

Nivea Morena Gonçalves Miranda

**SIMULAÇÃO DE FLUXO NA ZONA NÃO SATURADA EM
VALAS DE INFILTRAÇÃO URBANA**

Dissertação submetida ao Programa de
Pós-graduação em Engenharia
Ambiental da Universidade Federal de
Santa Catarina parte dos pré-requisitos
para a obtenção do Grau de mestre em
Engenharia Ambiental
Orientadora: Prof. Dra. Alexandra
Rodrigues Finotti

Florianópolis
2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Miranda, Nivea Morena Gonçalves
Simulação de fluxo na zona não saturada em valas
de infiltração urbana / Nivea Morena Gonçalves
Miranda ; orientadora, Alexandra Rodrigues Finotti
, 2019.
134 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de
Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós
Graduação em Engenharia Ambiental, Florianópolis,
2019.

Inclui referências.

1. Engenharia Ambiental. 2. valas de infiltração.
3. modelagem hidrológica . 4. HYDRUS-1D. I.
Rodrigues Finotti , Alexandra. II. Universidade
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Ambiental. III. Título.



**“SIMULAÇÃO DE FLUXO NA ZONA NÃO SATURADA EM VALAS DE
INFILTRAÇÃO URBANA”**

NÍVEA MORENA GONÇALVES MIRANDA

Dissertação submetida ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA AMBIENTAL

na Área de Engenharia Ambiental.

Aprovado por:

Prof.ª Dr.ª Alexandra Rodrigues Finotti
(Orientadora)

Prof. Dr. Nilson Guiguer Junior

Prof.ª Dr.ª Patricia Kazúe Uda

Prof. Dr. Orlando Martini de Oliveira

Prof.ª Dr.ª Maria Eliza Nagel Hassemer
(Coordenadora)

Este trabalho é dedicado aos meus colegas, colegas de laboratório, aos meus queridos pais e irmão.

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, meu irmão e meu pai por todo amor, carinho e compreensão ao longo dessa jornada.

À Profa Dra. Alexandra Rodrigues Finotti pelo aceite de orientação, ensinamentos e pela paciência ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Obrigada pela oportunidade e confiança em mim depositadas.

Ao Matheus Flach pela gigantesca ajuda em campo.

Ao Eduardo Arruda pela ajuda com a programação no Matlab.

Aos meus amigos Leidiane Accordi e Leonardo Dalri pela sincera amizade e por tornar a luta menos exaustiva e mais prazerosa.

A todos os meus amigos do laboratório Jakcemara Caprario, Maria Vitart, Aline Schuck, Fernando, Elisa Pacheco e Fabi Tasca pelas conversas, desabafos, trocas de ideias e muitas risadas.

Ao Prof Dr. Orlando Martini de Oliveira por disponibilizar o Laboratório de Geologia localizado no Departamento de Engenharia Civil e pela dedicação em me ensinar a realizar o ensaio do papel-filtro.

Ao Prof Dr. Fábio Mallmann que mesmo em Santa Maria estava sempre pronto para me ajudar via Skype e Whatsapp.

A todos que, de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, e não estão nominalmente citados.

RESUMO

Dentre o rol de alternativas para abordagem do problema das cheias urbanas destacam-se as técnicas compensatórias, que têm por objetivo precípua aumentar a parcela da água pluvial retida ou infiltrada devendo, assim, serem implantadas de modo que as águas superficiais urbanas não contaminem o ambiente subterrâneo. O conhecimento sobre infiltrações e movimento da água no solo surge então, como uma medida preventiva, em razão de que se pode simular o comportamento de escoamentos por meio da modelagem matemática, uma vez que reduzem o tempo e os recursos exigidos pelos testes em campo ou em laboratórios. Diante do contexto, este trabalho dedicou-se a estudar o desempenho do modelo HYDRUS-1D para a simulação do fluxo de água na zona não saturada de valas de infiltração de águas pluviais urbanas. Para atingir tal objetivo, realizou-se a calibração do modelo por meio da modelagem inversa, a partir de dados de um evento devidamente selecionado. A eficiência na predição e acurácia dos resultados simulados foi determinada pelo Coeficiente de Eficiência de Nash e Sutcliffe (NSE), Raíz do Erro Quadrático Médio (RMSE) e Coeficiente de Determinação (R^2). Os valores dos erros do evento selecionado para calibração foram de 0,009 (RMSE); 0,094 (NSE) e 0,89 (R^2). Estes valores foram classificados como “muito bom” e assim, atingiu-se a calibração do modelo. Adiante, para a validação do modelo HYDRUS-1D foram simulados 5 eventos e os valores dos estimadores estatísticos variaram entre 0,01 a 0,06 (RMSE); 0,87 a 0,91 (NSE) e 0,72 e 0,085 (R^2). Conclui-se que o desempenho do modelo HYDRUS-1D para os eventos 1 e 6 foram classificados como satisfatório (NSE) e bom (R^2), já os eventos 2 e 4 obtiveram desempenho bom (NSE) e bom (R^2) e, o evento 5 obteve desempenho muito bom (NSE) e muito bom (R^2). Entretanto, o fluxo simulado do Evento 4 e 1 não tiveram um bom ajuste, assim como os diversos picos do Evento 6. Conclui-se então, que o desempenho do modelo HYDRUS-1D foi satisfatório, uma vez que, os eventos possuíam variabilidade na distribuição das precipitações e as simulações sem o monitoramento do potencial matricial ao longo do perfil, se tornam mais complexas, devido às incertezas em relação as condições iniciais do solo.

Palavras-chave Valas de Infiltração. Modelagem Hidrológica. HYDRUS-1D.

ABSTRACT

Among the alternatives to address the problem of urban flooding are the compensatory techniques, whose main objective is to increase the amount of rainwater that is retained or infiltrated, and must therefore be deployed in such a way that urban surface water does not contaminate the environment underground. The knowledge about infiltration and water movement in the soil then appears as a preventive measure, since it is possible to simulate the behavior of flows through mathematical modeling, since they reduce the time and resources required by field tests or in laboratories. In the context of this work, this work was devoted to studying the performance of the HYDRUS-1D model for the simulation of water flow in the unsaturated zone of urban rainwater infiltration trenches. In order to reach this objective, the calibration of the model was performed by means of the inverse modeling, from data of a duly selected event. Efficiency in the prediction and accuracy of the simulated results was determined by the Nash and Sutcliffe Efficiency Coefficient (NSE), Root Mean Square Error (RMSE) and Determination Coefficient (R^2). The event error values selected for calibration were 0.009 (RMSE); 0.094 (NSE) and 0.89 (R^2). These values were classified as "very good" and thus, the calibration of the model was reached. Further, for the validation of the HYDRUS-1D model, 5 events were simulated and the values of the statistical estimators ranged from 0.01 to 0.06 (RMSE); 0.87 to 0.91 (NSE) and 0.72 and 0.085 (R^2). It was concluded that the performance of the HYDRUS-1D model for events 1 and 6 were classified as satisfactory (NSE) and good (R^2), while events 2 and 4 obtained good (NSE) and good performance (R), and event 5 obtained very good (NSE) and very good (R^2) performance. However, the simulated flow of Event 4 and 1 did not have a good fit, as did the various peaks of Event 6. It was concluded that the performance of the HYDRUS-1D model was satisfactory, since the events had variability in distribution of precipitations and simulations without the monitoring of the matrix potential along the profile, become more complex, due to the uncertainties regarding the initial conditions of the soil.

Keywords: Swales infiltration. Hydrological Modeling. HYDRUS-1D.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma síntese do trabalho.....	27
Figura 2- Representação de uma vala de infiltração pluvial.....	31
Figura 3 - Curva de retenção (secagem) típica com os estágios de transição.	35
Figura 4 - Curvas de Retenção de Água para diferentes tipos de solos.	36
Figura 5 – Mapa de localização da vala de infiltração pluvial. ..	65
Figura 6- Área de contribuição da vala de infiltração.	66
Figura 7 – Vala de infiltração pluvial estudada.	67
Figura 8 – Pontos de monitoramento e instrumentação da vala de infiltração.	70
Figura 9 – Coleta de solo para a determinação da densidade do solo da vala.	72
Figura 10 – Coleta e moldagem do solo para o ensaio do Papel-filtro.....	73
Figura 11 - Definição de evento.	75
Figura 12 - Variação do nível de entrada e saída da vala de infiltração.	76
Figura 13 – Modelo conceitual da vala de infiltração pluvial. ...	78
Figura 14 – Curva de Retenção de Água do solo da vala de infiltração ajustada no <i>software</i> RETC.	86
Figura 15 – Hidrograma do Evento 3 utilizado para calibração. 87	
Figura 16 - Hidrograma observado e simulado para o evento 3. 88	
Figura 17 - Taxa do fluxo acumulado simulado e do observado do Evento 3.	89
Figura 18 - Variação do perfil vala de infiltração do Evento 3. . 90	
Figura 19 - Hidrograma observado e simulado para o evento 1. 91	
Figura 20 - Taxa do fluxo acumulado simulado e do observado do Evento 1.	92
Figura 21 - Variação do perfil vala de infiltração do Evento 1. . 93	
Figura 22 - Hidrograma observado e simulado para o evento 2. 93	
Figura 23 - Taxa do fluxo acumulado simulado e observado do Evento 2.	94
Figura 24 - Variação do perfil vala de infiltração do Evento 2. . 95	
Figura 25 - Hidrograma observado e simulado para o evento 4. 95	
Figura 26 - Taxa do fluxo acumulado simulado e do observado do Evento 4.	96
Figura 27 - Variação do perfil vala de infiltração do Evento 4. . 97	

Figura 28 - Hidrograma observado e simulado para o evento 5.	97
Figura 29 - Taxa do fluxo acumulado simulado e observado do	
Evento 5.	98
Figura 30 - Variação do perfil vala de infiltração do Evento 5. .	99
Figura 31 - Hidrograma observado e simulado para o evento 6.	99
Figura 32 - Taxa do fluxo acumulado simulado e observado do	
Evento 6.	100
Figura 33 - Variação do perfil vala de infiltração do Evento 6.	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Curvas de calibração encontradas na literatura para o papel Watman N42.....	42
Tabela 2 - Proposições para estimar a curva de retenção solo....	50
Tabela 3 - Dimensões da Vala de Infiltração Pluvial	68
Tabela 4 – Valores de Condutividade hidráulica saturada K_s ...	71
Tabela 5 - Caracterização Granulométrica do solo.....	71
Tabela 6 – Classificação de desempenho do modelo HYDRUS-1D.	83
Tabela 7 - Classificação do método realizado em laboratório....	84
Tabela 8 - Densidade aparente do solo da vala de infiltração. ...	85
Tabela 9 - Parâmetros do modelo van Genuchten (1980) encontrados.	86
Tabela 10 – Valores do erro do balanço de massa e do tempo de simulação em relação ao número de nós selecionados.....	87
Tabela 11 – Parâmetros hidráulicos otimizados pela aplicação da solução inversa.	88
Tabela 12 - Valores dos estimadores estatísticos encontrados. ..	90
Tabela 13 - Desempenho das simulações de todos os eventos.	101
Tabela 14 – Parâmetros de vG obtidos a partir de dados de laboratório e solução inversa (campo).....	103

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LAUTEC – Laboratório de Águas Pluviais Urbanas e Técnicas Compensatórias;

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina;

vG – Van Genuchten;

CRA – Curva de Retenção de Água;

BHC – Balanço Hídrico Climatológico;

HELP – Hydrologic Evaluation of Landfill Performance;

LEACHM – Leaching Estimation And Chemistry Model

SWAP – Soil Water Atmosphere Plant;

VS2DT – Variably Saturated 2D Flow and Transport;

CDE – Convecção-Dispersão;

Ptotal – Precipitação Total;

RMSE – Raíz do Erro Quadrático Médio;

MRE – Erro Relativo Médio;

NRMSE – Raiz Quadrada do Erro Médio Normalizado;

NSE – Eficiência de Nash-Sutcliffe

RD – Razão de Desvios;

WRC – Curva de Retenção de Água;

RETC – Retention Curve;

ER – Erro Relativo.

LISTA DE SÍMBOLOS

K	Condutividade hidráulica não saturada;
K_S	Condutividade hidráulica saturada
θ	Teor de umidade volumétrico;
θ_r	Teor de umidade residual;
θ_s	Teor de umidade volumétrico saturado;
ψ	Sucção mátrica;
n, m, p	Parâmetros empíricos;
t	Tempo (T);
∂z	Profundidade da camada orientada positivamente para baixo;
S	Termo de extração de água pelo sistema radicular;
α	Ângulo entre a direção do fluxo e o eixo vertical;
∂t	Incremento de tempo.
ψ_T	Potencial de total
ψ_p	Potencial de pressão
ψ_g	Potencial gravitacional
ψ_{os}	Potencial osmótico
ψ_m	Potencial mátrico
S	Sucção
w	Teor de umidade percentual
R^2	Coefficiente de determinação
D_s	Densidade do solo;
M_{SS}	Massa do solo seca;
V	Volume do solo;
F_E	Fluxo de entrada;
F_{ES}	Fluxo escoado;
$F_{infiltrado}$	Fluxo infiltrado.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	27
1.1	OBJETIVOS	28
1.1.1	Objetivo geral.....	28
1.1.2	Objetivos específicos	29
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	29
2.1	VALAS DE INFILTRAÇÃO URBANA	29
2.2	ÁGUA NO SOLO.....	33
2.3	CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA	35
2.3.1	Determinação da CRA.....	37
2.3.1.1	Método do Papel-Filtro	41
2.4	MODELOS ANALÍTICOS E NUMÉRICOS	44
2.4.1	Modelo HYDRUS 1-D.....	45
2.4.1.1	Rotina para dinâmica da água	49
2.4.1.1.1	<i>Modelo de Genuchten – Mualem (1980).....</i>	<i>50</i>
2.4.1.2	ROSETTA LITE.....	52
2.4.1.3	SOLUÇÃO INVERSA	53
2.4.1.4	DESEMPENHO DO MODELO HYDRUS	57
3	PROCEDIMENTO METODOLÓGICO	65
3.1	ÁREA DE ESTUDO	65
3.1.1	Resumo dos Dados	67
3.1.2	Coleta e análise dos dados	68
3.1.2.1	determinação da densidade do solo.....	72
3.1.2.2	Determinação da Curva de Retenção de Água.....	73
3.1.2.2.1	<i>Ajuste das Curvas de Retenção.....</i>	<i>75</i>
3.1.2.3	Análise dos dados de precipitação	75
3.1.3	Modelagem HYDRUS-1D	78
3.1.4	Simulação de fluxo de água HYDRUS-1D.....	78
3.1.4.1	Parâmetros geométricos	78

3.1.4.2	Parâmetro de Tempo	79
3.1.4.3	Modelo hidráulico do solo	79
3.1.4.4	Condições de contorno	79
3.1.4.5	Condições variáveis de tempo.....	80
3.1.4.6	Parâmetros Hidráulicos do Solo.....	80
3.1.4.7	Condições iniciais do perfil do solo	80
3.1.4.8	Solução inversa	80
3.1.4.9	Avaliação do desempenho do modelo.....	82
4	RESULTADOS E DISCUSSOES	85
4.1	Densidade do solo	85
4.2	Parâmetros hidráulicos	85
4.3	Calibração do modelo HYDRUS-1D.....	86
4.3.1	Validação do modelo.....	90
4.3.1.1	Evento 1	90
4.3.1.2	Evento 2	93
4.3.1.3	Evento 4	95
4.3.1.4	Evento 5	97
4.3.1.5	Evento 6	99
4.3.2	Desempenho do modelo	101
4.3.3	Existência de convergência entre os parâmetros.....	103
5	CONCLUSAO	107
6	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	109
7	ANEXO 1	110
APÊNDICE 1	111
APÊNDICE 2	113
8	REFERÊNCIAS	115

1 INTRODUÇÃO

Apesar de a drenagem convencional ter sido utilizada durante muitos anos para a redução dos danos causados pelas cheias e que ainda seja necessária para eventos futuros, tem-se buscado novas técnicas alternativas para atuar em conjunto, as quais atenuem sistematicamente os efeitos da urbanização e ofereçam benefícios não somente em termos quantitativos, mas também, em termos qualitativos.

