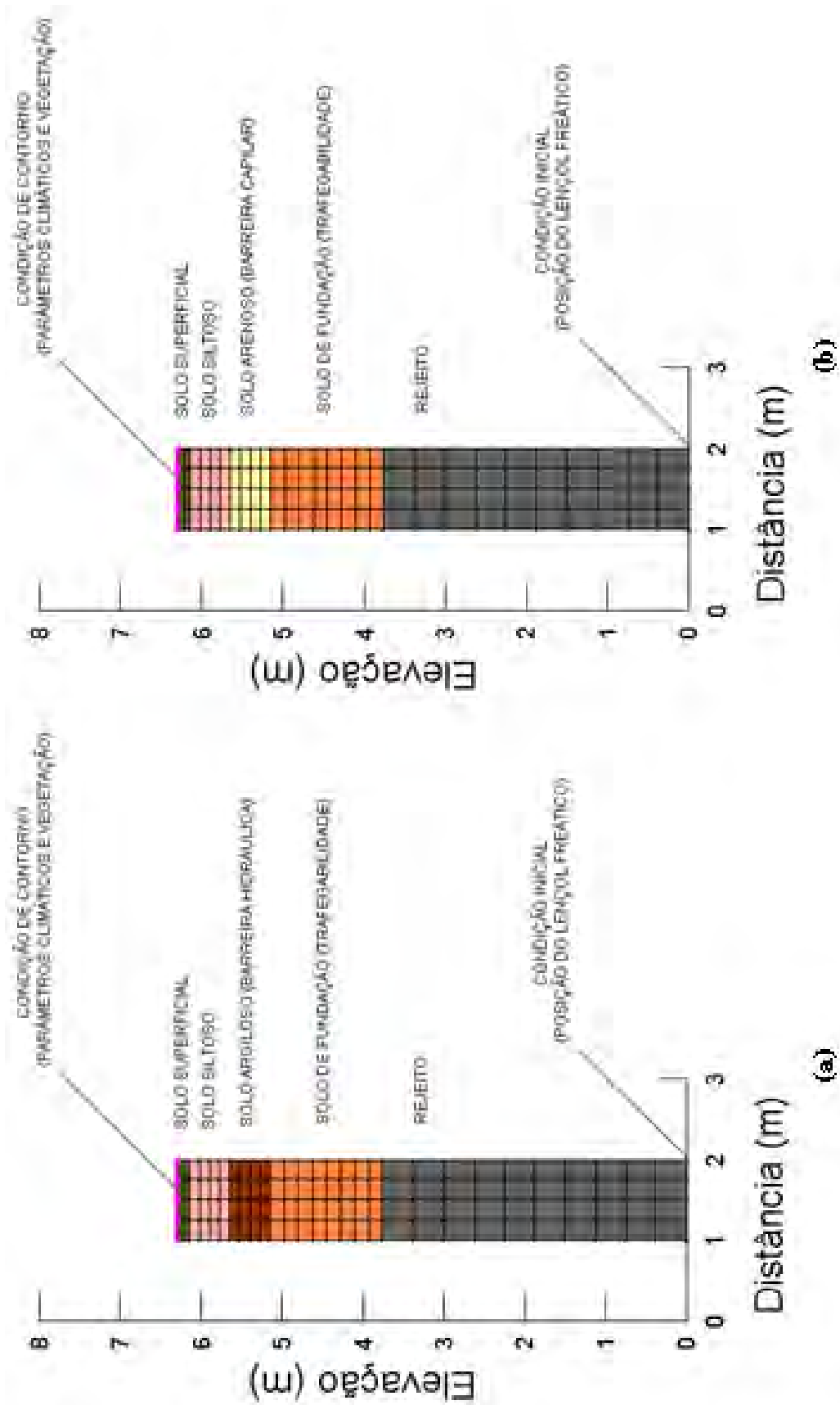


Figura 4.12 – Malhas de elementos finitos e condições de contorno para o modelo unidimensional. (a) Sistema de Cobertura 1 e (b) Sistema de Cobertura 2.

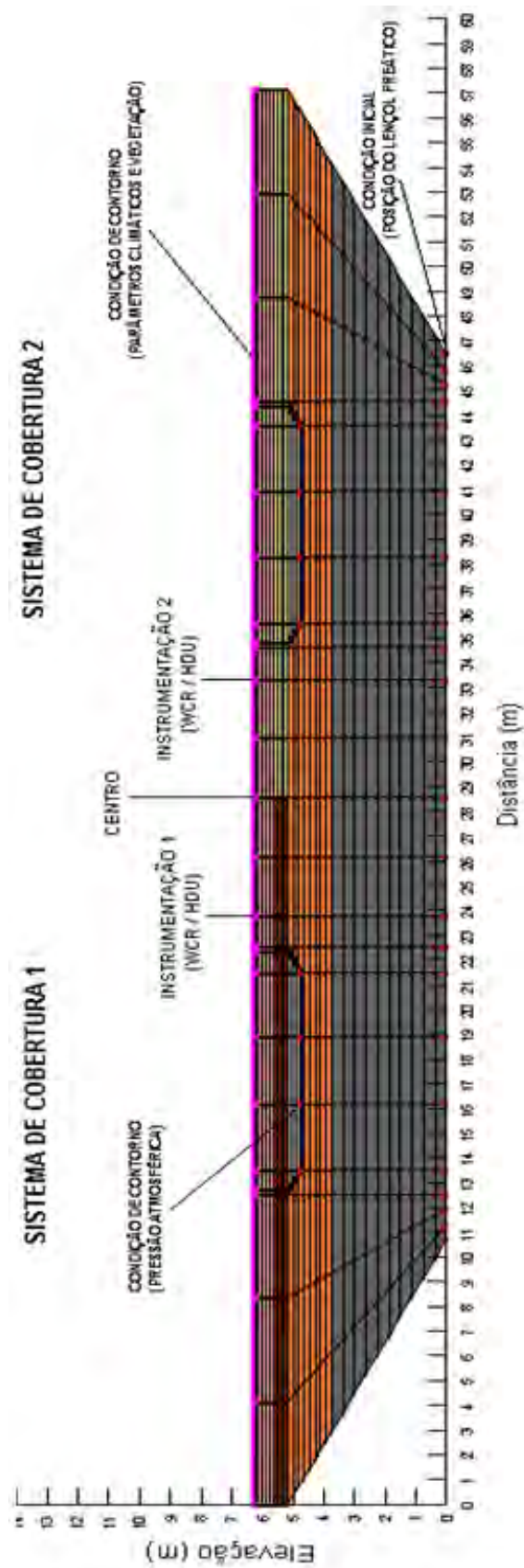


Figura 4.13 – Malha de elementos finitos e condições de contorno para o modelo bidimensional.

4.5.3 – Parâmetros de Entrada do Modelo

Admitiu-se a princípio que o lençol freático estaria posicionado na base dos rejeitos, embora não se dispusesse de resultados de sondagem que confirmassem esta suposição. Os parâmetros vegetais (IAF, profundidade da raiz e ponto de murcha) e os parâmetros térmicos (condutividade térmica e calor específico volumétrico) foram estimados com base no banco de dados do programa VADOSE/W, devido a falta de instrumentos para medição de tais parâmetros.

Por este motivo, realizou-se uma análise paramétrica com o modelo unidimensional, com o objetivo em determinar de maneira mais aproximada os parâmetros estimados e a posição que se encontrava o lençol freático no início da análise. Tal procedimento será relatado no item 4.5.4 do presente capítulo. A seguir serão apresentados os parâmetros de entrada do modelo usados como ponto de partida nas análises paramétricas.

4.5.3.1 – Parâmetros Climáticos

Para os modelos uni e bi-dimensionais usados no presente trabalho, forneceu-se com os seguintes dados climáticos diários: precipitação, temperatura, radiação solar, umidade relativa do ar e velocidade do vento, que são impostos como condição de contorno no topo da cobertura. Esses dados foram medidos na estação meteorológica existente na mina RPM situada a cerca de 1 km de distância do experimento no período de junho de 2007 a julho de 2010. As Figuras 4.14 a 4.18 mostram os parâmetros climáticos usados nos modelos numéricos.

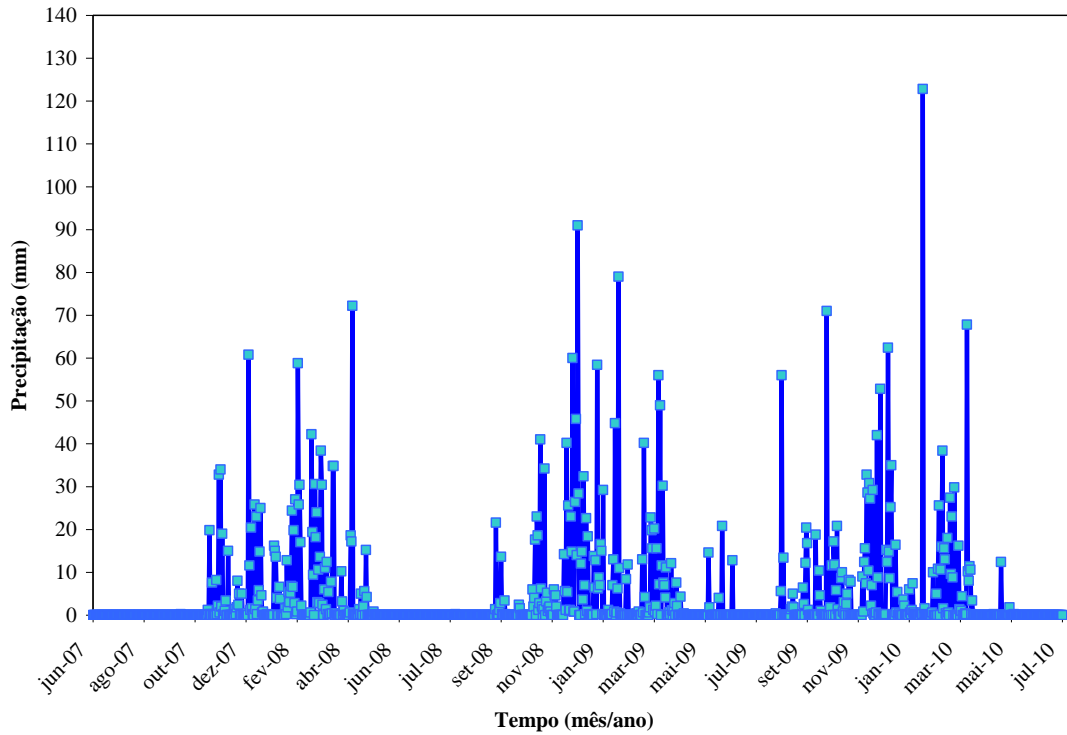


Figura 4.14 – Precipitação (Estação Meteorológica RPM).

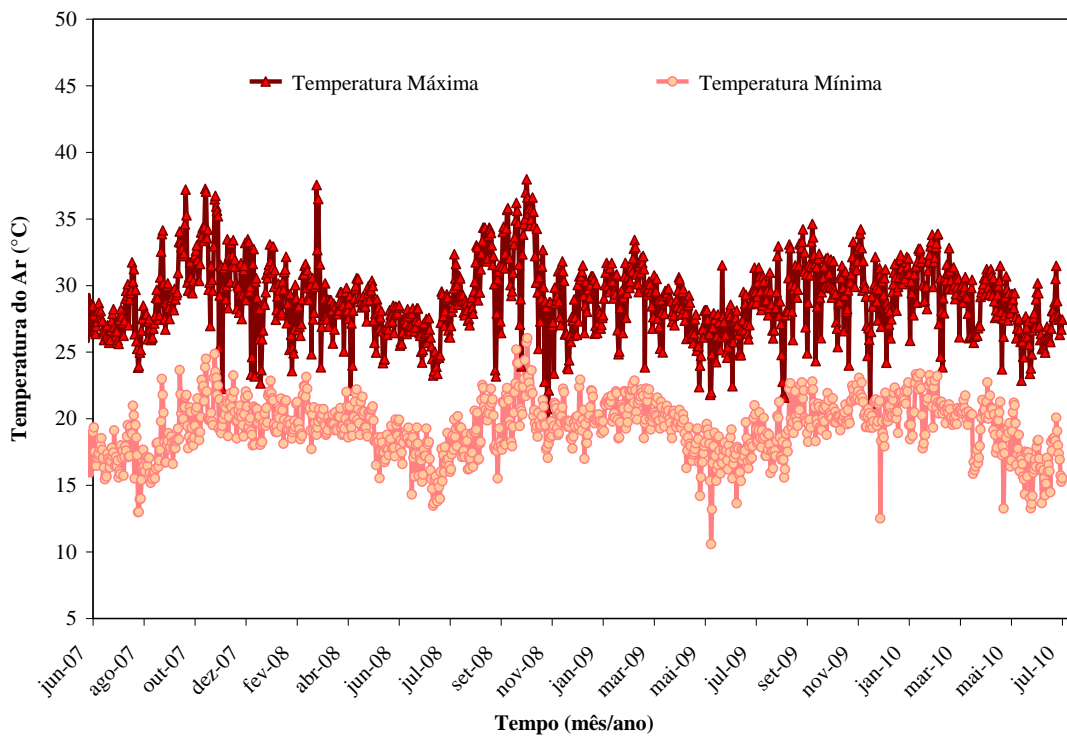


Figura 4.15 – Temperatura Máxima e Mínima (Estação Meteorológica RPM).

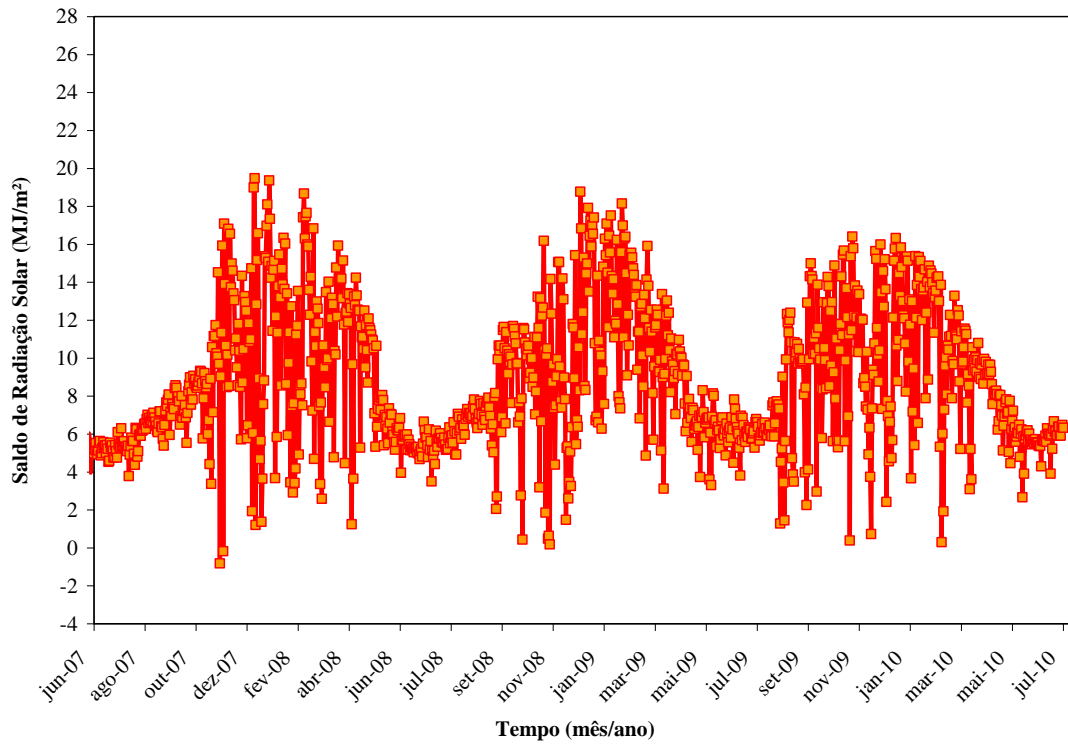


Figura 4.16 – Saldo de Radiação Solar (Estação Meteorológica RPM).

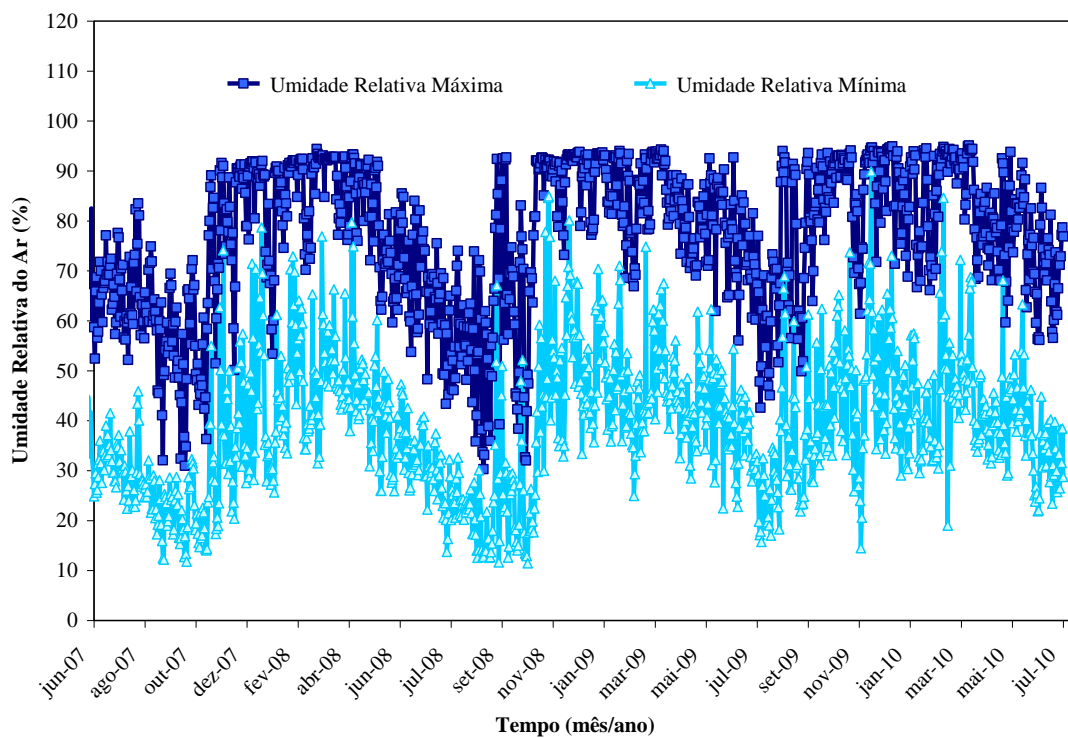


Figura 4.17 – Umidade Relativa do Ar Máxima e Mínima (Estação Meteorológica RPM).

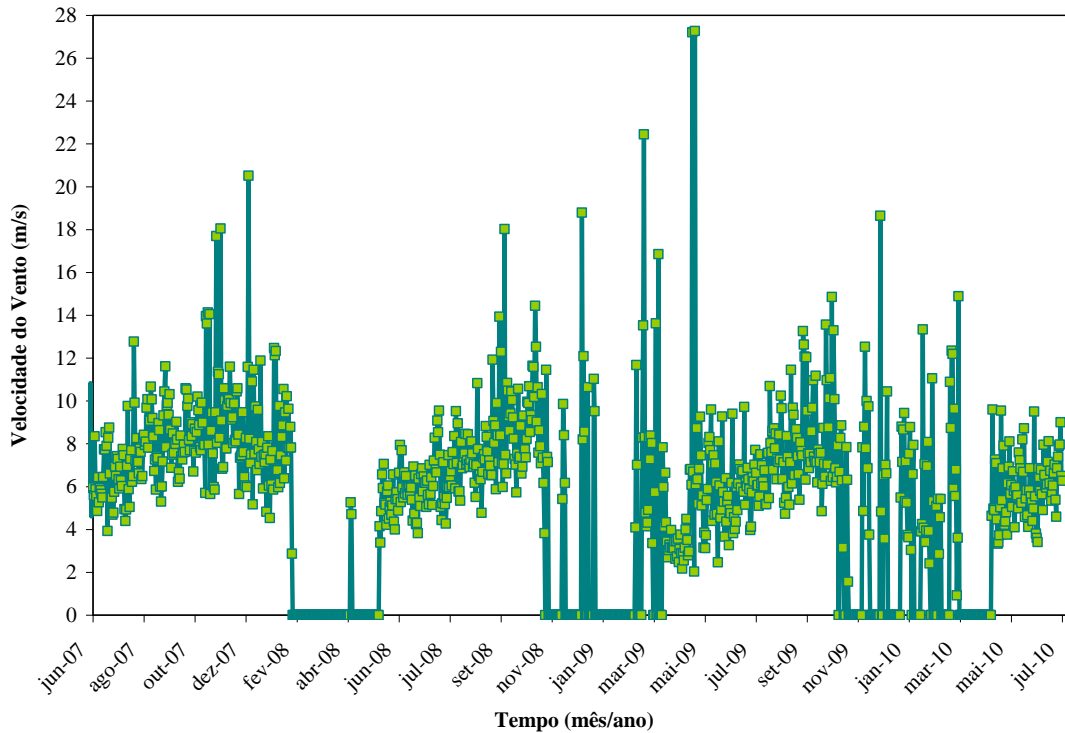


Figura 4.18 – Velocidade do Vento (Estação Meteorológica RPM).

4.5.3.2 – Parâmetros Geotécnicos

Para fazer a análise numérica, é necessário conhecer as curvas de retenção de água, o coeficiente de permeabilidade saturada e as curvas granulométricas (determinados em laboratório) para cada solo que compõe os dois sistemas de cobertura. Estes resultados como foram obtidos por Amorim (2008) serão apresentados a seguir, ainda neste Capítulo.

Os novos valores de condutividade hidráulica, bem como os resultados de caracterização dos materiais, como foram obtidos nesta tese serão apresentados no próximo Capítulo.

As Figuras 4.19 a 4.24 ilustram as curvas granulométricas dos materiais dos sistemas de cobertura. A curva granulométrica do rejeito foi fornecida pela RPM.

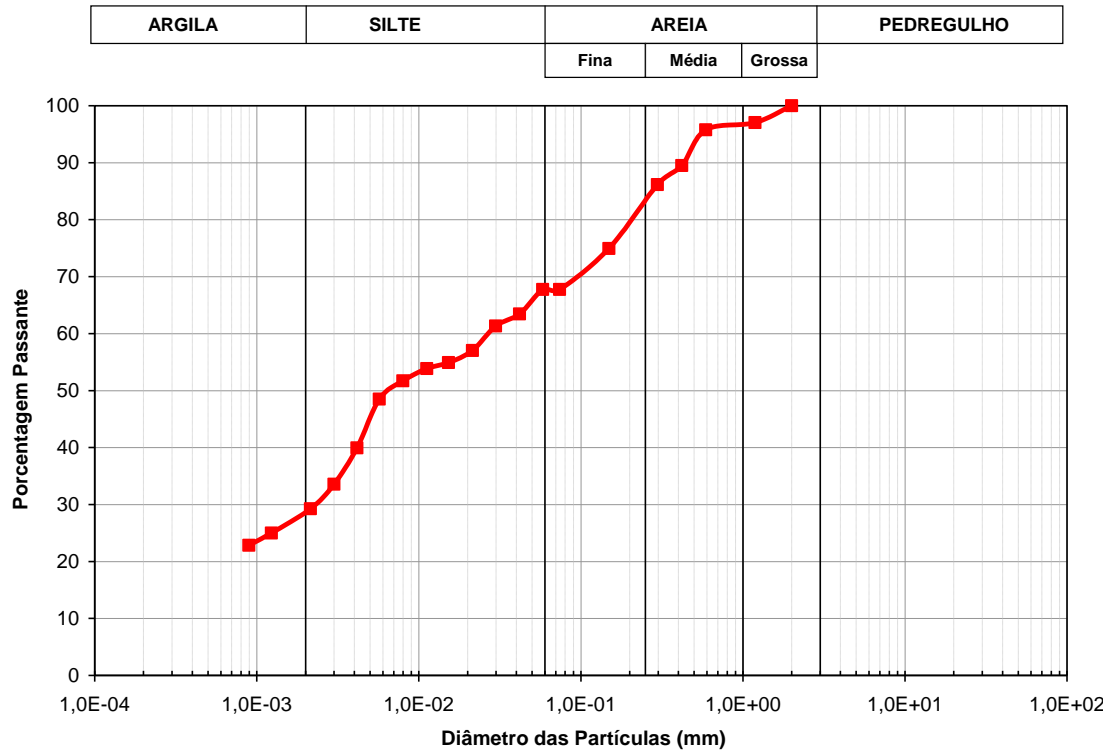


Figura 4.19 – Curva granulométrica do solo superficial (Top Soil) (Amorim, 2008) – NBR 6502/95

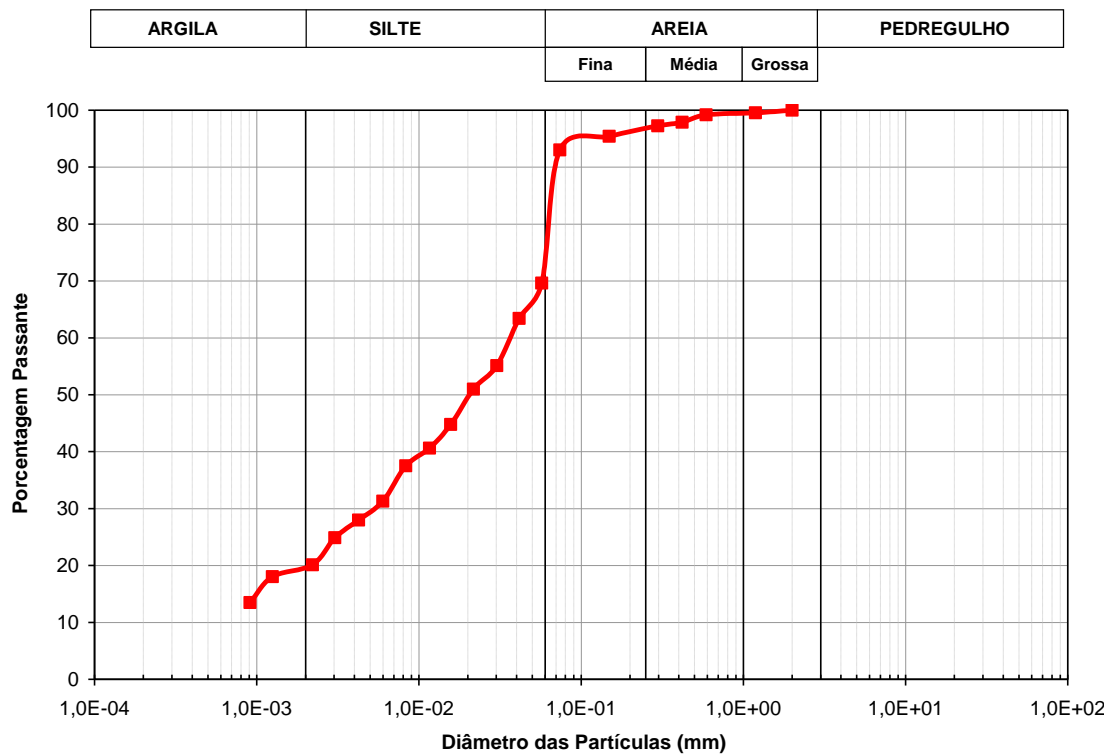


Figura 4.20 – Curva granulométrica do solo siltoso (Amorim, 2008) – NBR 6502/95

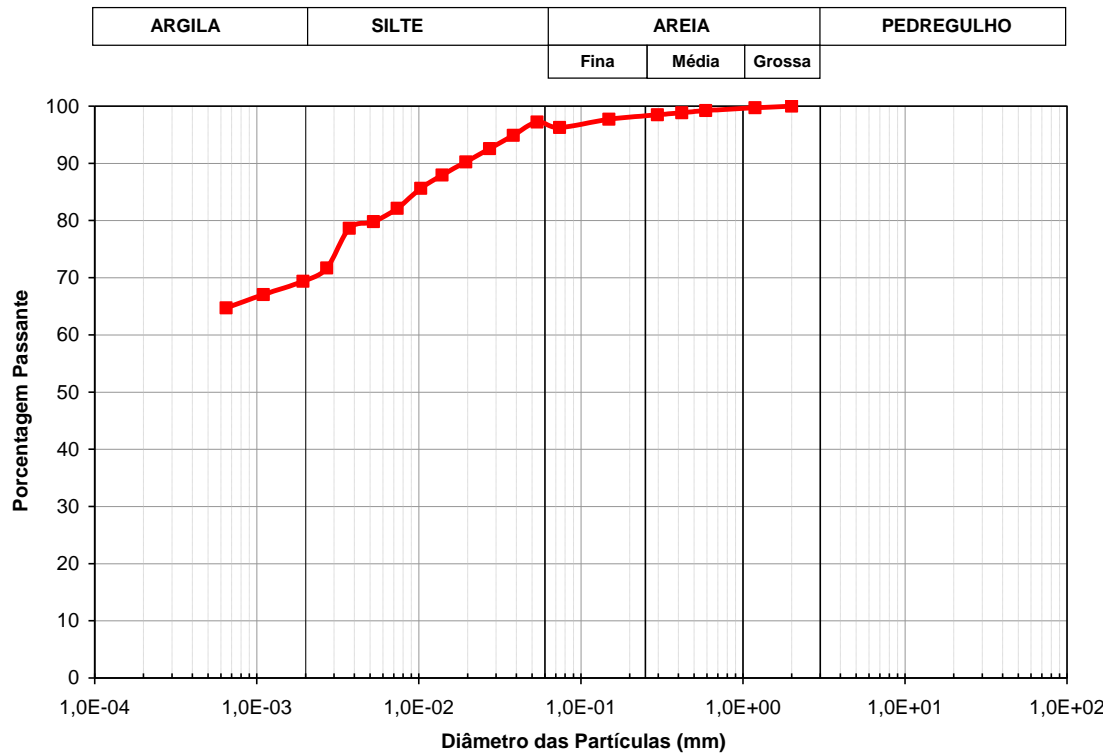


Figura 4.21 – Curva granulométrica do solo argiloso (Barreira Hidráulica) (Amorim, 2008) – NBR 6502/95

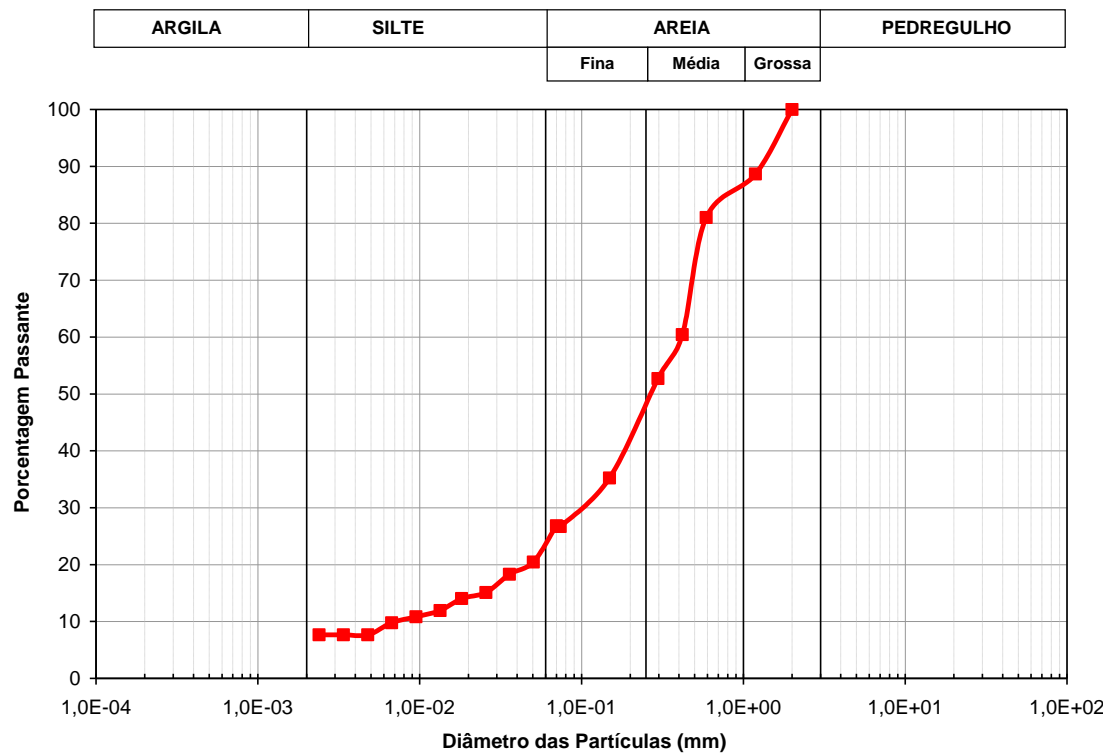


Figura 4.22 – Curva granulométrica do solo granular (Barreira Capilar) (Amorim, 2008) – NBR 6502/95

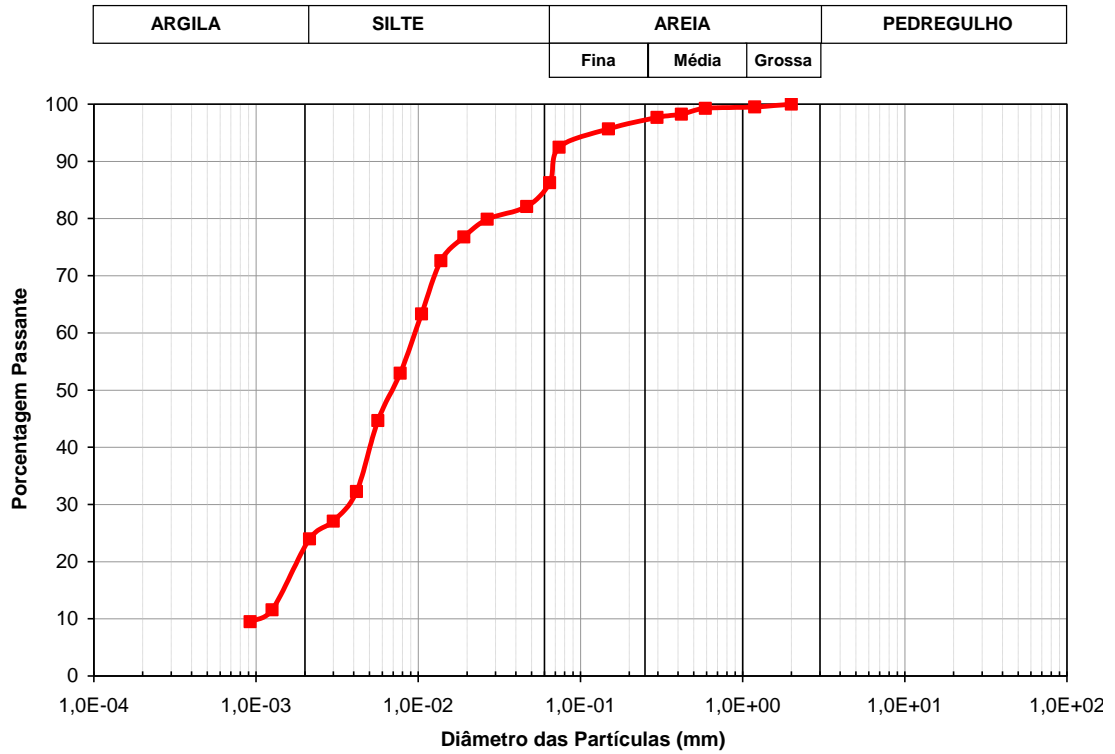


Figura 4.23 – Curva granulométrica do solo de fundação (trafegabilidade) (Amorim, 2008) – NBR 6502/95

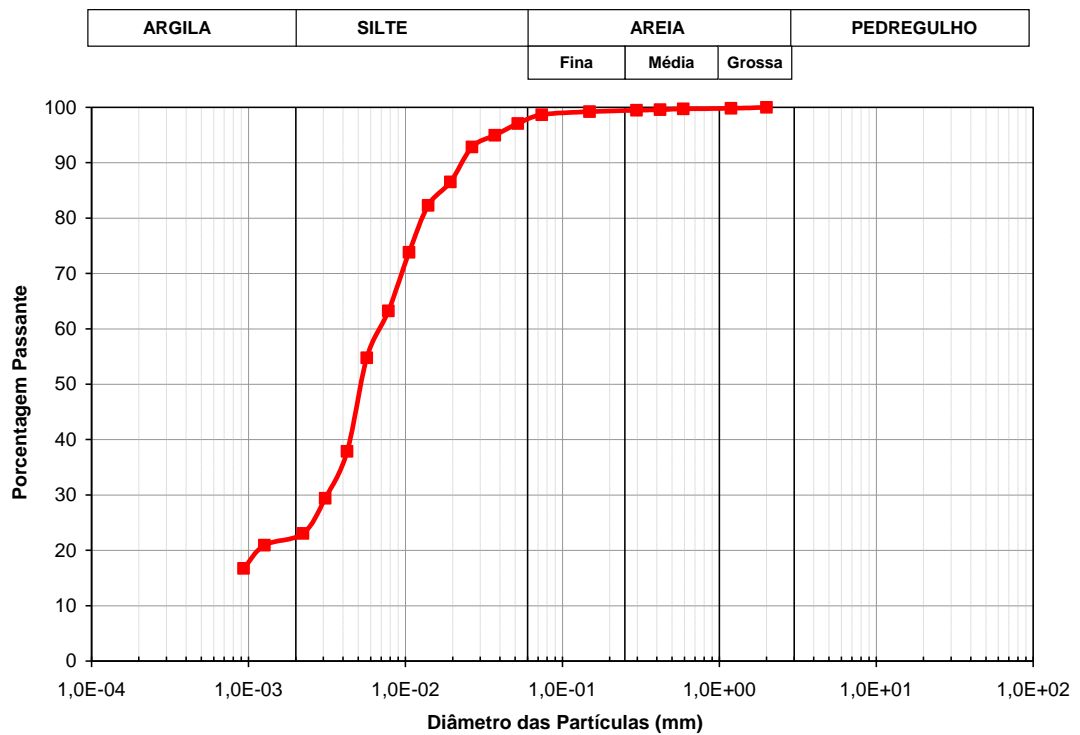


Figura 4.24 – Curva granulométrica do rejeito (RPM) – NBR 6502/95

As Figuras 4.25 a 4.30 ilustram as curvas de retenção de água obtidas por Amorim (2008) e usadas como parâmetro de entrada nos modelos propostos no

presente trabalho. Nas Figuras apresentam-se, também, as curvas de retenção ajustada pelo modelo de Fredlund and Xing (1994), podendo-se observar, de uma maneira geral uma excelente concordância.

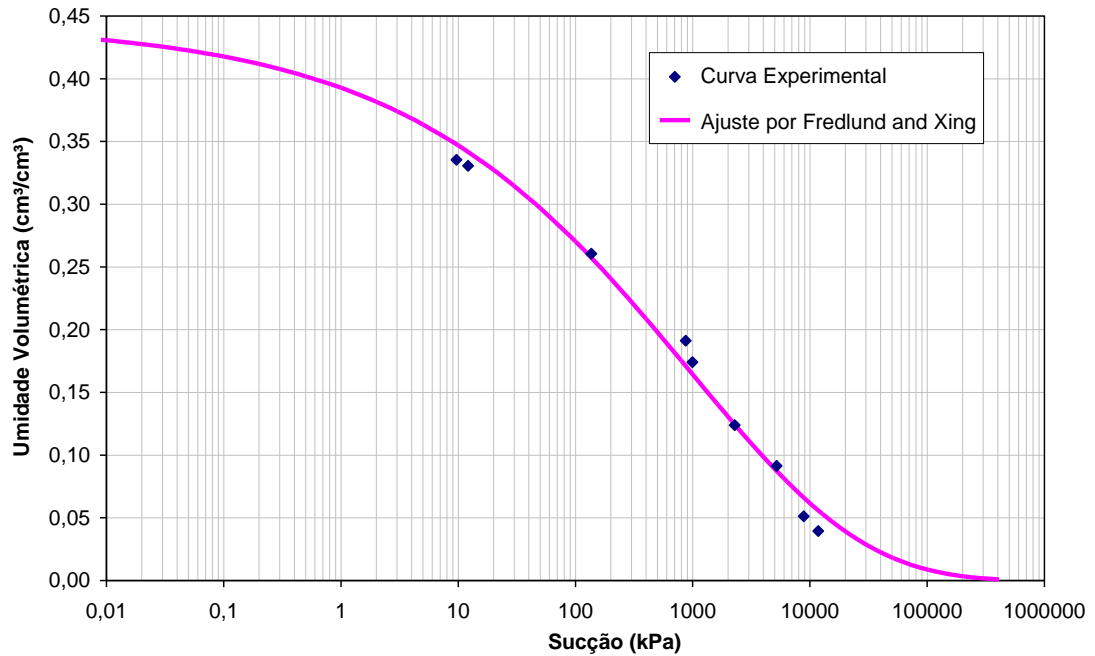


Figura 4.25 – Curva de retenção do solo superficial (top-soil) (Amorim, 2008).