As técnicas compensatórias consistem numa variedade de dispositivos de drenagem (bacias, poços, valas, planos, trincheiras de infiltração; pavimentos permeáveis; reservatórios de retenção, dentre outros) com estratégias de retenção e/ou infiltração dos excedentes pluviais. Outro aspecto importante na aplicação de tais técnicas, consiste na atenuação do volume de escoamento na fonte, isto é, antes que a água atinja a rede de drenagem, o que se torna interessante sobre o ponto de vista ecológico e social, pois esta configuração promove a valorização da água no meio urbano.

O uso das técnicas compensatórias no Brasil ainda não é difundido, principalmente pelo desinteresse à sua aplicação por parte dos gestores públicos, além de uma oposição natural à inovação. Os estudos referentes a eficiência após certo período de monitoramento dos dispositivos ainda são restritos em relação as publicações científicas internacionais, as quais são aplicações em regiões com características hidrológicas e geológicas distintas das encontradas no Brasil, principalmente no que se refere à precipitação, o que significa que há necessidade da aprimoração do conhecimento do comportamento hidráulico principalmente no que tange ao dimensionamento dessas estruturas de modo que não ocorra a inserção de poluentes presentes na drenagem superficial, no ambiente subterrâneo.

O conhecimento sobre infiltrações e movimento da água no solo surge como uma medida preventiva, em razão de que se pode simular o comportamento de escoamentos e transporte de poluentes por meio de modelos matemáticos, uma vez que reduzem o tempo e os recursos exigidos pelos testes em campo ou em laboratórios.

Dentre o rol de modelos matemáticos existentes, o HYDRUS-1D é capaz de simular o movimento de água no solo, a partir de variáveis meteorológicas e de parâmetros hidráulicos do solo. Este modelo computacional utiliza a equação de Richards para descrever o movimento de água em meios porosos não saturados por meio da relação do conteúdo volumétrico de água no solo e a condutividade hidráulica com o potencial matricial.

Diante desse contexto, este trabalho dedicou-se a estudar o desempenho de um modelo computacional para a simulação do fluxo de água na zona não saturada de valas de infiltração de águas pluviais urbanas. A vala de infiltração localizava-se na região do Distrito do Campeche, Florianópolis - SC. Este recorte foi escolhido devido aos frequentes eventos de alagamentos e inundações ocorridos, além da área ser objeto de estudo do Laboratório de Águas Pluviais Urbanas e Técnicas Compensatórias (LAUTEC), localizado no Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

O laboratório é supervisionado pela professora doutora Alexandra Rodrigues Finotti, no qual é composto por uma equipe técnica de doutores, doutorandos, mestrandos e graduandos, atuantes na área de drenagem urbana, os quais realizam estudos de técnicas alternativas que compensem os impactos da urbanização.

A escolha da vala de infiltração pluvial como técnica compensatória e do modelo computacional HYDRUS-1D para o tema do trabalho se deu em função dos seguintes aspectos:

- necessidade de elucidar o emprego seguro da técnica no Brasil e assim incentivar à adoção de controle do escoamento na fonte através de valas infiltração;
- baixo custo de implantação, pois consiste em dispositivos constituídos por simples depressões escavadas no solo, com o fundo vegetado ou descoberto;
- esses dispositivos drenam pequenas áreas urbanas e, portanto, estão sujeitos ao carreamento de poluentes;
- a modelagem numérica reduz o tempo e os recursos com os testes em campo, além disso, o modelo computacional HYDRUS-1D possui domínio público.

1.1 OBJETIVOS

Com base no exposto acima, o desenvolvimento deste trabalho foi realizado de forma a atingir os seguintes objetivos (Figura 1):

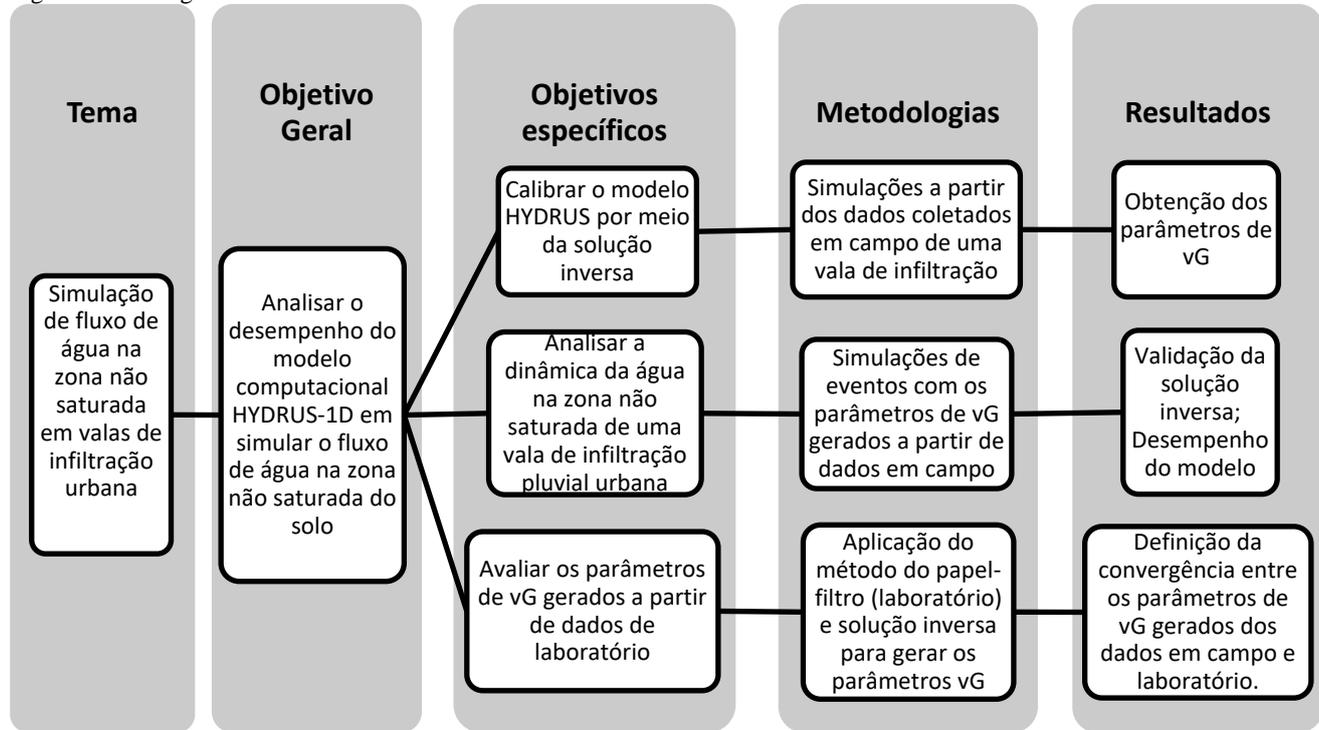
1.1.1 Objetivo geral

Analisar o desempenho do modelo computacional HYDRUS-1D em simular o fluxo na zona não saturada de uma vala de infiltração urbana.

1.1.2 Objetivos específicos

- Calibrar o modelo HYDRUS-1D por meio da solução inversa;
- Analisar a dinâmica da água na zona vadosa de uma vala de infiltração pluvial urbana;
- Avaliar os parâmetros de van Genuchten gerados a partir de dados de laboratório.

Figura 1 – Fluxograma síntese do trabalho.



2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresentará os conceitos necessários para o entendimento dos processos envolvidos na modelagem da dinâmica da água na zona vadosa em valas de infiltração urbana.

2.1 VALAS DE INFILTRAÇÃO URBANA

O crescimento socioeconômico em muitas cidades brasileiras resultou na instalação desordenada de comunidades em terrenos próximos às várzeas dos rios ou à beira-mar, pois assim as atividades produtivas são favorecidas. Após a ocupação destas áreas, a urbanização se expande para as regiões mais altas, a qual reduz de forma difusa as áreas permeáveis da bacia hidrográfica, devido à troca da vegetação natural por obras de construção civil. A impermeabilização faz com que o excedente de água precipitada não infiltrada escoe na superfície do terreno, da cota mais alta para a mais baixa, devida à ação da gravidade, dessa forma, inicia-se o processo conhecido como escoamento superficial.

O volume de água precipitada escoada que atinge o corpo hídrico rapidamente, correspondente à redução da permeabilidade do solo, ocasiona o aumento do escoamento superficial, das vazões máximas dos rios, erosão das margens dos cursos d'água e o aumento da produção de sedimentos. A urbanização sem planejamento, ainda incorpora as áreas de várzeas dos rios ao sistema viário. Inúmeros córregos foram retificados e canalizados, a fim de permitir a construção dessas vias marginais sobre os antigos meandros. A combinação desses fatores aumenta a ocorrência de cheias urbanas, a fim de minimizar os danos causados, faz-se necessário o emprego de técnicas de drenagem urbana.

Durante muitos anos, a drenagem urbana, tanto no Brasil, como em outros países, foi elaborada de forma acessória. A construção de sistemas que visam apenas o escoamento rápido da água precipitada acarretam inúmeros problemas ambientais e de gestão das águas urbanas, tais como o aumentando da magnitude da vazão e, a frequência e o nível de inundações a jusante. Dessa forma, a expansão das áreas urbanas requer infraestruturas adequadas a fim de se garantir condições plenas de saneamento (CANHOLI, 2005; BURGÉS; WIGMOSTA, 2013).

Outro aspecto importante a ser pensado quando da concepção de medidas de controle do escoamento superficial e de poluentes é a valorização da água dentro do meio urbano. Nesse sentido, os dispositivos alternativos desempenham papel fundamental no que se refere a melhorias ecológicas no ciclo da água inserida no meio urbano.

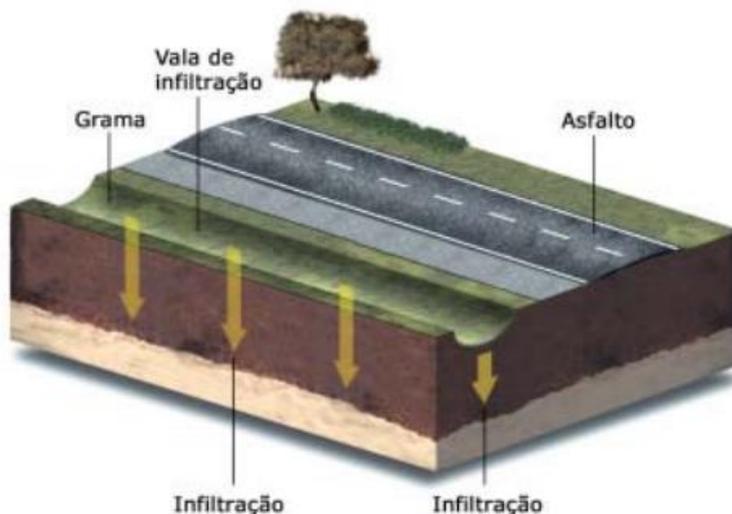
Dentre o rol de alternativas para abordagem do problema das cheias urbanas destacam-se as técnicas compensatórias, que diferentemente das técnicas convencionais, constituem-se de medidas de controle de escoamento na fonte de geração, aplicadas de forma difusa na bacia hidrográfica, sendo elas: os telhados verdes, pavimentos permeáveis, sistemas de biorretenção, bacias de detenção, valas de infiltração lagoas e zonas úmidas. Tais estruturas têm o objetivo precípua de aumentar a parcela da água pluvial retida ou infiltrada, recuperando ou minimizando os efeitos decorrentes do escoamento superficial direto gerado pela ocupação urbana (BARBASSA et al, 2015; SUDS, 2015).

Destacam-se as valas de infiltração pluvial (Figura 2), pois são constituídas por simples depressões escavadas no solo, com o fundo vegetado ou descoberto, e tem como finalidade de propiciar a infiltração das águas pluviais em áreas reduzidas. Devido à facilidade na sua execução e o seu baixo custo de projeto/execução, a vala de infiltração pluvial compreende a técnica compensatória mais antiga, pois existem relatos de sua utilização desde 1970 em diversos países, sendo comumente utilizada junto ao sistema viário, principalmente em zonas rurais (BAPTISTA et al, 2005; BUTLER; DAVIES, 2011; HERZON; HELENIUS, 2008).