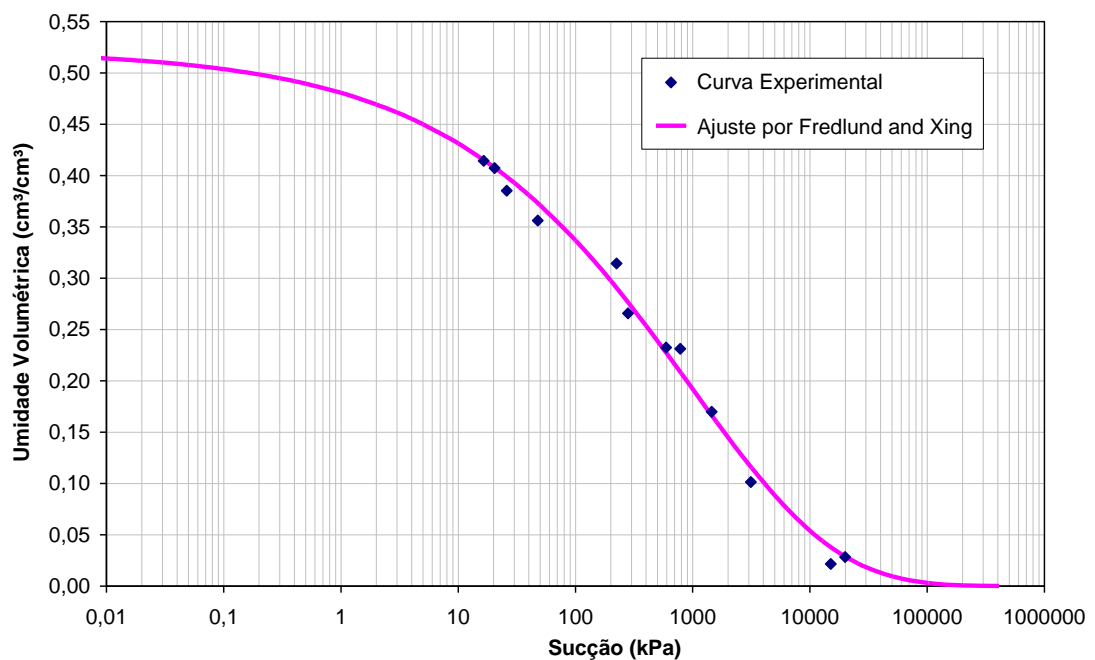


Figura 4.26 – Curva de retenção do solo siltoso (Amorim, 2008).

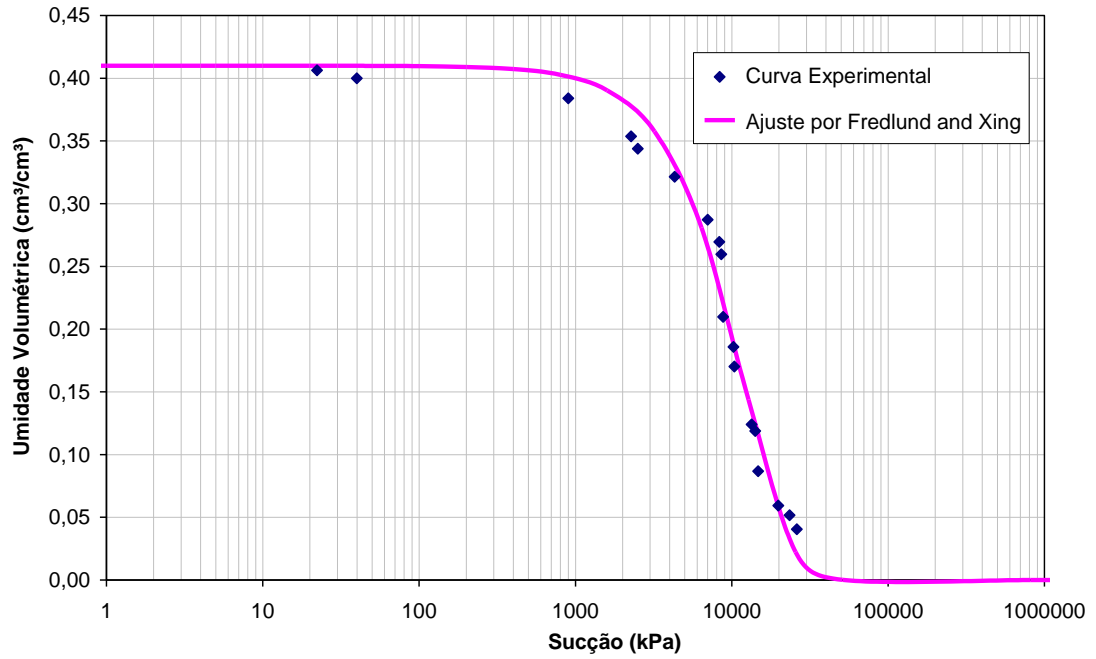


Figura 4.27 – Curva de retenção do solo argiloso (Amorim, 2008).

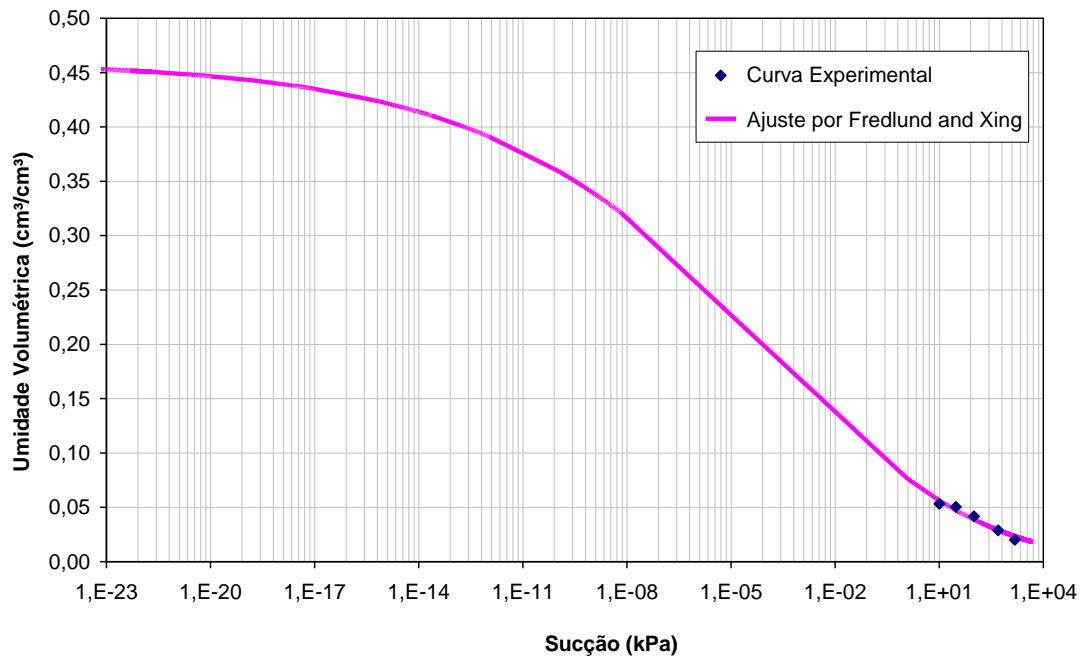


Figura 4.28 – Curva de retenção do solo granular (Barreira Capilar) (Amorim, 2008).

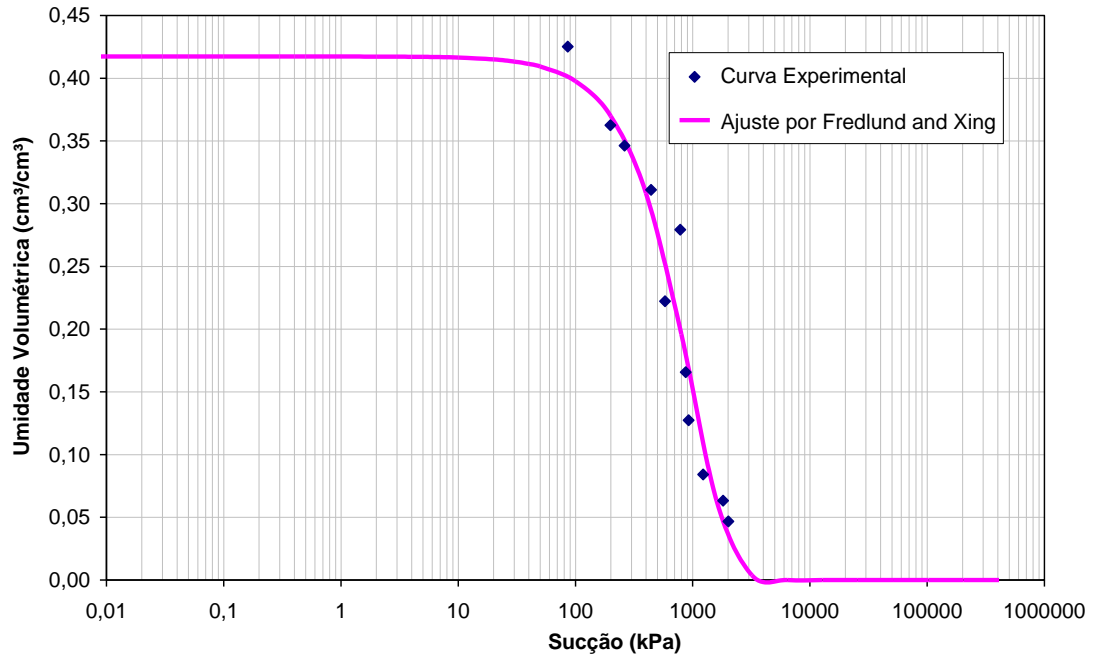


Figura 4.29 – Curva de retenção do solo de fundação (Trafegabilidade) (Amorim, 2008).

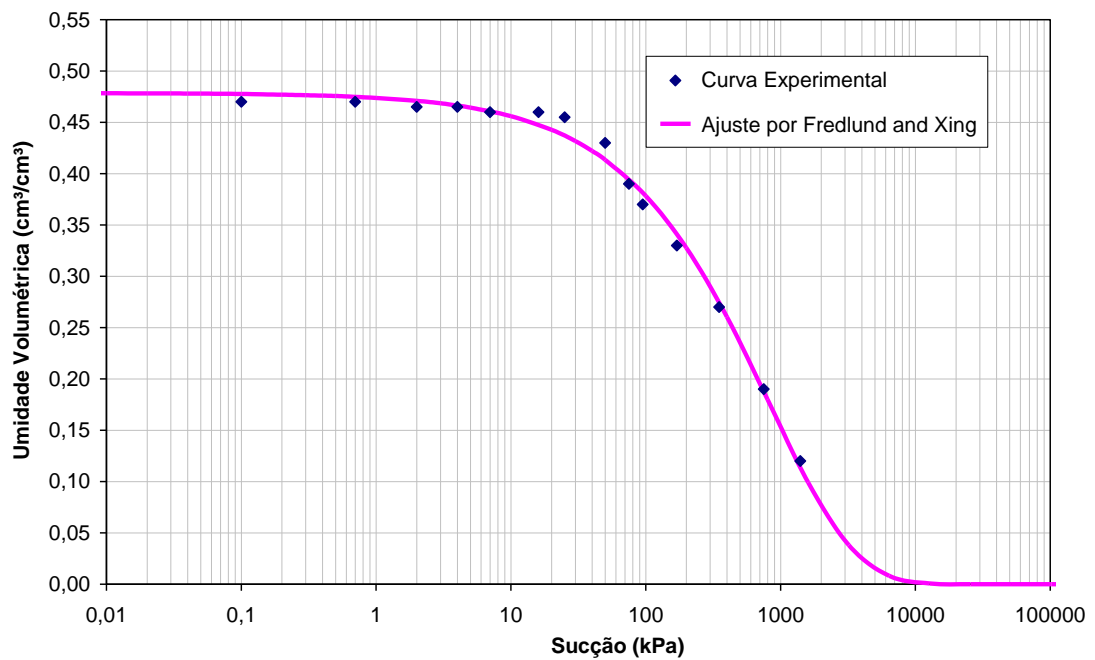


Figura 4.30 – Curva de retenção do rejeito (RPM).

4.5.3.3 – Parâmetros térmicos

O VADOSE/W requer que se especifiquem duas funções térmicas para resolver as equações de transferência de calor. A primeira estabelece a relação entre

a condutividade térmica e o teor de umidade volumétrica do solo. E, a segunda, entre o calor específico dos minerais dos solos e o teor de umidade volumétrico. A função de condutividade térmica é baseada em Johansen (1975) e a do calor específico volumétrico é baseado em Vries (1963).

(a) Função de condutividade térmica

A condutividade térmica reflete a capacidade do solo em conduzir calor assim como a condutividade hidráulica reflete a capacidade do solo em conduzir água. A taxa na qual o calor é transferido, depende do gradiente de temperatura e da condutividade térmica do solo. A condutividade térmica de um solo pode ser definida como a quantidade de calor que flui através de uma unidade de área de solo em uma unidade de tempo, sob uma unidade de gradiente. As unidades para condutividade térmica são tipicamente $J/(\text{seg.m.}^{\circ}\text{C})$ ou $\text{Btu}/(\text{hr.ft.}^{\circ}\text{F})$. A condutividade térmica do solo foi estimada constante e igual a $280 \text{ kJ}/(\text{dia.m.}^{\circ}\text{C})$, de acordo com o recomendado pelo manual do VADOSE/W.

(b) Função de calor específico volumétrico

A capacidade de calor de um material é definida como a quantidade de calor necessária para elevar a temperatura do material em uma unidade de grau. Quando expressa em termos de unidade de peso, esta quantidade de calor é referida como a capacidade de calor específico e quando expressa em termos de unidade de volume, a quantidade é conhecida como a capacidade de calor volumétrico. As unidades para a capacidade de calor específico são $J/(\text{kg.}^{\circ}\text{C})$ e $\text{Btu}/(\text{IB.}^{\circ}\text{F})$, e as unidades para capacidade de calor volumétrico são $J/(\text{m}^3.^{\circ}\text{C})$ e $\text{Btu}/(\text{ft}^3.^{\circ}\text{F})$. O calor específico volumétrico do solo foi estimado constante e igual a $2750 \text{ kJ}/(\text{m}^3.^{\circ}\text{C})$, também de acordo com o recomendado pelo manual do VADOSE/W.

4.5.3.4 – Parâmetros de Vegetação

Segundo Amorim (2008), a cobertura vegetal foi constituída a partir do semeio de sementes de uma mistura de espécies que só começaram a germinar no mês de novembro de 2007, conforme mostra a Tabela 4.1. Assim, os parâmetros da vegetação foram estimados considerando a especificidade local.

Tabela 4.1 – Cronograma das atividades realizadas por Amorim (2008)

Procedimento		Início	Fim
Montagem dos experimentos		06/2006	12/2006
Instalação dos Instrumentos		03/2007	03/2007
Espécies vegetais	Plantio	09/2007	-
	Germinação	11/2007	03/2008

Os dados de entrada da vegetação exigidos pelo programa são: índice de área foliar, profundidade das raízes e as tensões que se referem ao ponto de murcha e capacidade de campo do solo superficial.

(c) Índice de Área Foliar (IAF)

Como houve problemas para o crescimento da vegetação no local, este índice foi estimado baseando-se nos dados disponíveis na biblioteca do programa VADOSE.

(d) Profundidade das Raízes

Este índice também foi medido no campo em algumas espécies por Amorim (2008). A profundidade máxima das raízes foi 40 cm.

(e) Sucções relacionadas ao Ponto de Murcha

As sucções consideradas para o ponto de murcha foram 100 kPa, que é a sucção referente ao início da extração de água pela planta e 1500 kPa, que é a sucção ao qual a planta fica incapaz de retirar qualquer água do solo. Esses valores são sugeridos de acordo com o manual do VADOSE e foram usados por Amorim (2008).

4.5.4 – Análise Paramétrica

Procedeu-se uma análise paramétrica através da comparação dos valores de umidade volumétrica gerados pelo modelo numérico unidimensional (devido ao menor tempo computacional) com os valores de umidade volumétrica fornecidos pela instrumentação (WCR) instalada em campo. Essa comparação foi feita baseada

no erro relativo médio entre os valores de umidade volumétrica, conforme a Equação 4.6:

$$E_{\text{Rmédio}} (\%) = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\theta_{\text{campo}}^i - \theta_{\text{modelo}}^i)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\theta_{\text{campo}}^i)^2}} \quad (4.6)$$

onde,

$E_{\text{Rmédio}}$ é o erro relativo médio em (%)

θ_{campo} é a umidade volumétrica gerada pelo WCR em (%);

θ_{modelo} é a umidade volumétrica gerada pelo modelo unidimensional em (%);

n é o período da análise em (dias);

A escolha da comparação entre as umidades volumétricas e não entre as sucções geradas pelo modelo e no campo, foi devido ao fato da calibração dos WCRs serem mais confiáveis do que a calibração dos HDUs que medem de forma indireta a sucção matricial em cada camada de solo.

Os principais objetivos da análise paramétrica foram:

- Determinar com base no menor erro relativo encontrado, a posição do lençol freático no início do período de análise;
- Determinar com base no menor erro relativo encontrado, uma melhor aproximação dos parâmetros vegetais estimados (IAF, profundidade da raiz, ponto de murcha);
- Determinar com base no menor erro relativo encontrado, uma melhor aproximação dos parâmetros térmicos estimados (condutividade térmica, calor específico volumétrico);

A seguir são apresentadas as considerações para cada parâmetro analisado.

4.5.4.1 – Considerações para a obtenção da posição do lençol freático

Estipulou-se 10 profundidades (em metros) referentes à posição inicial do lençol freático, tendo como referência a base da camada de trafegabilidade (0,00; 0,75; 1,50; 2,25; 3,00; 3,75; 5,00; 10,00; 25,00; 50,00). Os demais parâmetros foram os mesmos adotados conforme o item 4.5.3.

4.5.4.2 – Considerações para a obtenção dos parâmetros vegetais

Para as análises dos parâmetros vegetais levou-se em conta o cronograma apresentado por Amorim (2008) (Tabela 4.1), no qual informa que a germinação apenas teve início em Novembro de 2007.

- ***IAF***

Sabe-se que o IAF atinge valores maiores nas estações chuvosas do ano e decresce nas estações de seca. No entanto, fica difícil mensurar tal parâmetro, principalmente suas variações sem um equipamento adequado como o LAI-2200. Devido a esse fato, estipulou-se 10 valores máximos de IAF (0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0; 4,5; 5,0) atingidos na última estação chuvosa do período de análise (Set/2009 a Maio/2010), para dois tipos de variação do IAF (Figuras 4.31 e 4.32). Os demais parâmetros foram os mesmos adotados conforme o item 4.5.3.

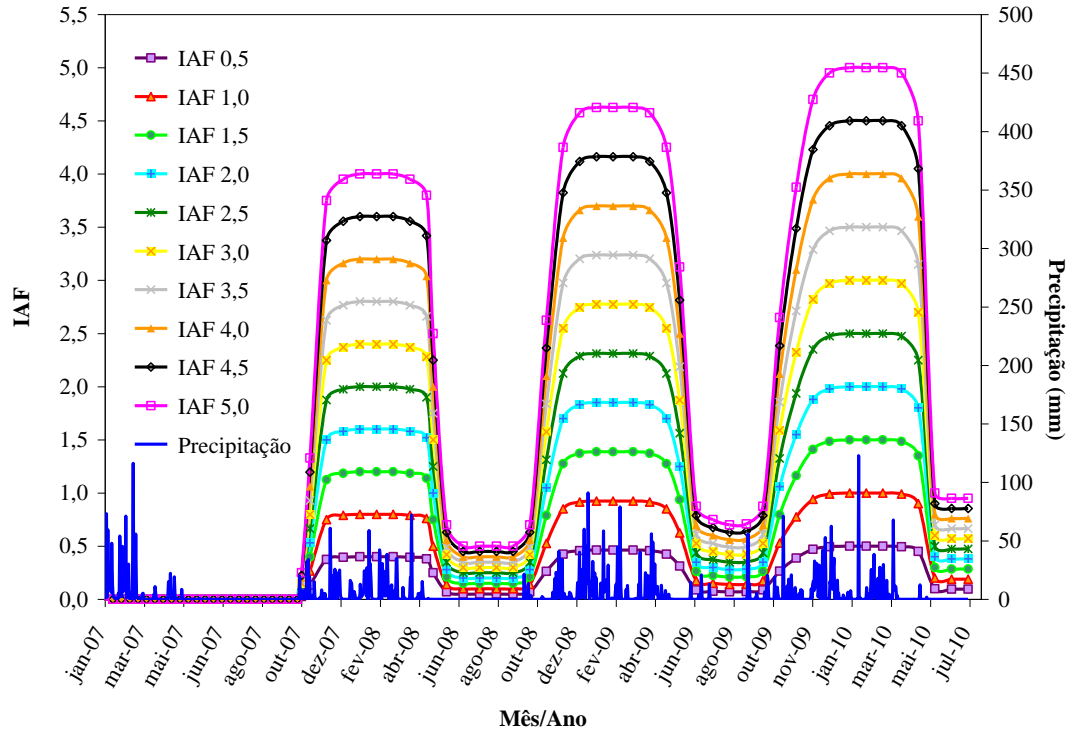


Figura 4.31 – Variação do IAF com um maior decréscimo no período de seca.

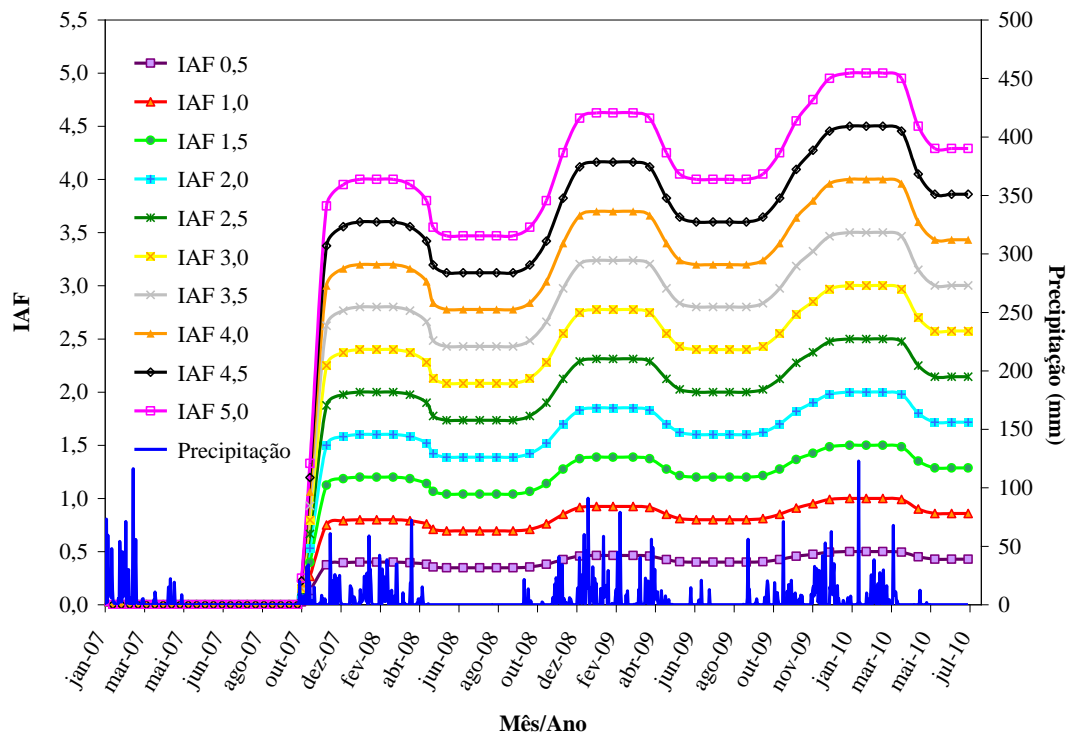


Figura 4.32 – Variação do IAF com um menor decréscimo no período de seca.

- **Profundidade da Raiz**

Uma grande variedade de espécies acabou se instalando no local do experimento, devido à influência das plantas nativas da região próximas ao mesmo. Por isso, ficou difícil mensurar a profundidade das raízes. Logo, estipulou-se 10 valores de profundidades máximas atingidas pelas raízes (5;10; 20; 25; 30; 40; 80; cm) para dois tipos de crescimento (Figuras 4.33 e 4.34), um contínuo durante todo período de análise e outro constante após o fim da germinação. Os demais parâmetros foram os mesmos adotados conforme o item 4.5.3.

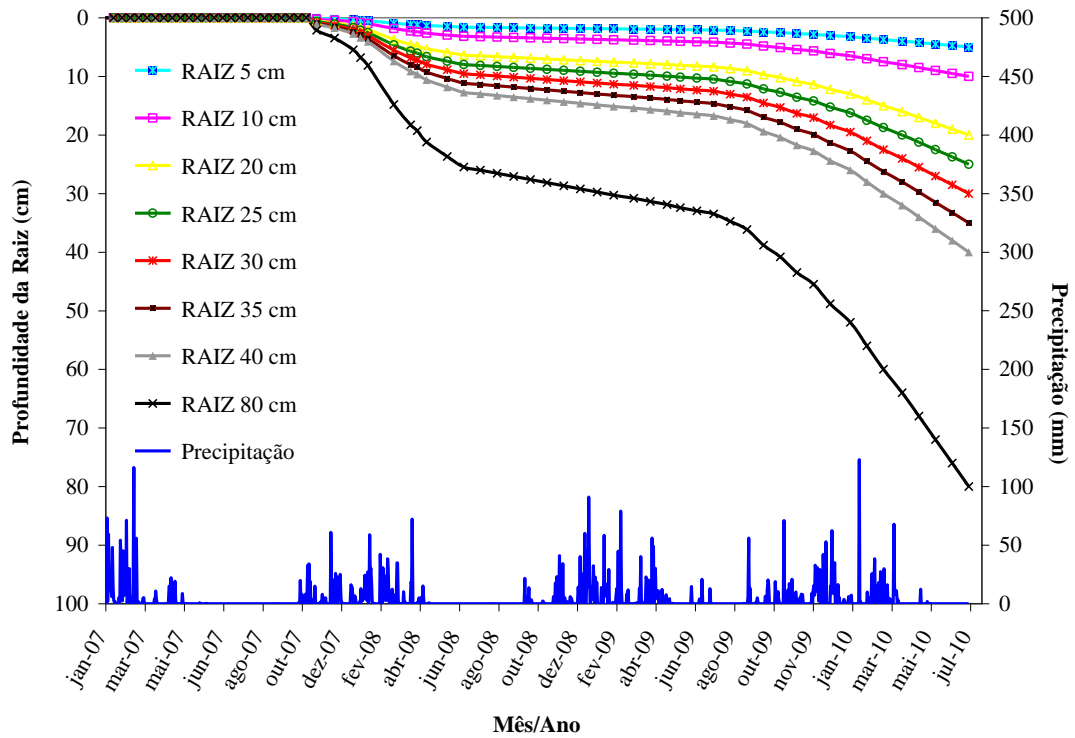


Figura 4.33 – Crescimento contínuo da raiz ao longo do período de análise.

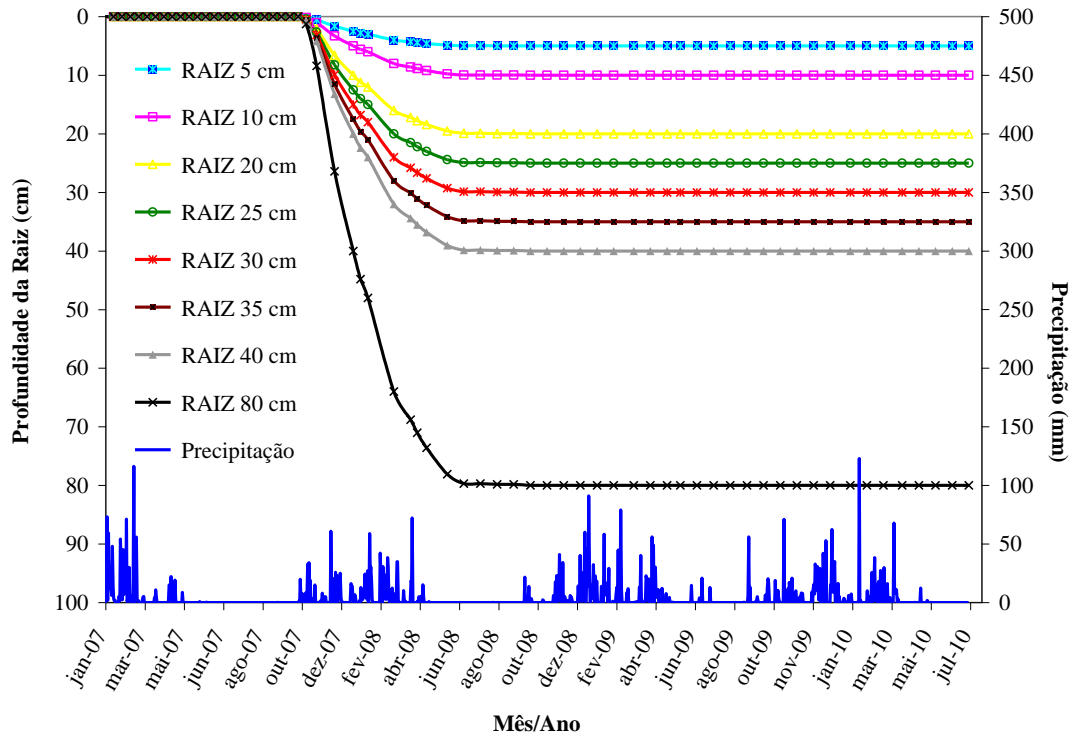


Figura 4.34 – Crescimento contínuo até o fim da germinação e constante no restante do período de análise.

- **Ponto de Murcha**

A falta de disposição de água na planta e/ou a alta demanda evaporativa provoca na maioria das plantas uma reação biológica, que fecha o estoma reduzindo as reações metabólicas (Saxton, 1982). Sob continuada e crescente tensão a planta irá atingir seu ponto de murcha. O ponto de murcha resulta na queda de folhas e morte do tecido (Saxton, 1982). No VADOSE/W o usuário deve entrar com uma função de Umidade Limite da Planta, que determina a redução percentual na capacidade das plantas para extrair a água com o aumento da poro-pressão no solo não-saturado. Uma função típica de Umidade Limite da Planta é dada na Figura 4.35 tirada do banco de dados do VADOSE/W. Nesta função a planta atinge um ponto de murcha referente à sucção de 100 kPa e é completamente incapaz de tirar a água se a sucção atingir 1500 kPa.

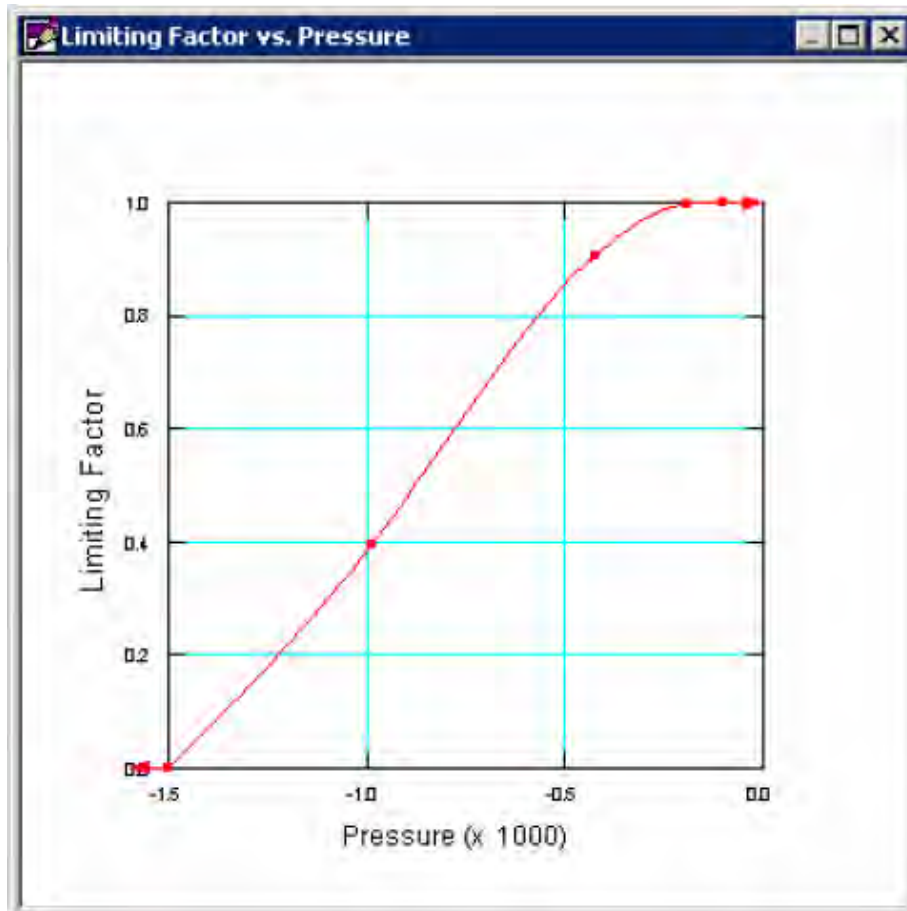


Figura 4.35 – Função de Umidade Limite típica das plantas (VADOSE/W).

Como dito anteriormente, devido à diversidade de espécies que germinaram no local do experimento, fica difícil mensurar os parâmetros vegetais. Logo para o ponto de murcha, foram estipulados 10 valores de sucção em que a planta atinge seu ponto de murcha (25; 50; 100; 200; 300; 400; 500; 650; 800 e 1000 kPa), gerando 10 funções de Umidade Limite da Planta conforme apresentado na Figura 4.36. Os demais parâmetros foram os mesmos adotados conforme o item 4.5.3.

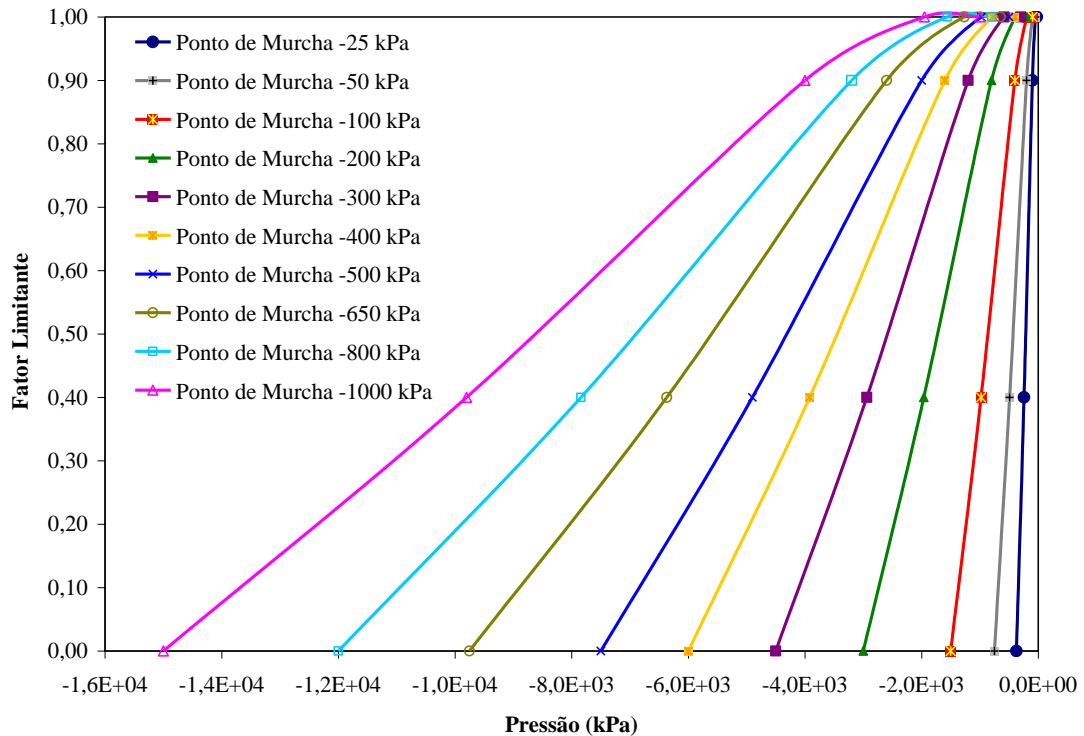


Figura 4.36 – Funções de Umidade Limite estipuladas para a análise paramétrica.

4.5.4.3 – Considerações para a obtenção dos parâmetros térmicos

- **Condutividade Térmica**

Foram estipulados 8 valores de condutividade térmica em $\text{kJ}/(\text{dia.m.}^{\circ}\text{C})$ (10; 20; 40; 80; 160; 280; 350; 500) para todos os solos do sistema de cobertura. Os demais parâmetros foram os mesmos adotados conforme o item 4.5.3.

- **Calor Específico Volumétrico**

Para determinar um valor aproximado do calor específico volumétrico, foram estipulados 8 valores em $\text{kJ}/(\text{m}^3.^{\circ}\text{C})$ (550; 1100; 1650; 2200; 2750; 3300; 3850; 4400) para todos os solos do sistema de cobertura. Os demais parâmetros foram os mesmos adotados conforme o item 4.5.3.

Depois de realizado todas essas análises paramétricas, definiram-se a posição inicial do lençol freático, bem como os melhores parâmetros de entrada, com base nos valores do menor erro relativo médio encontrado.

Definido esses parâmetros, procedeu-se as comparações entre os resultados obtidos com os modelos uni e bi-dimensionais propostos e os dados de campo.

Os resultados das análises paramétricas, bem como as comparações e informações geradas por estes estão apresentados no próximo capítulo.

5- APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios de laboratório (ensaios de caracterização, permeabilidade saturada e parâmetros de ajuste da curva de retenção) para os solos utilizados nos sistemas de cobertura, as curvas de calibração dos medidores de umidade WCR e dos medidores de sucção HDU, bem como as variações de umidade volumétrica e sucção com o tempo, obtidas através da leitura desses instrumentos. Também são apresentados os resultados obtidos com as análises paramétricas e conseqüentemente os parâmetros usados nos dois modelos propostos. Por fim, são apresentadas as comparações dos resultados obtidos nas análises numéricas com os dados de campo para os dois sistemas de cobertura do experimento construído por Amorim (2008).

5.1 – Resultado dos Ensaio de Laboratório

Na Tabela 5.1 são apresentados os valores das massas específicas dos sólidos, dos índices de vazios, dos Limites de Atterberg e dos coeficientes de permeabilidade saturada, dos solos componentes do experimento obtidos em laboratório e do material rejeito cujos valores foram obtidos em trabalho anterior realizado para a RPM por Azevedo (2003).

Na Tabela 5.2 são apresentados os parâmetros do modelo de Fredlund & Xing (1994) para o ajuste das curvas de retenção de água no solo com base nos dados obtidos pelo método do papel filtro.

Tabela 5.1 – Massa específica, Índice de Vazios, Limites de Atterberg e Condutividade Hidráulica dos materiais das coberturas

Solo	γ_s (g/cm ³)	e	LL (%)	LP (%)	K_s (cm/s)
Superficial	2,867	0,80	28,14	20,56	$8,45 \times 10^{-06}$
Siltoso	2,754	0,98	45,00	26,30	$1,62 \times 10^{-05}$
Argiloso (Barreira Hidráulica)	2,807	0,87	55,60	34,30	$1,15 \times 10^{-06}$
Granular (Barreira Capilar)	2,669	0,85	Não Plástico	Não Plástico	$7,91 \times 10^{-03}$
Fundação (Trafegabilidade)	2,731	0,72	34,20	21,70	$5,32 \times 10^{-06}$
Rejeito	2,822	0,91	37,95	21,07	$5,28 \times 10^{-05}$

Tabela 5.2 – Parâmetros de ajuste das curvas de retenção de água no solo pelo modelo de Fredlund & Xing (1994).