O grande entrave à aplicação segura dessas estruturas reside no risco da infiltração de poluentes provenientes dos centros urbanos e na determinação e manutenção das taxas de infiltração de projeto, as quais dependem de aspectos ligados ao solo, tais como umidade, profundidade do lençol freático e condutividade hidráulica.

No Brasil, como na maioria dos países em desenvolvimento, os sistemas de drenagem continuam sendo concebidos, dimensionados e projetados de forma a falhar. Assim, o uso de técnicas compensatórias como a resiliência/flexibilização do sistema de drenagem, ainda não é difundido, principalmente pela resistência à sua aplicação por parte dos gestores públicos, além de uma oposição natural à inovação. No entanto, os poucos estudos realizados demonstraram sua eficiência na resolução de problemas, bem como os baixos custos de implementação e manutenção (CAPRARIO et al., no prelo; Souza, 2013).

Figura 2- Representação de uma vala de infiltração pluvial.



Fonte: (FEAM, 2006).

Belotti (2011) acrescenta que as valas podem ser utilizadas para coletar o escoamento superficial urbano ao longo de ruas e estradas, por exemplo, substituindo as guias e sarjetas. A introdução das águas na estrutura é feita de forma direta, por escoamento superficial até a estrutura, podendo, eventualmente, ocorrer a afluência via tubulação. O armazenamento é efetuado em superfície livre, no interior da estrutura. A liberação das águas pode ocorrer por infiltração local, no caso de estruturas de infiltração, ou por deságue superficial, diretamente no corpo receptor, com ou sem dispositivos de controle.

Jurries (2003) ressalta que a capacidade de uma vala para remover poluentes do escoamento de águas pluviais depende também de outros fatores. O tipo de solo do qual a vala é construída e a variedade de vegetação presente na vala são fatores determinantes na capacidade de remoção de poluentes de um sistema de vala. Entretanto Belotti (2011) acrescenta que as valas não são muito eficientes na remoção de poluentes para eventos de chuvas mais intensas, mas podem eliminar o escoamento superficial proveniente de chuvas mais fracas. Ducks (2008) contrapõe dizendo que a vegetação e o solo permeável de uma vala possuem a capacidade de filtragem semelhante à de um *wetland*, pois filtram e

absorvem produtos químicos, nutrientes, sedimentos da água da chuva à medida que ela passa pelo sistema.

Em relação a eficiência, Urbonas e Roesner (1993) afirmam que quando o solo adjacente à vala é poroso e apresenta alta taxa de infiltração, a remoção de poluentes das águas de chuva pode chegar a 80%. Entretanto, os autores enfatizam que na maioria das vezes essas porcentagens são menores e ressaltam a importância do nível do lençol freático ou da camada de solo impermeável, estar a pelo menos 1,20 m de profundidade abaixo do fundo da vala de infiltração. Ellis (1992) aponta em seu estudo que uma vala com comprimento entre 30 m e 60 m pode reter entre 60% e 70% de sólidos e entre 30% e 40% de metais, hidrocarbonetos e bactérias. Fletcher et al. (2002) realizaram experimentos com valas gramadas na Austrália, as quais apresentaram redução na concentração total de sólidos em suspensão da ordem de 70% a 90% e na carga total de sólidos em suspensão de 60% a 90% e relevante redução de fósforo total e nitrogênio total.

Em Minas Gerais, Silva (2009) realizou um experimento piloto com a associação de técnicas compensatórias, tais como, trincheira de infiltração, vala de detenção e boca de lobo. Os principais resultados mostrados estão relacionados à caracterização qualitativa do escoamento e à eficiência na remoção de sólidos suspensos e metais pesados por meio da vala de detenção. A vala mostrou eficiência em redução de Sólidos Solúveis Totais (SST), em média, da ordem de 50%, com o melhor resultado em 80% e o pior, em apenas 6%. Em termos de abatimento das concentrações de metais, este dispositivo apresentou variabilidade elevada, com uma média em torno de 60%. As remoções de todos os metais (Mn, Cd, Ni, Cr, Cu, Zn e Pb) apresentaram valores razoavelmente próximos, em torno de 55%, à exceção do Pb com 88,6%

Belotti (2011) investigou a capacidade de retenção de metais pesados por meio da associação de trincheira de infiltração com vala de detenção de águas pluviais e os riscos de contaminação de águas subterrâneas associados à infiltração. No estudo, os metais mais retidos no solo foram o chumbo, cromo e manganês. Os resultados ainda evidenciaram riscos de contaminação das águas subterrâneas na área de implantação dessas estruturas e a importância da inclusão da capacidade de retenção de poluentes pelo solo como mais um critério a ser considerado na seleção de áreas para a implantação de estruturas de infiltração.

Davis et al. (2012) avaliaram o desempenho hidráulico das valas de infiltração gramada como medida de controle de águas pluviais de rodovias. No geral, metade dos eventos foram pequenos o suficiente para

que todo o fluxo fosse armazenado, infiltrado e evapotranspirado resultando em nenhuma descarga líquida. As valas reduziram significativamente o volume total e as magnitudes de fluxo durante eventos com chuva menor que 3 cm de lâmina d'água e duração entre 27 e 0,2 horas. Para precipitações totais maiores que 100.000 litros, não ocorreu a redução volumétrica, dessa forma, as valas funcionaram apenas para o transporte e suavização das flutuações do fluxo.

Rujner et al. (2018) estudaram duas valas de infiltração pluvial e descobriram que o volume de escoamento foi reduzido em até 82%, para um baixo conteúdo de água inicial no solo (0,22 – 0,29 m³/m³), já para um conteúdo de água inicial alto (0,30 – 0,40 m³/m³), a redução de volume foi de 15%. Os picos de fluxo de escoamento foram reduzidos proporcionalmente às reduções do volume de fluxo, na faixa de 4% a 55%. Os tempos de atraso do hidrograma de saída das valas variaram de 5 a 15 min, correspondentes ao baixo conteúdo de água inicial.

2.2 ÁGUA NO SOLO

O solo é composto basicamente de duas partes: uma sólida, que seria a matriz do solo e a parte não ocupada pelos sólidos, denominado de espaço poroso ou poros do solo. Os espaços porosos são ocupados por quantidades variáveis de uma solução aquosa denominada de água no solo e de uma solução gasosa denominada de ar no solo (LIBARDI, 2010).

Como qualquer corpo na natureza, a água pode ser caracterizada por um estado de energia de diferentes formas e quantidades, e para o estado de energia da água optem-se o termo potencial total da água, que é representado pela letra grega ψ , e representa a somatória dos trabalhos realizados quando a unidade de massa (volume ou massa) de água em estado padrão é levada isotérmica, isobárica e reversível para o estado considerado no solo (REICHARDT, 1985).

O potencial total da água no solo é a somatória de cinco potenciais: térmica, pressão (ψ_p), gravitacional (ψ_g), osmótica (ψ_{os}) e matricial (ψ_m). Porém, devido às pequenas variações de temperatura que ocorrem no sistema solo-planta-atmosfera, o potencial térmico torna-se muitas vezes variações desprezíveis. Deste modo, a Equação (1) descreve o potencial total da água no solo (REICHARDT, 1985; CAMPBELL, 1988; LIBARDI, 2010).

$$\psi_T = \psi_p + \psi_g + \psi_{os} + \psi_m \quad (1)$$

ψ_p sempre ocorre no caso em que o solo esteja numa condição de saturação e que, no caso de solo não saturado, ele só ocorre quando o solo for expansivo. Para a condição de saturação, o potencial de pressão num ponto do perfil do solo é igual a pressão de líquido nele atuando.

ψ_g aparece devido à atração gravitacional em direção ao centro da Terra.

ψ_{os} o potencial osmótico é atribuído à presença de solutos na solução de solo. Os solutos podem ser sais inorgânicos ou componentes orgânicos. Sua presença reduz a energia potencial de água, principalmente por reduzirem a liberdade de movimento das moléculas de água que se agrupam em torno de cada íon soluto ou molécula. Quanto maior a concentração de solutos, menor o potencial osmótico.

ψ_m também denominado de potencial capilar, tensão da água no solo, sucção ou pressão negativa é a somatória de todos os outros trabalhos que envolvem a interação entre a matriz do solo e a água, como a força capilar e de adsorção.

A retenção de água na matriz do solo é conduzida por dois tipos de forças mátricas, que são as forças capilares (ocorre nos poros capilares do solo) e forças de adsorção (ocorre nas superfícies dos sólidos do solo, como filmes presos a ela). Devido a essas forças e a presença da matriz do solo originou-se o termo potencial matricial de água no solo (VIEIRA, 2006; LIBARDI, 2010), que surge a partir da atração da matriz do solo pela água e da atração de moléculas de água por outras (CAMPBELL, 1988), este fenômeno é denominada de tensão superficial (LIBARDI, 2010). Diferenças de ψ_m entre duas zonas adjacentes de um solo estimulam o movimento da água de zonas mais úmidas (alta estado de energia) para as zonas mais secas (baixa estado energia) ou de poros maiores para menores. Apesar deste movimento ser lento, ele é extremamente importante, especialmente no suprimento de água para as raízes das plantas.

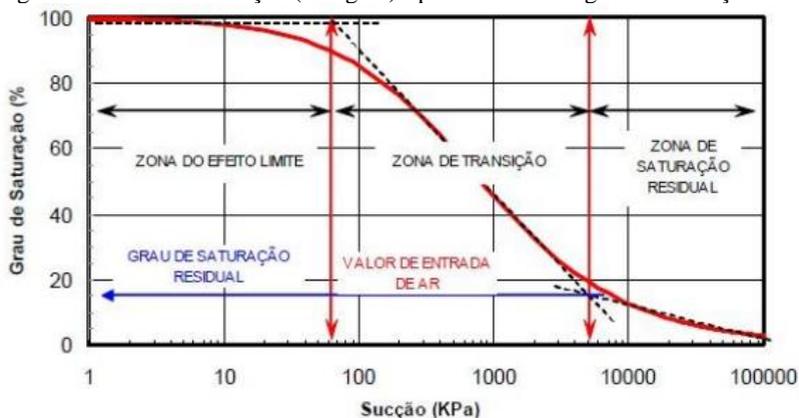
A água no solo como toda matéria na natureza tem a tendência espontânea e universal de assumir um estado de energia mínima. A taxa de decréscimo de potencial ao longo de uma direção é uma medida de força responsável pelo movimento. Assim, o conhecimento do seu estado de energia em cada ponto dentro do sistema pode permitir o cálculo das forças que atuam sobre a água e determinar quanto afastada ela se encontra do estado de equilíbrio (REICHARDT, 1985).

2.3 CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA

Segundo Libardi (2005) a Curva de Retenção da Água (CRA), também conhecida como curva característica de água no solo, é a curva que relaciona o teor ou o conteúdo de água no solo com a sucção matricial com que ela se encontra retida.

A curva de retenção possui, na maioria dos casos, o formato de um “S”. A Figura 3 mostra a configuração de uma curva de retenção e seus estágios (curva de secagem). O primeiro estágio identificável da curva de retenção é a zona de limite de entrada de ar, a qual inicia com o teor de umidade volumétrico (θ_s) que corresponde a uma sucção mátrica igual a zero ou próximo a zero e vai até a sucção correspondente ao valor da entrada de ar. Este valor representa a sucção no qual o ar começa a entrar, conhecido como “pressão de burbulhamento” ou pressão de dessaturação e relaciona-se ao tamanho máximo dos poros em um solo. Como o valor da pressão de burbulhamento é obtido graficamente, este “ponto” não corresponde exatamente ao ponto de dessaturação, na maioria dos solos; seria o equivalente ao ponto de entrada generalizada de ar no solo (MARINHO; PEREIRA, 1998; GONÇALVES, 2012).

Figura 3 - Curva de retenção (secagem) típica com os estágios de transição.



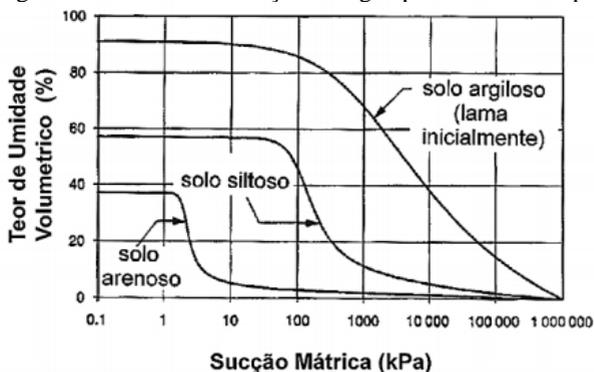
Fonte: Marinho (2005).

Um segundo estágio é a zona de transição onde o solo começa a reduzir a saturação e a sucção aumenta significativamente com o decréscimo da umidade. Este estágio inicia no valor de entrada de ar e termina no valor de sucção correspondente ao ponto de saturação residual.

O último estágio é a zona de saturação residual que inicia no ponto de saturação residual e vai até a máxima sucção, ou seja, quando o teor de umidade chega próximo de zero. Este é definido como o limite inferior, a partir do qual são necessárias sucções expressivas para a remoção de água do solo e se dá predominantemente por processos de transferência de vapor (CARVALHO et al. 2015; GONÇALVES 2012).

Os fatores que influenciam a disponibilidade de água no solo são: a estrutura do solo, por determinar o arranjo das partículas; a textura, que determina a composição granulométrica do solo; o teor de matéria orgânica e a temperatura (KLEIN; LIBARDI, 2000). A textura do solo, principalmente o teor de argila, define em boa parte a distribuição do diâmetro dos poros do solo, determinando assim a área de contato entre as partículas sólidas e a água, sendo por isso responsável pela força de retenção (REICHARDT, 1987). Sendo assim, pode-se notar na Figura 4, que à medida que o tamanho das partículas decresce (textura arenosa a argilosa), o valor de entrada de ar, cresce; e a inclinação da curva torna-se mais suave (BARBOUR, 1998).

Figura 4 - Curvas de Retenção de Água para diferentes tipos de solos.



Fonte: Fredlund e Xing (1994).

A matéria orgânica tem implicações sobre o comportamento físico do solo, quer seja por atuar diretamente sobre alguns de seus processos físicos, quer seja por seus efeitos indiretos. Os efeitos diretos devem-se, basicamente, às propriedades da matéria orgânica do solo que influenciam alguns fenômenos físicos e químicos no solo, dentre as quais se destacam a elevada área superficial específica e a grande quantidade de cargas superficiais. Indiretamente, a matéria orgânica interfere no comportamento físico do solo por seus efeitos sobre a agregação e

consistência do solo, atuando na formação de agregados e, portanto, na distribuição do tamanho de poros, bem como na sua estabilidade (KIEHL,1985; BRAIDA et al, 2010).

A temperatura influencia na determinação da curva de retenção de água no solo, isto se deve ao fato de que a intensidade das forças que retém a água no solo a um dado potencial é dependente da temperatura. Dessa forma, a tensão superficial diminui com o aumento da temperatura, o que leva a uma redução no teor de água a um dado potencial. Por isso, Campos et al. (1992), Bachmann et al. (2002) e Marinho (1994) recomendam que os ensaios de determinação da CRA sejam feitos em ambientes com temperatura controlada.

2.3.1 Determinação da CRA

Existem diversas metodologias para se determinar a Curva de Retenção de Água do Solo em campo ou em laboratório, focando principalmente na mensuração da sucção matricial. De acordo com Lu e Likos (2004) as principais formas estão no Quadro 1.

Quadro 1 - Métodos de medida de Sucção.

Método	Tipo de Sucção Medida	Faixa de Medida (kPa)	Vantagens	Desvantagens	Referência
Tensiômetro	Matricial	0-90 (minutos)	<ol style="list-style-type: none"> 1) Leituras diretas; 2) Permite fazer leituras contínuas quando associado com transdutores de pressão; 3) Baixo custo e utilização em campo. 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Uso limitado a sucções; necessita bom contato entre a água do tensiômetro e a água do solo; 2) Necessita manutenção permanente devido à difusão de ar para dentro do tensiômetro. 	Vilar (2002)
Translação de eixos	Matricial	0-1500 (horas)	<ol style="list-style-type: none"> 1) Método considerado clássico e mais utilizado. 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Elevado custo do equipamento; 2) Elevado tempo necessário para equilíbrio entre umidade e tensão aplicada; 3) Problemas de contato hidráulico entre a placa porosa e a amostra e, 4) Pouco precisa quando se pretende usá-la com baixas pressões. 	Tavares et al. (2014); Solone et al. (2012); Antinoro et al. (2014)

Psicrômetro	Total e osmótica	100-8000 (minutos)	<ol style="list-style-type: none"> 1) Determina o potencial matricial com maior rapidez; 2) Fácil manutenção e uso; 3) Simples verificação e calibração. 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Afetado por mudanças bruscas de temperatura do ambiente 	<p>Leong; Tripathy; rahardjo (2003); Campbell; Smith; Teare, (2007); Decagon (2007); Costa; Oliveira; Kato (2008)</p>
Sensores de Condutividade Elétrica	Matricial	20-1500	<ol style="list-style-type: none"> 1) Rapidez na obtenção da umidade; 2) repetibilidade das leituras; 3) não destruição da região amostrada 4) não emissão de radiações ionizantes, portabilidade; 5) facilidade de acoplamento a dispositivos coletores de dados; 6) pouco sensíveis às características texturais e estruturais do solo; 7) possibilidade de automação. 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Custo; 2) Sensíveis à salinidade; 	<p>Souza et al. (2004); Coelho (2001); Souza et al. (2001); Tommaselli e Bachi (2001); Ottol e Alcaide (2001) e Toop et al. (1980)</p>

Sensores de Condutividade Térmica	Matricial	Todos os valores (minutos)	<ol style="list-style-type: none"> 1) Construção relativamente fácil e custo moderado; 2) Leitura adicional da temperatura do solo; 3) Leitura independente do teor de sais na solução; 4) Utilização dos sensores por longo período de tempo sem necessidades de recalibração ou manutenção periódica. 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Sofre interferências quando imersos em água destilada por tempo prolongado; 2) Medidas realizadas sob condições de baixa umidade apresentam maior variabilidade em comparação a medidas feitas sob condições de alta umidade. 	Oliveira (1999)
Papel Filtro	Matricial e Total	30 a 30.000 (7 dias) e 400 a 30.000 (7 a 14 dias)	<ol style="list-style-type: none"> 1) Fácil aplicação; 2) Baixo custo e ampla faixa de sucção; 3) Boa adaptação ao valor da sucção do solo. 	<ol style="list-style-type: none"> 3) Manuseio delicado. 	Feuerharmel et al (2004); Swarbrick (1995)

Além das técnicas tradicionais, ensaios alternativos para determinação da curva de retenção surgiram com os trabalhos de Znidarcic et al. (1991), Manna et al. (1993), Wildenschild et al. (1997), Hwang (2002) e Lee (2011), que usam procedimentos baseados na bomba de fluxo.

2.3.1.1 Método do Papel-Filtro

A realização do ensaio baseia-se em colocar um papel filtro de características de retenção conhecidas num ambiente hermético junto com uma amostra de solo. Dado o contato do papel, que é capaz de reter a umidade, com o solo, ocorre a migração de água até estabelecer-se o equilíbrio de potencial. Então, se a curva de tensão capilar foi determinada para o material absorvente em contato com o solo, a tensão para o solo é facilmente encontrada por referência à curva (GARDNER, 1937).

No contato direto entre solo e papel filtro, desenvolve-se fluxo capilar de água e a sucção matricial é o que controla o processo, já que este fluxo ocorre de forma contínua entre a matriz sólida do solo e as fibras do papel filtro, sendo assim, as forças osmóticas não interferem nos mecanismos de fluxo. Quando há um espaço de ar entre o papel e a amostra, o fluxo ocorre através de vapor de água, onde esta distância atua como uma barreira para os sais. Nesta configuração, a sucção total é medida, pois neste processo o fluxo deve superar as forças osmóticas e capilares que retêm as moléculas de água no solo (MARINHO, 1994).

A massa do papel-filtro é posteriormente determinada e o potencial matricial na amostra é inferido a partir de uma curva de calibração do papel, a qual relaciona o teor de água e a sucção (ASTM, 2003).

Os aspectos que influenciam na confiabilidade das medições são: variação de temperatura, tempo de equilíbrio, contato entre papel-filtro e amostra, manuseio e exposição ao ambiente (BICALHO et al., 2007). A flutuação de temperatura durante o período de equilíbrio aumenta a variabilidade dos resultados (ALKHAFAF; HANKS, 1974). Assim, é imprescindível minimizar os gradientes de temperatura durante a medição do potencial matricial, bem como durante a calibração com soluções salinas (BULUT; LEONG, 2008). Considerando uma temperatura nominal de 20 °C, a variação de temperatura deve ser menor que 3 °C (ASTM, 2003).

O tempo é fator importante no método do papel-filtro, pois deve ser suficiente para que o equilíbrio seja alcançado (SUITS et al., 2006). O período de sete dias é considerado suficiente para garantir o equilíbrio

na maioria das medições de potencial matricial (LEONG et al., 2002), embora períodos maiores possam ser necessários para potenciais muito baixos (FAWCETT; COLLIS-GEORGE, 1967). Para a calibração do papel-filtro com soluções salinas, na literatura recente é sugerido um período de 14 dias (SUITS; WRAY, 2005).

Existem várias curvas de calibração na literatura para o papel Watman N42 (Tabela 1), contudo não existe um consenso sobre qual é mais adequada. Em geral, elas são compostas por duas equações, que indicam a diferente sensibilidade da resposta do papel filtro para altos e baixos níveis de sucção.

Tabela 1 - Curvas de calibração encontradas na literatura para o papel Watman N42.

Curva de calibração	Referência
$\log S = 8,022 - 3,683 \times w$	Hamblin (1981)
$\log S = 4,84 - 0,0622 \times w$ $w \leq 47$	Chandler et al (1997)
$\log S = 6,05 - 2,48 \times \log w$ $w > 47$	
$\log S = 5,237 - 0,0779 \times w$ $w < 45,3$	ASTM (1997)
$\log S = 2,413 - 0,0135 \times w$ $w \geq 45,3$	
$\log S = 8,778 - 0,222 \times w$ $w \geq 47$	Leong et al. (2002) Sucção mátrica
$\log S = 4,945 - 0,0673 \times w$ $w < 45,3$	
$\log S = 8,778 - 0,222 \times w$ $w \geq 26$	Leong et al. (2002) Sucção total
$\log S = 5,31 - 0,0879 \times w$ $w < 26$	

$$\begin{aligned} \log S &= 5,238 - 0,0723 \times w && w < 54 \\ \log S &= 1,8966 - 0,01025 \times w && w \geq 54 \end{aligned} \quad \text{McKeen (1980)}$$

w: Teor de umidade (%); S: Sucção em kPa.

Gomes (2007) adverte que irregularidades superficiais ou descontinuidades na face da amostra em relação ao papel-filtro podem alterar significativamente a precisão das aferições, acarretando medições incorretas em razão da deficiência de contato entre o papel-filtro e o solo. Entretanto, esse autor salienta que o aumento do tempo de interação entre o papel-filtro e o solo pode compensar eventuais dificuldades de acesso da água intersticial ao papel-filtro. Para obter-se uma medição confiável de potencial matricial, é necessário garantir que o papel-filtro, após o equilíbrio, seja removido do ambiente de equilíbrio sem alteração significativa de umidade. Por esse motivo, o manuseio deve ser o mais rápido possível, até ser aferida a quantidade de água no papel-filtro (BULUT; LYTTON; WRAY, 2001). O método do papel-filtro é padronizado pela norma D5298-03 (ASTM, 2003), que delinea a calibração do papel-filtro e o procedimento de medição. Porém, outros procedimentos recomendados podem ser consultados em Marinho (1994) e Ridley et al. (2003).

Devido ao elevado custo de aquisição e ao longo período de tempo para obter a curva de retenção pelo método convencional utilizando a câmara de Richards e o funil de Haines. Almeida et al. (2015) avaliaram o método do papel-filtro para obter a curva de retenção de água do solo em comparação com o método convencional. Ao comparar os métodos por meio dos valores de umidade de amostras de Argissolo Vermelho-Amarelo; Planossolo; Latossolo Amarelo; Neossolo Quartzarênico e Latossolo Vermelho-Amarelo, estimados segundo o modelo de van Genuchten, concluíram que o método do papel-filtro, com $R^2 = 0,99$, pode ser utilizado para obter as curvas de retenção de água dos solos agrícolas, sendo o seu uso como alternativa metodológica ao método convencional.

O método mais tradicional para determinação da curva de retenção de água no solo emprega a câmara de pressão de Richards. Por questões práticas, Lucas et al. (2011) buscaram um método alternativo ao de Richards, financeiramente mais acessíveis e menos morosos. Dessa forma, os autores avaliaram o uso do método do papel-filtro por meio da

comparação entre o método do papel-filtro e ensaios em Câmara de Richards com amostras de Latossolo Vermelho distroférico. Os autores verificaram a aplicabilidade do método do papel-filtro para determinação da curva de retenção de água no solo agrícola utilizado.

2.4 MODELOS ANALÍTICOS E NUMÉRICOS

O fluxo de água em solo insaturado envolve processos importantes como a absorção de água da raiz da planta e a recarga de águas subterrâneas para além da zona da raiz. O fluxo insaturado, representado pela equação de Richards, é conduzido por relações complexas entre a umidade do solo, a condutividade hidráulica correspondente e a sucção matricial. Essas relações são não lineares, caras e difíceis de estimar em condições laboratoriais ou de campo. A equação de Richards não possui uma solução analítica em forma fechada e é aproximada usando métodos numéricos, dividindo o domínio do fluxo em elementos finitos discretos de grades de diferenças finitas (NAHRA, 2006).

Nas últimas décadas, tem-se observado um considerável progresso na compreensão e na descrição de processos físicos que regem os fenômenos do movimento da água e o transporte de solutos na região não saturada do solo, e uma grande variedade de modelos analíticos e numéricos para prever os processos de transferência e o movimento de água e solutos no solo (PINHO; MIRANDA, 2014; GONÇALVES et al., 2007). Portanto existem dois conceitos diferentes de modelagem para simular o fluxo de água em perfis de solo homogêneos: modelos de balanço hídrico climatológico (BHC) e modelos numéricos.

O balanço hídrico foi proposto por Thornthwaite e Mather – 1995 (NETO, 1989) para determinar o regime hídrico de um local, sem necessidade de medidas diretas das condições do solo. Para sua elaboração, há necessidade de se definir o armazenamento máximo de água no solo, dados de chuva total e da estimativa da evapotranspiração potencial em cada período. Com essas três informações básicas, o BHC permite deduzir a evapotranspiração real, a deficiência ou o excedente hídrico, e o total de água retida no solo em cada período. Os modelos de BHC consideram o fluxo saturado e insaturado é calculado com base na lei de Darcy. Enquanto que, em condições insaturadas, a condutividade hidráulica saturada é substituída pela condutividade hidráulica não saturada, determinada por funções hidráulicas analíticas do solo, tal como a equação de Campbell (1974). Esses modelos incluem: DRAINMOD (SKAGGS, 1980; FERNANDEZ et al., 1997); HELP (adaptado por Fenn em 1975 e depois desenvolvido por Kmet em 1982).

Os modelos numéricos são, geralmente, baseados na equação de Richards para o fluxo de água em meios porosos e resolvem a equação de advecção-dispersão simultaneamente para o transporte de soluto. Esses modelos incluem LEACHM (HUTSON; WAGENET, 1992), SWAP (KROES et al., 1999), VS2DT (LAPPALA et al., 1993) e HYDRUS1D/2D/3D (SIMUNEK et al., 1998). Os modelos baseados em equações de Richards são os mais aceitos cientificamente para representar processos de fluxo no meio poroso de forma mais realista do que os modelos de balanço de água (API, 1996), especialmente em condições de fluxo de água próxima da superfície (SCANLON et al., 2002).

2.4.1 Modelo HYDRUS 1-D

O modelo HYDRUS-1D US foi desenvolvido por J. Šimunek, M. Th; Van Genuchten e M. Sejna, do laboratório *Salinity Laboratory* do Departamento de Ciências Ambientais da Universidade de Riverside California. Consiste num modelo numérico para simular o fluxo unidimensional de água, calor e transporte de soluto em solos variavelmente saturados, sob condições estacionárias e transientes. (Simunek et al., 1998; 2005).