Solo	Parâmetros			
	a	m	n	θ_s
Superficial	3225,20	3,78	0,388	0,44
Siltoso	312,68	2,16	0,386	0,50
Argiloso	8981,70	1,19	4,299	0,47
Barreira Capilar	140,04	2,70	0,327	0,46
Fundação	7,70E+06	3,70E+05	1,325	0,42
Rejeito	7,66E+06	1,43E+03	0,686	0,48

5.2 – Resultados de Campo

As Figuras 5.1 e 5.2, representam esquematicamente os perfis dos sistemas de cobertura 1 e 2, respectivamente, com as quais é possível notar o posicionamento

dos medidores de umidade (WCRs) e de sucção (HDUs) nos diversos solos da cobertura, facilitando assim, uma melhor compreensão das figuras apresentadas posteriormente.

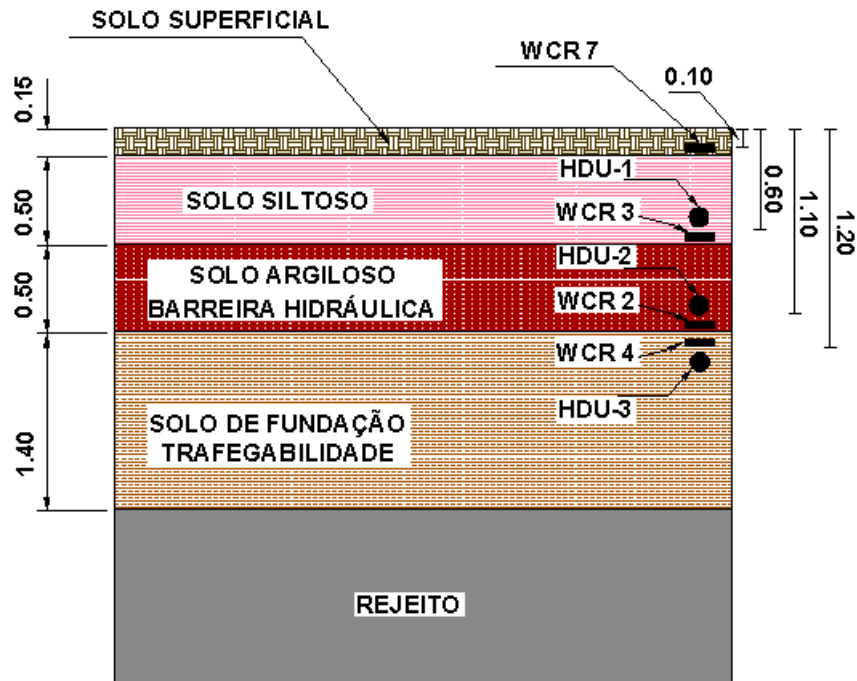


Figura 5.1 – Perfil esquemático do sistema de cobertura 1 com a posição dos instrumentos.

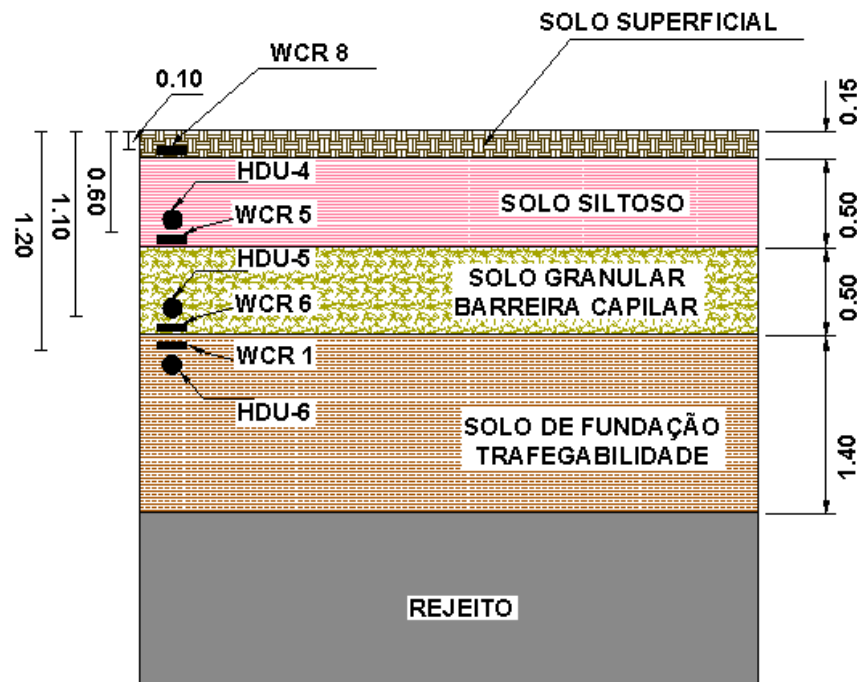


Figura 5.2 – Perfil esquemático do sistema de cobertura 2 com a posição dos instrumentos.

Os WCRs foram calibrados no campo conforme procedimento descrito no item 4.3.2.1. As Figuras 5.3 a 5.10 apresentam os pontos obtidos no campo e as retas de ajuste. Observa-se que os ajustes são na maioria muito bons, apenas dois tiveram coeficiente de correlação pouco abaixo de 0.95, os demais foram maiores que 0.97. Assim sendo, estas retas foram consideradas como as novas curvas de calibração destes instrumentos.

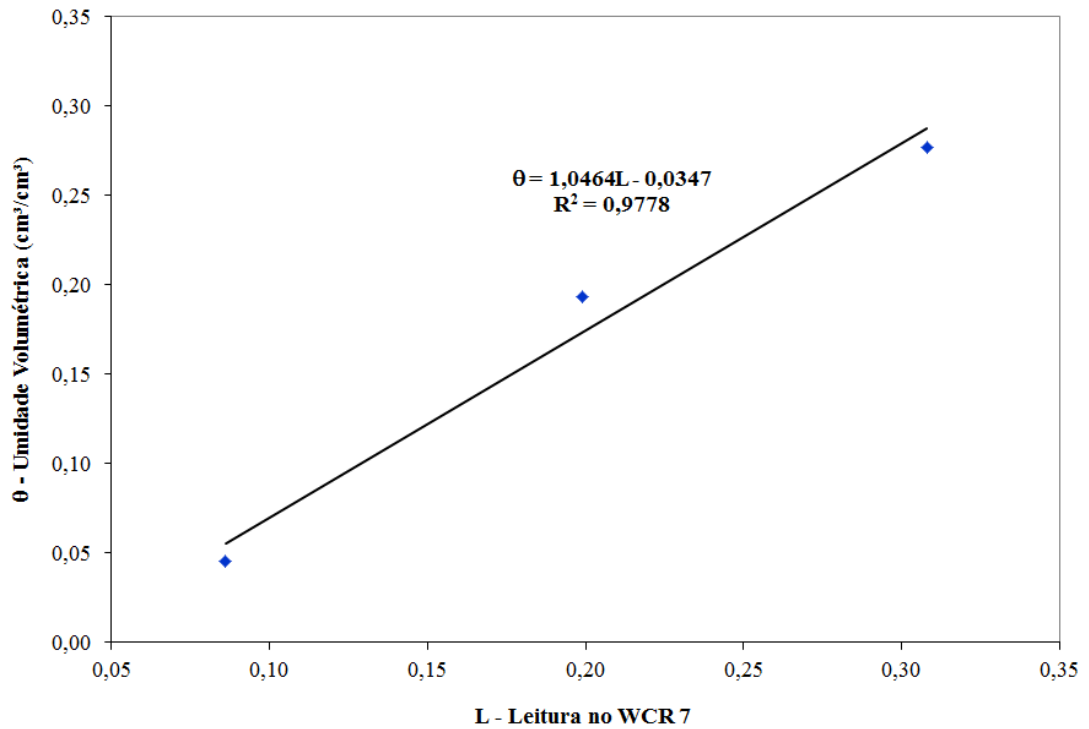


Figura 5.3 – Curva de Calibração para o WCR 7 (Solo Superficial – Sistema de Cobertura 1).

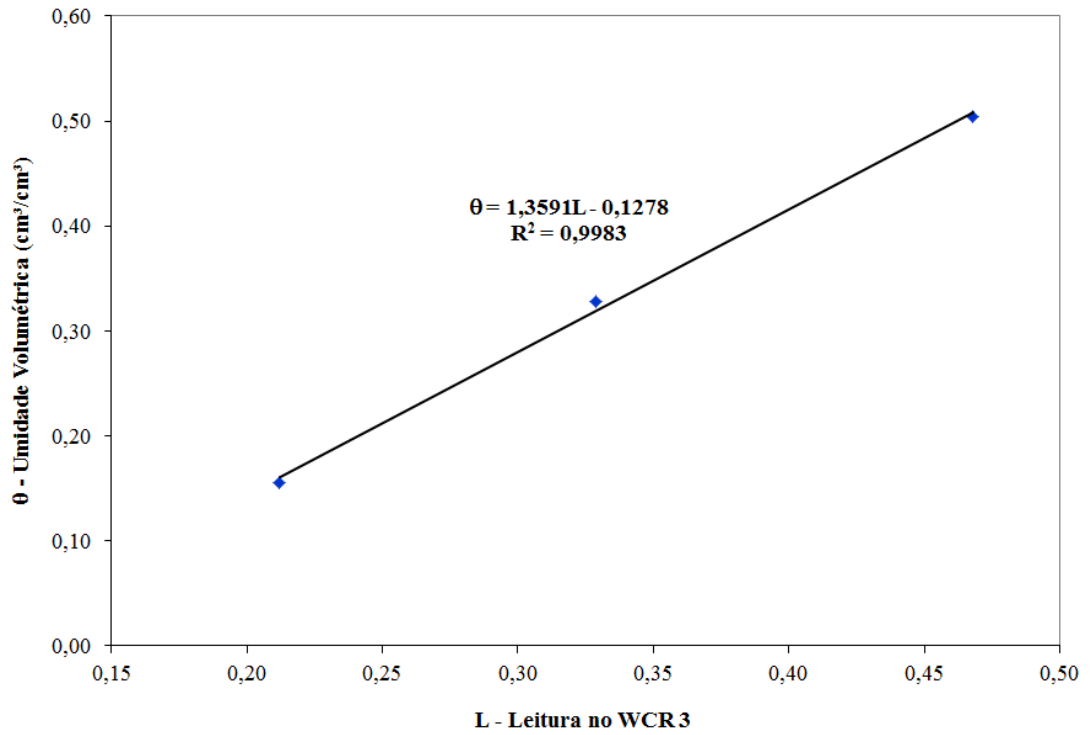


Figura 5.4 – Curva de Calibração para o WCR 3 (Solo Siltoso – Sistema de Cobertura 1).

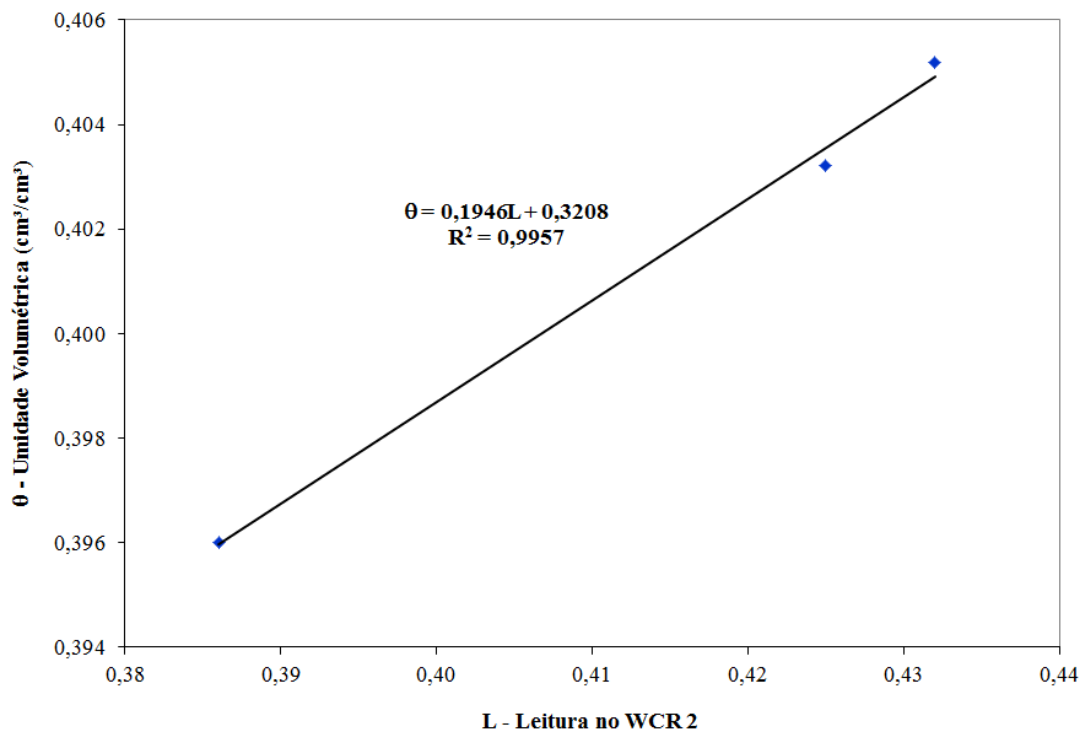


Figura 5.5 – Curva de Calibração para o WCR 2 (Solo Argiloso – Sistema de Cobertura 1).

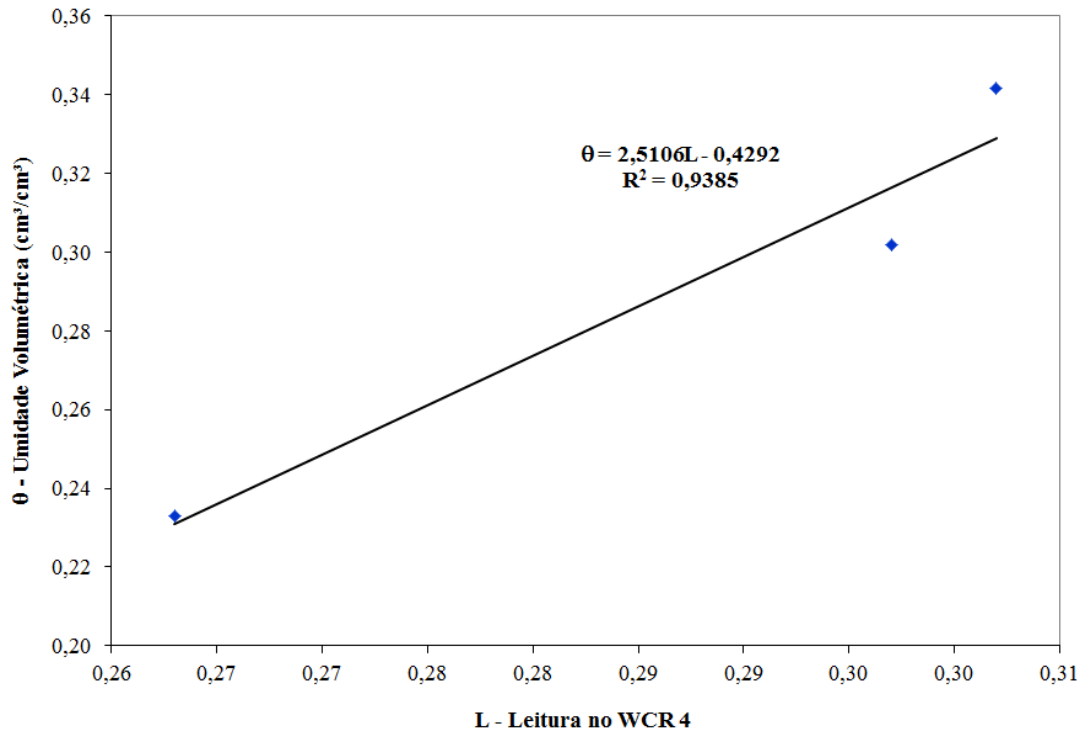


Figura 5.6 – Curva de Calibração para o WCR 4 (Solo de Fundação – Sistema de Cobertura 1).

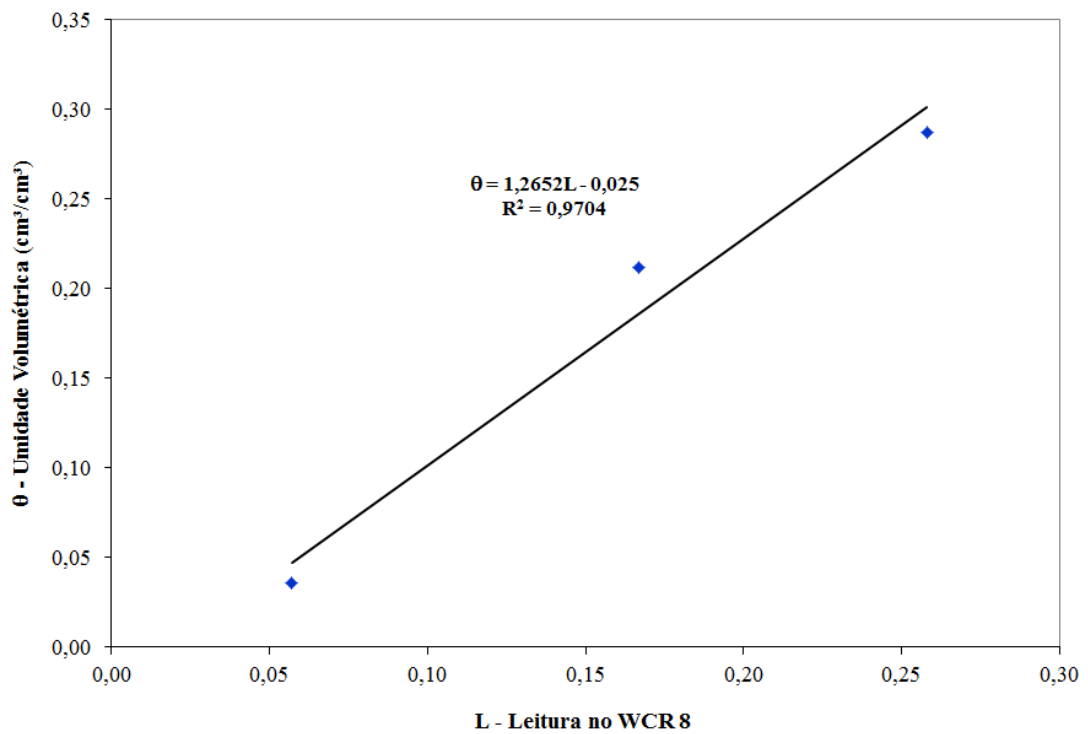


Figura 5.7 – Curva de Calibração para o WCR 8 (Solo Superficial – Sistema de Cobertura 2).

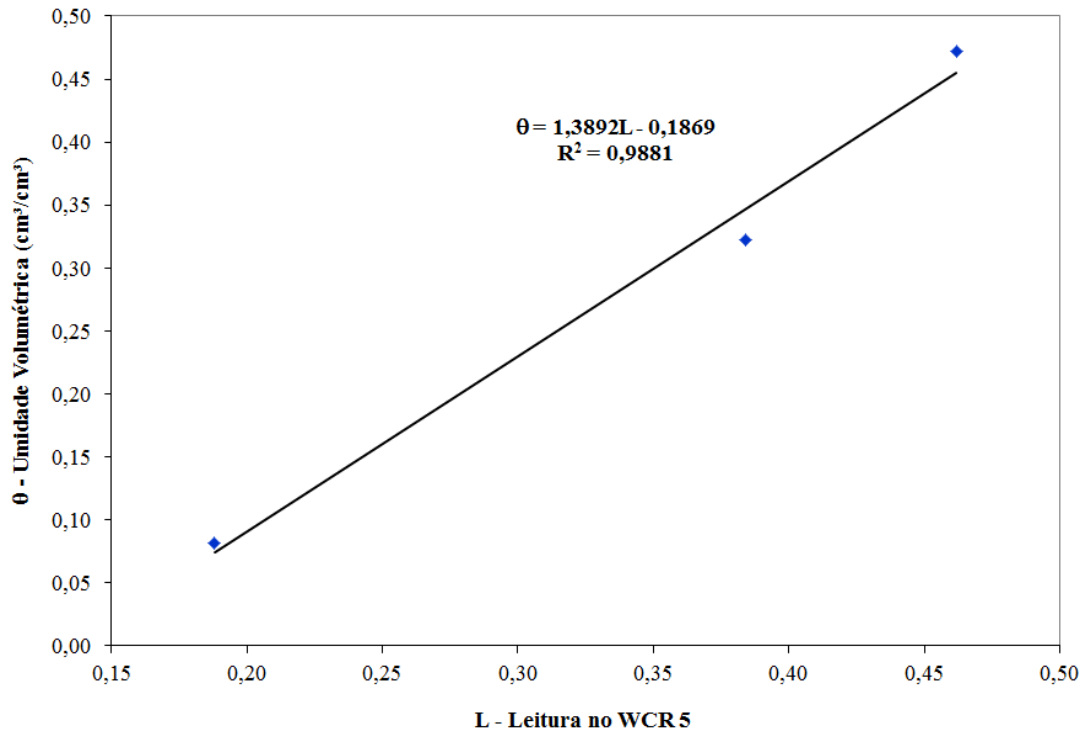


Figura 5.8 – Curva de Calibração para o WCR 5 (Solo Siltoso – Sistema de Cobertura 2).

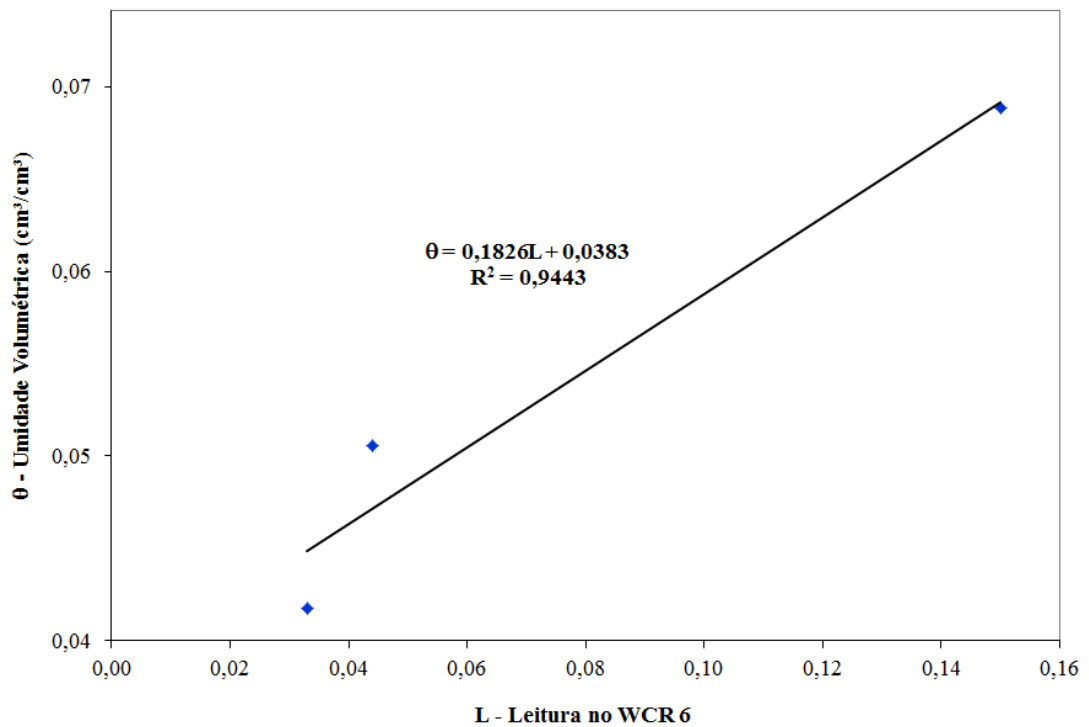


Figura 5.9 – Curva de Calibração para o WCR 6 (Solo Granular – Sistema de Cobertura 2).

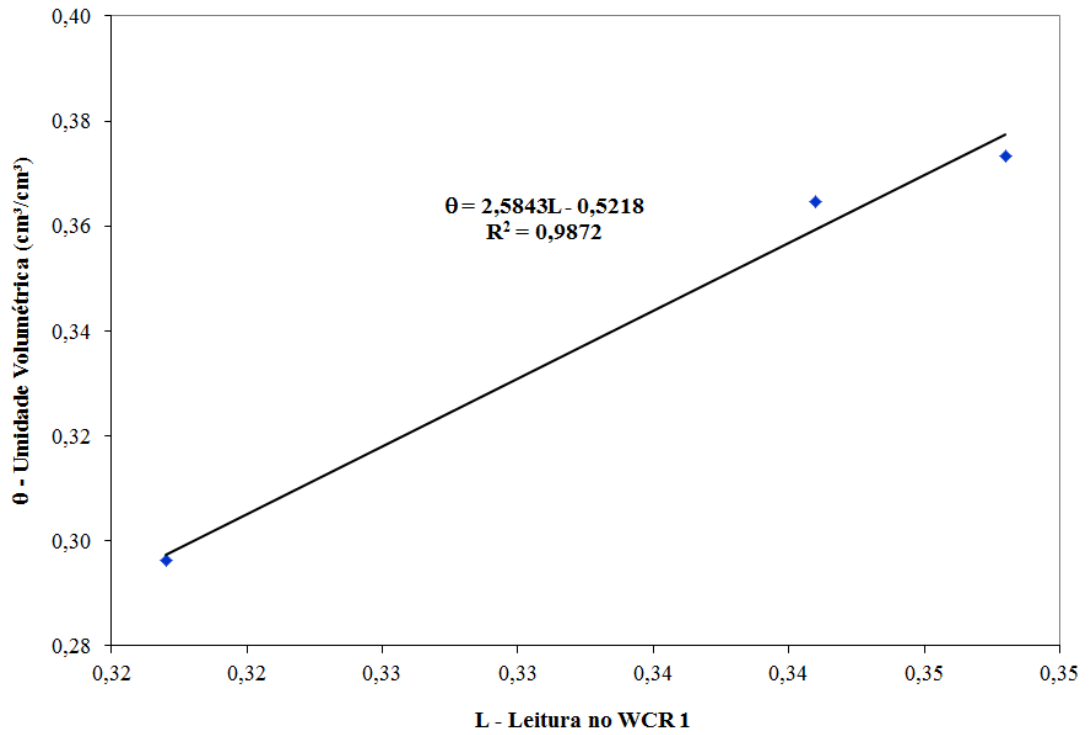


Figura 5.10 – Curva de Calibração para o WCR 1 (Solo de Fundação – Sistema de Cobertura 2).

Com base nas novas curvas de calibração obtidas para os WCRs, calculou-se a umidade volumétrica para as diversas camadas de solo no período de Junho de 2007 a Julho de 2010. Nas Figuras 5.11 e 5.12 são apresentadas as variações de umidade volumétrica com o tempo para os dois sistemas de cobertura.

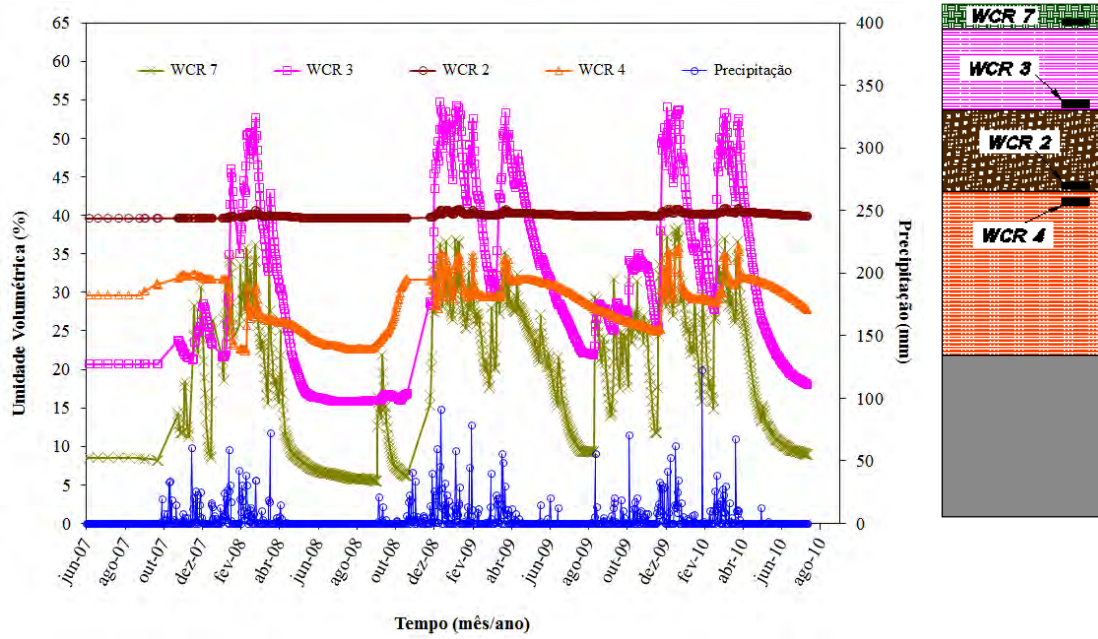


Figura 5.11 – Variação da Umidade Volumétrica obtida com a leitura dos WCRs do Sistema de Cobertura 1.

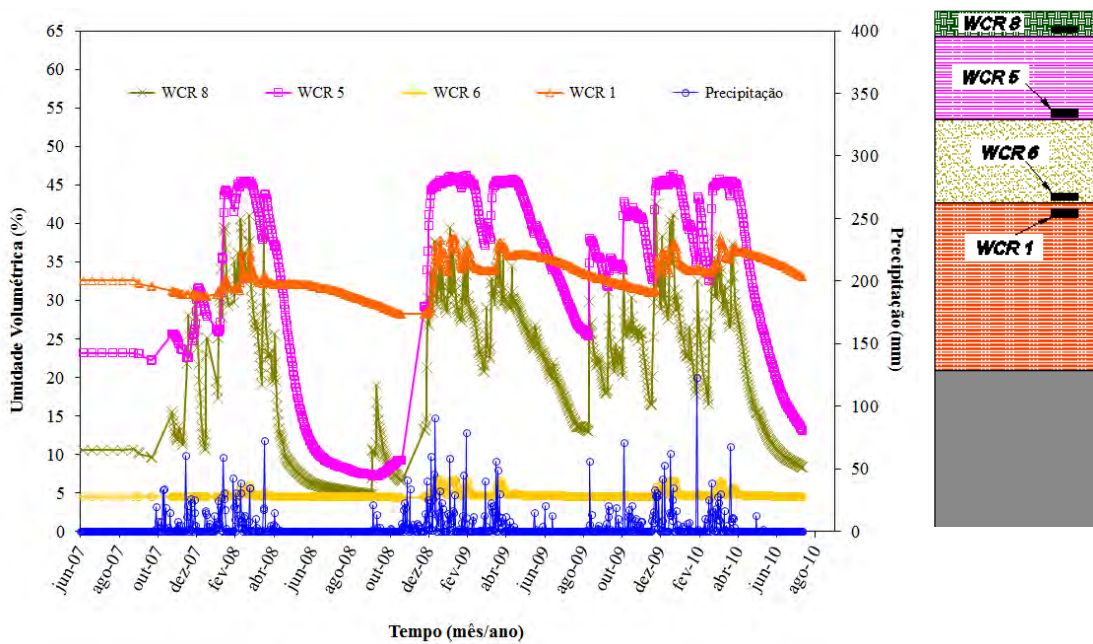


Figura 5.12 – Variação da Umidade Volumétrica obtida com a leitura dos WCRs do Sistema de Cobertura 2.

Conforme se pode observar nas Figuras 5.11 e 5.12, há uma maior variação na umidade volumétrica para as camadas mais próximas a superfície (WCR 7, 8, 3 e 5), sendo que tanto para a Barreira Hidráulica (solo argiloso - WCR 2) quanto para a Barreira Capilar (solo arenoso - WCR 6) as variações das umidades volumétricas não foram significativas, o que mostra o bom funcionamento da camada de

“armazenamento e liberação” (solo siltoso – WCRs 3 e 5) em ambos sistemas de cobertura.

Como relatado anteriormente, Amorim (2008) calibrou os medidores de umidade (WCR) em um laboratório na RPM, antes deles serem instalados nos sistemas de cobertura. As Figuras 5.13 a 5.20 comparam para cada camada dos sistemas de cobertura, as umidades volumétricas medidas no campo com a calibração feita por Amorim (2008) com as obtidas pela calibração no campo feita na presente Tese. Como será possível observar mais adiante, quando forem apresentadas as comparações entre esses resultados de campo e os obtidos com o modelo numérico, as novas calibrações, invariavelmente, melhoraram estas comparações.

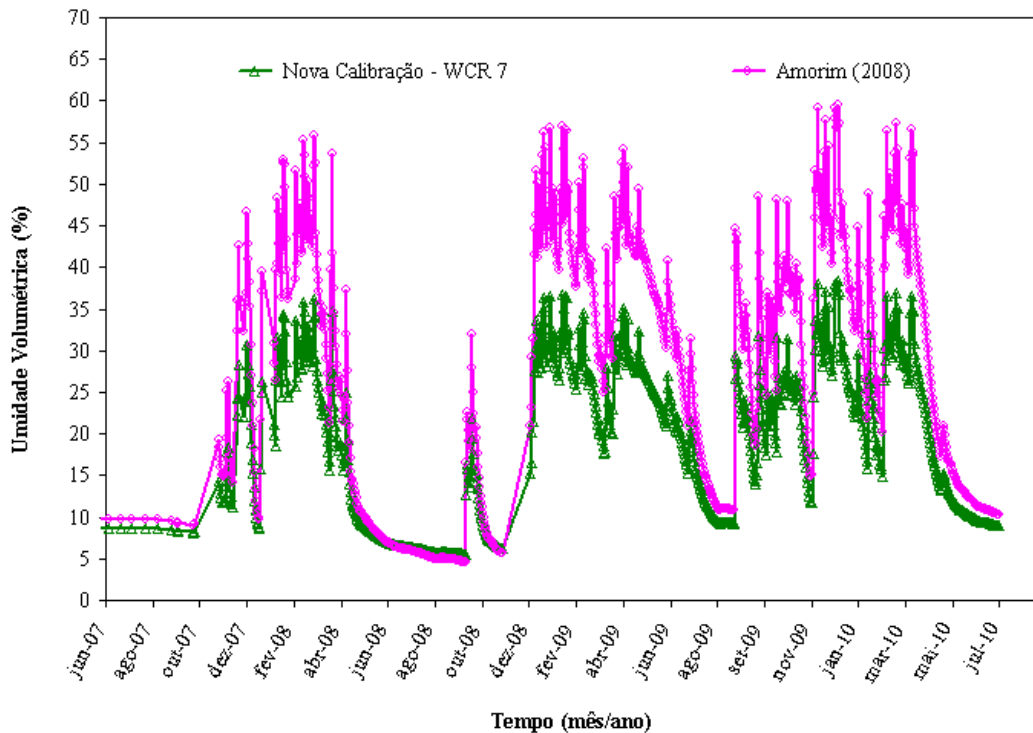


Figura 5.13 – Comparação com a calibração feita por Amorim (2008) para a camada de Solo Superficial (WCR 7).

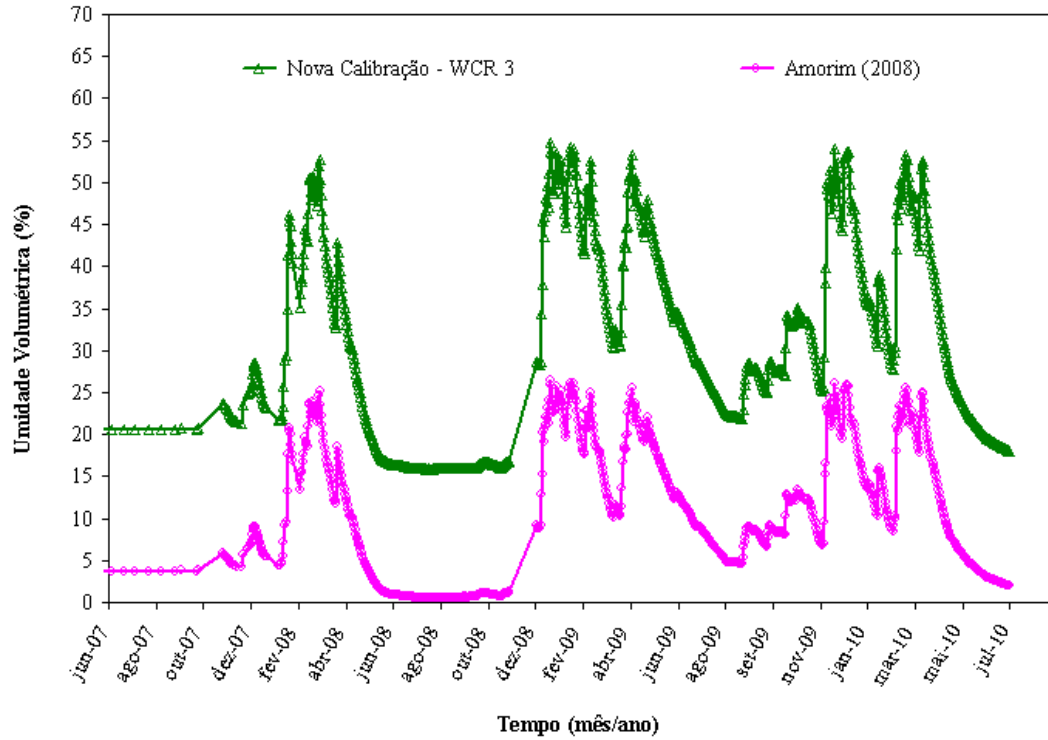


Figura 5.14 – Comparação com a calibração feita por Amorim (2008) para a camada de Solo Siltoso (WCR 3).

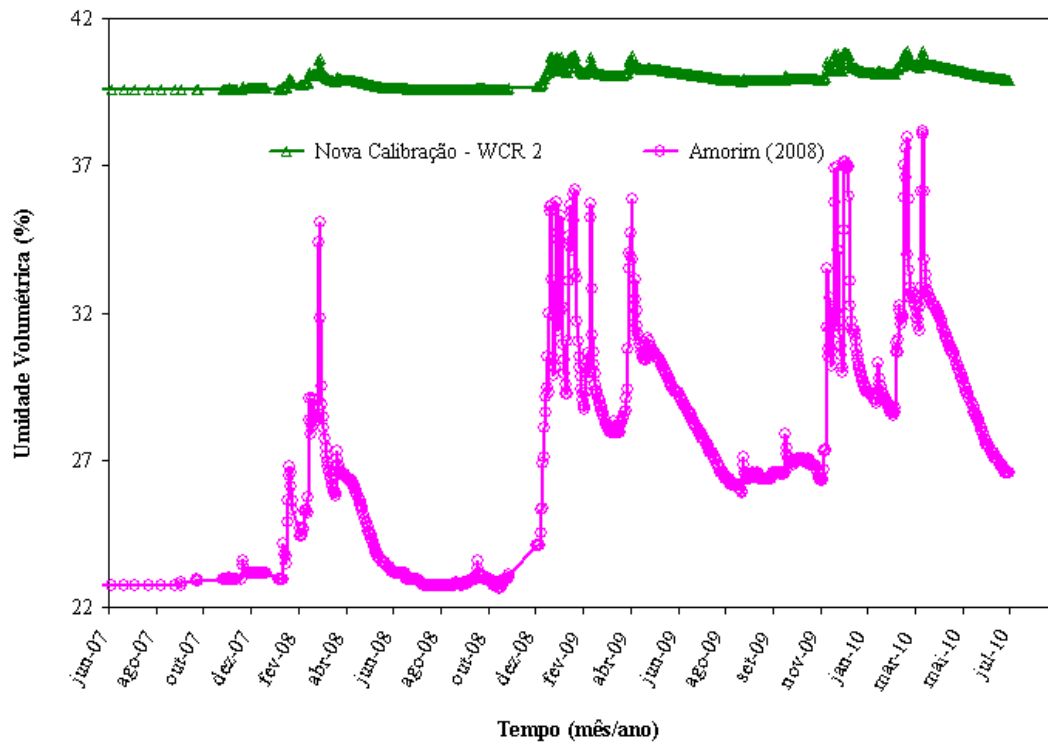


Figura 5.15 – Comparação com a calibração feita por Amorim (2008) para a camada de Solo Argiloso (WCR 2).