As equações diferenciais governantes são resolvidas usando a técnica de elementos finitos lineares do tipo Galerkin aplicada a uma rede de elementos triangulares. A integração no tempo é realizada usando o esquema de diferenças finitas retrógradadas para condições saturadas e insaturadas. Todas essas técnicas fornecem soluções sólidas para a equação governante, uma boa interface entre condições insaturadas e saturadas. As técnicas de elementos finitos fornecem solução de tabela para limites irregulares e limites dependentes do tempo, e diferenças finitas, usando o Esquema Crank-Nicholson, minimizam a produção de erros ao integrar pequenos incrementos de tempo (RASSAM; COOK, 2002).

Šimunek et al. (2009) comentam que o surgimento dos diversos modelos se deve ao progresso na compreensão conceitual das descrições matemáticas dos processos de transporte de solutos e movimento de água no solo em região não saturada. Esses modelos são baseados na equação de Richards para o fluxo saturado/insaturado da água no solo e na equação de convecção-dispersão (CDE) para o transporte de solutos.

Ross e Shah (2009) citaram que o HYDRUS-1D é amplamente aceito para representar a física da água do solo pelas comunidades de pesquisa e engenharia e tem sido amplamente verificado pela comparação

dos resultados do modelo com soluções analíticas disponíveis, dados de campo e com outros modelos numéricos para o fluxo de água.

De acordo com Chaves (2009), o modelo matemático HYDRUS é um dos mais usados para a estimativa do processo de percolação de água e lixiviação de compostos químicos na zona vadosa do solo, particularmente, em estudos de recarga e contaminação de aquíferos.

Em relação ao seu uso para simulação de técnicas compensatórias, o Quadro 2 mostra os estudos encontrados na literatura que aplicaram o modelo HYDRUS-1D para simulações em técnicas compensatórias.

Quadro 2 - Estudos que aplicaram o modelo HYDRUS para simulações em técnicas compensatórias.

Autor	País	Solo Estudado	Aplicação			Técnica compensatória
			Fluxo de Água	Transporte de soluto	Transporte de calor	
Sírio (2014)	Brasil	Multicamadas heterogêneas	✓			Bacia de retenção de água, uma vala ou filtro gramado e uma trincheira de infiltração.
Slimene et al. (2015)	França	Depósito glaciofluvial com Multicamadas heterogêneas	✓	✓		Bacia de infiltração
Meng et al. (2014)	China	Multicamadas heterogêneas	✓			Células de biorretenção
Santos (2014)	Brasil	Multicamadas heterogêneas	✓			Trincheira de infiltração
Mujovo (2014)	Brasil	Multicamadas heterogêneas	✓			Trincheira de infiltração
Hilten et al. (2008)	Estados Unidos	Solo variado	✓		✓	Telhado verde

Lassabatere et al. (2010)	França	Depósito glaciofluvial heterogêneo	✓			Bacias de infiltração
Santos et al. (2013)	Brasil	Arenoso	✓			Telhado verde
Fournel et al. (2013)	França	Multicamadas heterogêneas	✓			<i>wetlands</i>
Turco et al. (2017)	Itália	Multicamadas heterogêneas	✓			Pavimento permeável
Hakimdavar et al. (2014)	Estados Unidos	Multicamadas heterogêneas	✓			Telhado verde
Li e Babcock Jr (2013)	Estados Unidos	Multicamadas heterogêneas	✓			Telhado verde
Lamera et al. (2014)	Reino Unido	Multicamadas heterogêneas	✓			Telhado verde
Obeid (2015)	Estados Unidos	Multicamadas heterogêneas	✓			Telhado verde
Seidl (2015)	Estados Unidos	Multicamadas heterogêneas	✓			Telhado verde

Pode-se observar no Quadro 2, que o modelo HYDRUS tem sido aplicado para a modelagem do fluxo de água no solo de dispositivos de drenagem. Portanto, o aumento da utilização do modelo, em condições variadas de laboratório e de campo, torna-se necessário, pois, além de possibilitar melhorias para as rotinas computacionais, fornece informações acerca dos processos para os quais o modelo pode ser aplicado com confiança.

2.4.1.1 Rotina para dinâmica da água

O fluxo de água é descrito com base na equação de Richards (Equação (2)), o qual considera-se que a fase do ar desempenha um papel insignificante no processo de fluxo líquido e que o fluxo de água devido a gradientes térmicos pode ser negligenciado:

(2)

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K \left(\frac{\partial h}{\partial z} + \cos \alpha \right) \right] - S$$

Sendo h o potencial matricial; θ é o conteúdo volumétrico de água no solo; t é o tempo, z é a profundidade da camada orientada positivamente para baixo; S é o termo de extração de água pelo sistema radicular, α é o ângulo entre a direção do fluxo e o eixo vertical e K a condutividade hidráulica insaturada obtida pela Equação (3).

(3)

$$K(h, x) = K_s(x)K_r(h, x)$$

Sendo K_s condutividade hidráulica do solo saturado e K_r a condutividade hidráulica relativa do solo não-saturado.

As propriedades hídras de um solo não-saturado, $\theta(h)$ e $K(h)$, da Equação ((2)), são de maneira geral, funções não lineares do potencial mátrico. O modelo HYDRUS-1D permite o uso de 5 modelos analíticos para as propriedades hídras: Brooks e Corey (1964); Modelo de Genuchten – Mualem (1980); Modelo Genuchten modificado de Vogel e Cislerová (1988); Kosugi (1996) e Durner (1994).

A partir dos dados obtidos nos ensaios para determinar a curva de retenção de água no solo, vários autores fizeram regressões numéricas para se chegar a um modelo matemático que melhor represente esta

relação. O resumo dos cinco modelos integrados ao HYDRUS está disposto na Tabela 2.

Tabela 2 - Proposições para estimar a curva de retenção solo.

Autor (es)	Equação	Parâmetros do solo	Aplicação
Durner, (1994)	$w = \frac{100e_{wL}}{G} \left\{ \frac{1}{1 + [\alpha_L \times (u_a - u_w)]^{n_L}} \right\}^{m_L} + \frac{100e_{wS}}{G} \left\{ \frac{1}{1 + [\alpha_S \times (u_a - u_w)]^{n_S}} \right\}^{m_S}$	$e_{wL}, \alpha_L, \alpha_S, u_a, u_w$ n_L, n_S, G, m_L, m_S $= 1 - (1/n)$	Poros multimodal
Kosugi (1996)	$w = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{\ln(\Psi/\alpha)}{\sqrt{2n}} \right\}$	α, n	Poros lognormal
Genuchten–Mualem (1980)	$w = \frac{w_s}{\left[1 + \left(\frac{\Psi}{a_m} \right)^{n_m} \right]^{m_n}}$	a_m, n_m, m_n $= 1/(1 - n_m)$	Diferentes solos
Vogel e Cislárová (1988)	$w = \frac{w_s}{[1 + (\alpha \Psi)^n]^m}$	a_b, n_b, m_b $= 2/(1 - n_b)$	Solos textura fina
Brooks e Corey (1964)	$w = \left\{ \frac{(u_a - u_w)_b}{u_a - u_w} \right\}^\lambda$	$(u_a - u_w)_b, \lambda$	Solos textura grossa

2.4.1.1.1 Modelo de Genuchten – Mualem (1980)

A função dada por van Genuchten (1980) para a curva de retenção de água está descrita na Equação (4). O modelo de distribuição de tamanho de poro (Equação (5)) proposto por Mualem (1976) utilizado para a função de condutividade hidráulica não saturada (Equação (6)). Usados em conjunto, essas relações são chamadas de modelo Van Genutchen Mualem (VGM) (Simúnunk et al., 2005). Os parâmetros como teor de umidade residual (θ_r) no modelo VGM não são propriedades verdadeiramente físicas, mas sim variáveis para ajustar as curvas de retenção observadas. No entanto, os usuários frequentemente fazem analogia aproximada com as definições físicas do estado do solo (por exemplo, o residual referido como ponto de murcha) (Simúnunk et al., 2005; VIRDI, 2013).

$$\theta(\psi) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha|\psi|)^n]^m} \quad (4)$$

$$n = \frac{1}{1 - m} \quad (5)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n}$$

$$\alpha = \frac{1}{h_b} (2^{1/m} - 1)^{1-m}$$

$$K(\psi) = K_s \Theta^l [1 - (1 - \Theta^{1/m})^m]^2 \quad (6)$$

Sendo, $\theta(\psi)$ o conteúdo volumétrico de água no solo; n o índice de distribuição do tamanho dos poros, α o inverso da pressão de entrada de ar (borbulhamento), a carga na qual a sucção começa a dominar, $K(\psi)$ é a condutividade hidráulica não saturada; l o parâmetro de conectividade dos poros (0,5, estimativa empírica) e Θ a saturação efetiva definida pela Equação (7), abaixo:

$$\Theta = \frac{\theta(\psi) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (7)$$

Sendo, θ_s o teor de água saturada do solo e θ_r o teor de água residual.

A equação proposta por van Genuchten (1980) é aceita no meio científico para estimar a curva de retenção de diferentes solos, e certas publicações sugerem valores dos parâmetros da equação proposta por van Genuchten (1980) dentre elas as apresentadas por Gerscovich e Sayão

(2002), Hodnett e Tomasella (2002), Wosten et al. (1999) e do programa ROSETTA (SCHAAP et al., 2001).

O parâmetro α é proporcional ao inverso do valor de h (carga de pressão ou sucção), entre θ_s e θ_r , ou seja, para o valor do grau de saturação efetivo igual a 50% (van Genuchten, 1980; HODNETT; TOMASELLA, 2002). Pequenos valores indicam uma pequena mudança no teor de água que geralmente é mais provável em solos finos e não estruturados. Grandes valores de α indicam uma mudança repentina no teor de água, com esvaziamento de alguns poros sob valores de entradas de ar muito pequenos: este é geralmente mais típico de areia (HODNETT; TOMASELLA, 2002).

O parâmetro n é adimensional e determina a inclinação da curva de retenção. Se o valor de n é grande, a curva é íngreme, com uma diminuição rápida do conteúdo de água e uma pequena distribuição de tamanho de poros, ou seja, solos mais uniformes (van Genuchten, 1980). Se o valor de n é baixo, a alteração no teor de água é muito gradual (HODNETT; TOMASELLA, 2002).

Ainda sobre os parâmetros de van Genuchten (1980), o conteúdo de água residual θ_r , equivale ao teor de água em que a inclinação da curva de retenção ($d\theta_r/dh$) é igual à zero a um valor muito grande de sucção.

2.4.1.2 ROSETTA LITE

Na década de 90, trabalhos como o de Minasny et al. (1999) utilizaram análises com redes neurais artificiais para estabelecer funções de pedrotrânsferência empíricas devido ao uso ser vantajoso em relação às funções de pedotransferência convencionais, pois não requer um modelo conceitual a priori.

Os dados de entrada dão origem aos dados de saída através de um processo de calibração iterativo. Assim, os modelos de redes neurais extraem o máximo de informações dos dados de entrada (SCHAAP et al., 2001). Mesmo as funções de pedotransferência, baseadas em redes neurais, as quais fornecem estimativas com acurácia adequada, ainda existem coeficientes de complexa interpretação e apresentação. Devido a isso, Schaap et al. (2001) desenvolveram o programa Rosetta Lite para facilitar a aplicação dessas técnicas. Esse programa é capaz de estimar os parâmetros da curva de retenção (van Genuchten, 1980) e a condutividade hidráulica do solo saturado a partir de dados substitutos do solo, como dados de textura do solo e densidade aparente, além dos parâmetros da condutividade do solo não saturado do modelo de Mualem (1976). O

software Rosetta Lite v.1.1 está acoplado ao modelo HYDRUS-1D versão 4.16.0110.

2.4.1.3 SOLUÇÃO INVERSA

A otimização de parâmetros é uma abordagem indireta para a estimativa de parâmetros de transporte hidráulico e/ou soluto do solo a partir de dados de fluxo e/ou transporte transitório. Os métodos inversos são tipicamente baseados na minimização de uma função objetiva adequada, que expressa a discrepância entre os valores observados e a resposta prevista do sistema. As propriedades hidráulicas do solo para este fim são assumidas como descritas por um modelo analítico com valores de parâmetros desconhecidos (ŠIMŮNEK et al., 2009).

A resposta do sistema é representada por uma solução numérica da equação de fluxo, aumentada com as funções hidráulicas parametrizadas, parâmetros de transporte selecionados e condições iniciais e de contorno adequadas. As estimativas iniciais dos parâmetros otimizados do sistema são melhoradas iterativamente durante o processo de minimização até que um grau de precisão desejado seja obtido. Esta metodologia foi originalmente aplicada aos dados de escoamento de uma etapa e coluna de múltiplas etapas gerados no laboratório (KOOL et al., 1985; van Dam et al., 1994), e dados de transporte de campo ou de laboratório durante o fluxo de água em estado estacionário (van Genuchten, 1981; TORIDE et al., 1995).

O HYDRUS implementa a otimização de parâmetros também para a estimativa dos parâmetros de transporte e reação do soluto a partir de experimentos transitórios de fluxo de água e transporte de solutos. A função objetivo Φ a ser minimizada durante o processo de estimação de parâmetros pode ser definida de acordo com a Equação (8) (ŠIMŮNEK et al., 1998).

(8)

$$\begin{aligned}
\Phi(b, q, p) = & \sum_{j=1}^{mq} v_j \sum_{j=1}^{nq} w_{i,j} [q_j^*(x, t_i) - q_j(x, t_i) - q_j(x, t_i, b)]^2 \\
& + \sum_{j=1}^{mq} \bar{v}_j \sum_{j=1}^{nq} \bar{w}_{i,j} [p_j^*(\theta_i) - p_j(\theta_i, b)]^2 \\
& + \sum_{j=1}^{n_b} \hat{v}_j [b_j^* - b_j]^2
\end{aligned}$$

onde o primeiro termo do lado direito representa desvios entre as variáveis de espaço-tempo medidas e calculadas, como succões, conteúdo de água e/ou concentrações em diferentes locais e/ou tempos no domínio de fluxo, ou fluxos reais ou cumulativos versus tempo através de um determinado limite. Existe uma tabela no *software* a qual lista várias opções para definir o primeiro termo da Equação (8) para os diferentes modelos de fluxo de água e de transporte de soluto. No primeiro termo, mq é o número de diferentes conjuntos de medições, nqj é o número de medições em um determinado conjunto de medidas, $q_j^*(x, t_i)$ representa medições específicas no tempo t_i para o conjunto de medições de j na localização $x(r, z)$, $q_j(x, t_i, b)$ são as previsões de modelo correspondentes para o vetor de parâmetros otimizados b (por exemplo, $\theta_r, \theta_s, \alpha, n, K_s, \dots$), e v_j e $w_{i,j}$ são pesos associados a um conjunto ou ponto de medição particular, respectivamente. O segundo termo da Equação (8) representa diferenças entre propriedades hidráulicas do solo medidas e previstas independentemente (por exemplo, retenção, (h) e/ou condutividade hidráulica, dados $K(\theta)$ ou $K(h)$), enquanto os termos mp , n_{pj} , $p_j^*(\theta_i)$, $p_j(\theta_i, b)$, \bar{v}_j e $\bar{w}_{i,j}$ têm significados similares aos do primeiro termo, mas agora para as propriedades hidráulicas do solo. O último termo da Equação (8) representa uma função de penalidade para desvios entre o conhecimento prévio dos parâmetros hidráulicos do solo, b_j^* , e suas estimativas finais, b_j , com n_b sendo o número de parâmetros com conhecimento prévio e \hat{v}_j representando pesos pré-atribuídos. Estimativas, que fazem uso de informações prévias (como aquelas usadas no terceiro termo da Equação (8)) são conhecidas como estimativas bayesianas. Šimůnek et al. (2009) observaram que as matrizes de covariância (ponderação), fornecem informações sobre a exatidão da medição, bem como qualquer possível correlação entre erros de medição

e/ou parâmetros. Os coeficientes de ponderação v_j , que minimizam diferenças na ponderação entre diferentes tipos de dados devido a diferentes valores absolutos e números de dados envolvidos, são fornecidos pela Equação (9) (CLAUSNITZER; HOPMANS, 1995).

$$v_j = \frac{1}{n_j \sigma_j^2} \quad (9)$$

Que faz com que a função objetivo torne-se o desvio médio ponderado ao quadrado normalizado pelas variâncias de medição σ_j^2 .

A minimização da função objetivo Φ é realizada usando o método de minimização não-linear de Marquardt (1963), que consiste numa abordagem de mínimos quadrados ponderados baseada no método de vizinhança máxima de Marquardt. Esse método combina os métodos Gauss-Newton e o Máximo declive e, gera intervalos de confiança para os parâmetros otimizados. O método foi encontrado para ser muito eficaz e tornou-se um padrão apropriado em mínimos quadrados para os modelos não-lineares entre os cientistas do solo e hidrólogos (van Genuchten, 1981; KOOL et al. 1985, 1987).

Como parte da solução inversa, o HYDRUS produz uma matriz de correlação, que especifica o grau de correlação entre os coeficientes ajustados. A matriz de correlação quantifica as alterações nas previsões do modelo causadas por pequenas alterações na estimativa final de um parâmetro específico, em relação a alterações semelhantes, como resultado de alterações nos outros parâmetros. A matriz de correlação reflete a não-ortogonalidade entre dois valores de parâmetros. Um valor de ± 1 sugere uma correlação linear perfeita, enquanto 0 indica que não há correlação alguma. A matriz de correlação pode ser usada para selecionar quais parâmetros, se houver, são melhor mantidos constantes no processo de estimativa de parâmetros devido à alta correlação.

Uma medida importante da adequação do ajuste é o valor de r^2 (Equação (10) para a regressão dos valores observados \hat{y}_i versus ajustados $y_b(b)$).

$$r^2 = \frac{\left[\sum w_i \hat{y}_i y_i - \frac{\sum \hat{y}_i \sum y_i}{\sum w_i} \right]^2}{\left[\sum w_i \hat{y}_i^2 - \frac{(\sum \hat{y}_i)^2}{\sum w_i} \right] \left[\sum y_i^2 - \frac{(\sum y_i)^2}{\sum w_i} \right]} \quad (10)$$

O valor r^2 é uma medida da magnitude relativa da soma total de quadrados associados à equação ajustada; o valor de 1 indica uma correlação perfeita entre os valores ajustados e observados.

O HYDRUS fornece informações estatísticas adicionais sobre os parâmetros ajustados, como a média, o erro padrão, o valor T e os limites de confiança inferior e superior (dados no arquivo de saída FIT.OUT). O erro padrão, $s(b_j)$, é estimado a partir do conhecimento da função objetivo, do número de observações, do número de parâmetros desconhecidos a serem ajustados e de uma matriz inversa (DANIEL; WOOD, 1971). O valor T é obtido a partir da média e erro padrão usando a Equação ((11).

$$T = \frac{b_j}{s(b_j)} \quad (11)$$

os valores para T e $s(b_j)$ fornecem medidas absolutas e relativas dos desvios em torno da média. HYDRUS também especifica os limites superior e inferior do nível de confiança de 95% em torno de cada parâmetro ajustado b_j . É desejável que o valor real do parâmetro alvo esteja sempre localizado em um intervalo estreito em torno da média estimada obtida com o programa de otimização. Grandes limites de confiança indicam que os resultados não são muito sensíveis ao valor de um determinado parâmetro.

Feltrin et al. (2013) simularam a dinâmica da água no solo, por meio do modelo computacional HYDRUS-1D, para as condições climáticas características da região sul do Brasil. A estimativa dos parâmetros hidráulicos do modelo foi realizada por meio da ferramenta Rosetta Lite V. 1.1 com base em sub-rotinas de redes neurais e funções de pedotransferência, a partir dos dados de entrada, determinados em laboratório e com base nos resultados obtidos, utilizou-se a técnica da solução inversa presente no *software* HYDRUS-1D. Os autores

observaram que para a profundidade de 10 cm, a média dos valores simulados foi de 11,22% menor que os valores observados, enquanto que para as profundidades de 30 e 70 cm a média dos valores simulados foram, respectivamente, 8,58 e 4,97% maiores. Dessa forma, concluíram-se que para as condições em que o estudo foi realizado, foi possível afirmar que o modelo HYDRUS-1D representa de maneira satisfatória os processos hidrológicos do solo.

Costa (2019) estimou os parâmetros da equação de van Genuchten em cinco classes texturais de solo com amostras de solo em laboratório e por modelagem inversa com dados de umidade (obtidos por gravimetria) em experimentos de campo do tipo perfil instantâneo e, assim, o modelo simulou satisfatoriamente a redistribuição de água no solo para todas as classes texturais, dado os baixos valores de erros dos dados e a boa concordância entre os observados em campo e os simulados. O autor concluiu que o uso do HYDRUS-1D permite estimar os parâmetros da equação de van Genuchten de modo mais coerente com os dados obtidos *in situ* que aqueles obtidos em laboratório para todas as classes texturais, estimando com melhor acurácia (NSE entre 0,95 a 0,97; RMSE entre 0,001 a 0,003 m³/m³) o conteúdo de água no solo independentemente da classe textural de solo.

Silva Junior et al. (2013) determinaram o parâmetro K_s das funções de $K(\theta)$ e $K(h)$, do modelo de van Genuchten, mediante a resolução de um problema inverso com auxílio do aplicativo HYDRUS-1D, a partir de dados de infiltração acumulada coletados em campo e concluíram que o problema inverso proposto permite determinar a condutividade hidráulica não saturada com base em dados coletados sob um amplo intervalo de valores de umidade volumétrica e módulo do potencial mátrico.

Mashayekhi et al (2016) simularam a infiltração em lagoas através de infiltrômetros de anel duplo em um perfil de solo argiloso hipotético. Os resultados mostraram que a modelagem numérica inversa dos dados do infiltrômetro de anéis duplos forneceu um método alternativo confiável para determinar os parâmetros hidráulicos do solo.

2.4.1.4 DESEMPENHO DO MODELO HYDRUS

Os modelos de fluxo podem ser valiosas ferramentas de prognóstico, alertando sobre detalhes não considerados previamente, e prever consequências de diversos usos sobre os recursos hídricos subterrâneos (ANDERSON; WANG, 1982).

Os modelos mais complexos são aqueles que descrevem o maior número de processos e conseqüentemente mais informação sobre o

sistema descrito requerido. De acordo com van Dam et al. (1994), a precisão das simulações de fluxo e transporte de solutos em meio não saturado requerem amplo conhecimento ambiental, uma vez que para cada situação de uso do solo, clima e organismos vivos devem ser caracterizados todos os possíveis fatores que afetam o sistema solo. Um modelo de previsão deve incluir todos os processos e propriedades do sistema que influenciam em seu funcionamento e comportamento (ZAVATTARO; GRIGNANI, 2001; VANDERBORGHT et al., 2005). A precisão do resultado do modelo depende das suposições e simplificações realizadas e das relações deles com as condições específicas locais (ZAVATTARO; GRIGNANI, 2001). Além destas suposições, a parametrização do modelo e o uso por diferentes modeladores também podem conduzir a diferenças nos resultados modelados (VANCLOOSTER; VIANE; CHRISTIAENS, 1994). Ao selecionar um modelo, deve ser assegurado que todos os parâmetros de entrada requeridos devam ser comparados e validados com dados seguros e acessíveis para uma determinada situação. Diante disso, o Quadro 3 mostra os critérios estatísticos para a avaliação do desempenho do Modelo HYDRUS encontrados na literatura.

Quadro 3 - Critérios estatísticos para a avaliação do desempenho do Modelo HYDRUS adotados na literatura.

Autor (es)	ESTIMADORES								
	RMSE	MRE	R^2	NRMSE	NSE	d	RD	e	Aplicação
Meng et al. (2014)	✓	✓	✓	✓					Avaliou o desempenho do modelo HYDRUS-1D para simulação do desempenho hidrológico de duas células de biorretenção.
Tafteh e Sepaskhah (2012)	✓			✓		✓			Avaliou o desempenho do modelo HYDRUS-1D para simulação do fluxo de água e lixiviação de nitrato com diferentes taxas de adubação e irrigação.
Li et al. (2015)	✓		✓						Avaliou o desempenho do HYDRUS-1D para simulação do transporte e das transformações de nitrogênio em um campo experimental de arroz de sementeira direta.
Tan et al (2015)	✓				✓				Avaliou o desempenho do HYDRUS-1D para simulação do movimento da água e transporte e

									transformações do nitrogênio em arrozais experimentais sob irrigação.
Silva et al. (2015)	✓				✓	✓			Modelar a dinâmica de umidade do solo através do Modelo Hydrus-1D, a partir de medições por meio de Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) em parcelas experimentais, sob condição de cobertura natural e solo descoberto
Mujovo (2014)					✓		✓	✓	Avaliou o desempenho do HYDRUS-1D para simulação do fluxo de água no meio poroso a partir de trincheiras de infiltração.
Tan; Shao e Liu (2013)	✓				✓				Avaliou o desempenho do modelo HYDRUS-1D para simulação do fluxo de água em plantações de arroz.
Turco et al. (2017)			✓		✓				Avaliou o desempenho do modelo HYDRUS-2D para interpretar o comportamento hidráulico de um

									sistema de pavimento permeável em escala laboratorial.
Pinho (2009)						✓			Aplicação do modelo Hydrus-1D para simulação do movimento da água e dos íons nitrato e potássio, em condições de laboratório.
Ma et al. (2010)	✓								Avaliou o desempenho do modelo HYDRUS-1D para simulação do fluxo de água numa coluna de água de 300 cm de profundidade.
Verbist et al. (2012)	✓								Avaliou o desempenho do modelo HYDRUS-3D para simulação do fluxo de água no solo de uma vala de infiltração urbana.
Wang et al. (2018)			✓	✓	✓				Avaliou o desempenho do modelo HYDRUS-1D para simulação do movimento de água em solos repelentes de água.
Behera e Panda (2011)	✓		✓						Avaliou o desempenho do modelo HYDRUS-1D para simulação do movimento de água, nitrogênio e fósforo no solo de plantação de trigo.

Kanzari et al. (2018)	✓								Avaliou o desempenho do modelo HYDRUS-1D para simulação do movimento de água e sais numa parcela de solo agrícola.
Márquez et al. (2017)	✓		✓		✓				Avaliou o desempenho do modelo HYDRUS-1D para simulação do movimento vertical de um nematocida em condições de laboratório.
Gabiri et al. (2018)	✓		✓		✓				Avaliou o desempenho do modelo HYDRUS-1D para simulação da dinâmica hídrica do solo em diferentes zonas hidrológicas de uma planície de inundação tropical na Tanzânia, para determinar fatores de controle para períodos úmidos e secos e avaliar a disponibilidade de água no solo.
Agah; Meire e Deckere (2016)				✓		✓			Avaliou o desempenho do modelo HYDRUS-1D para prever a lixiviação de fósforo em cultura de cevada.

Caiqiong e Jun (2016)	✓				✓				Avaliou o desempenho do modelo HYDRUS-1D para simulação o fluxo de água em parcelas no Platô de Loess, China.
Negm et al (2017)	✓				✓				Avaliar o desempenho de duas abordagens para estimar o teor de água na camada superior do solo em condições de campo: a inércia térmica baseada em fontes físicas e o modelo de Hydrus 1e 2D.
Melo e Louzada (2013)	✓				✓				Dois modelos públicos, SWAP e HYDRUS 1D, amplamente utilizados em simulações unidimensionais do fluxo de água foram aplicados para quantificar o balanço hídrico em dois cenários agrícolas significativamente distintos.
Junior (2014)		✓		✓		✓			Determinação, com a utilização do método numérico inverso, a curva de condutividade hidráulica não saturada, os parâmetros do modelo de van Genuchten (1980) (θ_s, θ_r, a, n) da curva de retenção de água no solo. Por meio da

									resolução de um problema inverso do modelo HYDRUS-2D
Pinho e Miranda (2014)				✓		✓			Aplicar o modelo HYDRUS-1D, bem como avaliar sua performance, em simulações do deslocamento do potássio e água (umidade do solo), em colunas segmentadas, preenchidas com dois tipos de solos tropicais, em condições não saturadas.
Duncan (2011)	✓					✓			Avaliou o desempenho do modelo HYDRUS-2D juntamente com o modelo MatlabSimulink para simular a quantidade de escoamento com base nos dados de precipitação contínua.