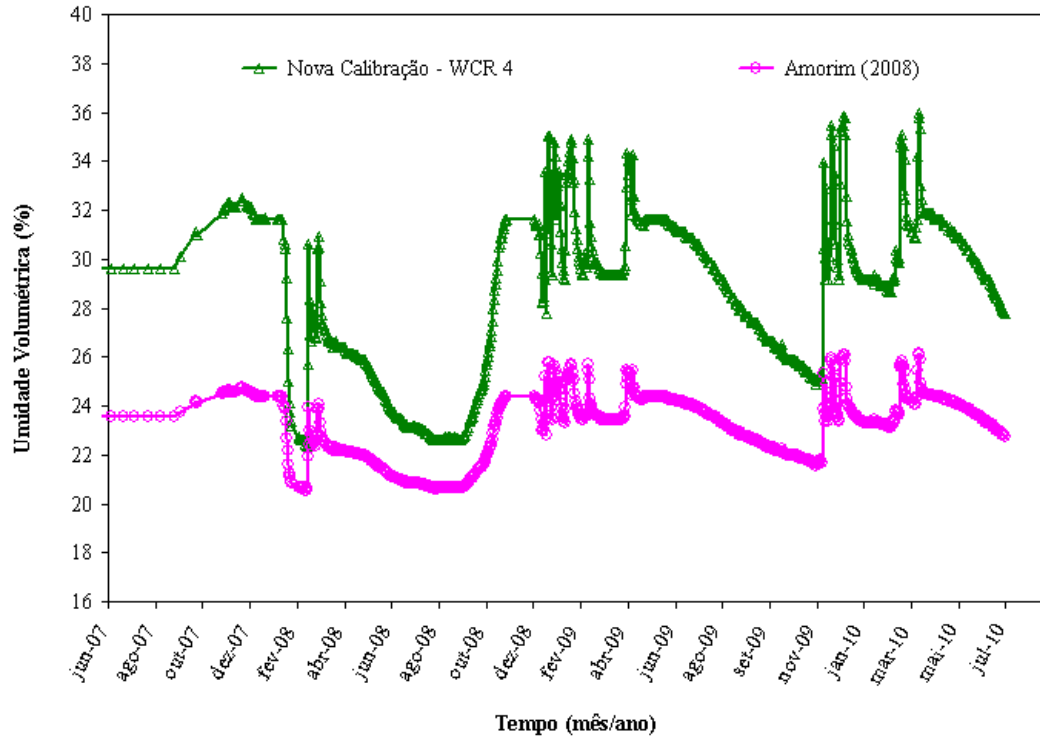


Figura 5.16 – Comparação com a calibração feita por Amorim (2008) para a camada de Solo de Fundação (WCR 4).

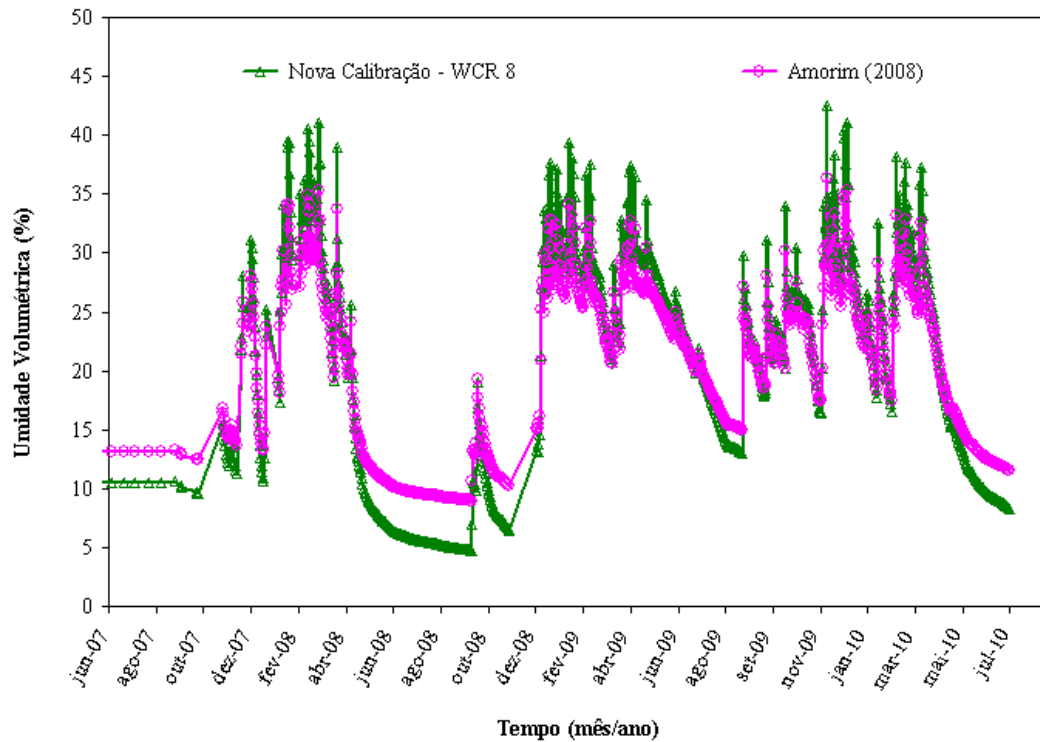


Figura 5.17 – Comparação com a calibração feita por Amorim (2008) para a camada de Solo Superficial (WCR 8).

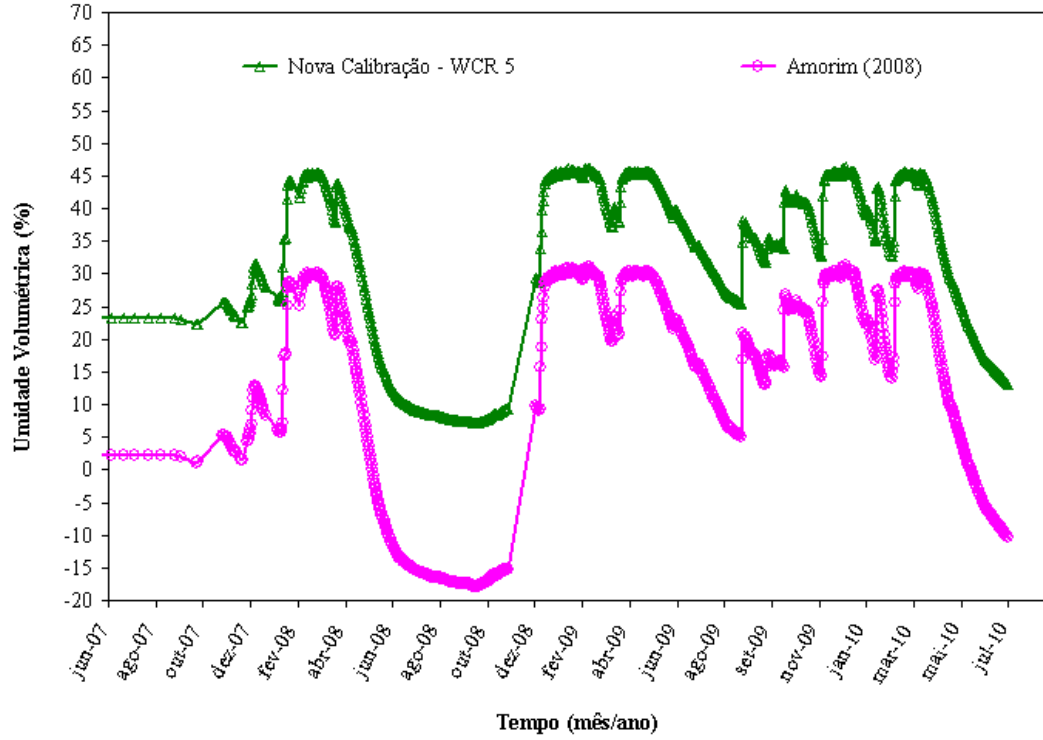


Figura 5.18 – Comparação com a calibração feita por Amorim (2008) para a camada de Solo Siltoso (WCR 5).

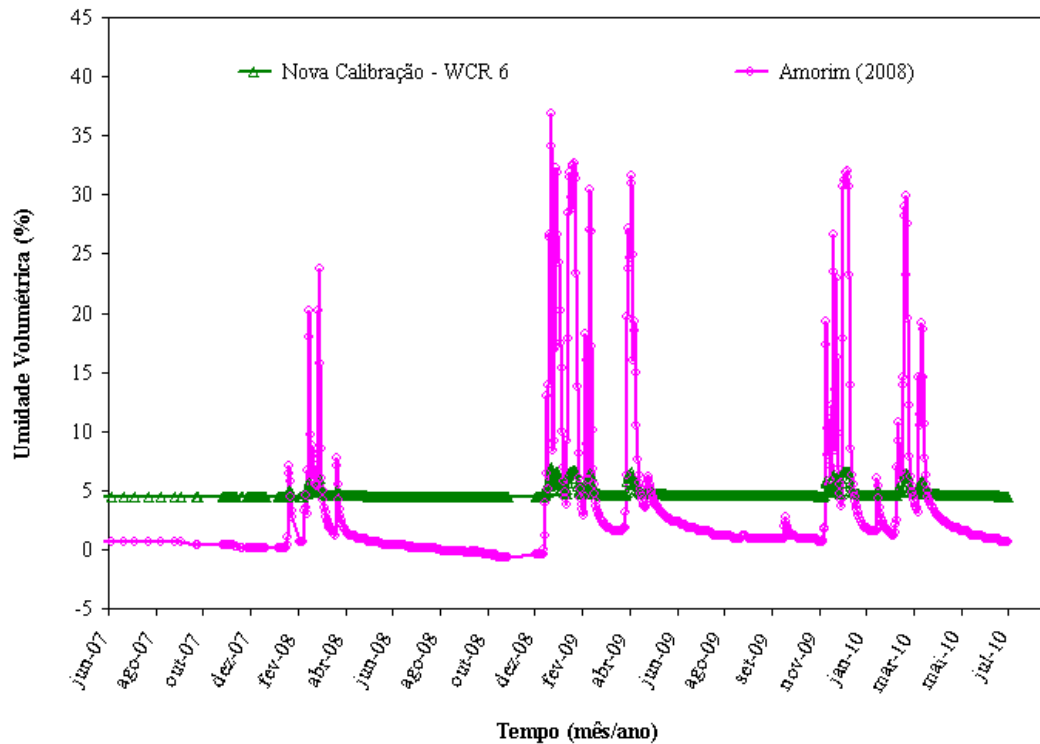


Figura 5.19 – Comparação com a calibração feita por Amorim (2008) para a camada de Solo Granular (WCR 6).

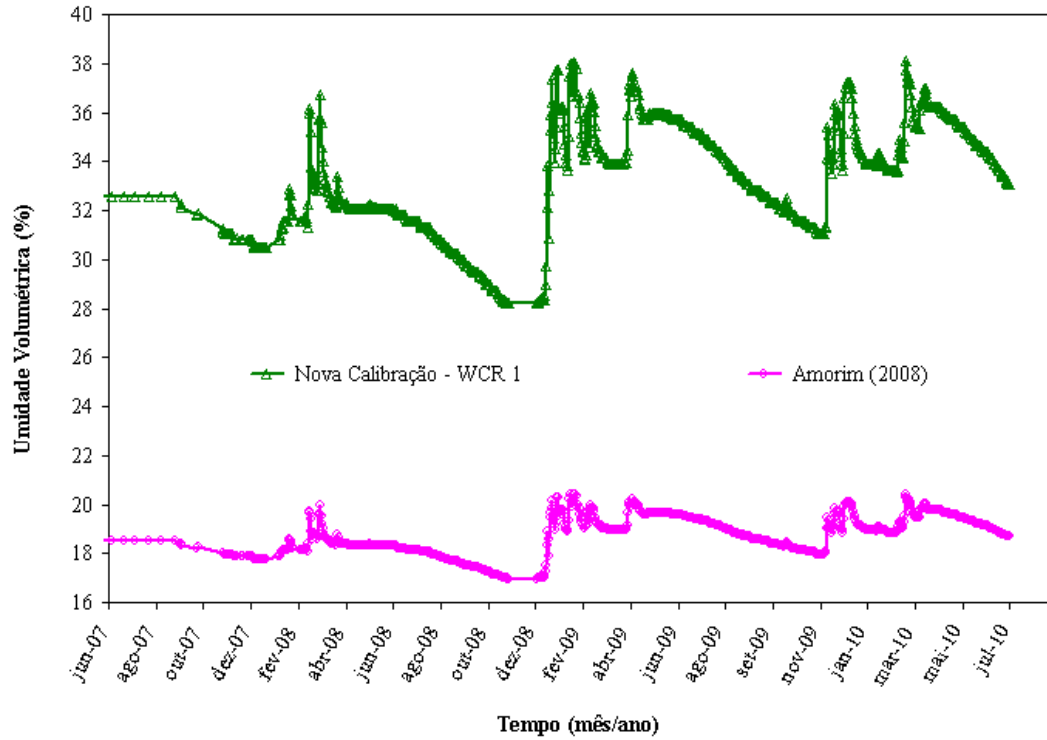


Figura 5.20 – Comparação com a calibração feita por Amorim (2008) para a camada de Solo de Fundação (WCR 1).

As Figuras 5.21 a 5.26 representam os pontos que serviram para a calibração dos HDUs conforme procedimento descrito no item 4.3.3.1. Nas Figuras mostram-se, também, as retas de ajuste obtidas por regressão linear. Observa-se que os coeficientes de correlação não foram tão bons quanto os obtidos no procedimento de calibração dos medidores de umidade, mesmo assim, só um coeficiente ficou abaixo de 0.92. As retas de ajuste foram, então, consideradas as curvas de calibração destes instrumentos, com as quais se obteve as variações da sucção com o tempo para os dois sistemas de cobertura apresentadas nas Figuras 5.27 e 5.28.

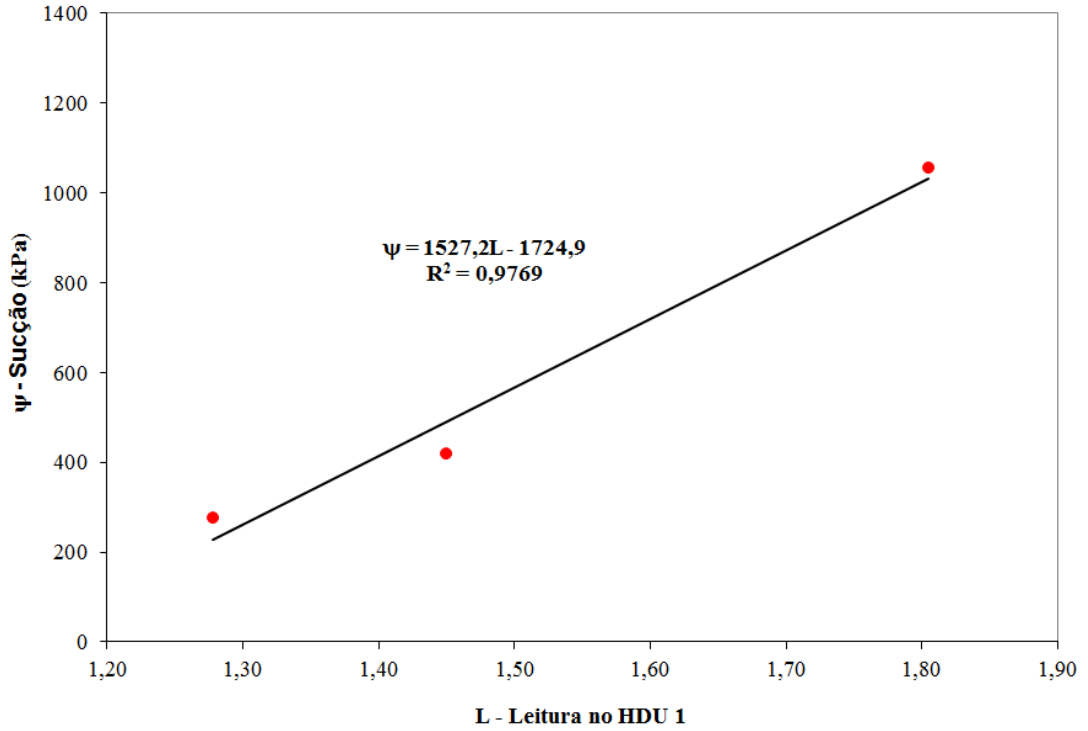


Figura 5.21 – Curva de Calibração para o HDU 1 (Solo Siltoso – Sistema de Cobertura 1).

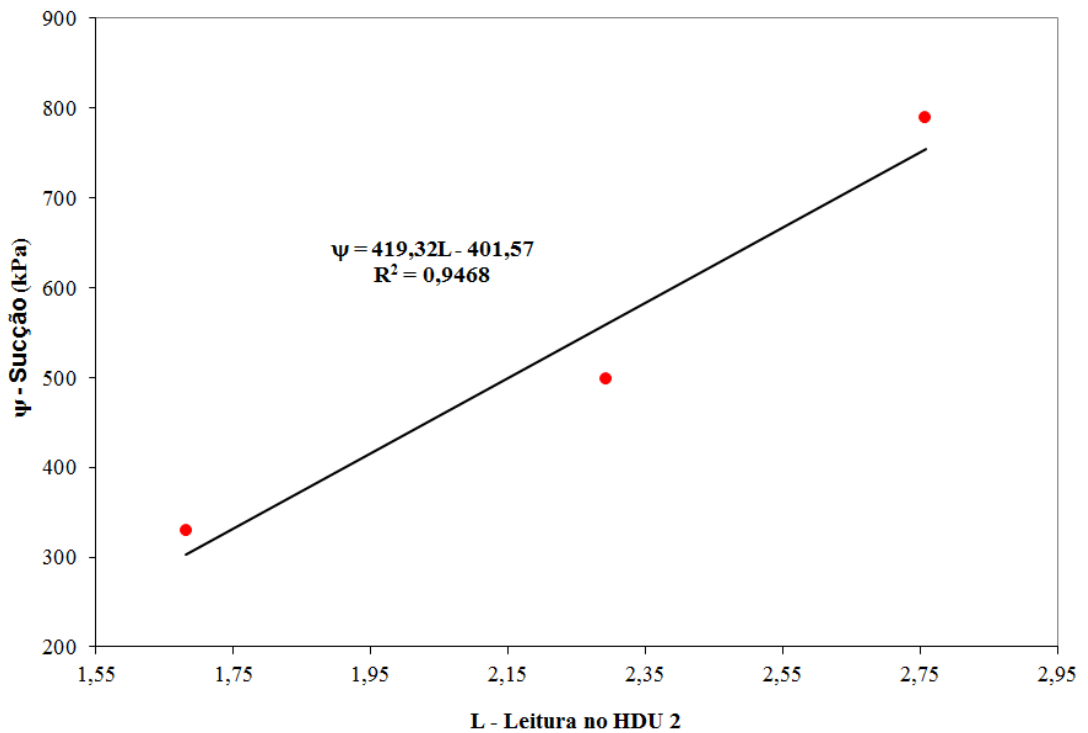


Figura 5.22 – Curva de Calibração para o HDU 2 (Solo Argiloso – Sistema de Cobertura 1).

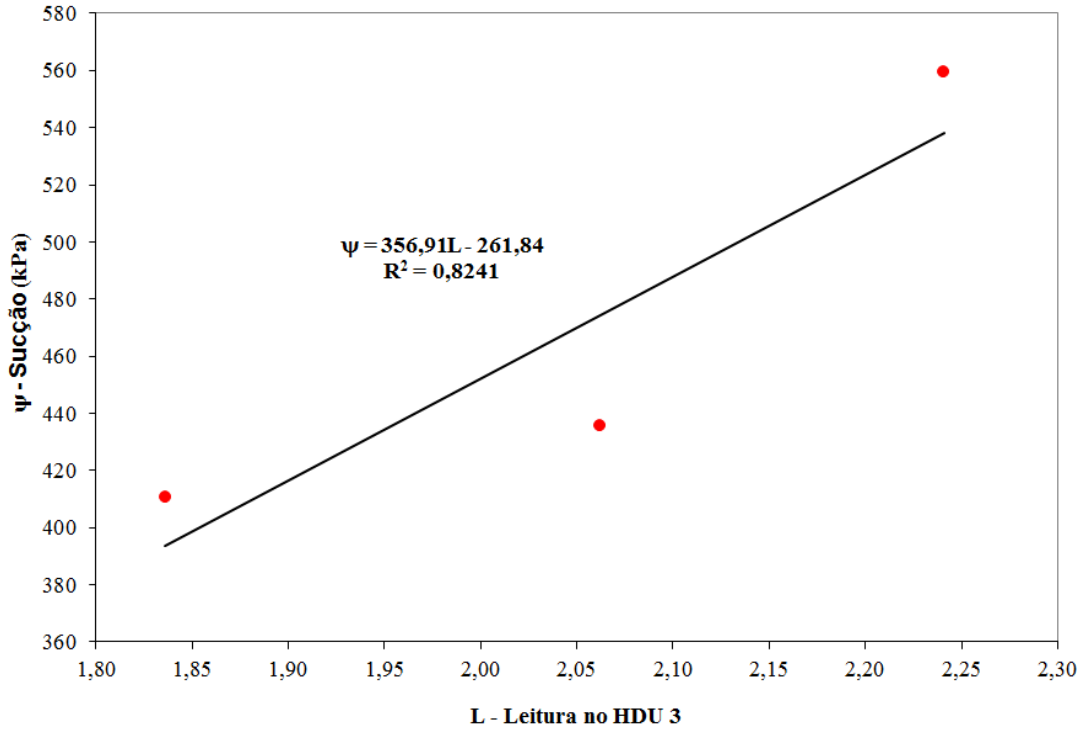


Figura 5.23 – Curva de Calibração para o HDU 3 (Solo de Fundação – Sistema de Cobertura 1).

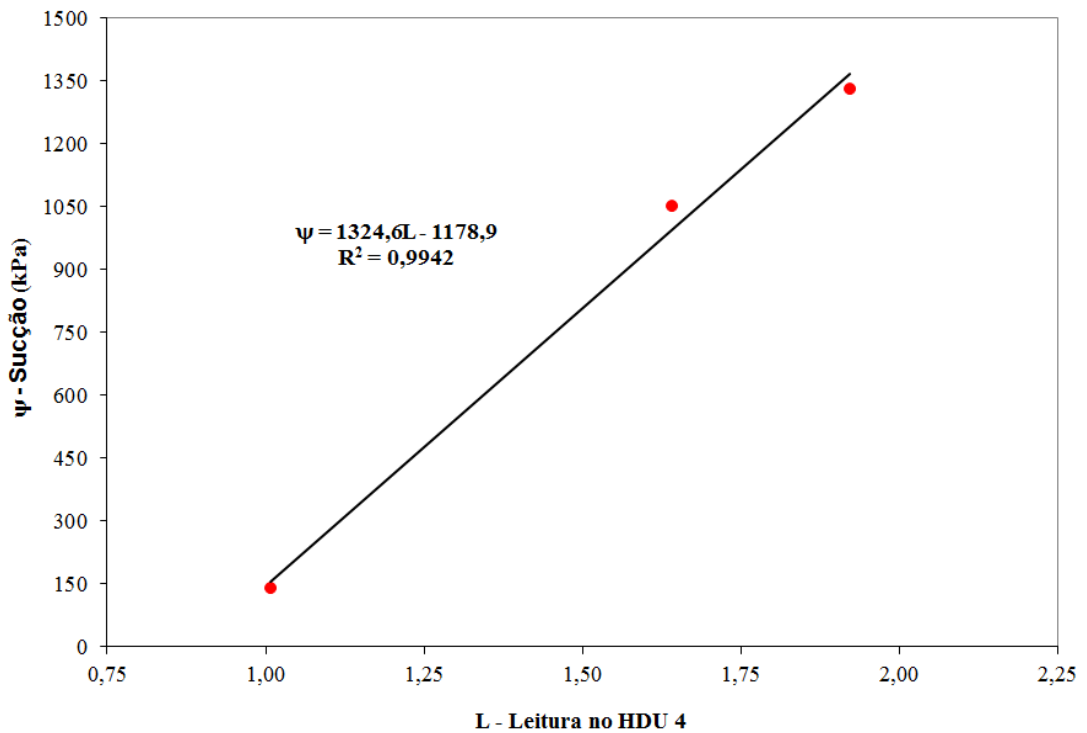


Figura 5.24 – Curva de Calibração para o HDU 4 (Solo Superficial – Sistema de Cobertura 2).

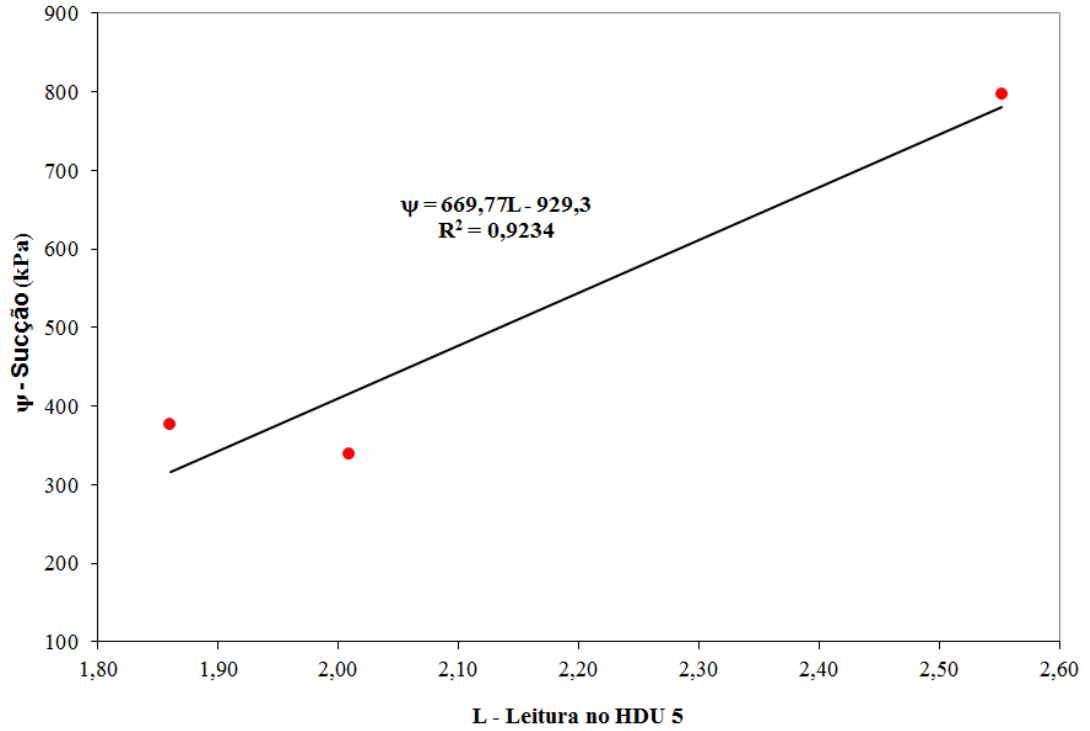


Figura 5.25 – Curva de Calibração para o HDU 5 (Solo Granular – Sistema de Cobertura 2).

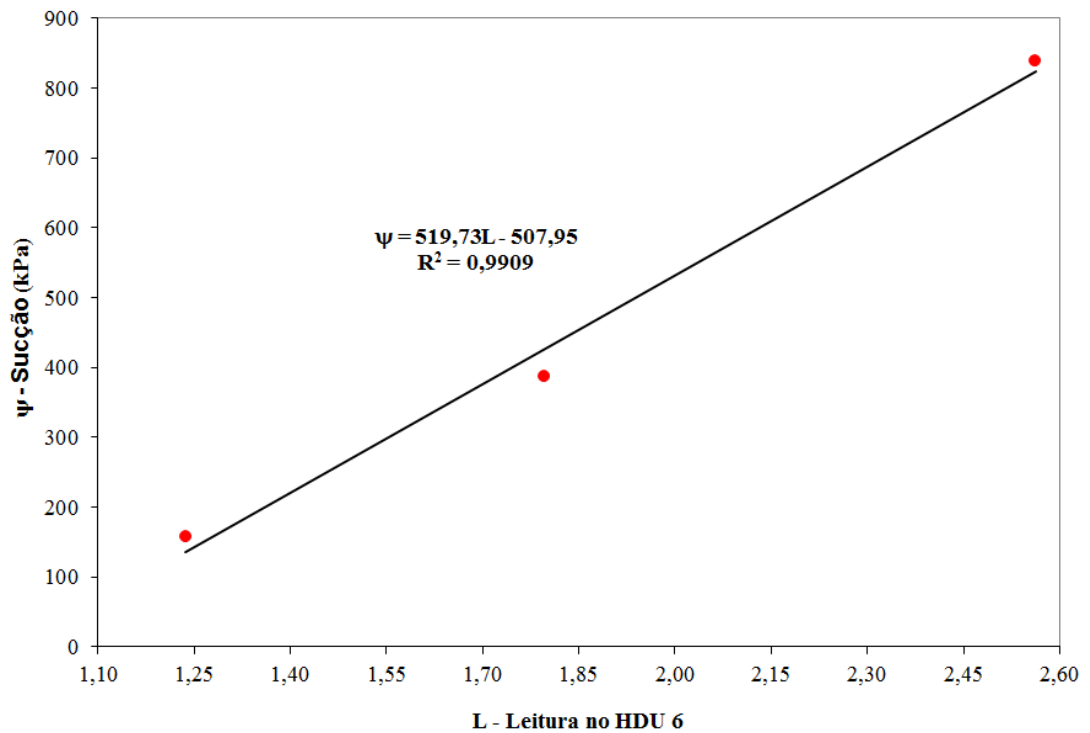


Figura 5.26 – Curva de Calibração para o HDU 6 (Solo de Fundação – Sistema de Cobertura 2).

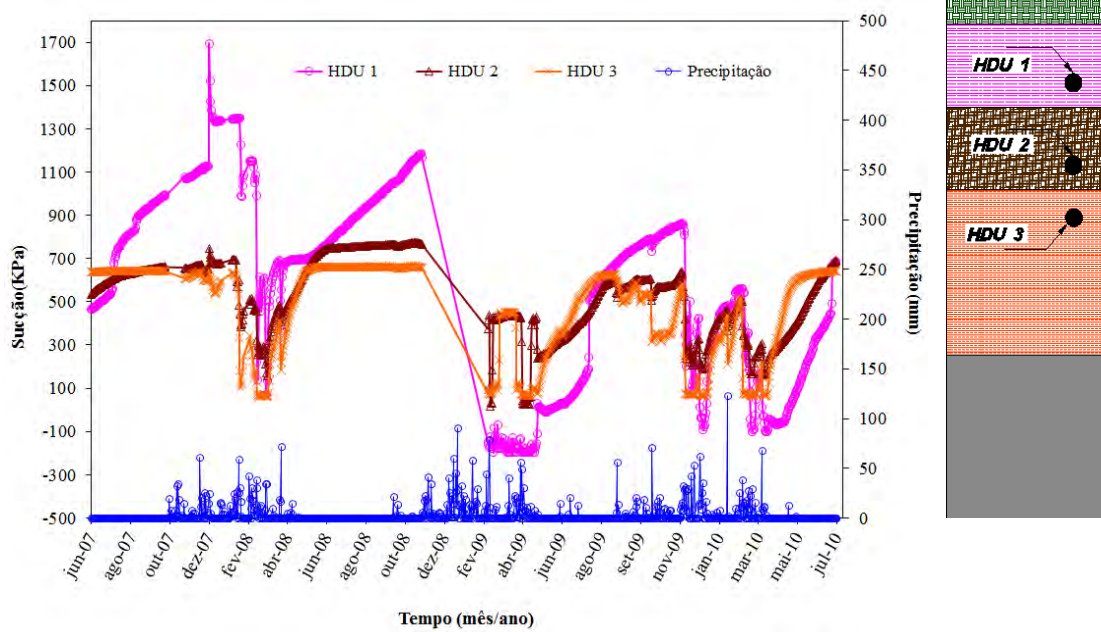


Figura 5.27 – Variação da Sucção Matricial obtida com a leitura dos HDUs do Sistema de Cobertura 1.

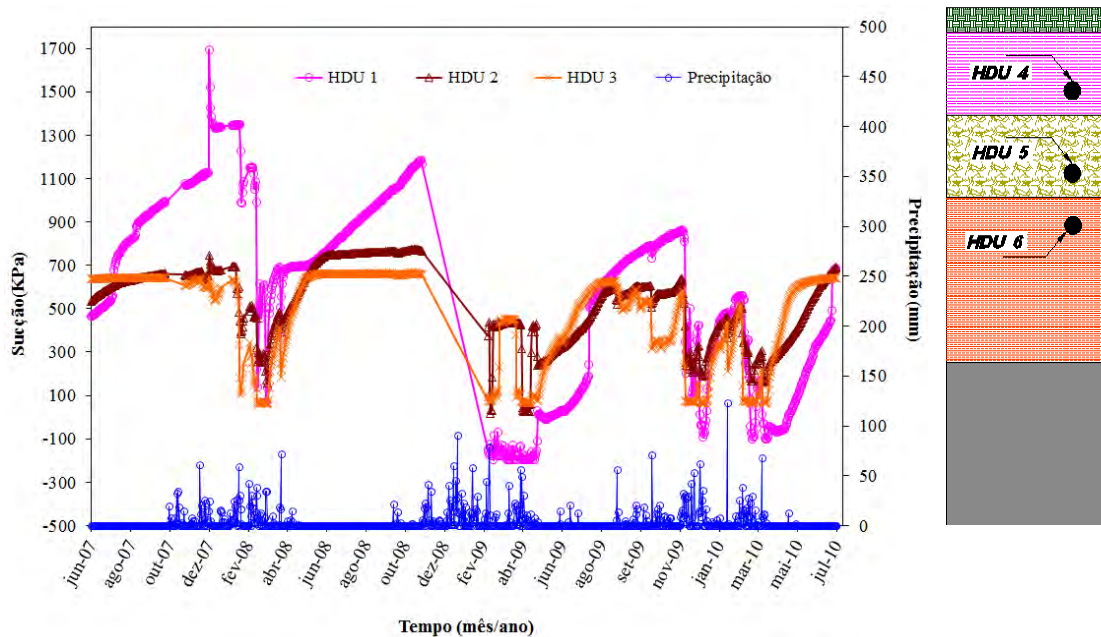


Figura 5.28 – Variação da Sucção Matricial obtida com a leitura dos HDUs do Sistema de Cobertura 2.

Em relação ao escoamento superficial medido no campo, as mesmas dificuldades encontradas por Amorim (2008) aconteceram no presente trabalho. A água que escoava pela cobertura e chegava à caixa coletora de concreto arrastava muitos sedimentos, impossibilitando a passagem pelos hidrômetros, o que levou a desativação destes.

O volume de água que passou pelas coberturas e foi coletado pelos lisímetros não serão apresentados nesta Tese por dois motivos. Primeiro, porque no primeiro ano desconfiou-se que os lisímetros estavam coletando água do lençol freático por falta de maior limpeza e rebaixamento do canal periférico construído junto com o experimento. E, segundo, porque as medições feitas pelos funcionários da RPM eram feitas nos períodos chuvosos em intervalos de tempo muito grande, alguns dias, fazendo com que extravasasse muita água dos reservatórios de medição. Isto, naturalmente, tornava as medições muito imprecisas.

5.3 – Resultados das Análises Paramétricas

A Figura 5.29 ilustra os resultados das análises paramétricas para determinar a posição inicial do lençol freático. A posição referencial foi a base da camada de fundação (trafegabilidade).

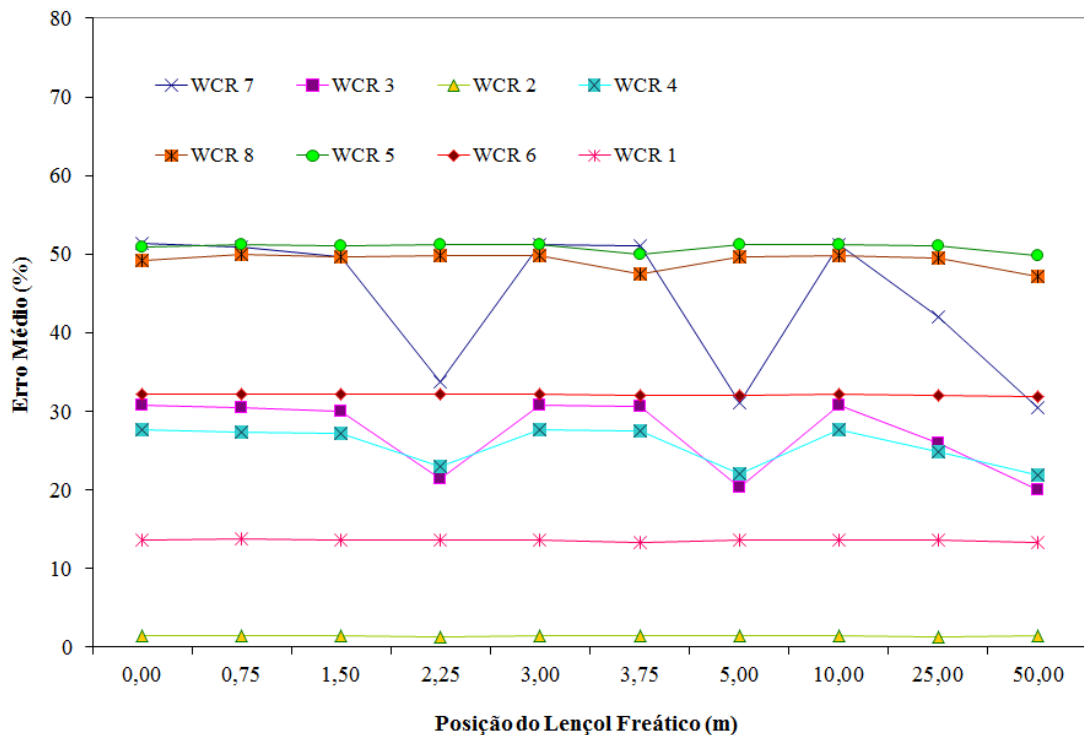


Figura 5.29 – Resultado da análise paramétrica para determinação da posição inicial do lençol freático.

Ao observar a Figura 5.29, nota-se que o erro relativo médio foi menor para as posições 2,25; 5,00 e 50,00 m. No entanto, com base no que foi relatado por Amorim

(2008), normalmente o lençol freático encontra-se abaixo da camada de fundação dentro da camada de rejeito. Logo, adotou-se a profundidade de 2,25 m abaixo da camada de fundação como sendo a posição inicial do lençol freático.

As Figuras 5.30 e 5.31 ilustram os resultados das análises paramétricas para a obtenção do índice de área foliar (IAF), referentes aos casos apresentados nas Figuras 4.31 e 4.32 respectivamente.

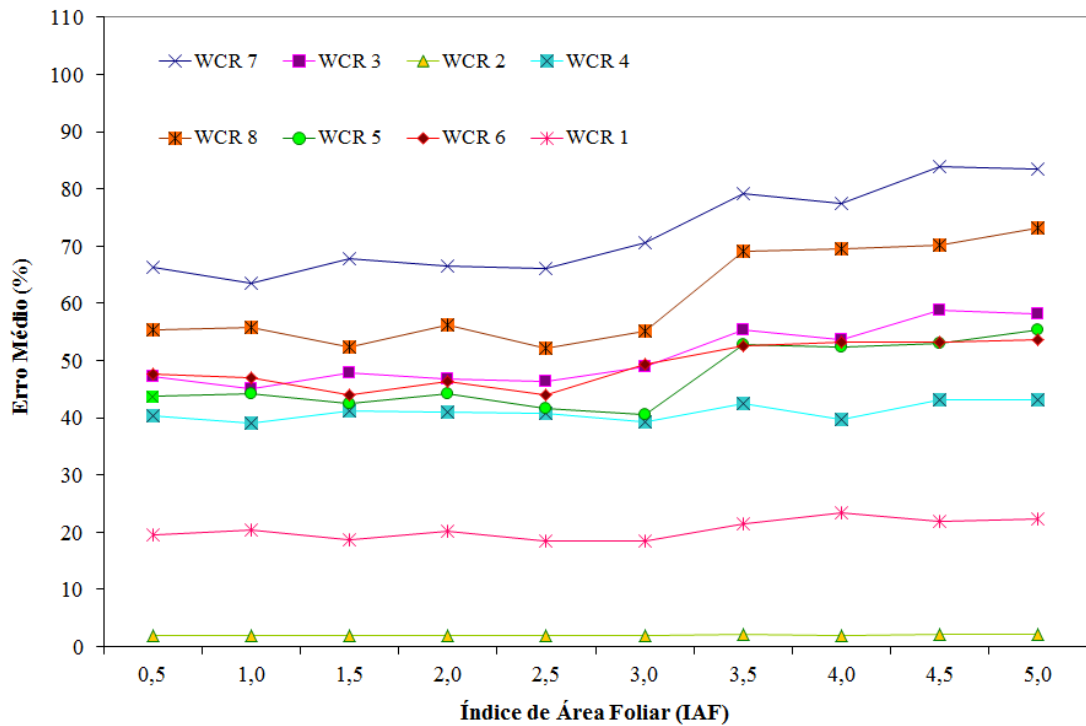


Figura 5.30 – Resultado da análise paramétrica para determinação do valor do IAF para o caso em que há um decréscimo acentuado do IAF no período de seca.

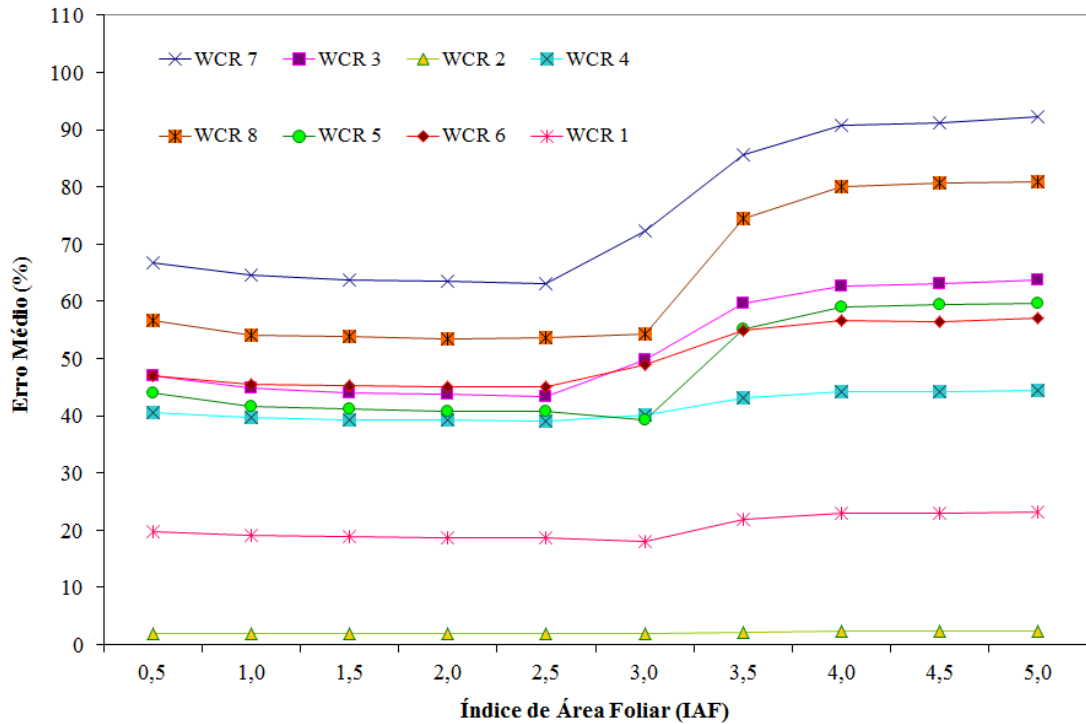


Figura 5.31 – Resultado da análise paramétrica para determinação do valor do IAF para o caso em que não há um decréscimo acentuado do IAF no período de seca.

Pode-se observar nas Figuras 5.30 e 5.31 que as camadas mais superficiais, ou seja, as dos solos superficial e siltoso foram as que apresentaram maior sensibilidade na variação da umidade volumétrica em relação aos valores do IAF, o que já era esperado, pois são as camadas que estão em contato mais direto com os parâmetros vegetais. Para os dois casos estipulados para a variação do IAF com o tempo, Figuras 4.31 e 4.32 do Capítulo 4, o IAF de 2,5 apresentou um menor erro. No entanto, o segundo caso em que há um menor decréscimo do IAF em épocas de seca (Figura 4.32) foi o que apresentou de uma forma geral o menor erro relativo (Figura 5.31). Logo, adotou-se para as análises numéricas das coberturas um IAF máximo de 2,5 conforme apresentado na Figura 4.32.

As Figuras 5.32 e 5.33 ilustram os resultados das análises paramétricas para a obtenção da profundidade da raiz, referentes aos casos apresentados nas Figuras 4.33 e 4.34 respectivamente, e a Figura 5.34 ilustra os resultados das análises paramétricas para a obtenção do ponto de murcha da planta, de acordo com os valores estipulados na Figura 4.35.

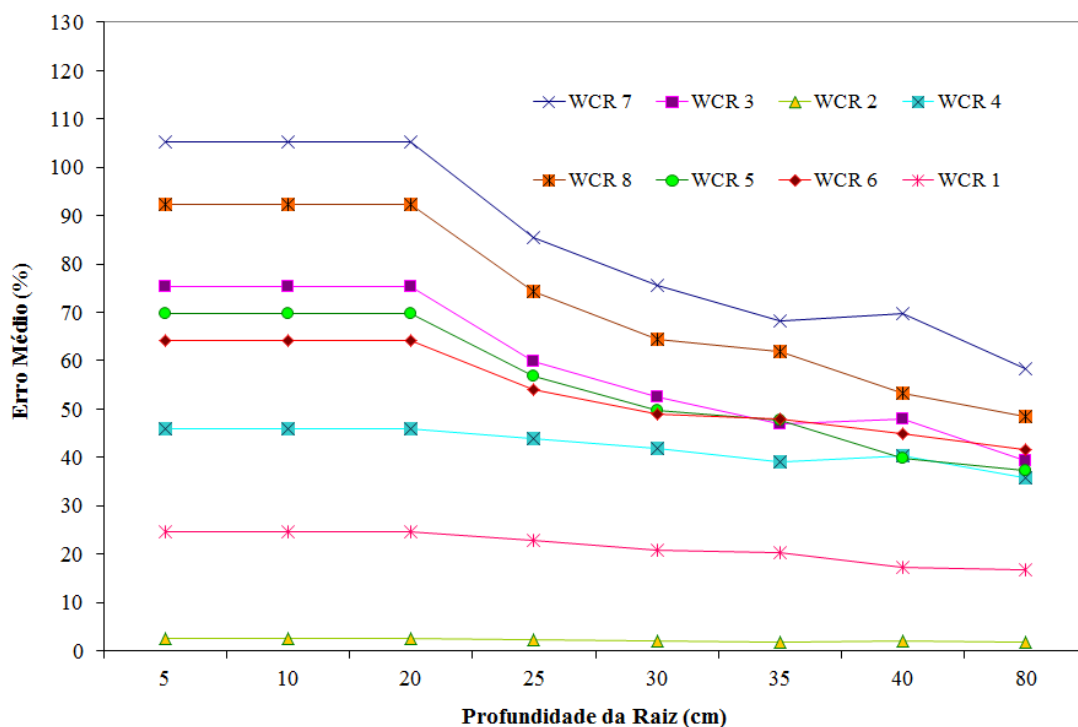


Figura 5.32 – Resultado da análise paramétrica para determinação da profundidade da raiz para o caso de um crescimento contínuo durante todo período de análise.

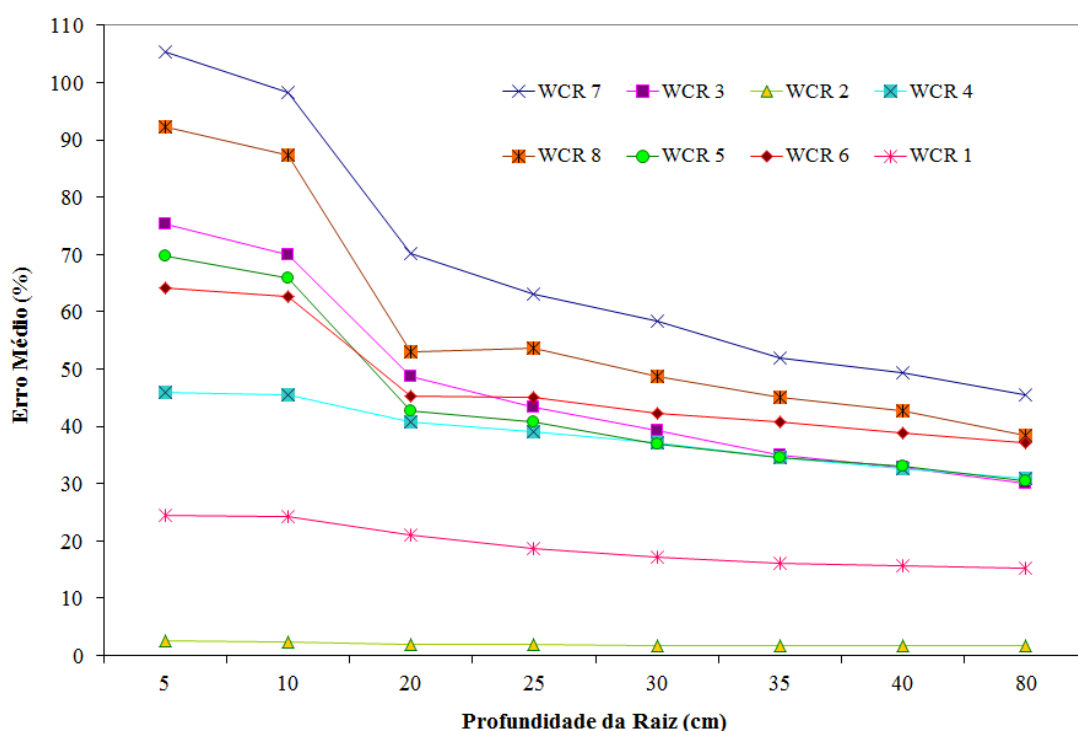


Figura 5.33 – Resultado da análise paramétrica para determinação da profundidade da raiz para o caso de um crescimento contínuo até o fim da germinação e constante no restante do período de análise.

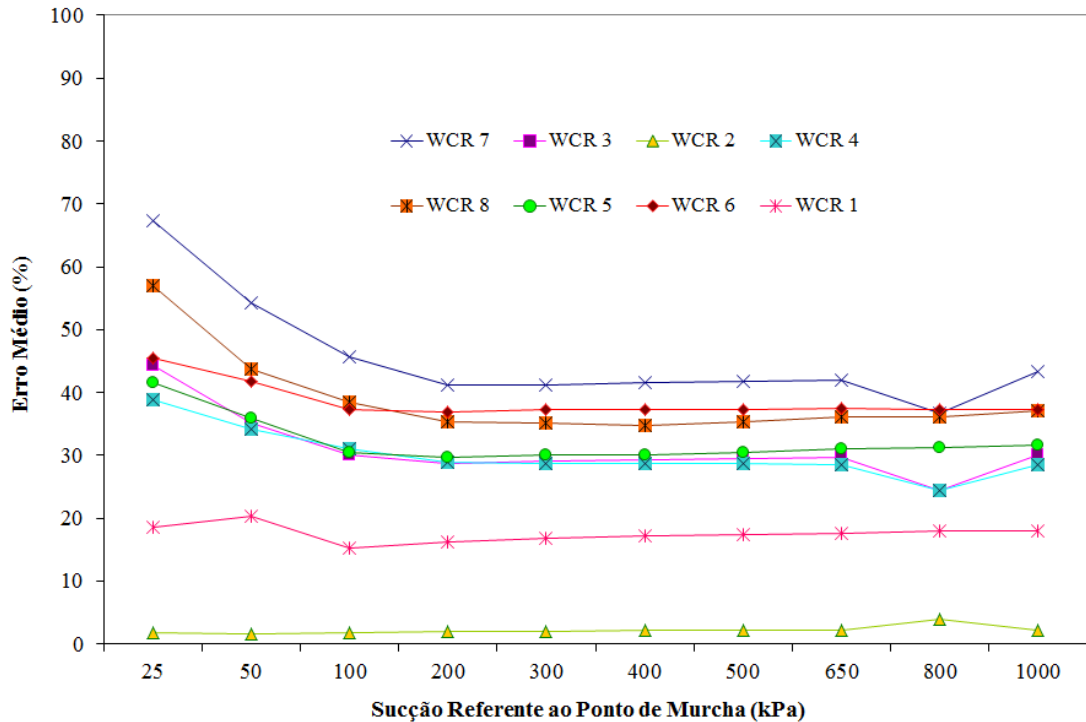


Figura 5.34 – Resultado da análise paramétrica para determinação da sucção referente ao ponto de murcha das espécies vegetais.

Da mesma forma que o IAF, os resultados apresentados nas Figuras 5.32 a 5.34 mostram que a variação na umidade volumétrica do solo foi mais sensível nas camadas superficiais (Solo Superficial e Solo Siltoso) para os parâmetros vegetais analisados (Profundidade da Raiz e Ponto de Murcha), como já era esperado.

Para a determinação da profundidade da raiz, estipularam-se também dois casos de crescimento durante o período da análise, sendo que para o caso em que há um crescimento contínuo da raiz até o final da germinação e depois este permanece constante durante todo o período de análise, Figura 4.34, apresentou de uma forma geral um menor erro relativo (Figura 5.33). Apesar da profundidade de 80 cm, em ambos os casos, ter apresentado um menor erro, adotou-se para as análises numéricas das coberturas uma profundidade máxima da raiz igual a 40 cm, próximo do valor recomendado por Amorim (2008), com o crescimento de acordo com o apresentado na Figura 4.34.

Em relação à sucção referente ao Ponto de Murcha da planta, o recomendado pela literatura consultada é usar o valor de 100 kPa. No entanto a Figura (5.34) mostra que para 200 kPa o erro calculado é menor. Logo adotou-se para as análises das coberturas uma sucção referente ao ponto de murcha igual a 200 kPa.

As Figuras 5.35 e 5.36 ilustram os resultados das análises paramétricas para os parâmetros térmicos condutividade térmica e calor específico volumétrico respectivamente. Nas análises adotaram-se os mesmos valores para todos os solos dos sistemas de cobertura, estipulando valores extremos no sentido de avaliar a influência destes parâmetros na variação da umidade volumétrica nas diversas camadas da cobertura.

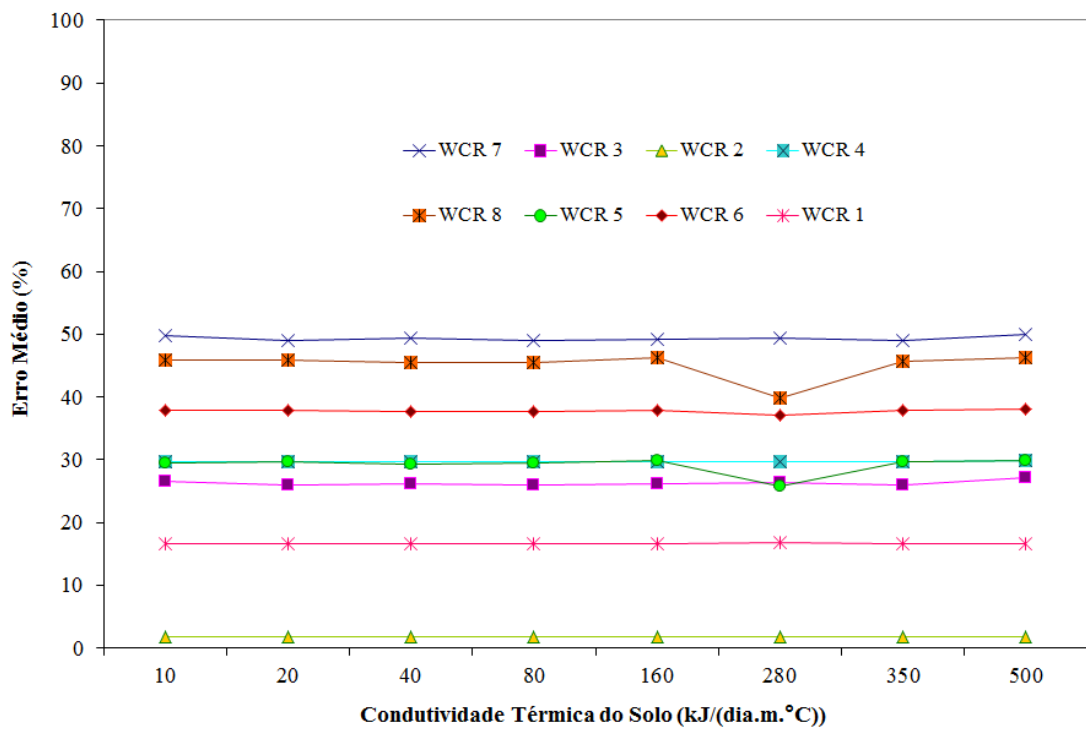


Figura 5.35 – Resultado da análise paramétrica para avaliar a influência da condutividade térmica na variação da umidade volumétrica nas coberturas.

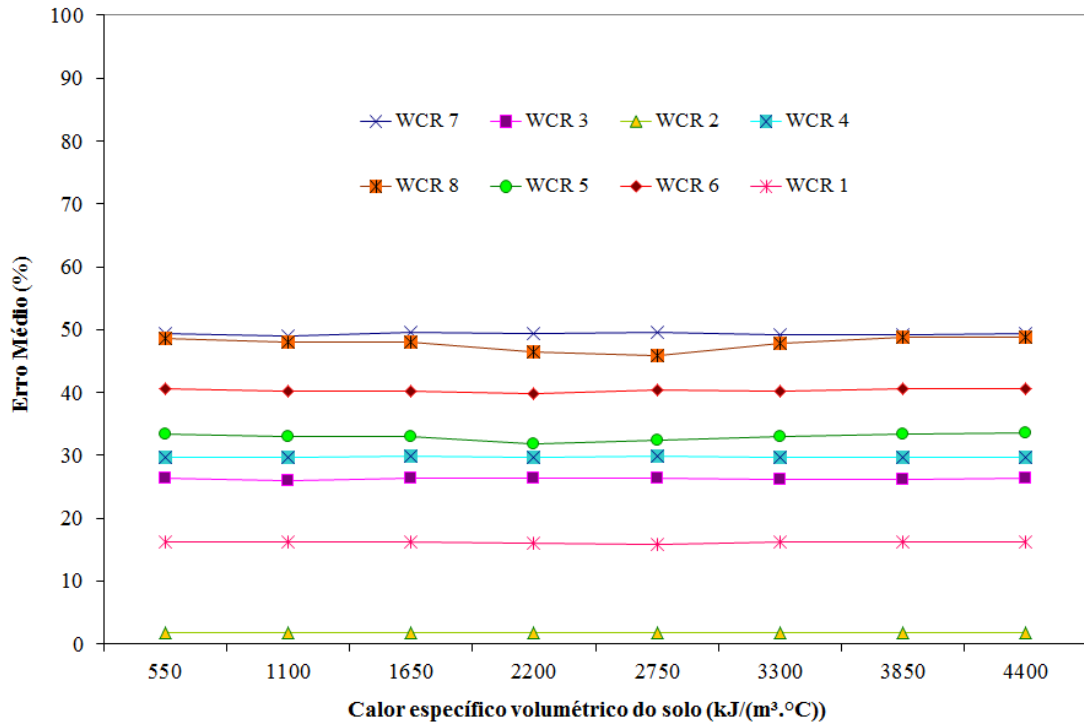


Figura 5.36 – Resultado da análise paramétrica para avaliar a influência do calor específico na variação da umidade volumétrica nas coberturas.

Pode-se observar nas Figuras 5.35 e 5.36 que os parâmetros térmicos tem pouca influência nos resultados, sendo que os melhores valores da condutividade térmica e do calor específico dos minerais de solo variam em torno dos valores de 280 kJ/(dia.m.°C) e 2750 kJ/(m³.°C) respectivamente. Ressalta-se que o manual do VADOSE/W recomenda valores de condutividade térmica em torno de 250 a 285 kJ/(dia.m.°C) e valores de calor específico volumétrico na faixa de 2250 a 2900 kJ/(m³.°C) para minerais de solo.

Em relação aos parâmetros geotécnicos utilizados para as análises numéricas das coberturas, a maior incerteza foi o valor da condutividade hidráulica do solo de fundação, devido ao fato deste ter sido determinado usando uma amostra moldada e não indeformada como os demais solos. O valor da condutividade hidráulica do rejeito foi obtido por Azevedo (2003) com o ensaio HCT (hydraulic consolidation test) em função do índice de vazios.

Na Tabela 5.3 é apresentado um resumo dos parâmetros de entrada do programa VADOSE/W, referentes aos dois modelos propostos para a análise numérica dos sistemas de cobertura.

Tabela 5.3 – Resumo dos Parâmetros de Entrada do VADOSE/W

Parâmetros	Especificação	Valor	Método de determinação
Condição Inicial	Posição nível d'água (m)	2,25 metros abaixo da camada de fundação	Análise Paramétrica
Vegetais	IAF	Figura 4.32 para o valor máximo de 2,5	Análise Paramétrica
	Profundidade da raiz (cm)	Figura 4.34 para o valor de 40 cm	Análise Paramétrica
	Sucção referente ao ponto de murcha (kPa)	Figura 4.36 para o valor de 200 kPa	Análise Paramétrica
Térmicos	Condutividade Térmica kJ/(dia.m.°C)	250-285	Análise Paramétrica e Manual VADOSE/W
	Calor Específico Vol. kJ/(m ³ .°C)	2250-2900	Análise Paramétrica e Manual VADOSE/W
Geotécnicos	Curva Granulométrica	Figuras 4.19 a 4.24	Ensaio de Laboratório
	Curva de Retenção de água	Figuras 4.25 a 4.30	Ensaio de Laboratório
	Condutividade Hidráulica (cm/s)	Tabela 5.1	Ensaio de Laboratório
Climáticos	Precipitação (mm)	Precipitação medida em campo (Fig. 4.14)	Estação Meteorológica da RPM
	Temperatura (°C)	Precipitação medida em campo (Fig. 4.15)	Estação Meteorológica da RPM
	Radiação (MJ/m ²)	Precipitação medida em campo (Fig. 4.16)	Estação Meteorológica da RPM
	Umidade Relativa do Ar (%)	Precipitação medida em campo (Fig. 4.17)	Estação Meteorológica da RPM
	Velocidade do Vento (m/s)	Precipitação medida em campo (Fig. 4.18)	Estação Meteorológica da RPM

5.4 – Resultados das Análises Numéricas

Nas Figuras 5.37 a 5.42 são apresentados os perfis de umidade dos solos obtidos com as análises uni e bi-dimensionais para o Sistema de Cobertura 1.

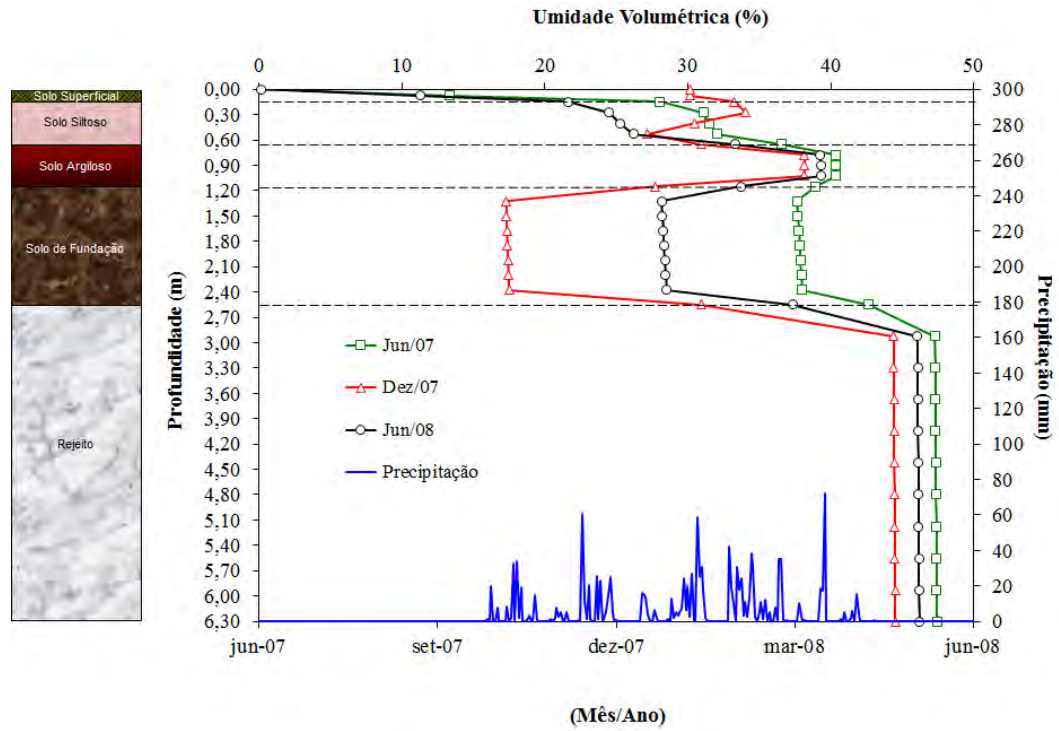


Figura 5.37 – Perfil de umidade (Sistema de Cobertura 1) gerado pelo modelo unidimensional referente ao período de Junho de 2007 a Junho de 2008.

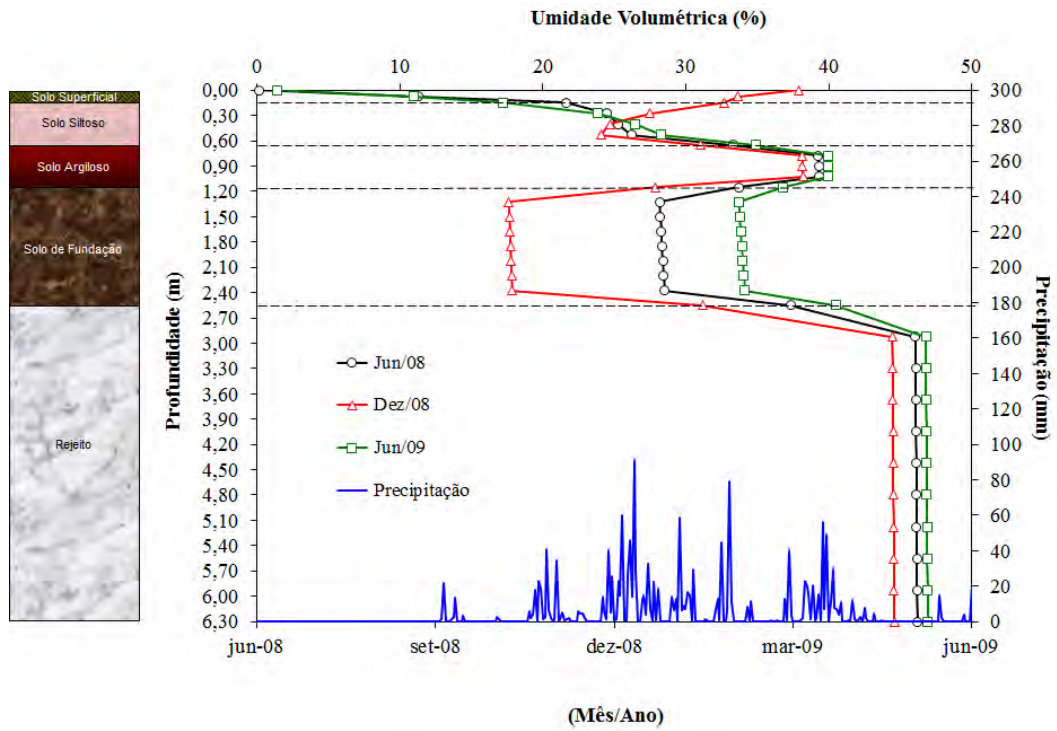


Figura 5.38 – Perfil de umidade (Sistema de Cobertura 1) gerado pelo modelo unidimensional referente ao período de Junho de 2008 a Junho de 2009.

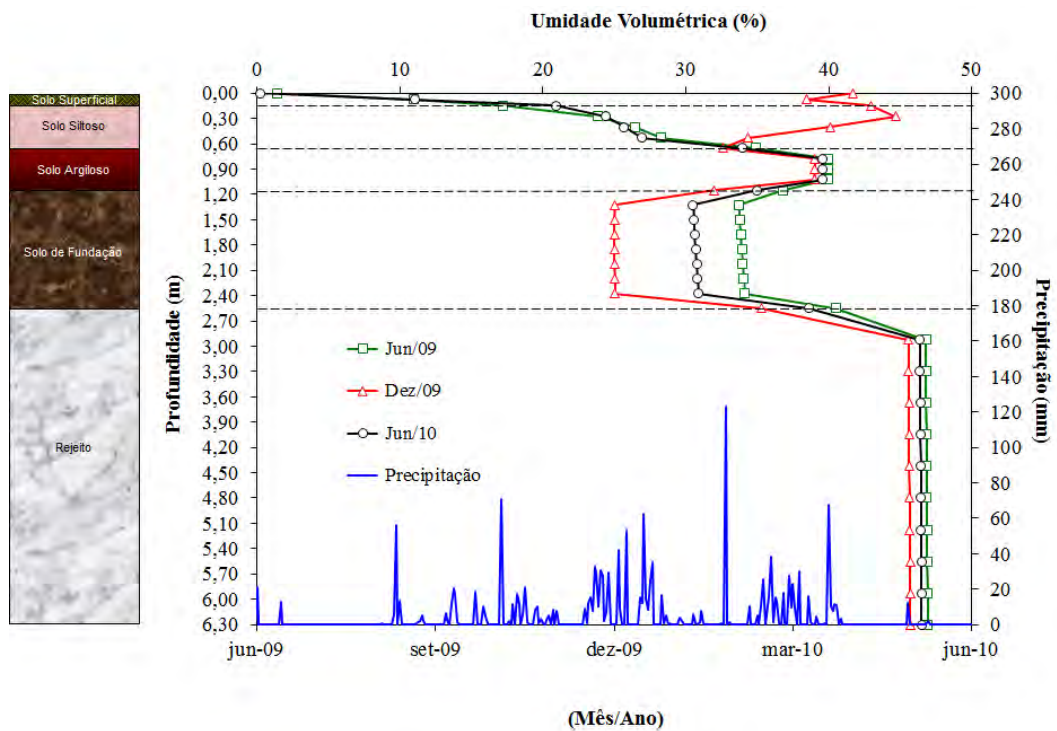


Figura 5.39 – Perfil de umidade (Sistema de Cobertura 1) gerado pelo modelo unidimensional referente ao período de Junho de 2009 a Junho de 2010.

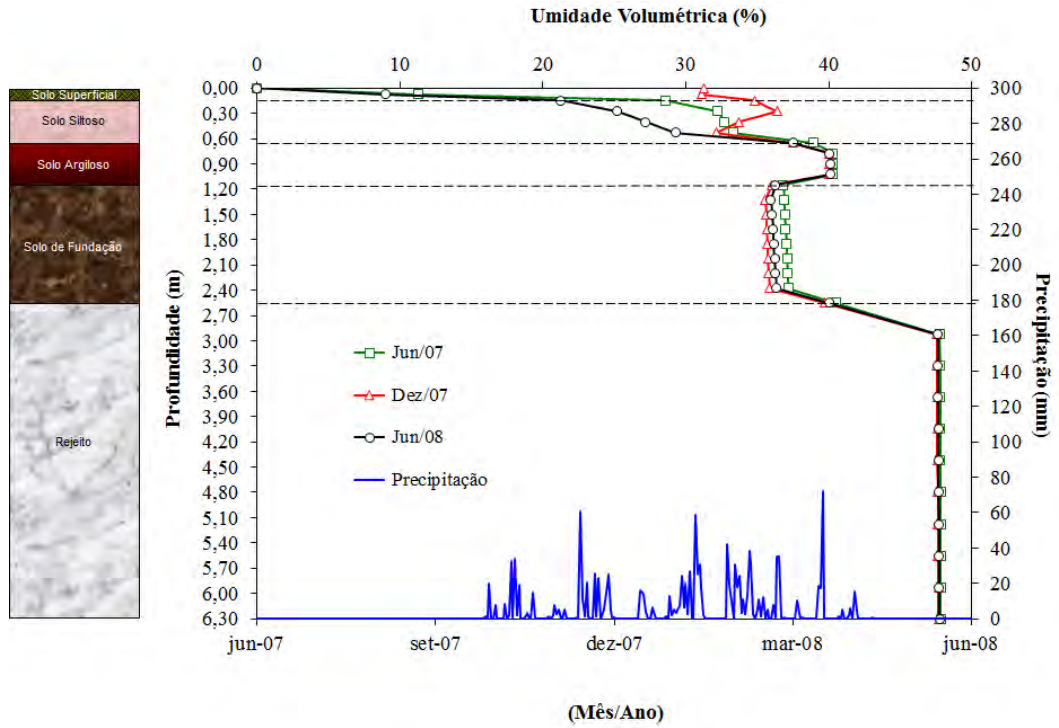


Figura 5.40 – Perfil de umidade (Sistema de Cobertura 1) gerado pelo modelo bidimensional referente ao período de Junho de 2007 a Junho de 2008.

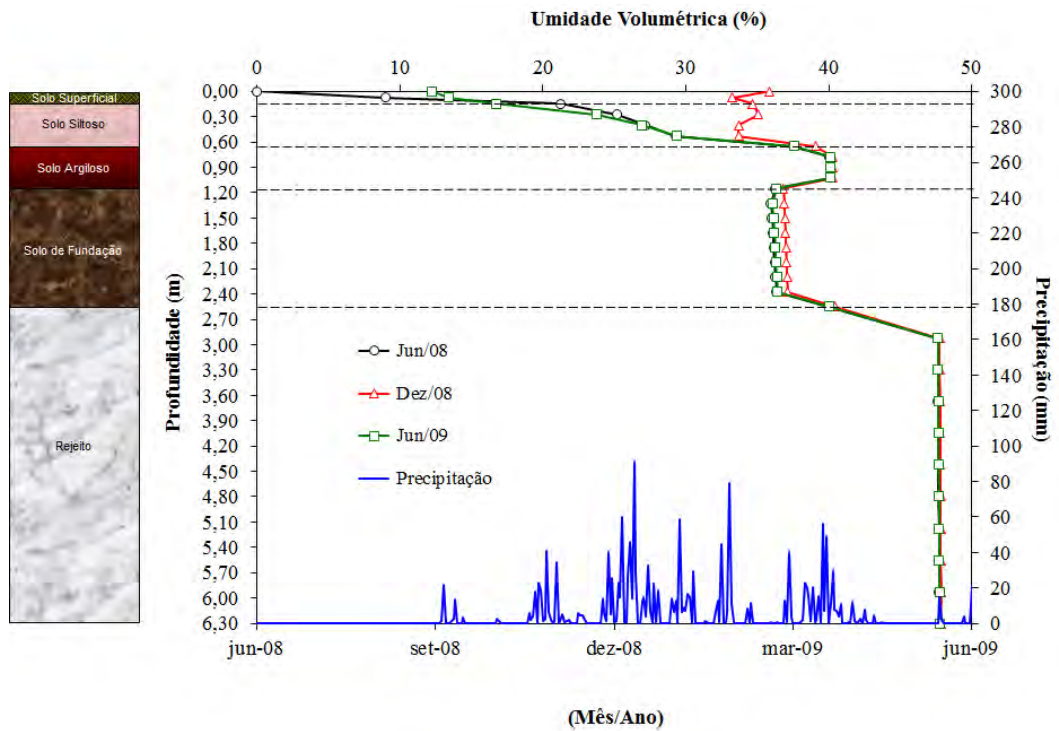


Figura 5.41 – Perfil de umidade (Sistema de Cobertura 1) gerado pelo modelo bidimensional referente ao período de Junho de 2008 a Junho de 2009.

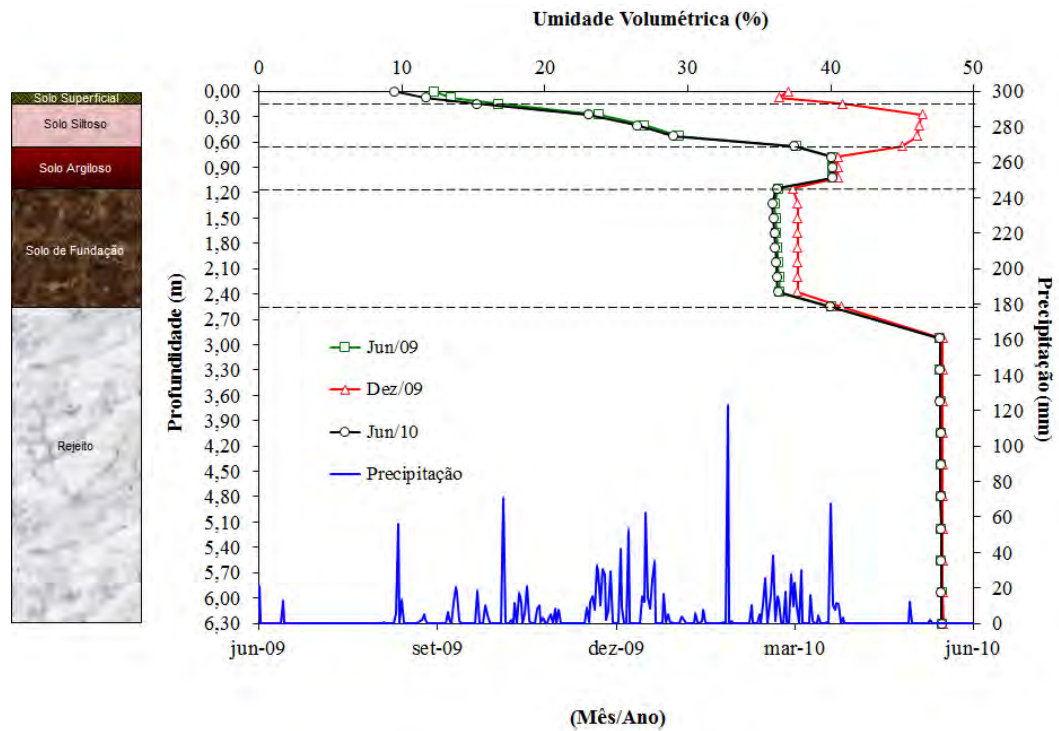


Figura 5.42 – Perfil de umidade (Sistema de Cobertura 1) gerado pelo modelo bidimensional referente ao período de Junho de 2009 a Junho de 2010.

Ao observar os perfis de umidade representados pelas Figuras 5.37 a 5.42, referentes aos modelos uni e bidimensionais para o sistema de cobertura 1, nota-se que houve uma variação significativa entre os perfis obtidos com as análises uni e bi-dimensionais. De uma maneira geral, as análises uni-dimensionais apresentaram maiores variações de umidade que as bi-dimensionais. Naturalmente, o solo que mais sofreu variações de umidade foi o solo superficial (0,00 a 0,15 m), abaixo dele, o solo siltoso com profundidade variando entre (0,15 a 0,65 m) também secou e umedeceu com o passar dos meses do experimento. No solo argiloso (0,65 a 1,15 m), como era de se esperar, não houve grandes variações de umidade volumétrica e, finalmente, no solo de fundação (1,15 a 2,55 m) houve variação de umidade durante os meses na análise unidimensional e praticamente nenhuma variação na análise bidimensional, o que parece mais lógico.

Nas Figuras 5.43 a 5.48 são apresentados os perfis de umidade dos solos obtidos com as análises uni e bi-dimensionais para o Sistema de Cobertura 2.

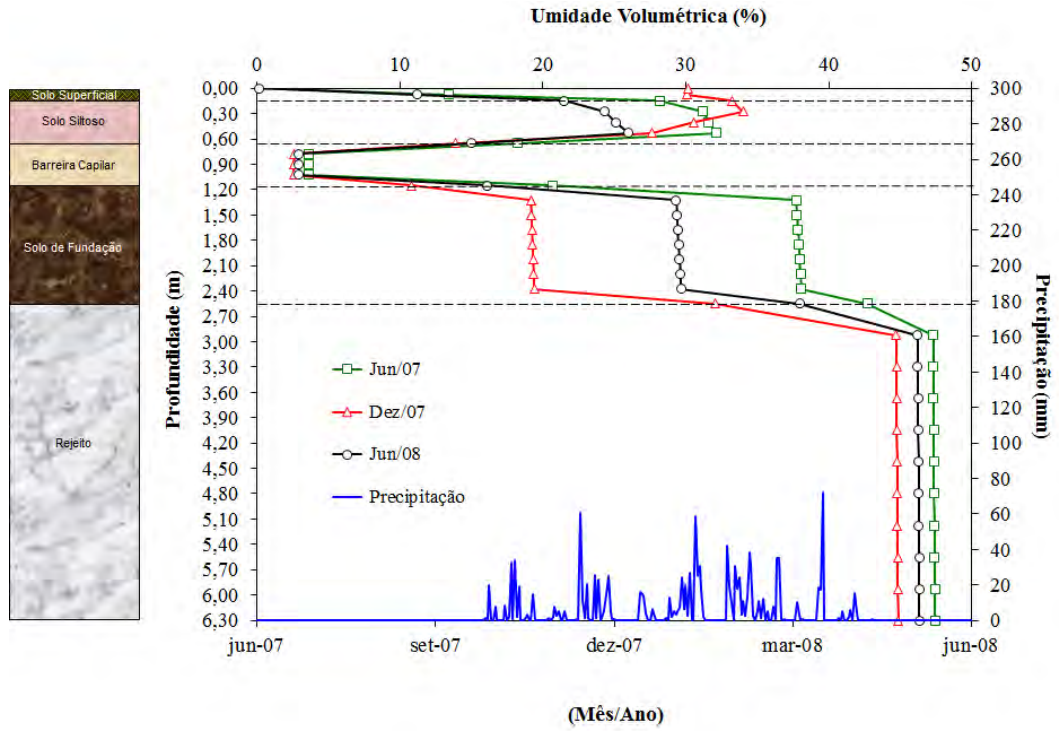


Figura 5.43 – Perfil de umidade (Sistema de Cobertura 2) gerado pelo modelo unidimensional referente ao período de Junho de 2007 a Junho de 2008.