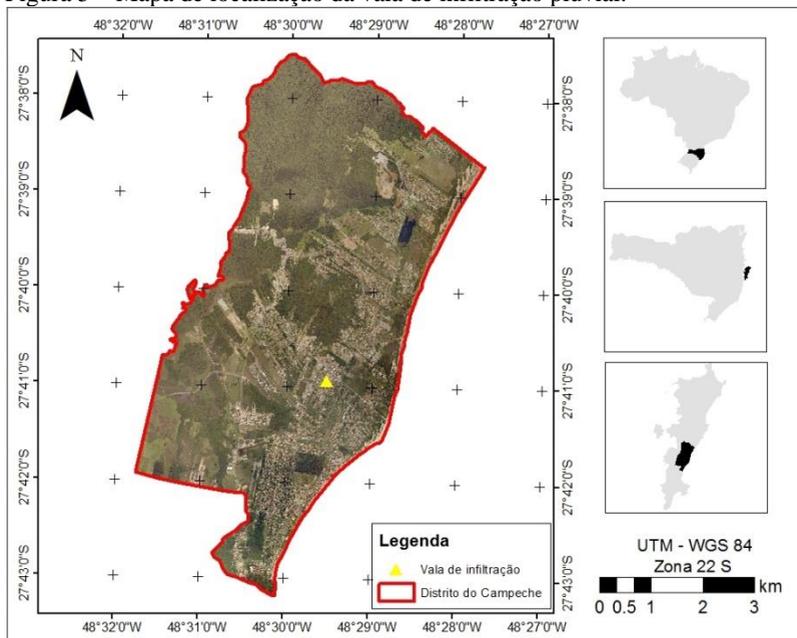
Coeficiente de concordância (d); *razão dos desvios (RD); Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE); * Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE); * Índice de Concordância (d) Erro relativo médio (MRE); Raiz quadrada do erro médio normalizado (NRMSE); Coeficiente de determinação (R^2); erro porcentual (e).

3 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A vala de infiltração pluvial (Figura 5) estudada localizava-se entre as coordenadas $48^{\circ}29'29,6''\text{W}$ e $27^{\circ}40'54,6''\text{S}$ no Distrito do Campeche localizado ao sul da ilha de Florianópolis.

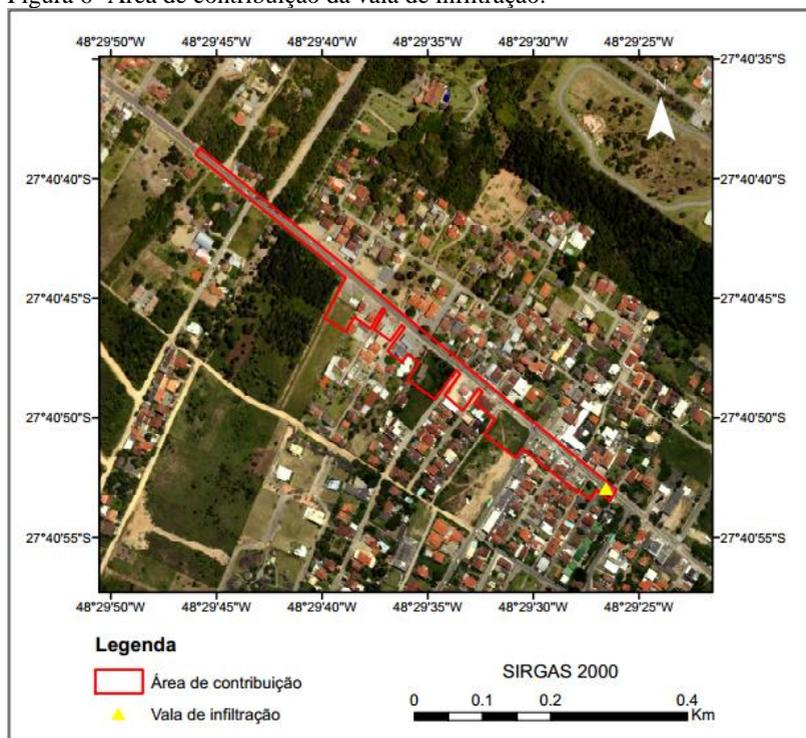
Figura 5 – Mapa de localização da vala de infiltração pluvial.



Fonte: Schuck, Caprario e Finotti (2017).

De acordo com Pacheco (2015), a área de contribuição (Figura 6) corresponde a 18.000 m^2 , composta por 79,8% de área impermeável e 20,2% de área permeável. A rede foi projetada de modo que somente os primeiros lotes da avenida contribuam para a vala e a água remanescente (tubulação de saída) da vala de infiltração era lançada diretamente no mar. foram considerados todos os elementos de drenagem urbana (bueiros, boca de lobos, tubulações, canaletas e a distinção de áreas permeáveis e impermeáveis) para o levantamento da área de contribuição.

Figura 6- Área de contribuição da vala de infiltração.



Conforme Pacheco, Schuck e Finotti (2015), resíduos sólidos e matéria orgânica são carreados para a estrutura de infiltração (Figura 7) devido às chuvas e as ligações clandestina de esgotos. O aumento da especulação imobiliária da região, fez com que a produção de sedimentos e resíduos de obras civis crescesse, o qual contribuía com o assoreamento da estrutura. Dessa forma, os sedimentos eram retirados por meio de hidro jato, uma vez por ano.

A frequência de limpeza da vala de infiltração era influenciada pela sazonalidade, pois na época do verão ocorria com maior frequência

o corte da vegetação e a coleta de resíduos sólidos. Dessa forma, a vegetação da vala sofria variações ao longo do ano.

Figura 7 – Vala de infiltração pluvial estudada.



Fonte: Schuck, Caprario e Finotti (2017).

3.1.1 Resumo dos Dados

Os dados utilizados na presente pesquisa foram coletados por Pacheco (2015), Schuck (2019) e Autora (2019), sendo assim, o resumo dos dados coletados se encontra no Quadro 4.

Quadro 4 - Resumo dos dados coletados.

Autor	Dado (s)	Número de amostragem	Método	Data de coleta ou ensaio
Pacheco (2015)	Precipitação e vazão de entrada/saída	-	Pluviógrafo e método dos flutuadores	abril 2014 a março 2015
Schuck (2019)	Precipitação e vazão de entrada/saída	-	Pluviógrafo e método dos flutuadores	Março de 2015 a setembro 2016
Schuck (2019)	Nível freático	-	Sensor de nível	Setembro 2015

Pacheco (2015)	K_s	3	<i>Slug Test</i>	Julho 2014
Pacheco (2015)	Taxa de infiltração	-	Anéis concêntricos	Julho 2014
Pacheco (2015)	granulometria	8	Peneiramento grosso e fino	Julho 2014
Autora (2019)	Densidade do solo	1	Anel volumétrico (MAV)	Mai 2018
Autora (2019)	CRA	1	Papel-filtro	Julho 2018

3.1.2 Coleta e análise dos dados

Este estudo utilizou dados de instrumentação de campo da vala de infiltração pluvial, que aconteceu entre abril de 2014 a setembro de 2016, disponibilizados por Pacheco (2015) e por Schuck (2019). Devido à necessidade de conhecimento dos parâmetros hidráulicos e da densidade do solo, realizou-se novas coletas de solo em maio e julho de 2018.

As dimensões da vala de infiltração estão dispostas na Tabela 3. Para o monitoramento da vala, foram colocados sensores de nível acoplados na tubulação de entrada e de saída de água e, um pluviômetro de balança instalado num lote residencial ao lado da vala. Além disso, possuía três poços de monitoramento do aquífero a montante e jusante da vala, também com sensores de nível. As vazões de entrada e saída foram determinadas por meio dos dados de nível e, das condições hidráulicas da vala e das tubulações. Os registros dos sensores foram armazenados num *datalogger* e fixado na barra fixa do pluviômetro. Os instrumentos foram instalados conforme mostra a Figura 8.

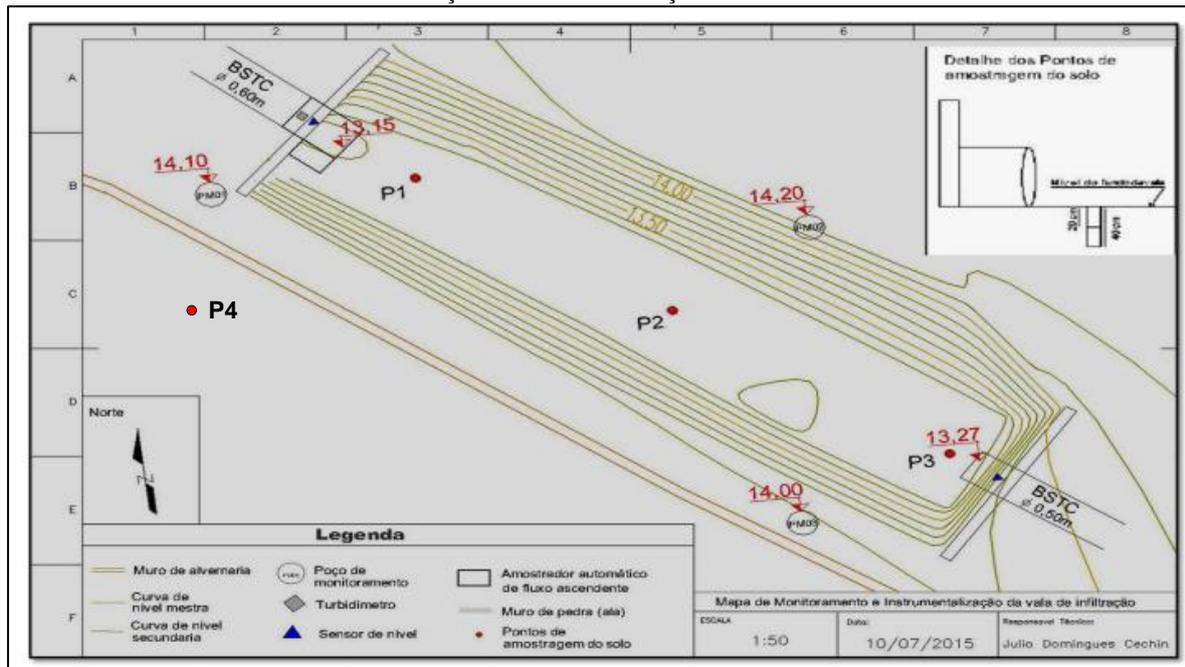
Tabela 3 - Dimensões da Vala de Infiltração Pluvial

Dimensões	
Comprimento (m)	10,5
Largura Superior (m)	2,9
Largura Inferior (m)	1,6
Profundidade (m)	1,1
Área do fundo da vala (m ²)	16,8

Diâmetro da tubulação de entrada (m)	0,6
Diâmetro da tubulação de saída (m)	0,5

Fonte: Pacheco (2015).

Figura 8 – Pontos de monitoramento e instrumentação da vala de infiltração.



Fonte: Pacheco (2015).

P1: ponto de coleta 1 (2014); P2: ponto de coleta 2 (2014); P3: ponto de coleta 3 (2014); P4: ponto de coleta 4 (2019).

Em julho de 2014 foram realizados 3 ensaios de anéis concêntricos para a determinação da taxa de infiltração de água e, o ensaio do Slug Test para a condutividade hidráulica saturada nos três poços de monitoramento instalados ao redor da vala e seus dados foram analisados pelo método Hvorslev. Os valores se encontram na (Tabela 4).

Tabela 4 – Valores de Condutividade hidráulica saturada K_s .

Valores de K_s (cm/s)	Taxa de infiltração (cm/s)	
Poço 1	0,03108	
Poço 2	0,091	0,00583
Poço 3	0,00237	

Fonte: Pacheco (2015).

No mesmo período, foi feita a análise granulométrica (Simples+sedimentos) no Laboratório de Engenharia Civil – UFSC/Florianópolis. De acordo com a curva granulométrica o solo obteve a classe textural de areia franca. A Tabela 5 apresenta as características da textura do perfil do solo onde foi escavada a vala.

Tabela 5 - Caracterização Granulométrica do solo.

Ponto de coleta	Profundidade (cm)	GRANULOMETRIA (%)					
		Argila	Silte	AREIA			Pedregulho
				Fina	Média	Grossa	
1	0-20	2,27	1,64	43,7	15,54	17,32	19,54
	20-40	3,8	1,01	60,28	8,31	10,78	15,82
2	0-20	5,62	1,18	76,16	4,91	4,45	7,68
	20-40	5,05	5,49	69,95	5,14	5,09	9,28
3	0-20	2,49	0,37	67,5	6,41	7,39	15,84
	20-40	6,79	11,01	69,88	3,6	3,32	5,39
4	0-20	3,46	4,57	72,19	6,1	7,28	6,4
	20-40	5,85	9,49	70,73	9,68	1,95	2,3

Fonte: Pacheco (2015).

O solo foi classificado por Pacheco (2015) como Areias Quartzosas não-hidromórficas descoloridas, Neossolo Quartzarênico.

3.1.2.1 determinação da densidade do solo

Em maio de 2018, foram coletadas amostras de solo indeformado com o uso dos anéis biselados ou kopeak, após 1 metro de profundidade e levadas para o laboratório. Para a determinação da densidade do solo utilizou-se o método do anel volumétrico (MAV), segundo Embrapa (1997). A densidade do solo da vala então foi determinada por meio da Equação (12).

$$D_s = M_{ss}/V \quad (12)$$

Sendo, D_s a Densidade do solo; M_{ss} a massa de solo seca e V o volume do solo (recipiente).

Figura 9 – Coleta de solo para a determinação da densidade do solo da vala.



3.1.2.2 Determinação da Curva de Retenção de Água

Em julho de 2018, realizou-se a Curva de Retenção de Água pelo método do Papel-filtro para a determinação dos parâmetros θ_s , θ_r , α e n necessários para a resolução da equação de Richards. Para isso foi retirada amostra de solo indeformada da vala (Figura 10) seguindo as recomendações da NBR 9604/86 (ABNT, 1986) e acondicionada imediatamente após a retirada, mantendo assim as condições de campo.

Figura 10 – Coleta e moldagem do solo para o ensaio do Papel-filtro.