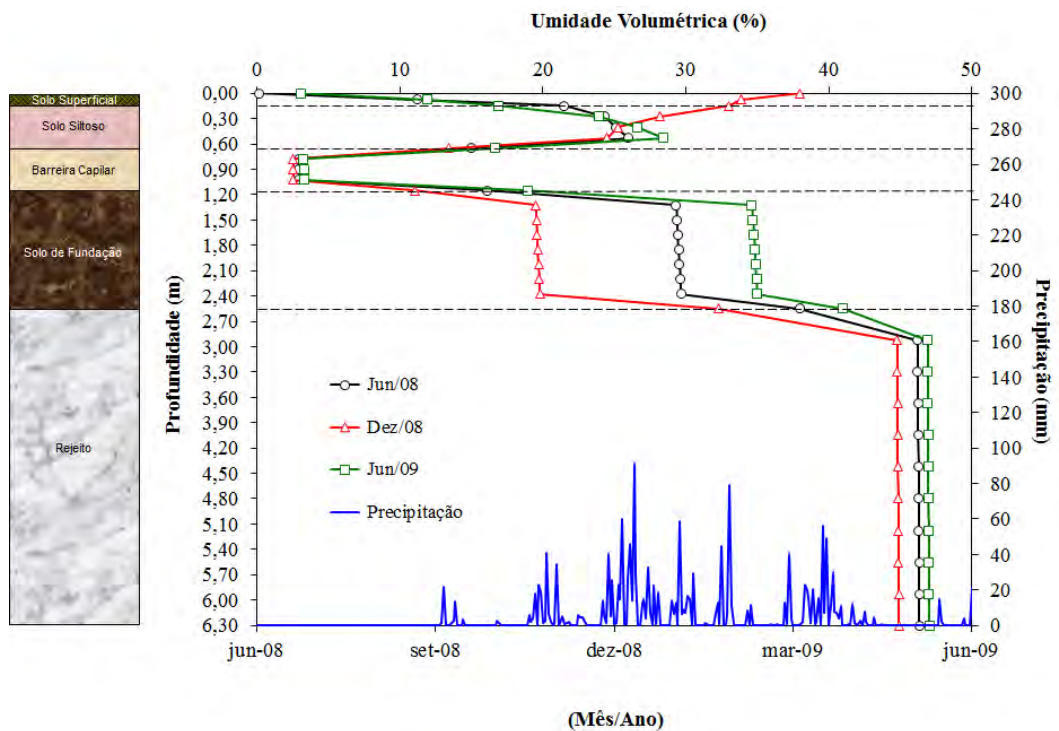


Figura 5.44 – Perfil de umidade (Sistema de Cobertura 2) gerado pelo modelo unidimensional referente ao período de Junho de 2008 a Junho de 2009.

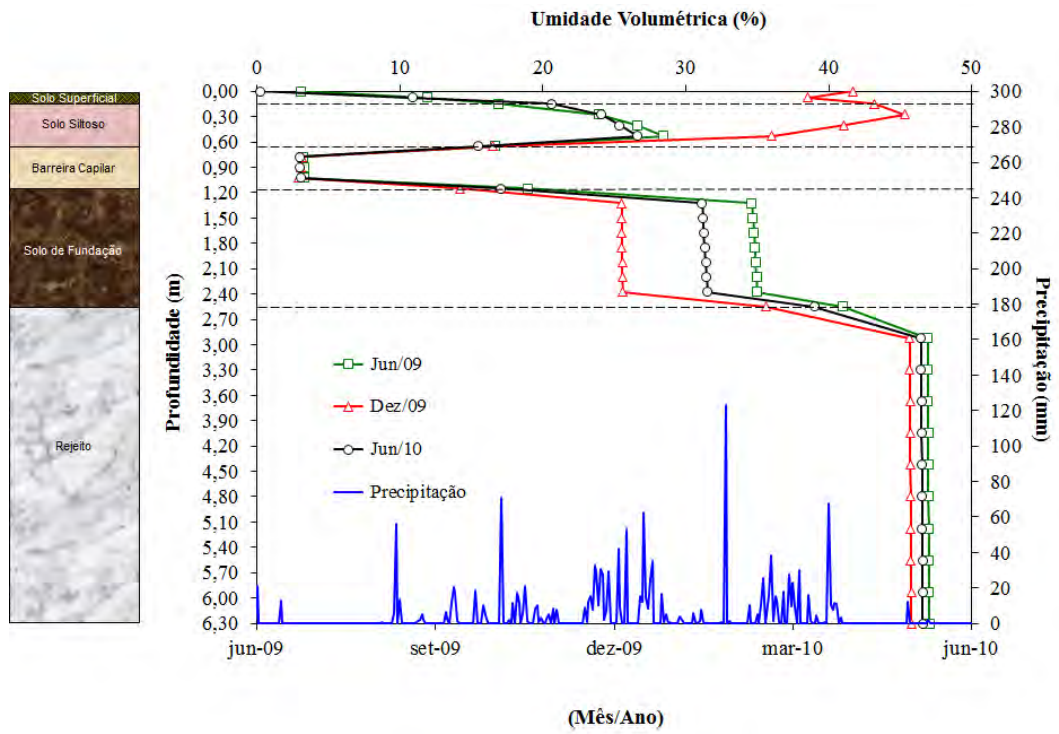


Figura 5.45 – Perfil de umidade (Sistema de Cobertura 2) gerado pelo modelo unidimensional referente ao período de Junho de 2009 a Junho de 2010.

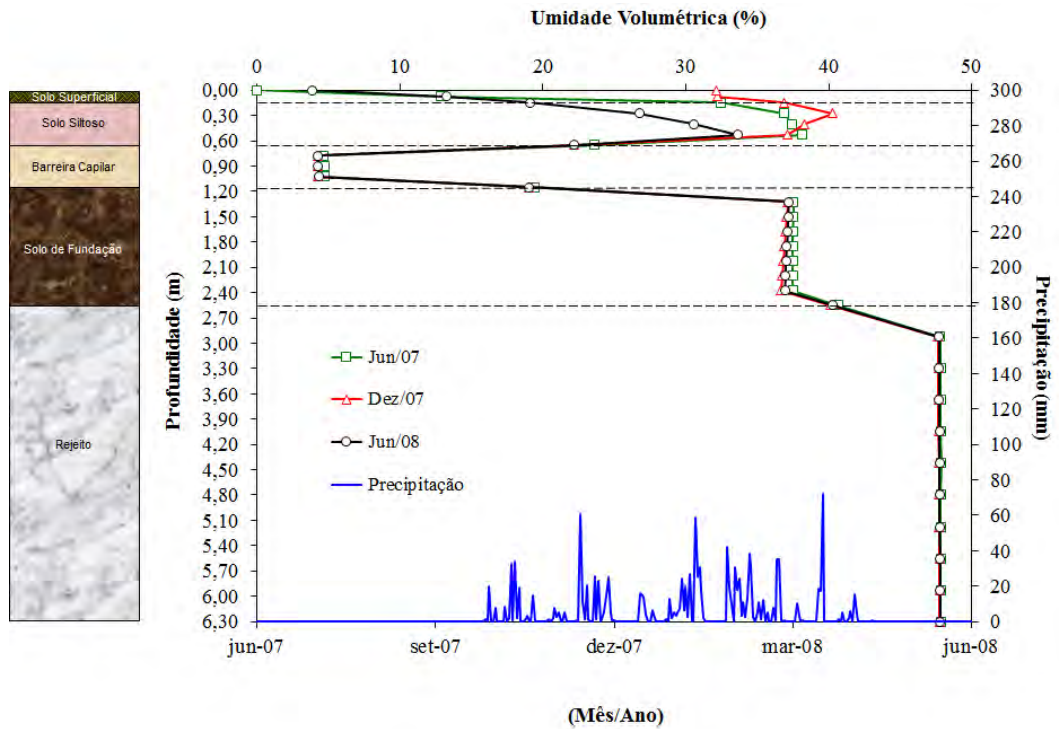


Figura 5.46 – Perfil de umidade (Sistema de Cobertura 2) gerado pelo modelo bidimensional referente ao período de Junho de 2007 a Junho de 2008.

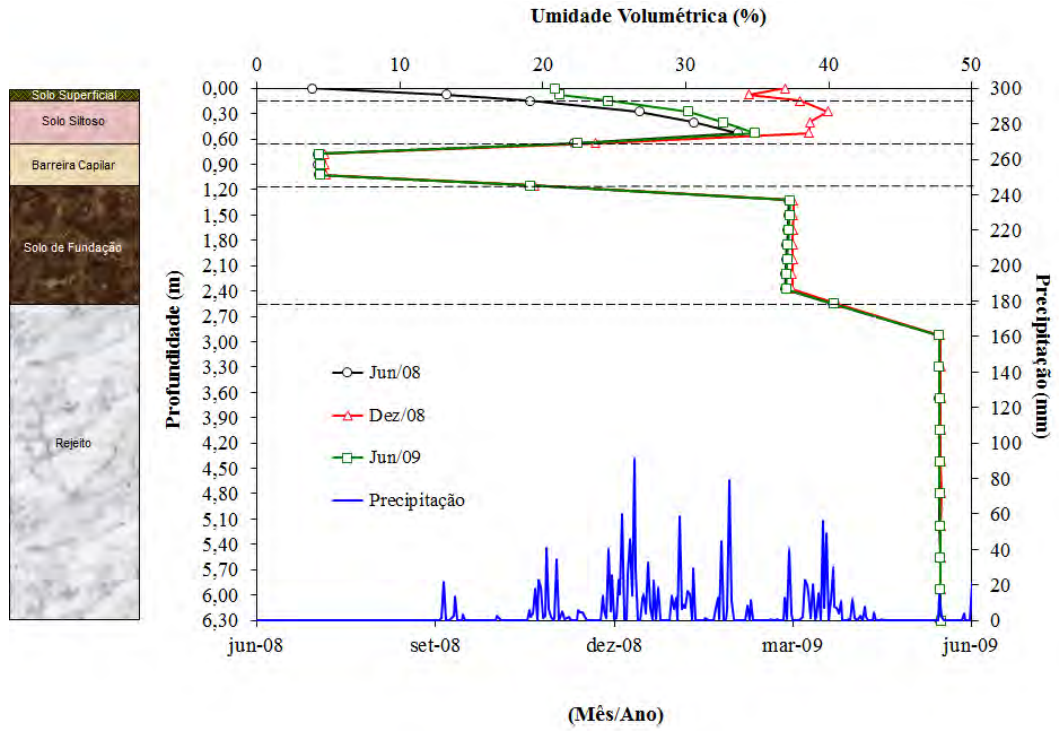


Figura 5.47 – Perfil de umidade (Sistema de Cobertura 2) gerado pelo modelo bidimensional referente ao período de Junho de 2008 a Junho de 2009.

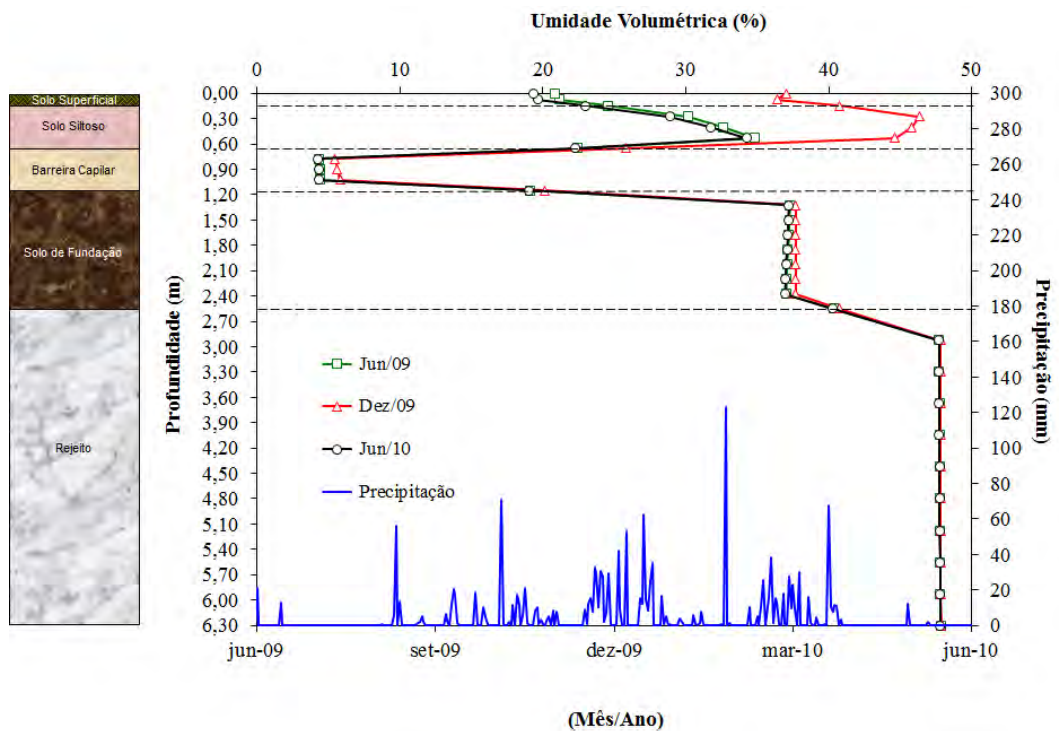
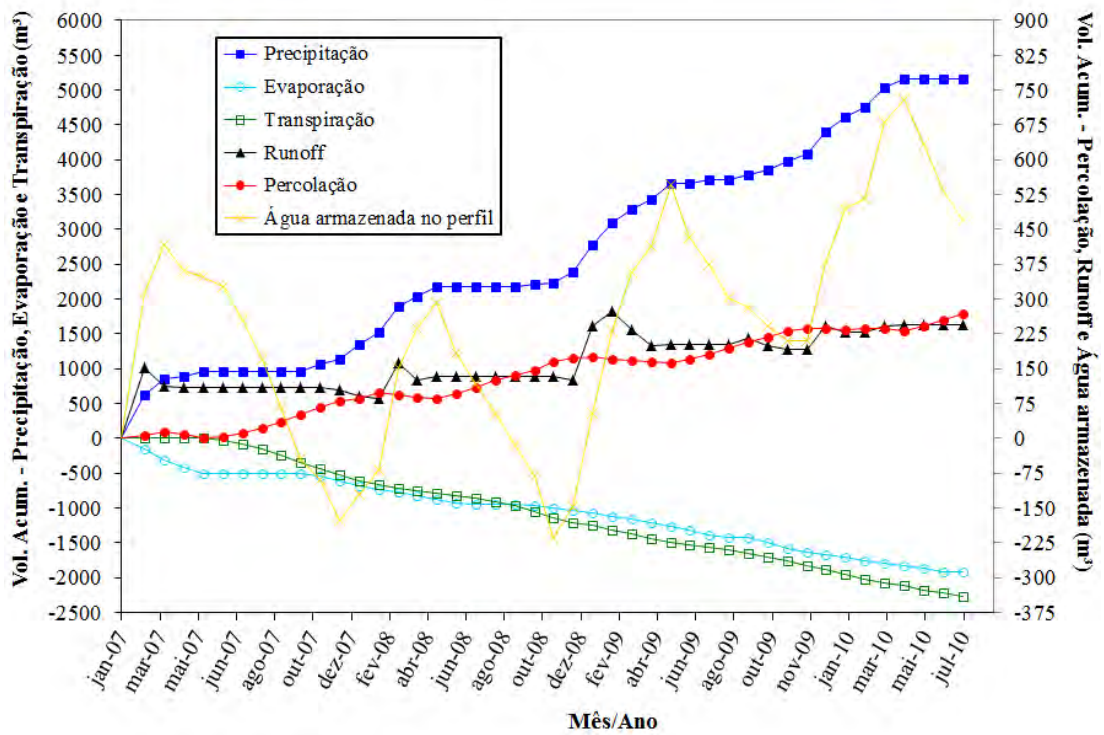


Figura 5.48 – Perfil de umidade (Sistema de Cobertura 2) gerado pelo modelo bidimensional referente ao período de Junho de 2009 a Junho de 2010.

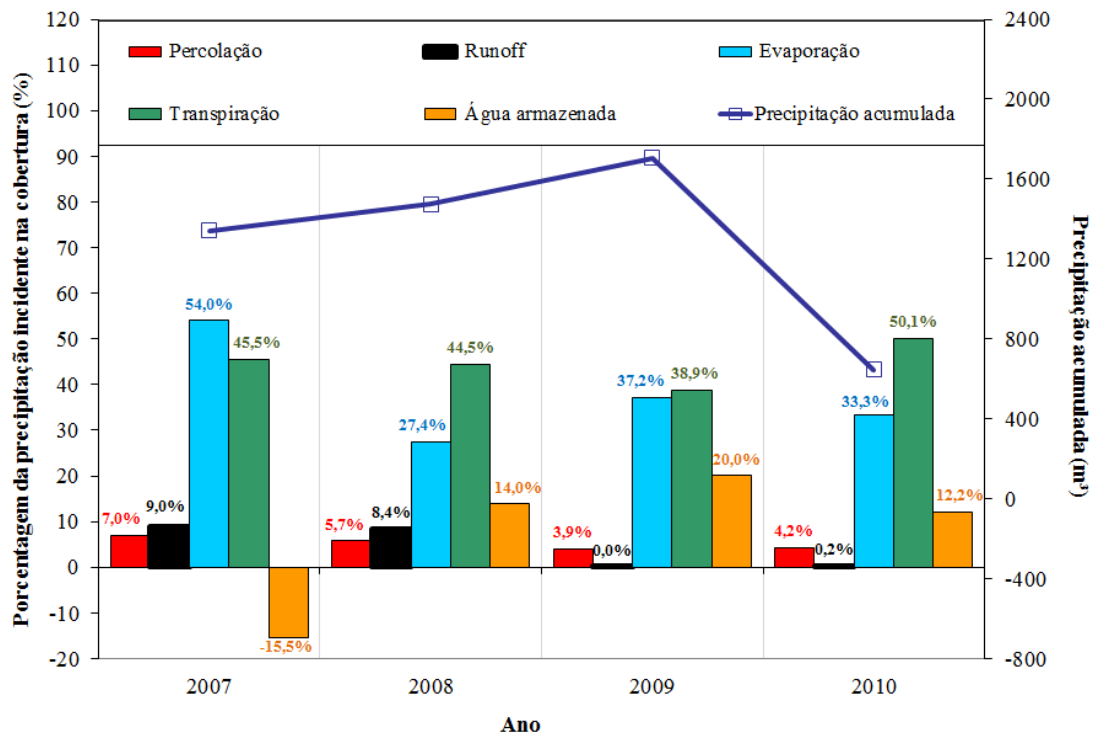
Ao observar os perfis de umidade representados pelas Figuras 5.43 a 5.48, referentes aos modelos uni e bidimensionais para o sistema de cobertura 2, nota-se que para a análise unidimensional, todos os solos do perfil sofreram variações de umidade sendo que o solo granular (barreira capilar) apresentou pequenas variações na umidade do início ao fim do ensaio. Na análise bidimensional, a camada de fundação praticamente não apresentou variação na umidade volumétrica durante todo o período de análise, assim como a camada de solo granular (barreira capilar). Tanto na análise unidimensional quanto na análise bidimensional, a camada de solo granular apesar de não teve grandes variações de umidade volumétrica (aprox. 3%). Conclui-se, portanto, que ela não umedeceu durante todo o período o suficiente para que houvesse quebra de capilaridade. Ou seja, a barreira funcionou como se desejava.

Outra observação interessante pode-se fazer ao comparar o desempenho da camada de armazenamento-liberação (solo siltoso) nos dois sistemas. Fica claro ao se comparar os perfis de umidade nos meses de dezembro nas Figuras 5.37 e 5.43, 5.38 e 5.44, e 5.39 e 5.45, para o modelo uni-dimensional, e as Figuras 5.40 e 5.46, 5.41 e 5.47, e 5.42 e 5.48, para o modelo bi-dimensional, que a barreira capilar proporcionou um acúmulo de umidade maior nos pontos inferiores da camada de armazenamento-liberação que a barreira hidráulica. Aliás, como era de se esperar.

As Figuras 5.49 a 5.52 apresentam um balanço hídrico gerado pelo modelo bi-dimensional para os dois sistemas de cobertura propostos.

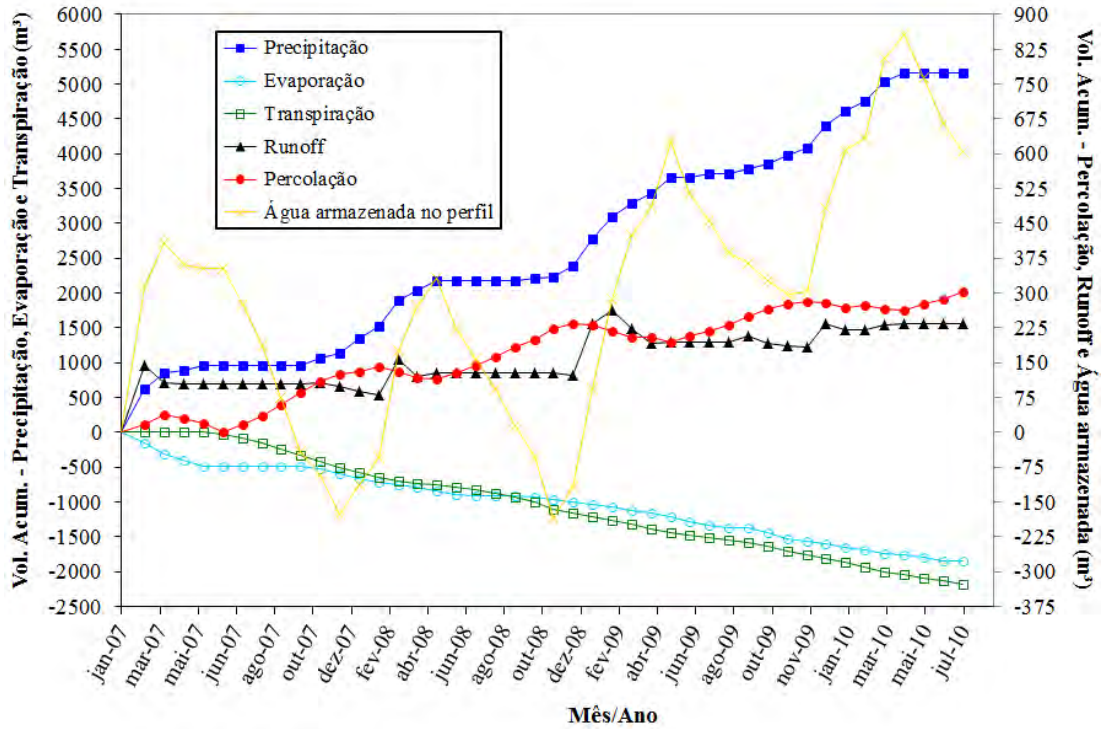


(a)

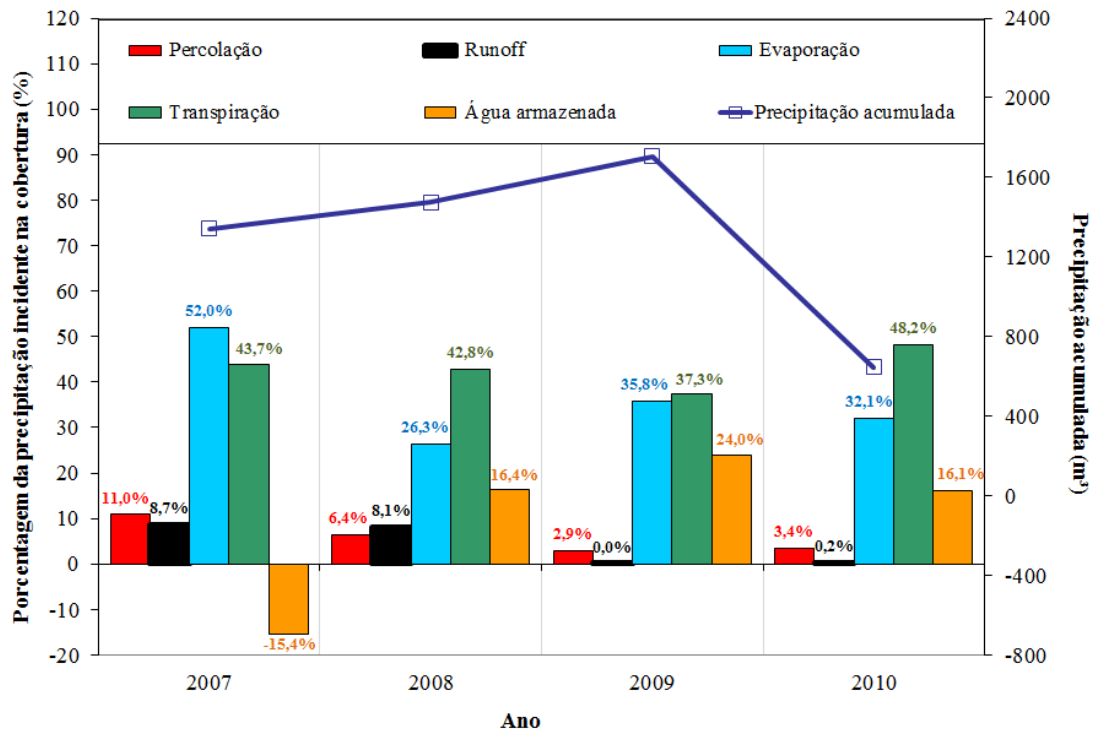


(b)

Figura 5.49 – (a) Balanço Hídrico gerado pelo modelo 2D para o sistema de cobertura 1, (b) Porcentagem da precipitação que incidiu na superfície do sistema de cobertura 1 para cada ano de estudo.



(a)



(b)

Figura 5.50 – (a) Balanço Hídrico gerado pelo modelo 2D para o sistema de cobertura 2, (b) Porcentagem da precipitação que incidiu na superfície do sistema de cobertura 2 para cada ano de estudo.

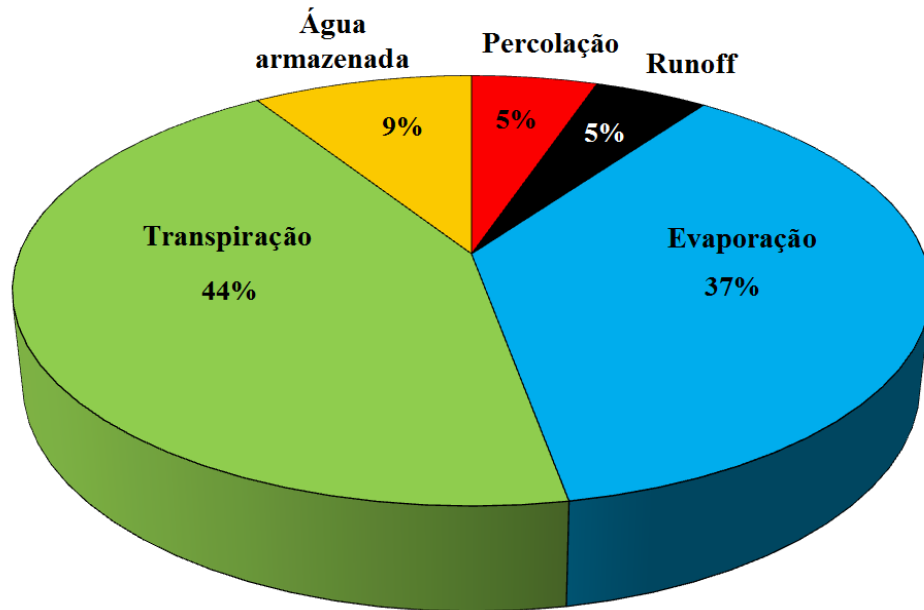


Figura 5.51 – Porcentagem de toda precipitação que incidiu na superfície do sistema de cobertura 1 nos quatro anos de análise.

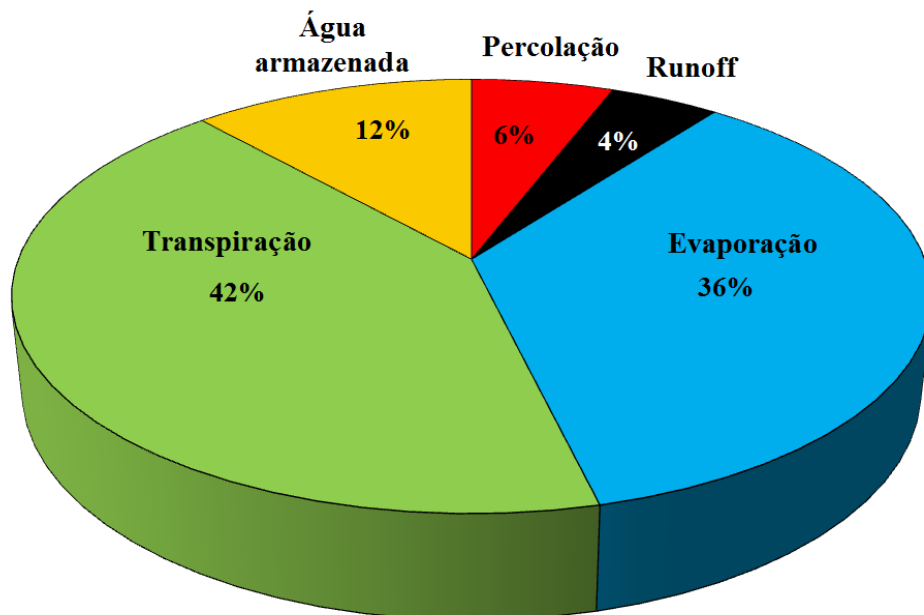


Figura 5.52 – Porcentagem de toda precipitação que incidiu na superfície do sistema de cobertura 2 nos quatro anos de análise.

Pode-se observar nas Figuras 5.49 e 5.50 que os dois sistemas de cobertura apresentaram um balanço hídrico bem parecido, sendo que no sistema de cobertura 1

houve uma menor quantidade de água captada pelo lisímetro em relação ao sistema de cobertura 2. Segundo as Figuras 5.51 e 5.52 pode-se dizer que de toda a precipitação que incidiu na superfície das coberturas, em média:

- 4,5% escoou superficialmente; 79,5% evapotranspirou e 16% infiltrou, sendo que cerca de 10,5% ficou retido nas camadas de solo e 5,5% percolou para os lisímetros.

Esses valores foram bem diferentes dos encontrados pela SRK (2003) e SRK (2005), cujos resultados numéricos indicaram que 45% da precipitação que caiu sobre a superfície do tanque escoou superficialmente, 31% infiltrou no solo da cobertura e 24% foi consumida pela evaporação. Estes resultados mostram que o escoamento superficial foi elevado porque a cobertura não tinha vegetação.

5.5 – Comparação dos Resultados (Campo X Modelo 1D e 2D)

A variação da umidade volumétrica com o tempo medida no campo para as diferentes camadas dos dois sistemas de cobertura, e a variação de umidade volumétrica obtida com os modelos uni e bidimensionais são apresentadas nas Figuras 5.53 a 5.60. A Figura 5.61 apresenta o erro médio calculado para os dois modelos em relação a umidade volumétrica obtida no campo pelas leituras dos WCRs.

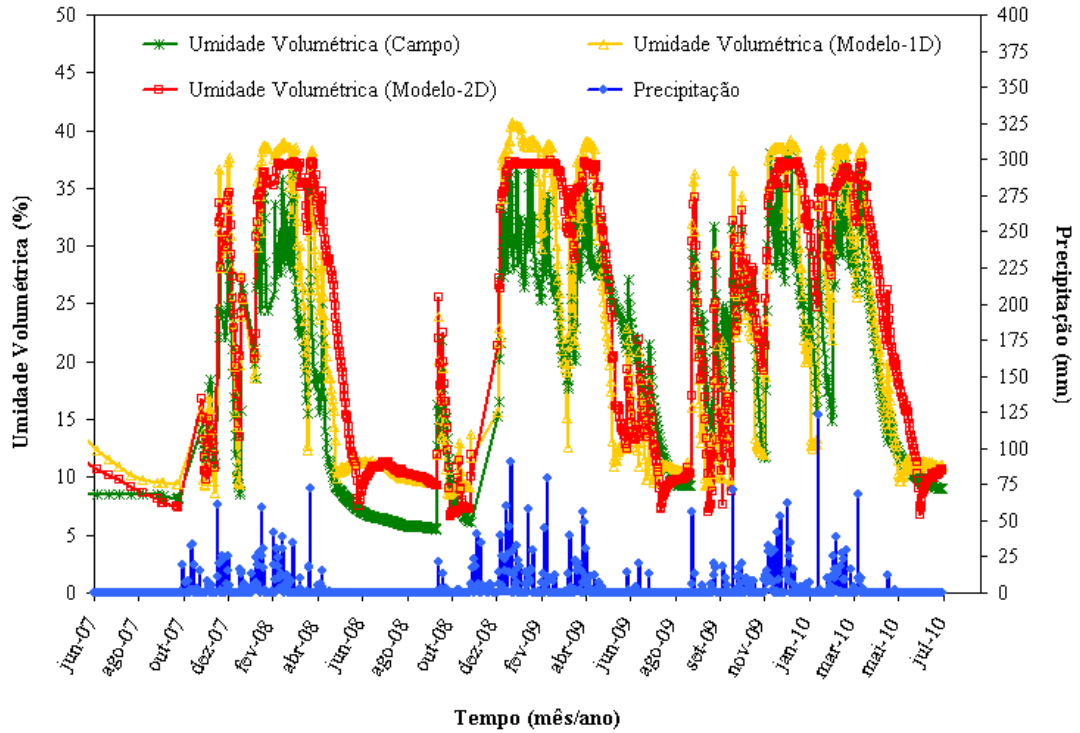


Figura 5.53 – Variação da umidade volumétrica com o tempo para a camada de solo superficial do sistema de cobertura 1 (CAMPO X MODELO).

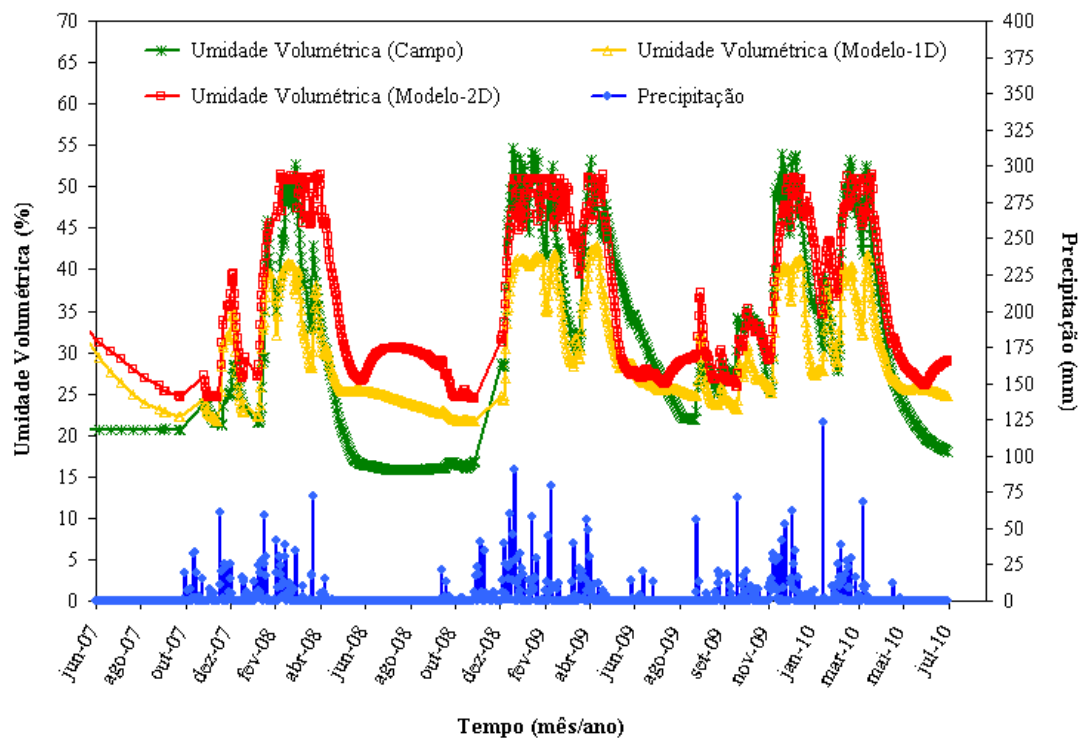


Figura 5.54 – Variação da umidade volumétrica com o tempo para a camada de solo siltoso do sistema de cobertura 1 (CAMPO X MODELO).

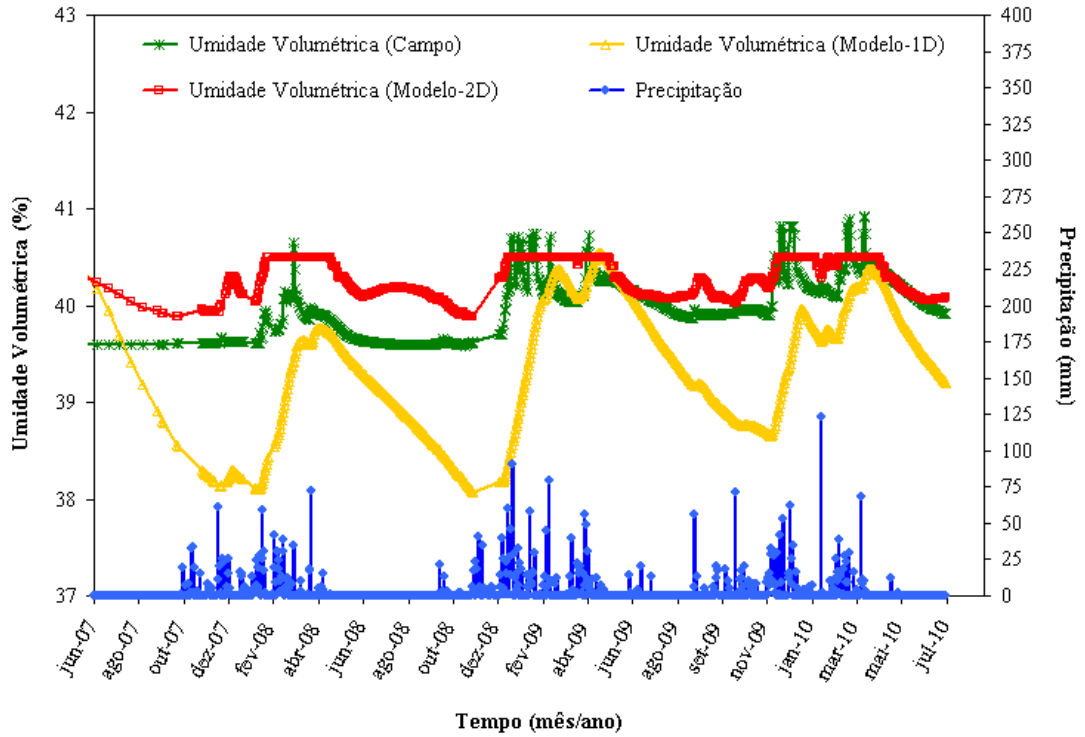


Figura 5.55 – Variação da umidade volumétrica com o tempo para a camada de solo argiloso (barreira hidráulica) do sistema de cobertura 1 (CAMPO X MODELO).

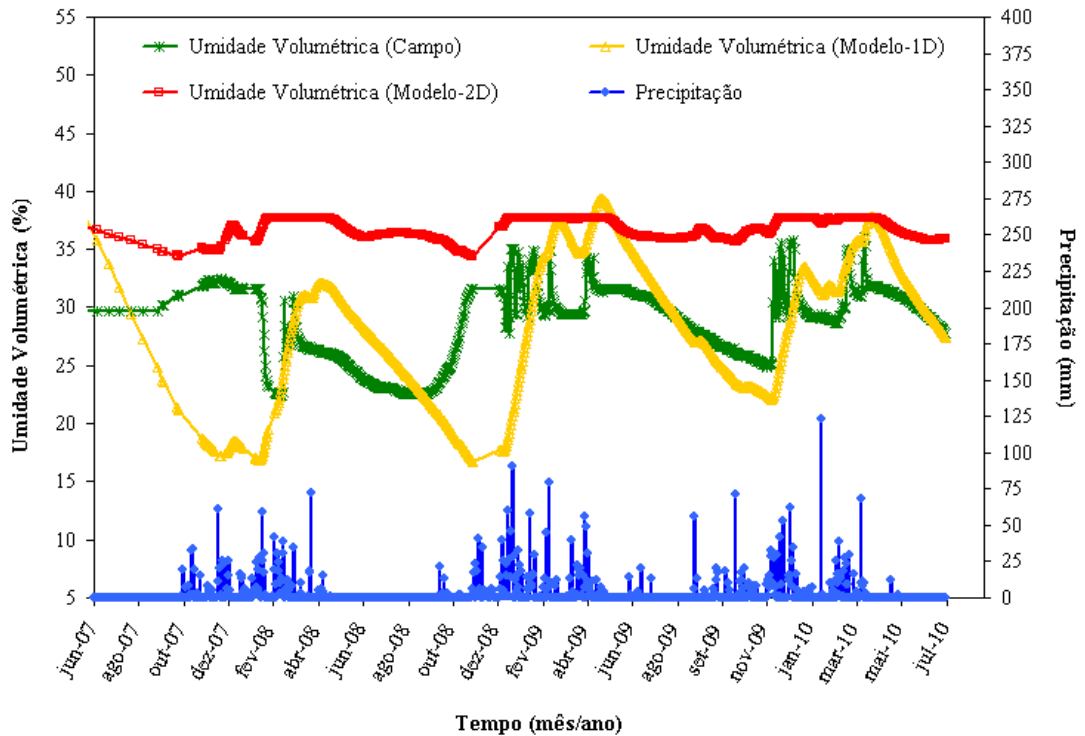


Figura 5.56 – Variação da umidade volumétrica com o tempo para a camada de solo de fundação (trafegabilidade) do sistema de cobertura 1 (CAMPO X MODELO).

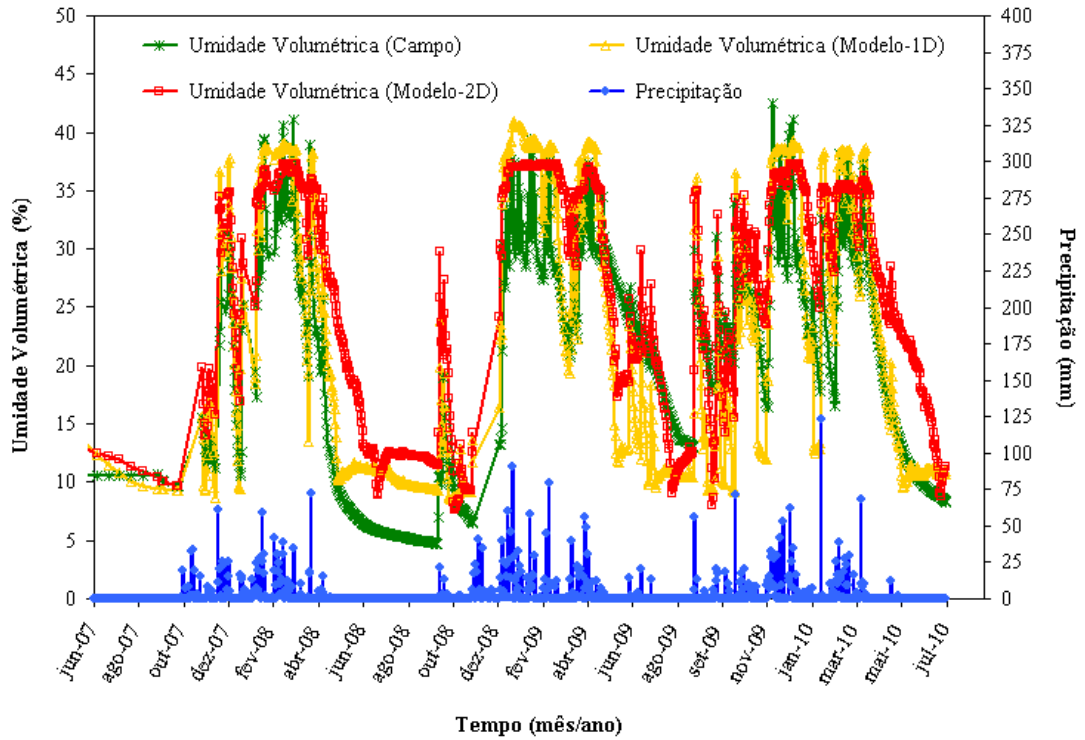


Figura 5.57 – Variação da umidade volumétrica com o tempo para a camada de solo superficial do sistema de cobertura 2 (CAMPO X MODELO).

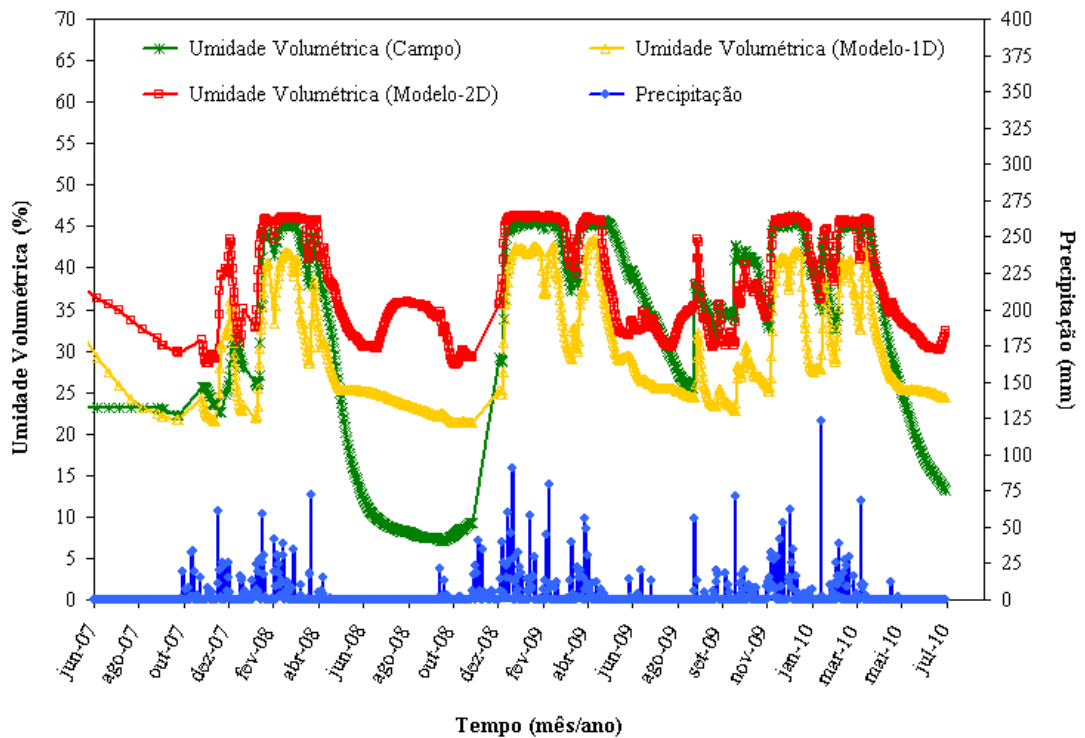


Figura 5.58 – Variação da umidade volumétrica com o tempo para a camada de solo siltoso do sistema de cobertura 2 (CAMPO X MODELO).

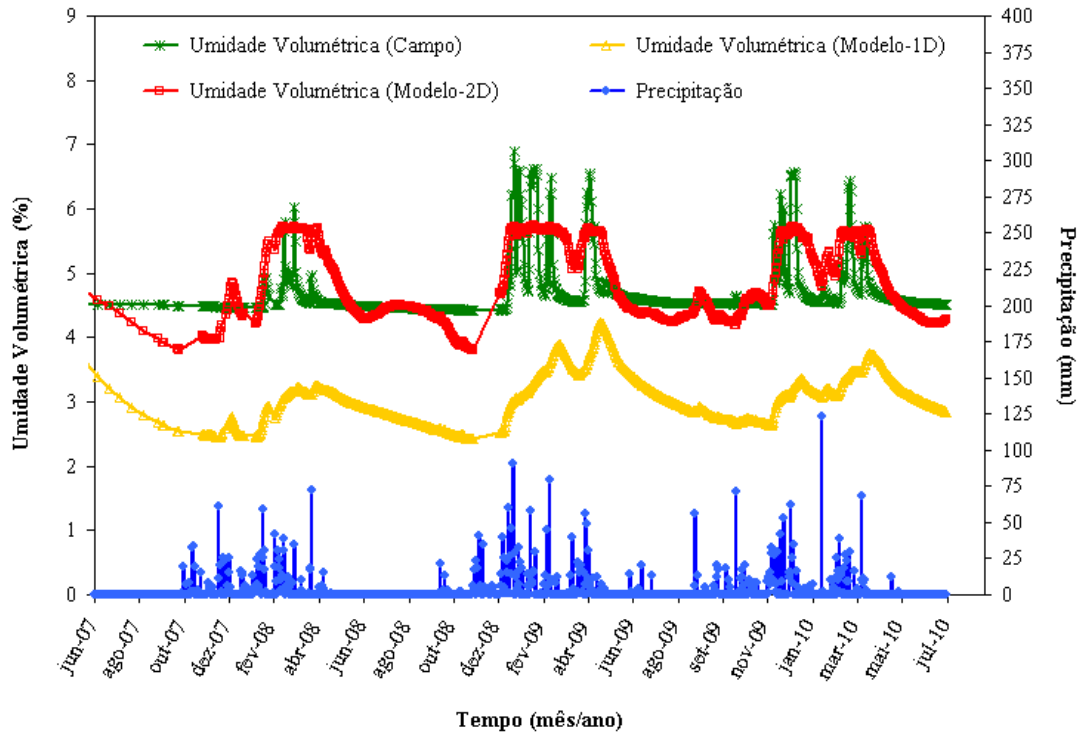


Figura 5.59 – Variação da umidade volumétrica com o tempo para a camada de solo granular (barreira capilar) do sistema de cobertura 2 (CAMPO X MODELO).

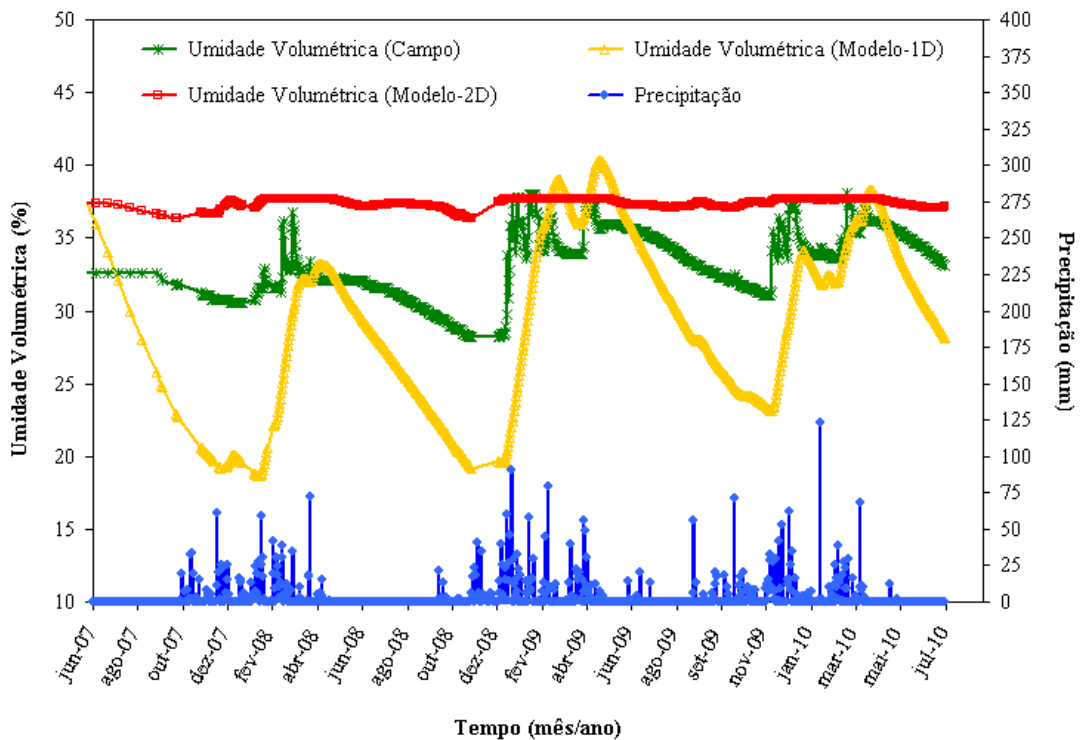


Figura 5.60 – Variação da umidade volumétrica com o tempo para a camada de solo de fundação (trafegabilidade) do sistema de cobertura 2 (CAMPO X MODELO).

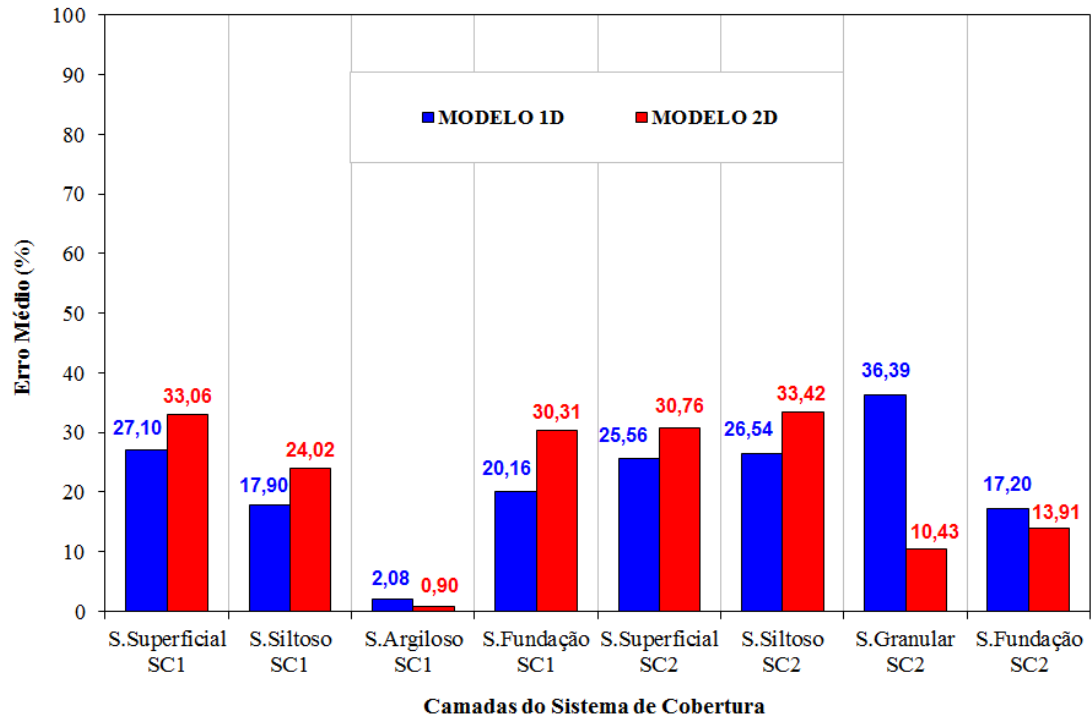


Figura 5.61 – Erro relativo médio para as diversas camadas dos dois sistemas de cobertura.

Com base nas Figuras apresentadas anteriormente, pode-se dizer que:

- De uma forma geral, o comportamento da umidade medida em campo e da umidade calculada a partir dos modelos propostos foram semelhantes e compatíveis com o comportamento da precipitação.
- A variação da umidade nos dois modelos é menos sensível às variações da precipitação, sendo que esta sensibilidade vai diminuindo cada vez mais à medida que se analisa as camadas mais profundas, porém mantendo o mesmo comportamento da umidade de campo.
- Tanto o modelo 1D quanto o modelo 2D apresentaram um comportamento parecido com o medido em campo, no entanto, o modelo 1D apresentou um erro menor para as camadas superiores e para o solo de fundação do primeiro sistema de cobertura enquanto que o modelo 2D se ajustou melhor para as camadas referentes as barreiras hidráulica e capilar e para a camada de solo de fundação do sistema de cobertura 2.

Para analisar se há ou não fluxo de oxigênio nas camadas da cobertura, observou-se o comportamento do grau de saturação no período de tempo das análises para as diversas camadas dos dois sistemas de cobertura. Supondo que se o solo tiver grau de saturação igual ou maior que 80% o fluxo de oxigênio é bem pequeno, SRK (2005), nas Figuras 5.62 a 5.65, delimitou-se duas regiões, uma que “passaria” oxigênio e outra que “não passaria”.

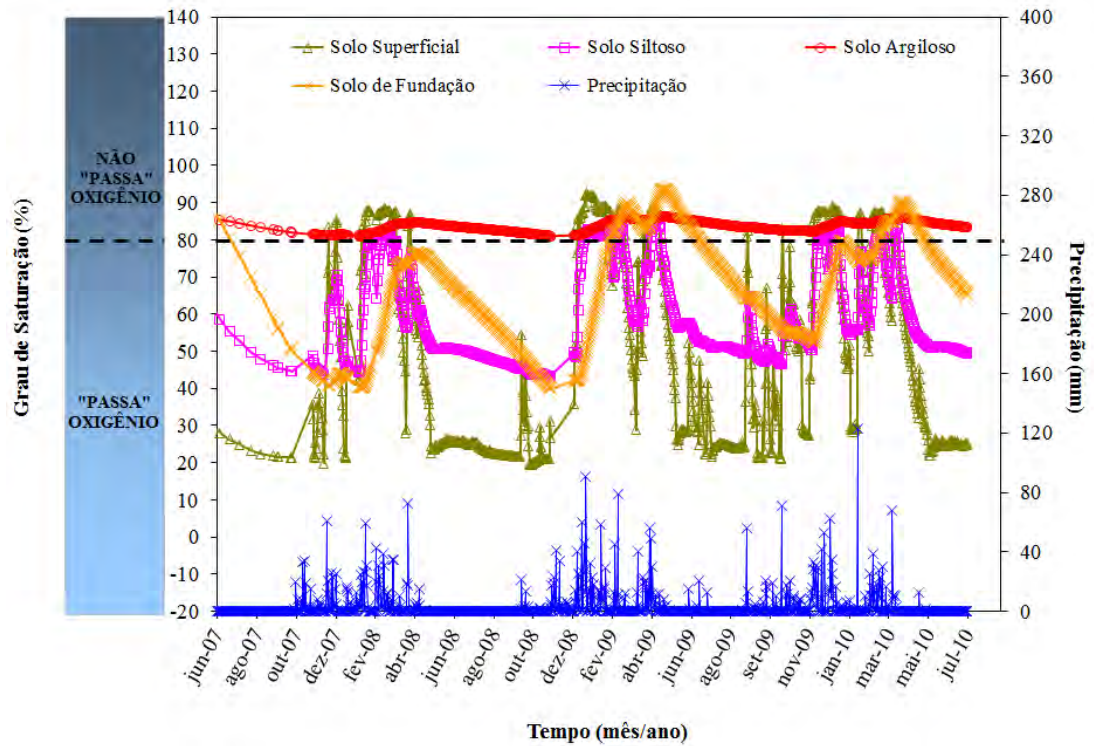


Figura 5.62 – Variação do grau de saturação dos solos do sistema de cobertura 1 (MODELO 1D).

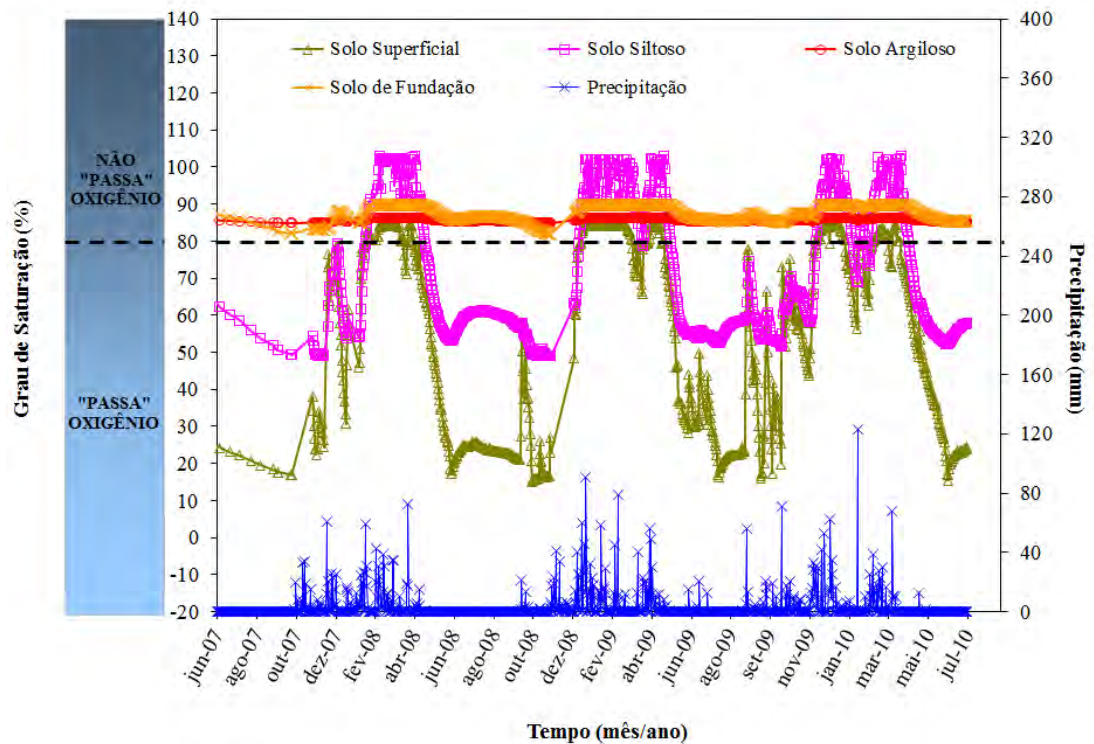


Figura 5.63 – Variação do grau de saturação dos solos do sistema de cobertura 1 (MODELO 2D).

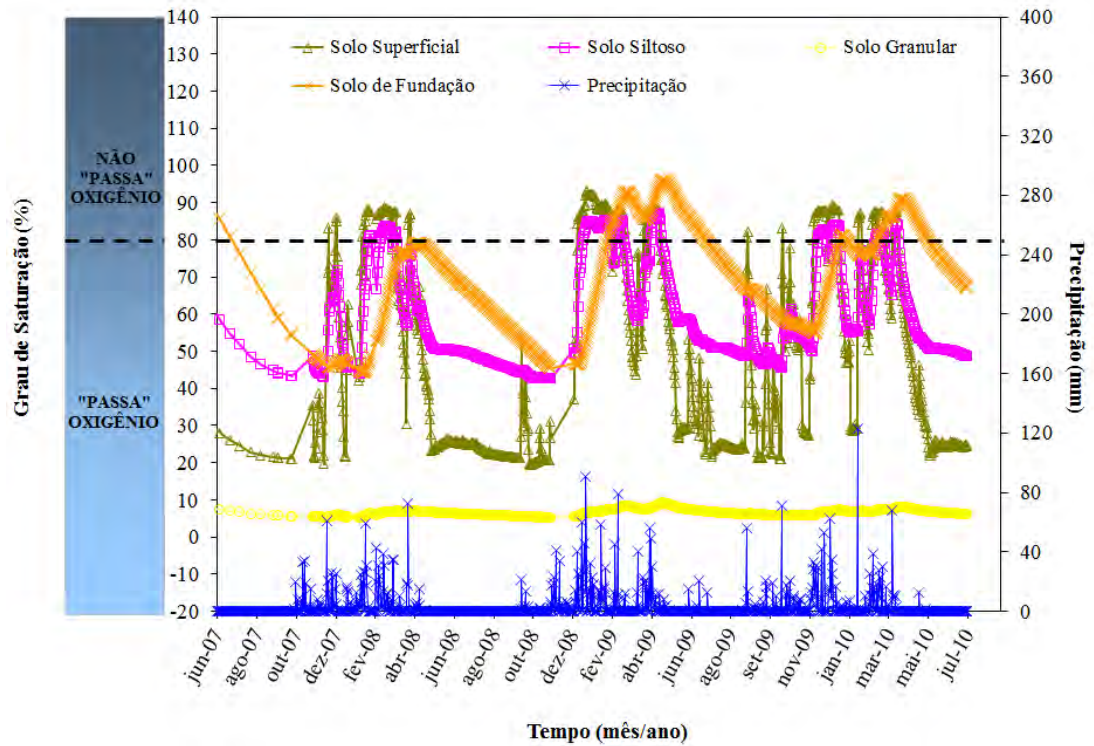


Figura 5.64 – Variação do grau de saturação dos solos do sistema de cobertura 2 (MODELO 1D).

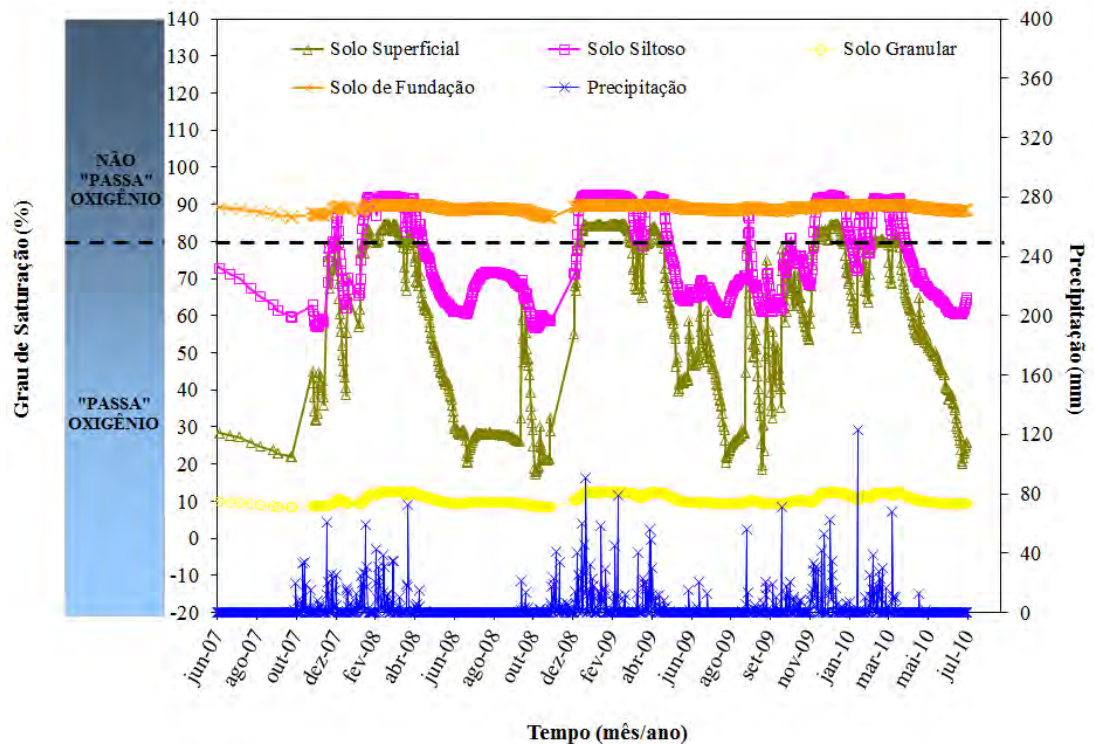


Figura 5.65 – Variação do grau de saturação dos solos do sistema de cobertura 2 (MODELO 2D).

Observa-se nessas Figuras que:

- A camada referente ao solo superficial (top soil) apresenta um grau de saturação acima de 80% apenas nas épocas de chuva, dessaturando muito rápido nos períodos de seca, o que permite então o fluxo de oxigênio nesta camada. Tal ocorrência já era esperada, uma vez que se trata da camada que está em contato direto com a atmosfera, ou seja, que sofre todos os tipos de intempéries (transpiração, radiação solar, vento, etc.).
- A camada de “armazenamento e liberação” (solo siltoso) também apresenta valores de grau de saturação acima de 80% apenas nas épocas chuvosas, valores estes menores do que aqueles apresentados pela camada superficial no modelo 1D e maiores no modelo 2D. Como se trata de uma camada cuja função principal é servir como um reservatório de água, evitando assim grandes perdas de umidade e conseqüentemente de saturação das camadas inferiores, este comportamento também já era esperado.
- A camada de solo argiloso (barreira hidráulica) apresentou um grau de saturação na faixa de 80 a 87% durante todo o período de análise, ou seja, acima de 80% o que sugere que não houve fluxo de oxigênio através desta camada. Esta condição foi possível devido a dois fatores:
 1. A baixa condutividade hidráulica desta camada, o que permite a pequenas variações na umidade e saturação da camada.
 2. À camada de solo siltoso “armazenamento e liberação” que devido sua função de “caixa d’água” permitiu com que as camadas inferiores não sofressem perdas de umidade e conseqüentemente de saturação durante os períodos de seca.
- A camada de solo arenoso (barreira capilar) apresentou um grau de saturação bastante inferior em relação ao valor ideal durante todo o período de análise, o que mostra que apesar de não haver grandes variações de umidade na camada, devido ao fato da presença da camada de solo siltoso, há fluxo de oxigênio nesta camada, uma vez que os valores de saturação alcançados estão na faixa de 10 a 15%.

- Apesar da baixa variação de umidade nas camadas sobrejacentes a camada de fundação, houve variações significativas de umidade e consequentemente na saturação desta camada nas análises numéricas unidimensionais dos sistemas de cobertura. Isto pode ser explicado pelo fato da elevação do lençol freático nas épocas chuvosas e o rebaixamento deste nas épocas de seca. Tal fato não se repete nas análises bidimensionais dos sistemas de cobertura.

A variação da sucção matricial com o tempo medida no campo para as diferentes camadas dos dois sistemas de cobertura, e a variação da sucção matricial obtida com os modelos uni e bidimensionais são apresentadas nas Figuras 5.66 a 5.71. A Figura 5.72 apresenta o erro médio calculado para os dois modelos em relação à sucção matricial obtida no campo pela leitura dos HDUs.

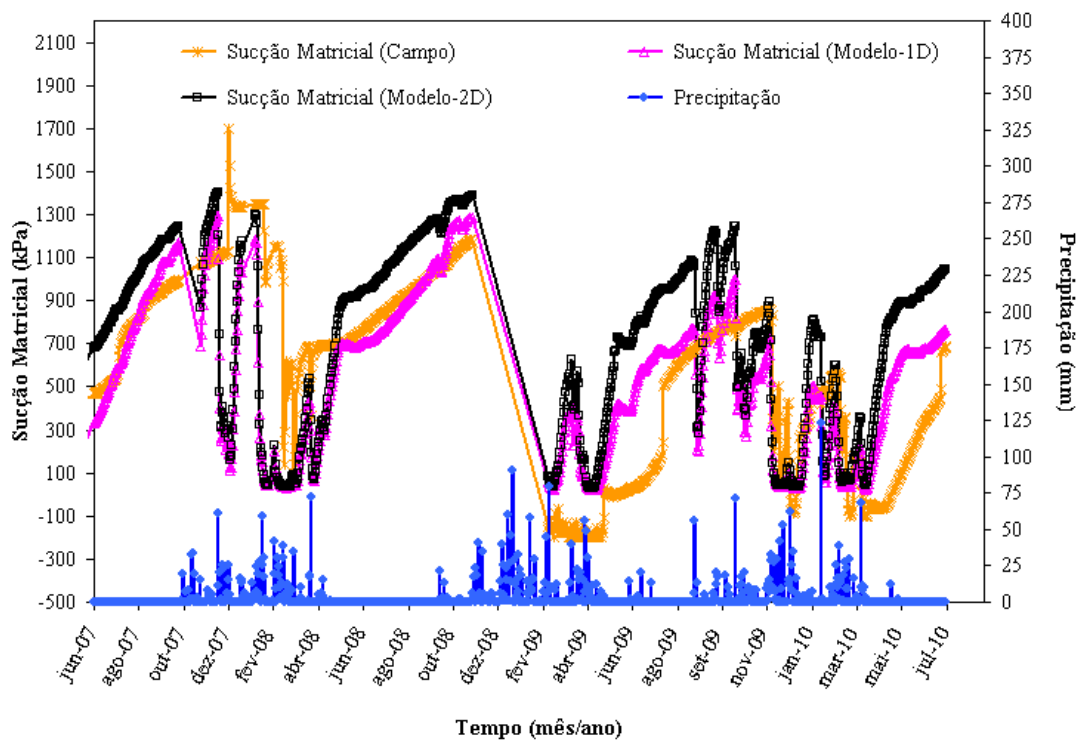


Figura 5.66 – Variação da sucção matricial com o tempo para a camada de solo siltoso do sistema de cobertura 1 (CAMPO X MODELO).

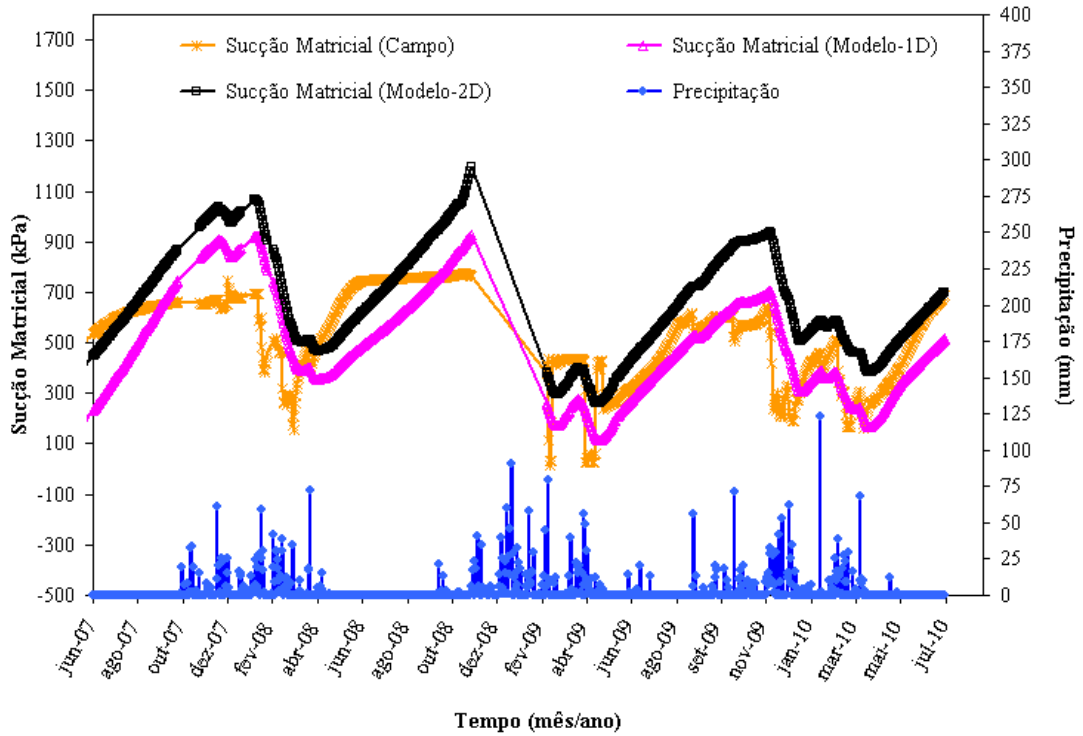


Figura 5.67 – Variação da sucção matricial com o tempo para a camada de solo argiloso (barreira hidráulica) do sistema de cobertura 1 (CAMPO X MODELO).

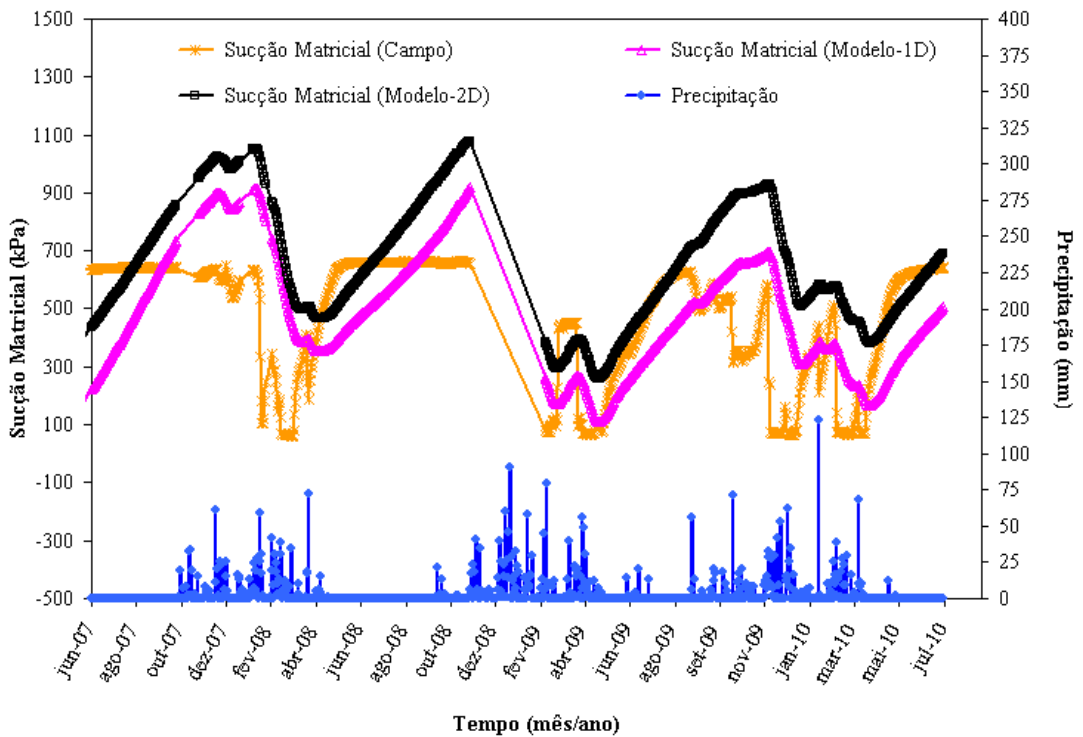


Figura 5.68 – Variação da sucção matricial com o tempo para a camada de solo de fundação (trafegabilidade) do sistema de cobertura 1 (CAMPO X MODELO).

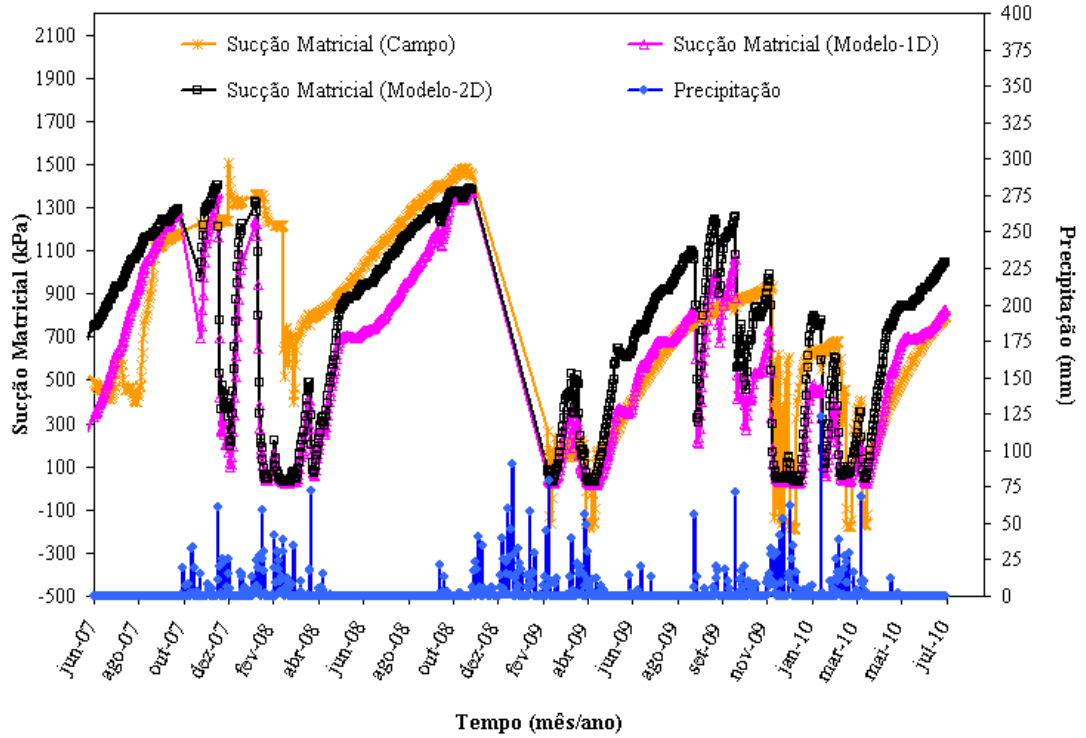


Figura 5.69 – Variação da sucção matricial com o tempo para a camada de solo siltoso do sistema de cobertura 2 (CAMPO X MODELO).

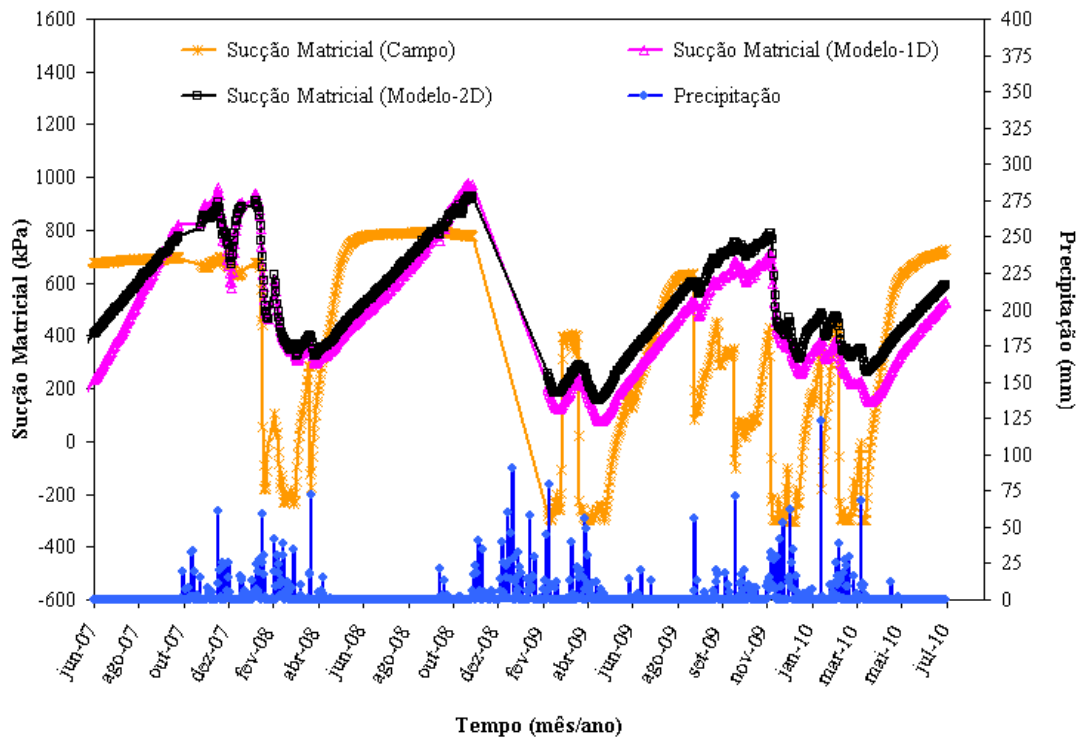


Figura 5.70 – Variação da sucção matricial com o tempo para a camada de solo granular (barreira capilar) do sistema de cobertura 1 (CAMPO X MODELO).

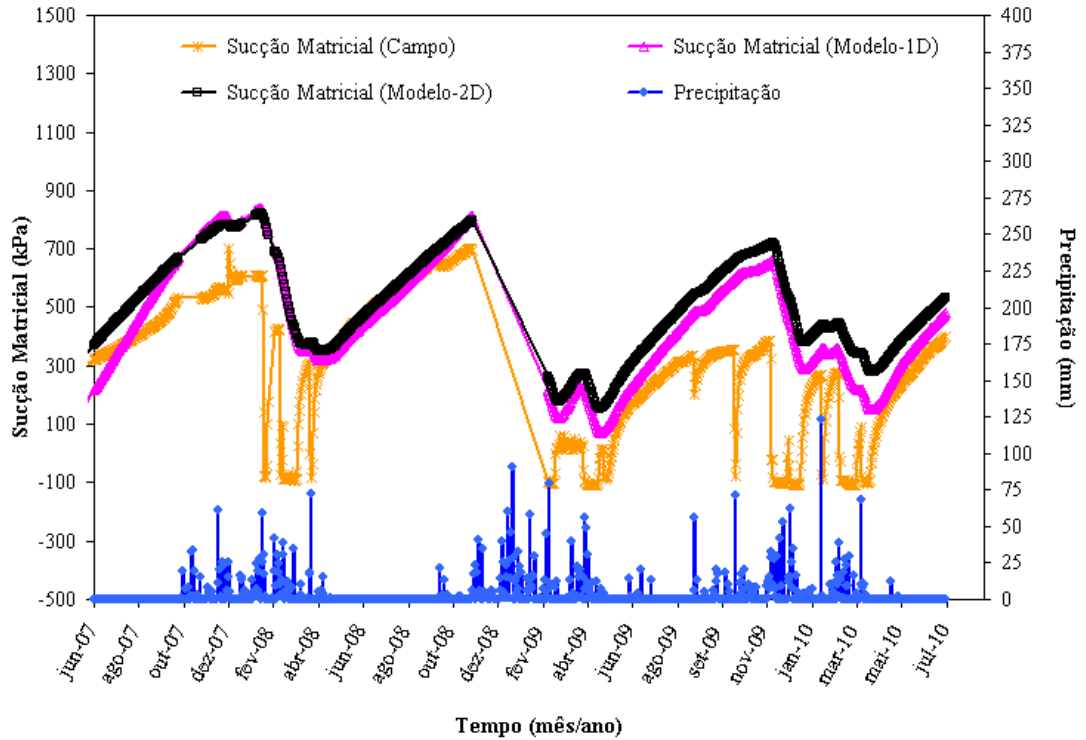


Figura 5.71 – Variação da sucção matricial com o tempo para a camada de solo de fundação (trafegabilidade) do sistema de cobertura 2 (CAMPO X MODELO).

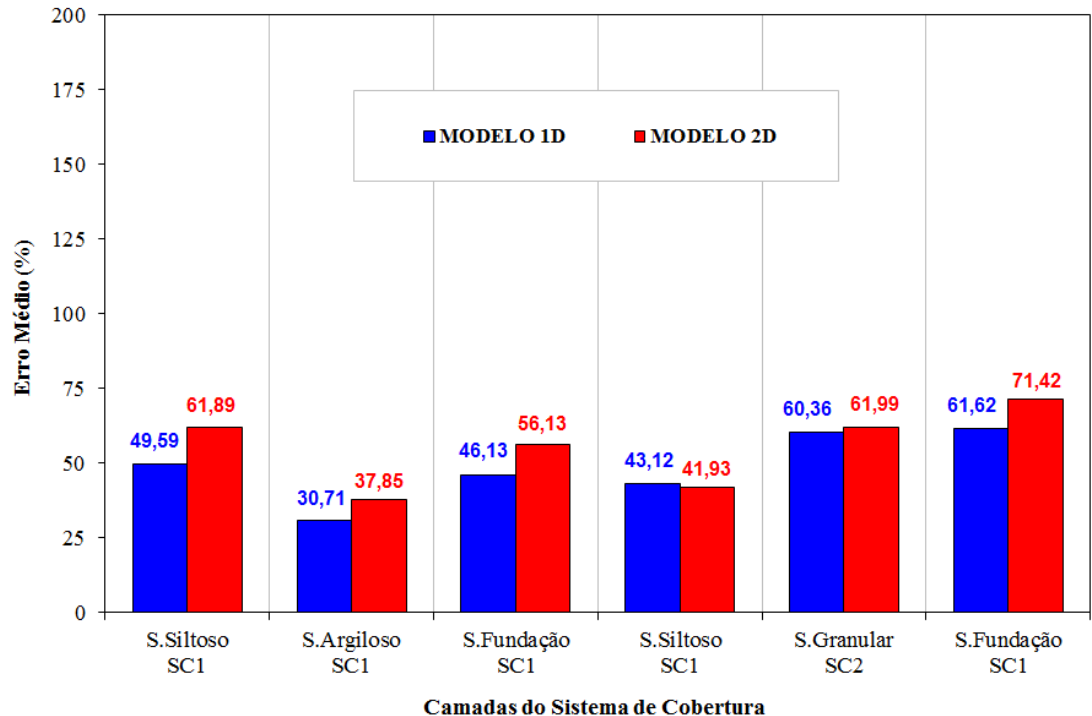


Figura 5.72 – Erro relativo médio para as diversas camadas dos dois sistemas de cobertura.

Com base nas Figuras apresentadas anteriormente, pode-se dizer que:

- Dada a calibração que foi feita dos HDUs, a única que se podia fazer dadas as circunstâncias encontradas, mas que, certamente, não é a melhor, pode-se dizer que as comparações entre a sucção medida em campo e calculada a partir dos modelos propostos foi satisfatória, o que de certa forma valida a calibração feita.
- A variação da sucção nos dois modelos é menos sensível às variações da precipitação, sendo que esta sensibilidade vai diminuindo cada vez mais à medida que se analisa as camadas mais profundas, porém mantendo o mesmo comportamento da sucção de campo.
- Tanto o modelo 1D quanto o modelo 2D apresentaram um comportamento parecido com o medido em campo, no entanto, em ambos os modelos os erros médios calculados foram grandes, o que contraria o bom comportamento que estes tiveram ao longo do período de análise, mas por se tratar de valores de sucção, ou seja, uma escala maior do que os valores de umidade, acaba gerando erros com valores maiores do que o apresentado pela umidade volumétrica, sendo que o modelo 1D apresentou um erro menor em todas as camadas em relação ao 2D.

Após a apresentação dos principais resultados obtidos com as análises numéricas dos sistemas de cobertura e suas comparações com os resultados obtidos em campo, é apresentado no Capítulo 6 as principais conclusões do presente trabalho.

6- CONCLUSÕES

No desenvolvimento da tese surgiram alguns problemas:

- Durante o período estudado foram realizadas apenas algumas medidas do escoamento superficial por Amorim (2008), no entanto em função do entupimento contínuo dos hidrômetros, provocado pelo mau funcionamento da caixa de retenção de finos, uma vez que a cobertura vegetal não estava completamente instalada sobre o experimento no início do período de análises, os hidrômetros foram desativados. Para tentar resolver o problema, pensou-se em instalar uma régua milimétrica direto na caixa de retenção de finos com o intuito de realizar uma medida indireta do escoamento superficial nos sistemas de cobertura. No entanto, tal procedimento necessitaria de um monitoramento rigoroso por parte do pessoal da RPM em período de chuvas fortes, o que não acabou acontecendo e, por isso, estes dados não foram apresentados nesta tese;
- A medição da percolação realizada também foi pouco precisa primeiro porque muito provavelmente, os lisímetros coletaram água do lençol freático em função do mau funcionamento do canal de drenagem que circunda o experimento, que foi rebaixado com o uso de uma retroescavadeira. Além disso, o monitoramento era feito em vasilhames que, principalmente nos períodos chuvosos, precisavam de acompanhamento frequente do pessoal da RPM o que, mais uma vez, acabou não ocorrendo. Isto acarretou em medidas imprecisas e muito espaçadas no tempo, o que levou também a não apresentação destes dados na tese.
- Como relatado por Amorim (2008), houve alguns problemas na germinação das espécies vegetais no início do experimento. Além disso, como o experimento se encontra numa área onde existem diversas espécies nativas, as espécies lançadas inicialmente acabaram dominadas pelas espécies nativas que circundavam a área. Por isso, no transcorrer do experimento, não se teve controle das espécies que acabaram dominando na área, causando assim incertezas nos parâmetros vegetais necessários nas análises numéricas.

Por outro lado, o desenvolvimento do trabalho conduziu às seguintes conclusões:

- A nova calibração dos WCRs apresentou valores diferentes das realizadas por Amorim (2008), principalmente para os solos com coeficiente de permeabilidade baixo como o solo argiloso e o solo de fundação.
- Uma calibração rigorosa dos HDUs exigiria uma câmara na qual as amostras de solo deveriam ser submetidas a diferentes valores de sucção. Como não se dispunha dessa facilidade na RPM onde estava o sistema de aquisição dos dados da instrumentação, a calibração dos HDUs não pode ser feita de forma rigorosa. No entanto, a calibração feita nesta tese, embora limitada, proporcionou valores de sucção nas análises numéricas das coberturas coerentes com as obtidas no campo.
- A grande maioria dos parâmetros geotécnicos usados nesta Tese foram obtidos por Amorim (2008). No entanto, realizaram-se novos ensaios de condutividade hidráulica para os solos das coberturas, uma vez que nos ensaios realizados por Amorim (2008) utilizou-se amostras compactadas e não indeformadas dos solos argiloso e de fundação. Os novos valores de condutividade hidráulica obtidos foram bastante coerentes com os obtidos por Amorim (2008).
- Os demais parâmetros do modelo numérico foram determinados com base em análises paramétricas, devido às incertezas nos valores a serem adotados.
 - ✓ Como se tinha dúvida em relação à posição inicial do lençol freático fez-se a análise paramétrica e observou-se que esse parâmetro tinha uma influência importante nos resultados;
 - ✓ Os parâmetros vegetais ficaram indefinidos devido à diversidade de espécies que germinaram no local do experimento. As análises paramétricas mostraram que tanto o índice de área foliar, quanto a profundidade das raízes e o ponto de murcha têm influencia nos resultados;
 - ✓ Os parâmetros térmicos não foram determinados previamente em laboratório, por isso usou-se análises paramétricas para determiná-los. Percebeu que a influência desses parâmetros não era grande, principalmente o calor específico dos solos. Os melhores valores foram condizentes com os encontrados na literatura e recomendados no manual do programa VADOSE.

- ✓ A influência dos dados climáticos também foi avaliada e, como era de se esperar, todos os parâmetros estudados tem influencia muito importante nos resultados;
- As análises permitiram concluir também que os solos mais superficiais são mais sensíveis às variações dos parâmetros de entrada do modelo.
- Com relação às análises numéricas realizadas pode-se dizer:
 - ✓ Comparando com os dados obtidos pela instrumentação de campo, o modelo unidimensional apresentou um erro relativo menor tanto para umidade volumétrica quanto para a sucção matricial medida. Conclui-se que, pelo menos em situações semelhantes às estudadas nesta tese, o uso do modelo uni-dimensional é mais interessante, já que os tempos computacionais são significativamente menores dos que os que gasta com o uso do modelo bi-dimensional;
 - ✓ Nos dois sistemas de cobertura evapotranspirativos estudados, praticamente não houve passagem das águas pluviais para o rejeito, como pode ser observado pelos perfis de umidade gerados pelos modelos;
 - ✓ Como também se quer evitar a passagem de oxigênio, o sistema de cobertura 1, que apresenta a camada de argila (barreira hidráulica), parece ser o que mais atende às necessidades da RPM, uma vez que manteve seu grau de saturação acima de 80%, o que é o recomendado para que não o fluxo de oxigênio seja pequeno;
 - ✓ As variações de umidade volumétrica e sucção matricial, com o tempo medidas no campo nas diferentes camadas dos dois sistemas de cobertura, foram razoavelmente parecidas com as previstas pelos modelos numéricos, principalmente para os solos mais superficiais (solo superficial e solo siltoso). Entretanto, para os solos mais profundos, tais variações não foram tão precisas.
 - ✓ No caso dos valores de sucção matricial pode-se concluir que a calibração proposta para os instrumentos HDUs é válida, uma vez que os resultados de campo apresentaram um comportamento parecido com os gerados pelos modelos.

Portanto, como conclusão final do estudo, propõe-se que o projeto de sistemas de cobertura com solo seja feito de acordo com as seguintes etapas:

- A partir de análise táctil-visual e ensaios de caracterização, solos disponíveis nas proximidades devem ser selecionados para comporem as camadas de armazenamento e liberação e a barreira hidráulica;
- Os solos escolhidos devem ser ensaiados no laboratório para se determinar as suas permeabilidades saturadas e as curvas de retenção de água;
- Espécies nativas devem ser escolhidas para serem implantadas no topo do sistema de cobertura. Estas espécies devem ter raízes pouco profundas, até cerca de 40 cm, um índice de área foliar em torno de 2,5 a 3 e a sucção referente ao ponto de murcha entre 200 e 800 kPa;
- Em princípio o sistema de cobertura deve ser composto de 3 camadas de solo:
 - 1^a) A camada superficial deve ter cerca de 15 cm e o solo deve, principalmente, ter características que facilitem a germinação da cobertura vegetal.
 - 2^a) Abaixo da camada superficial, deve-se construir a camada de armazenamento-e-liberação, cuja espessura deve ser estudada em análises numéricas unidimensionais como as apresentadas nesta tese, de forma a se obter a infiltração desejada;
 - 3^a) Por fim, abaixo da camada de armazenamento-e-liberação e sobre os resíduos, deve-se construir a camada barreira hidráulica com solo compactado com teor de umidade na umidade ótima ou pouco acima desta, de forma que se tenha um coeficiente de permeabilidade saturado menor que 10^{-6} cm/s. Em princípio, esta camada pode ter 50 cm de espessura;

Como sugestão para futuros trabalhos, recomenda-se estudar o efeito da histerese nas curvas de retenção de água no solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABICHOU, T.; LIU, X. AND TAWFIQ, K. (2004). *Design of Cost Effective Lysimeters for Alternative Landfill Cover Demonstrations Projects* FAMU – FSU College of Engineering State University System of Florida, Florida Center for Solid and Hazardous Waste Management, University of Florida, 88 p.
- ABICHOU T. (2003). Technical Academic Meeting of Field Evaluation of Evapotranspiration Caps.
- AKINDUNNI, F.F., GILLHAM, R.W., NICHOLSON, R.V. (1991). Numerical simulations to investigate moisture-retention characteristics in the design of oxygen-limiting covers for reactive mine tailings. *Canadian Geotechnical Journal* 28, 446–451.
- AMORIM, N.R. (2008). Avaliação do desempenho de sistemas de cobertura na Mina Rio Paracatu Mineração (RPM), Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, 143 p
- ANDERSLAND, O. B., AND ANDERSON, D. M. (1978). *Geotechnical Engineering for Cold Regions*. McGraw-Hill Inc. New York.
- ARES, A.; FOWNES, J. H. (2000). Productivity, nutrient and water-use efficiency of *Eucalyptus saligna* and *Toona ciliate* in Hawaii. *Forest Ecology and Management*, v. 139, p. 227-236.
- AUBERTIN, M., CHAPUIS, R.P., AACHIB, M., BUSSIE`RE, B., RICARD, J.-F., TREMBLAY, L. (1995a). E´valuation en laboratoire de barriers se`ches construites a` partir de re´siduals miniers. E´cole Polytechnique, CDT P1622. Final Report, Mine Environment Neutral Drainage Program—Programme de Neutralisation des Eaux de Drainage dans l’Environnement Minier (MEND/NEDEM).
- AUBERTIN, M., RICARD, J.-F., CHAPUIS, R.P. (1995b). A study of capillary properties of mine tailings: measurements and modeling. In: *Proceedings, ‘48th Canadian Geotechnical Conference, Vancouver, BC*, pp.17–24.
- AZEVEDO (2003) - Relatório Técnico: Ensaio de caracterização, triaxiais e edométricos em amostra de rejeito da barragem morro do ouro - empresa rio paracatu mineração(rpm), 52 pgs.
- BATTAGLIA, M (1998). Prediction of leaf area index in eucalypt plantations: effects of water stress and temperature. *Tree Physiology*, v. 18, p. 521-528.
- BARBOUR, S.L. (1990). Reduction of acid generation in mine tailings through the use of moisture retaining cover layers as oxygen barriers: discussion. *Canadian*

- Geotechnical Journal 27, 398–401.
- BARCLAY H. J.; TROFYMOW J. A.; LEACH R. I. (2000). Assessing bias from bores in calculating leaf area index in immature Douglas-fir with the LI-COR canopy analyzer. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 100, p. 255-260.
- BENSON, C. H. AND KHIRE, M. V. (1995). “*Earthen Covers for Semiarid and Arid Climates*,” *Landfill Closures – Environmental Protection and Land Recovery*, ASCE, Geotechnical Special Publication, No. 53, R. Jeffrey Dunn and Udai P. Singh, Eds., New York, NY, p. 201-217
- BENSON, C., BOSSCHER, P., LANE, D., PLISKA, R. (1994). Monitoring system for hydrologic evaluation of landfill final covers. *Geotechnical Testing Journal* 17 (2), 138–149.
- BROWN, W.E. (1970). The control of acid mine drainage using an oxygen diffusion barrier. M. Sc. Thesis, Ohio State University, Columbus, OH.
- BUSSIÈRE, B., AUBERTIN, M., AACHIB, M., CHAPUIS, R.P., CRESPO, R.J. (1995). Unsaturated flow modeling of covers for reactive tailings. CAMI’95, Proceedings of the Third Canadian Conference on Computer Application in the Mineral Industry, Montreal, Quebec.
- CAMILLO, P. J., GURNEY, R. J., AND SCHMUGGE, T. J. (1983). A Soil and Atmospheric Boundary Layer Model for Evapotranspiration and Soil Moisture Studies. *Water Resources Research*, Vol. 19 No.2 pp. 371-380.
- CARLSSON, E. (2002). *Sulphide-Rich Tailings Remediated by Soil Cover*, Doctoral Thesis, Lulea University of Technology, Sweden.
- CHANDLER, R. J., CRILLY, M. S., MONTGOMERY-SMITH, G. (1992). *A low-cost method of assessing clay desiccation for low-rise buildings*. Proceeding of the Institute of Civil Engineering.
- CHAPUIS, R.P. (2002). The 2000 R.M. Hardy Lecture: full-scale hydraulic performance of soil-bentonite and compacted clay liners. *Canadian Geotechnical Journal* 39, 417–439.
- CHEN, J. M.; BLACK, T. A.; ADAMS, R. S. (1991) Evaluation of hemispherical photography for determining plant area index and geometry of a forest stand. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 56, p. 129-143.
- CHEN, J. M.; CIHLAR, J.(1996). Retrieving leaf area index of boreal conifer forests using Landsat TM images. *Remote Sensing of Environment*, v. 55, p. 153-162.
- CHOO, L.-P., YANFUL, E.K. (2000). Water flow through cover soils using modeling and experimental methods. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 126, 324–334.
- COLLIN, M. (1987). Mathematical modeling of water and oxygen transport in

- layered soils for deposits of pyritic mine tailings. Department of Chemical Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- DAKSHANAMURTHY, V., AND FREDLUND, D. G. (1981). A Mathematical Model for Predicting Moisture Flow in an unsaturated Soil Under Hydraulic and Temperature Gradients. *Water Resources Research Journal*, American Geophysical Union, Vol. 17(3), pp. 714-722.
- DAUGHTRY, C. S. T.(1990) Direct measurement of canopy structure. In: Goel, N. S.; Norman, J. M. (Eds.) *Instrumentation for studying vegetation canopies for remote sensing in optical and thermal infrared regions*. London: Harwood, cap. 5, p. 45-60.
- DORSEY, N. E. (1940). *Properties of Ordinary Water Substance*, Nostrand Reinhold, New York, pp. 673.
- DWYER, F. S. (2003). *Water Balance Measurements and Computer Simulations of Landfill Covers* Doctoral Thesis, The University of New Mexico, USA.
- EDLEFSEN, N.E. & ANDERSON, A.B.C. (1943). Thermodynamics of soil moisture. *Hilgardia* 15: 2: pp. 31-298.
- EPA (1999). "Field Applications of In Situ Remediation Technologies: Permeable Reactive Barriers," EPA/542/R-99/002, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington, D.C., 114 p.
- EPA (2002). "Technical Guidance For RCRA/CERCLA Final Covers". Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington DC.
- FARIAS, C. E. G. (2002). "Mineração e o Meio Ambiente no Brasil". Relatório Preparado para o CGEE. PNUD – Contrato 2002/001604. 40p.
- FREDLUND, D. G., AND DAKSHANAMURTHY, V. (1982). Predicting of Moisture Flow and Related Swelling or Shrinking in unsaturated Soils. *Geotechnical Engineering*, Vol. 13, pp. 15-49.
- FREDLUND, D.G., AND MORGENSTERN , N.R. (1976). Constitutive Relations for Volume Change in Unsaturated Soils. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 13, pp. 261-276.
- FREDLUND, D. G. (1981). *The Behavior of Unsaturated Soil*. Published Course Notes, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada.
- FREDLUND, D.; XING, A.; AND HUANG, S. (1994). *Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil – water characteristic curve*, *Canad. Geotechn. J.* 31, 533-546.
- GEO-SLOPE International Ltd. (2002). *VADOSE/W User's Manual*, Version 1.01, Calgary, Alberta, Canada.

- GEO-ANALYSIS 2000 Ltd. (2000). Manual preparation for SoilCover version 2000.
- HARRIES, J.R., RITCHIE, A.I.M. (1987). The effect of rehabilitation on the rate of oxidation of pyrite in a mine waste rock dump. *Environmental Geochemistry and Health* 9 (2), 27–36.
- HILLEL, D. (1980). *Fundamentals of Soil Physics and Applications to Soil Physics*. Academic Press. New York.
- HINGSTON, F. J.; GALBRAITH, J. H.; DIMMOCK, G. M. (1998) Application of the process-based model BIOMASS to *Eucalyptus globulus* ssp. *globulus* plantations on exfarmland in south western Australia - I. Water use by trees and assessing risk of losses due to drought. *Forest Ecology and Management*, v. 106, p. 141-156.
- ITRC - The Interstate Technology & Regulatory Council, (2003), “*Technical and Regulatory Guidance for Design, Installation, and Monitoring of Alternative Final Landfill Covers*”, Alternative Landfill Technologies Team. www.itrcweb.org.
- JAME, Y. W., AND NORUM, D. I. (1980). Heat and Mass Transfer in a Freezing Unsaturated Porous Medium. *Water Resources Research*, Vol. 16, No.4, pp. 811-819.
- JOSHI, B. (1993). A finite element model for the coupled flow of moisture and heat in soils under atmospheric forcing. M. Sc. Thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, Saskatchewan, Canada.
- KHIRE, M., BENSON, C., BOSSCHER, P. (1997). Water balance modeling of earthen final covers. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 123 (8), 744–754.
- KIMBALL, B. A., JACKSON, R. D., REGINATO, R. J., NAKAYAMA, F. S., AND IDSO, S. B. (1976). Comparison of field-measured and calculated soil-heat fluxes, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 40(1), p. 18-25.
- LAI, P.C.W., FORRESTER, P.I., HANCOCK, R.L., HAY, D.M. & LORSCHIEDER, F.L. (1976) Rat alpha-fetoprotein: isolation, radioimmunoassay and fetal-maternal distribution during pregnancy. *J. Reprod. Fert.* 48, 1-8.
- LAM, L. W., FREDLUND, D. G., AND BARBOUR, S. L. (1987). Transient seepage model for saturated-unsaturated soil systems: a geotechnical engineering approach. *Can. Geotech. J.*, Vol. 24, No.4, pp. 565-580.
- LANGONI, G. (2002). *Feasibility of Evapotranspiration Covers for Florida Landfills*. M.S.Thesis, Florida State University, 100pp.
- LI-COR. LAI-2000 (1992). Plant canopy analyser: Instruction manual. Li-cor Inc. Lincoln: 182 p.

- LINHARES, C. A.; PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. (2000). Relação entre volume de madeira e índice de área foliar em um povoamento de *Pinus spp.*: estudo de caso. *Revista Árvore*, v. 24, p. 47-54.
- LUNDGREN, T. (1997). Bersbo Pilot Project—Physical behaviour seven years after covering the waste rock piles. In: Proceedings 'Fourth International Conference on Acid Rock Drainage' III, Vancouver, BC, Canada, pp. 1419–1434.
- MARINHO, F.A.M.; VIEIRA, A. M.; OLIVEIRA, O.M., (2005). *Aspectos da curva de calibração do TDR para um solo residual compactado*; *Solos e Rochas*, v. 28, n. 3, p.inicial 295, p.final 306, ISSN: 0103-7021, Impresso.
- MBONIMPA, M., AUBERTIN, M., AACHIB, M., BUSSIÈRE, B. (2003). Diffusion and consumption of oxygen in unsaturated cover materials. *Canadian Geotechnical Journal* 40, 916–932.
- MCCARTNEY AND ZORNBERG (2003). Assessment of Evapotranspirative Cover Performance using Field Data and Numerical Modeling. Proceedings of the 4th International Workshop of Applications of Computational Mechanics In Geotechnical Engineering, Ouro Preto – Brazil, pp. 297-304.
- MEIN, R. G., AND LARSON, C. L. (1973). Modelling infiltration during a steady rain. *Water Resources Research* 9(2): 384-394.
- MILLY, P. C. D. (1984a). A Linear Analysis of Thermal Effects on Evaporation From Soil. *Water Resour. Res.* Vol. 20, No.8, pp. 1087 - 1098.
- MILLY, P. C. D. (1984b). A Simulation Analysis of Thermal Effects on Evaporation from Soil. *Water Resources Research*, Vol. 20, No.8, pp. 1087-1098.
- MILLY, P. C. D. (1982). Moisture and Heat Transport in Hysteretic, Inhomogeneous Porous Media: A Matric Head-Based Formulation and a Numerical Model, *water Resour. Res.*, Vol. 18, No.3, pp. 489-498.
- MILLY, P. C. D., AND EAGLESON, P. S. (1982). Parameterization of Moisture and Heat Fluxes Across the Land Surface For Use in Atmospheric General Circulation Models, Tech. Rep. No. 279, Dep. of Civ. Eng., Mass. Inst. of Technol., Cambridge.
- MILLY, P. C. D., AND EAGLESON, P. S. (1980). The Coupled Transport of Water and Heat in a Vertical Soil Column Under Atmospheric Excitation, Tech. Rep. No. 258 Dep. of Civ. Eng., Mass. Inst. of Technol., Cambridge.
- MOLZ, F.J., AND I. REMSON, (1970), Extraction-term models of soil-moisture use by transpiring plants: *Journal, Water Resources Research*, Vol. 6, No. 5, pp. 1346-1356.
- MOLZ, F.J. (1981). Soil-plant water transport. *Water Res. Res.*, 17:1245-1260.

- MORRIS AND STORMONT (1997). *Capillarity Barriers and Subtitle D Covers: Estimating Equivalency*, Journal of Environmental Engineering, ASCE, Vol. 123, N. 1, p. 3-10.
- MCMULLEN, J., FIRLOTTE, R., KNAPP, R., AUBERTIN, M. (1997). Les Terrains Auriferes property site closure and rehabilitation-conceptual to construction, Proceedings of the 29th Annual Meeting of Canadian Mineral Processors, Ottawa, pp. 274–292.
- NICHOLSON, R.V., AKINDUNNI, F.F., SYDOR, R.C., GILLHAM, R.V. (1991). Saturated tailings covers above the water table: the physics and criteria for design. The Proceedings of the Second International Conference on the Abatement of Acidic Drainage, Montreal.
- NICHOLSON, R.V., GILLHAM, R.W., CHERRY, J.A., REARDON, E.J. (1989). Reduction of acid generation in mine tailings through the use of moisture-retaining cover layers as oxygen barriers. Canadian Geotechnical Journal 26, 1–8.
- NIXON, J. F. (1975). The role of convective heat transport in the thawing of frozen soils. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 12, pp. 425-429. Johansen (1975)
- NYHAN, J. W.; HAKONSON, T. E.; AND DRENNON, B. J. (1993). A water balance study of two landfill cover designs for semiarid regions. J. Environmental Quality, 19:281- 288.
- O’KANE, M., WATERS, P. (2003). Dry cover trials at Mt. Whaleback—a summary of overburden storage area cover system performance. Proceedings of Sixth International Conference for Acid Rock Drainage, Cairns, Qld., Australia, CD.
- O’KANE, M., WILSON, G.W., BARBOUR, S.L. (1998). Instrumentation and monitoring of an engineered soil cover system for mine waste rock. Canadian Geotechnical Journal 35, 828–846.
- PARENT, S-É. AND CABRAL, G.(2006). “*Design of Inclined Covers with Capillary Barrier Effect*”, Geotechnical and Geological Engineering (2006) 24: 689–710, Department of Civil Engineering, Faculty of Applied Science, University of Sherbrooke, Quebec J1K 2R1, Canadá
- PASSERAT DE SILANS, A., BRUCKLER, L., THORY, J. L., AND VAUCLIN, M. (1989). Numerical Modeling of Coupled Heat and Water Flows During Drying in a Stratified Bare Soil Comparison with Field Observations. Journal of Hydrology, Vol 105, pp.109-138.
- PENMAN, H. L. (1948). Natural evapotranspiration from open water, bare soil and-grass. Proc. R. Soc. London Sere A. 193: 120-145.
- PHILIP, J. R. ,AND DE VRIES, D. A. (1957). Moisture Movement in Porous Materials under Temperature Gradients. Transaction, American Geophysical Union, Vol 38, No.2, pp. 222-232.

- PRIESTLEY, C. H. B., AND TAYLOR, R. J. (1972). On the assessment of the surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Mon. Weather Rev.*, 100: 81-92.
- QIAN, X.; KOERNER, R. M. AND GRAY, D. H. (2002). “Geotechnical Aspects of Landfill Design and Construction”, in *Michigan Department of Environmental Quality, Waste Management Division, USA*, p 399–437
- RASMUSON, A., ERIKSSON, J.C. (1986). Capillary layers in covers for mine tailings dumps. Report 3307, National Swedish Environment Protection Board, Solna, Sweden.
- ROSS B. (1990). The diversion capacity of capillary barriers, *Water Resources Research*, 26, 2625–2629.
- SASAMORI, T. (1970). A Numerical Study of Atmospheric and Soil Boundary Layers. *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. 27, pp. 112-1137.
- SAXTON, K.E. (1982). Mathematical modelling of evapotranspiration on agricultural watersheds. In, *Modeling Components of the Hydrologic Cycle*. Singh, H. (ed.), May 18 - 21, 1981. pp. 183-203.
- SHACKELFORD, C.D., CHANG, C.K., CHIU, T.F. (1994). The capillary layer effect in unsaturated flow through soil barriers. *Proceedings of the First International Congress on Environmental Geotechnics, Edmonton, ISSMFE/CGS*, pp. 789–793.
- SOARES, J. V. (2000); Notas de aula, Curso de Hidrologia de Florestas - Introdução a Hidrologia de Florestas, Capítulo 4 – Umidade atmosférica e precipitação; <http://www.ltid.inpe.br/dsr/viane/CursoHF/Capitulo4c.htm>; acesso em 17/01/2001.
- SOPHOCLEOUS, M. A. (1979). Analysis of Water and Heat Flow in Unsaturated-Saturated Porous Media. *Water Resources Research*, Vol. IS, No.5, pp. 1195-1206.
- SOPHOCLEOUS, M. A. (1978). Analysis Of Heat And Water Transport In Unsaturated-Saturated Porous Media, Ph. D. thesis, University of Alberta, Edmonton, Canada.
- SRK Consulting Engineers and Scientists (2005). “Rio Paracatu Mineração, Morro do Ouro, *Conceptual Mine and Tailings Cover Design*”. Relatório interno da RPM.
- SRK Consulting. (2003). Rio Paracatu Mineração, Morro do Ouro, Closure Design Aspects, December 2003 *Site Visit Report. Report to Rio Paracatu Mineração S.A., Brazil*. Project Number 1UR007.00, November.
- STORMONT, J.C. STOCKTON, T. & RAY, C. (1999). “*Development of an Geosynthetic Unsaturated Drainage System to Provide Buried Waste*

- Containment*". Report WERC-97-040. New Mexico Waste-management Education and Research Consortium and US Department of Energy. 20p.
- SWANSON, D.A., BARBOUR, S.L., WILSON, G.W., O'KANE, M. (2003). Soil-atmosphere modeling of an engineered soil cover for acid generating mine waste in a humid, alpine climate. *Canadian Geotechnical Journal* 40, 276–292.
- TORNTHWAITE, C. W., (1948). "*An Approach toward a Rational Classification of Climate*", *Geographic Review*, Vol. 38, pp. 89-99.
- VERTESSY, R. A. (1995). Relationships between stem diameter, sapwood area, leaf area and transpiration in a young mountain ash forest. *Tree Physiology*, v. 15, p. 559-567.
- VIEIRA, ADERSON MARTHA (2005). Estudo de barreiras capilares como cobertura final de aterro de resíduos. *Tese Doutorado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo*, 285 p.
- VILLAR, L. F. S.; CAMPOS, T. M. P. (2002). Obtaining the soil moisture characteristic curve of a highly compressible waste submitted to drying. *In: 3rd Int. Conf. Unsaturated Soils, UNSAT, 2002, Recife, Pernambuco. Proc. 3rd Int. Conf. Unsaturated Soils, UNSAT, 2002.*
- VRIES, D. A. (1963). Thermal properties of soils. In the *Physics of Plant Environment*, W. R. Van Wijk (ed.), North Holland Pub. Co., pp. 382.
- VRIES, D. A. (1975). *Heat Transfer in Soils. Heat and Mass Transfer in the Biosphere*, 1. Transfer processes in plant environment. Scripta Book Company, Washington, D.C. pp. 5-28.
- WELLES, J. M. (1990). Some indirect methods of estimating canopy structure. *Remote Sensing Reviews*, v. 5, p. 31-34.
- WELLES, J. M.; COHEN, S. (1996) Canopy structure measurement by gap fraction analysis using commercial instrumentation. *Journal of Experimental Botany*, v. 47, p. 1335-1347.
- WHISLER, F. D., KLUTE, A., AND MILLINGTON, R. J. (1968). Analysis of steady state evapotranspiration from a soil column, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 32, 167-174.
- WILSON, G.W., FREDLUND, D.G., BARBOUR, S.L. (1994). Coupled soil-atmosphere modeling for soil evaporation. *Canadian Geotechnical Journal* 31, 151–161.
- WILSON, G.W. (1990). Soil Evaporation fluxes for geotechnical engineering problems. Ph. D. Thesis, University of Saskatchewan, Saskatchewan, Canada.
- WOYSHNER, M.R., YANFUL, E.K. (1995). Modelling and field measurements of

- water percolation through an experimental soil cover on mine tailings. *Canadian Geotechnical Journal* 32, 601–609.
- YANFUL, E.K. (1993). Oxygen diffusion through soil covers on sulphidic mine tailings. *Journal of Geotechnical Engineering* 119 (8), 1207–1228.
- YANFUL, E.K., AUBE, B.C. (1993). Modelling moisture-retaining soil covers. *Proceedings 1993 Joint CSCE–ASCE National Conference on Environmental Engineering*, Montreal, Quebec, Canada, pp. 273–280.
- YANFUL, E.K., ST-ARNAUD, L.C. (1991). Design, instrumentation and construction of engineered soil covers for reactive tailings management. In: *Proceedings Second International Conference on the Abatement of Acid Drainage*, sponsored by MEND (Mine Environment Neutral Drainage), Montreal, Quebec, Canada, vol. 1, pp. 93–114.
- YANFUL, E.K., RILEY, M.D., DUNCAN, J. (1993a). Construction and monitoring of a composite soil cover on an experimental waste-rock pile near Newcastle, New Brunswick, Canada. *Canadian Geotechnical Journal* 30, 588–599.
- YANFUL, E.K., RILEY, M.D., WOYSHNER, M.R., DUNCAN, J. (1993b). Construction and monitoring of a composite soil cover on an experimental waste rock pile near Newcastle, New Brunswick, Canada. *Canadian Geotechnical Journal* 31 (2), 299–303.
- YANFUL, E.K., WOYSHNER, M.R., AUBE, B.C., ST-ARNAUD, L.C. (1994). Field and laboratory performance of engineered covers on the Waite Amulet tailings. In: *Proceedings International Land Reclamation and Mine Drain. Conference and Third International Conference on Abatement of Acid Drain*, United States Department of the Interior, Bureau of Mines Special Publication SP 06B-94, vol. 2, pp. 139–147.
- YANFUL, E.K., MOUSAVI, S.M., YANG, M. (2002). Modeling and measurement of evaporation in moisture retaining soil covers. *Advances in Environmental Research* 7, 783–801.
- YANFUL, E.K., MOUSAVI, S.M., SOUZA LIN-PEI DE. (2006). A numerical study of soil cover performance. *Journal of Environmental Management* 81. pp 72-92.