O bloco foi envolvido com gesso e acondicionado numa bandeja com o fundo coberto de solo para evitar perturbação durante o transporte. As amostras foram guardadas numa câmara úmida do laboratório de Mecânica dos Solos, localizado no Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina até a sua utilização.

Para a determinação da curva característica do solo ensaiado, utilizou-se o Método do Papel Filtro, seguindo a norma D5298-03 (ASTM, 2003). O método consiste basicamente em atingir o equilíbrio de sucção, total ou matricial, do solo em estudo com o papel filtro, cuja curva de calibração já foi previamente determinada. Este ensaio possibilita a obtenção de uma grande variação de sucção no solo, desde sucções muito baixas a sucções muito altas.

Portanto, foram esculpidos 15 corpos de prova em tubos cilíndricos de PVC em diferentes profundidades do bloco de solo indeformado. Posteriormente, os tubos foram identificados e envolvidos em plástico filme, até o início do ensaio. Devido a possibilidade de ruptura do solo

arenoso durante a trajetória de secagem, utilizou-se todas as amostras para a construção de uma única CRA, isto é, foi considerado que o bloco de solo fosse homogêneo.

Adicionou-se o excesso de solo da primeira moldagem em duas cápsulas de metal (duplicata) com dimensões conhecidas, as quais foram levadas à estufa para medição de umidade. A partir da média da umidade do solo, calculou-se as umidades correspondentes a diferentes graus de saturação para cada tubo e então foram encontrados os pesos de água a serem adicionados nas amostras. Para tal, os tubos foram colocados numa balança com precisão de três casas decimais e, assim, com um algodão úmido, realizou-se o gotejamento da água nas amostras de solo até atingir o peso pré-definido.

Com as umidades pretendidas, o papel filtro da marca Whatman Schleicher e Schuell 42 foi colocado em ambas as extremidades dos tubos (duplicata). O conjunto, papel filtro-solo-papel filtro foi embalado em papel filme, papel alumínio e colocado numa caixa de isopor e, assim, foi mantido durante o período de equilíbrio de 7 dias.

Após os sete dias, os corpos-de-prova foram retirados da caixa, seguindo as etapas: retirava-se a proteção de filme plástico de PVC e do papel alumínio, e, depois, o papel filtro do contato com o solo. Na sequência, os papéis eram acondicionados em embalagens plásticas do tipo “zip lock”, com pesos já determinados, para não perder umidade durante a pesagem. Em seguida os papéis foram colocados em cápsulas de metal, de pesos conhecidos. Após a pesagem, o solo contido nos anéis de PVC também foi colocado em capsulas metálicas, os quais ambos (capsúla com solo e com papel) foram levados a estufa com temperatura acima de 100° C, por 24 horas.

Com o peso seco e peso úmido, a umidade gravimétrica do papel foi determinada e, através da curva de calibração, obteve-se a sucção correspondente, considerada a mesma da amostra de solo. Com um par de sucção e umidade correspondente do solo, obteve-se um ponto na curva característica.

Posteriormente, efetuou-se em duplicata, a medida do diâmetro e altura dos tubos, com paquímetro, para determinar o volume dos mesmos. Para cálculo da sucção matricial foram empregadas as equações propostas por Chandler et al. (1997) dispostas na Tabela 1.

Em todas as fases do ensaio, o manuseio do papel filtro foi feito com uma pinça metálica, para evitar a alteração das características do papel.

3.1.2.2.1 Ajuste das Curvas de Retenção

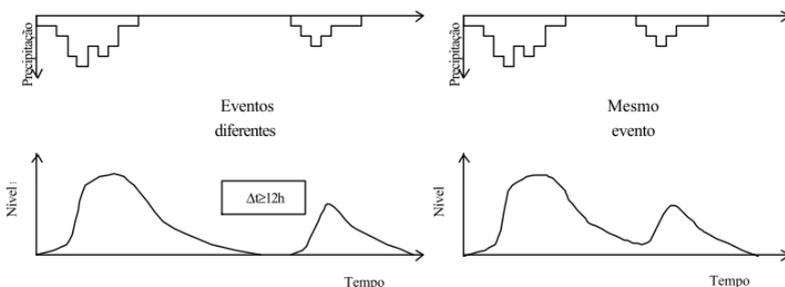
O ajuste da curva de retenção de água pelo solo foi realizado por meio do *software* RETC - "Retention Curve", versão 6.0, do "Soil Salinity Laboratory" (van Genuchten et al., 1991). Neste programa computacional, introduzem-se os pares (ψ, θ) experimentalmente obtidos, e pelo processo dos mínimos quadrados encontra-se a curva que melhor se ajusta a estes pontos. A curva utilizada pelo programa foi a de van Genuchten, o qual foi fixado $m = 1 - 1/n$.

3.1.2.3 Análise dos dados de precipitação

A análise de dados consistiu em:

1) Definição de evento: Bertrand-Krajewski (2000) define que um evento chuvoso é independente de outro se os efeitos resultantes do primeiro cessaram antes do início do segundo. Com esta definição, a Figura 11 apresenta dois casos em que, dependendo da duração do intervalo de chuva nula, dois intervalos de precipitação podem ou não ser considerados como partes do mesmo evento. Em alguns casos, mesmo quando se observam intervalos de nível nulo no interior da vala, considerou-se um único evento. Para este trabalho, utilizou-se o critério de consideração de eventos independentes quando as valas permanecerem vazias por intervalos superiores a 12 horas. O mesmo adotado por intervalo de tempo adotado no estudo de Souza (2002), visto que o autor estudou os efeitos da umidade no solo no comportamento de uma trincheira de infiltração pluvial.

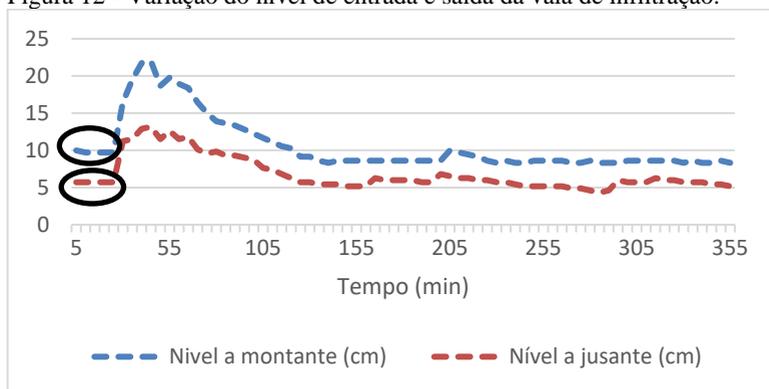
Figura 11 - Definição de evento.



Fonte: Bertrand-Krajewski (2000).

2) Formatação e processamento dos dados: com a finalidade de selecionar os eventos para as simulações, os dados obtidos dos registradores automáticos (*datalogger*) foram importados para uma planilha eletrônica. Os eventos chuvosos que não geraram escoamento para o interior da vala, assim como aqueles em que os sensores de nível e saída não estavam funcionando simultaneamente (falhas) foram eliminados. Para facilitar a análise dos dados, foram gerados os gráficos com a variação de nível de entrada e saída dos eventos, como por exemplo a Figura 12 e assim foi definido os valores que correspondiam ao marco zero dos eventos (círculo), ou seja, nível de água igual a zero.

Figura 12 - Variação do nível de entrada e saída da vala de infiltração.



Os dados referentes aos eventos selecionados se encontram no Quadro 5.

Quadro 5 - Características da chuva e do escoamento observados na vala.

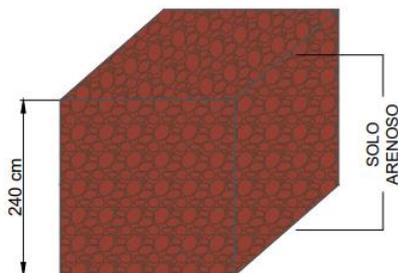
Evento	Data	CHUVA					VALA (ESCOAMENTO)			
		Início (h:min)	Fim (h:min)	Duração (d h:min)	Ptotal (mm)	I média (mm/h)	Início	Fim	Duração (d h:min)	Nível máximo (cm)
1	09 e 10/01/2016	4:24	23:32	0 19:38	140,00	3,24	4:59	22:37	18:38	60,00
2	12 e 13/08/2015	19:40	1:35	1 5:55	15,80	2,67	19:45	1:05	0 5:50	21,74
3	15 a 17/08/2015	19:40	0:35	1 6:15	17,80	0,36	4:47	18:44	14:47	15,03
4	25/08/2015	22:35	3:25	0 5:10	15,20	2,89	23:00	3:45	4:45	17,26
5	15/03/2015	16:32	19:17	0 3:49	26,80	7,14	16:42	20:07	4:49	39,63
6	07/01/2016	6:21	14:42	0 9:05	19,80	2,30	8:51	15:53	7:02	29,57

Ptotal: Precipitação total; Imédia: Intensidade média.

3.1.3 Modelagem HYDRUS-1D

O modelo conceitual (Figura 13) para representar a vala de infiltração foi realizado com as seguintes considerações:

Figura 13 – Modelo conceitual da vala de infiltração pluvial.



- A camada de solo da vala de infiltração foi composta por 240 cm;
- O perfil do solo foi composto por um único material, pois de acordo com Pacheco (2015) o solo é composto majoritariamente por Areias Quartzosas não-hidromórficas descoloridas;
- Todo o perfil foi considerado como poroso sem a presença de rocha;
- Não foi considerado o transporte de contaminantes.

3.1.4 Simulação de fluxo de água HYDRUS-1D

O HYDRUS-1D é um modelo que apresenta vários cenários possíveis de modelagem de fluxo de água e transporte de solutos. Esse modelo requer dados de entrada como, parâmetros geométricos, parâmetro de tempo e características hidrológicas e hidráulicas. Para este estudo, utilizou-se o programa HYDRUS-1D, versão 4.16.0110.

3.1.4.1 Parâmetros geométricos

Conforme publicado pela Companhia Catarinense de Águas e Saneamento (CASAN, 2002) a profundidade do perfil do solo na área da vala é de 350 centímetros. Dessa forma, foi montada uma célula de 240

centímetros de solo, pois foram descontados os 110 centímetros de profundidade da vala.

A unidade adotada foi o centímetro (cm) e foi considerado um material no perfil, devido ao solo ser composto por Neossolo Quartzarênico.

3.1.4.2 Parâmetro de Tempo

A unidade de tempo adotada foi em minutos (min). Os valores considerados para o tempo inicial e final referente a cada evento. foram retirados do Quadro 5. O intervalo de tempo escolhido para a discretização da intensidade da precipitação foi de 3 e 5 minutos de acordo com os dados experimentais de Schuck (2019) e Pacheco (2015).

3.1.4.3 Modelo hidráulico do solo

Na descrição do comportamento físico-hídrico de diferentes solos, o modelo de ajuste proposto por van Genuchten (1980) tem sido adotado universalmente e permite relacionar, com alto poder de predição, a energia de retenção e disponibilidade hídrica (DEXTER, 2004). Dessa forma, este modelo foi utilizado para estimar os parâmetros hidráulicos do solo da vala de infiltração.

3.1.4.4 Condições de contorno

A superfície da vala sofre variação de carga de pressão devido à contribuição de água pluvial da tubulação de entrada. Durante as precipitações forma-se uma lâmina de água sobre a vala que depende das vazões de entrada e saída. Dessa forma, adotou-se a condição de contorno atmosférica com camada superficial, pois esta condição permite que a água se acumule na superfície. O mesmo foi adotado por Caiqiong e Jun (2016), Virdí (2013) e Lassabatere et al. (2010) em estudos semelhantes.

Os dados de vazão de entrada da vala foram transformados em lâmina d'água no intervalo de tempo da discretização, uma vez que esta é a entrada que o HYDRUS-1D exige.

Para a condição inferior foi escolhida a pressão variável, considerando que nem toda a água que entra na vala de infiltração deva infiltrar e ser conduzida para a zona parcialmente saturada e posteriormente saturada, devido à possibilidade de transbordamento na

superfície devido à pouca profundidade do nível freático que foi comparada com a condição de drenagem livre.

Não foi considerada a existência de componente vegetal retirando água da matriz do solo, nem a existência de variações da temperatura e de evaporação na superfície do solo.

3.1.4.5 Condições variáveis de tempo

Os dados referentes à taxa de precipitação e do nível do lençol freático foram fornecidos por Schuck (2019).

Com dados de vazão de entrada e a área do fundo da vala, encontrou-se lâmina d'água dentro da vala no intervalo de tempo da discretização, pois os dados de entrada de água na superfície do perfil do solo no modelo computacional HYDRUS-1D estabelecem que estejam nesse formato.

3.1.4.6 Parâmetros Hidráulicos do Solo

Para a obtenção dos parâmetros hidráulicos utilizou-se o *software* Rosetta Lite Version 1.1 inserido ao HYDRUS-1D que utiliza funções de pedotransferência para estimar os parâmetros de van Genuchten (1980) e condutividade hidráulica a partir dos dados de granulometria e densidade do solo.

3.1.4.7 Condições iniciais do perfil do solo

A escolha do número de nodes ao longo do perfil de solo (240 cm) a ser utilizada nas simulações é fundamental, pois interfere no tempo de simulação e no resultado do balanço de massa. Então, foi realizada uma análise do perfil do solo com 101 nós (padrão do HYDRUS-1D), 721 (3 malhas por cm) nós e 961 nós (4 malhas por cm).

Por falta do monitoramento da umidade ao longo do perfil do solo, adotou-se, inicialmente, que a superfície do solo estava seca e, para o restante adotou-se a umidade média (valor de sucção encontrado na Curva de Retenção de Água correspondente a umidade mínima e média do solo).

3.1.4.8 Solução inversa

A técnica de modelagem inversa foi aplicada para a obtenção dos parâmetros (α , n , θ_s e θ_r) do modelo de van Genuchten, a partir dos dados

de infiltração. Para o cálculo de fluxo infiltrado, utilizou-se a Equação (13).

(13)

$$F_{infiltrado} = F_E - F_S$$

Onde F_E é o fluxo de entrada e F_{ES} é o fluxo escoado.

O primeiro termo da função objetivo (Equação (8)) foi definido como sucção no nó (node) de observação do perfil do solo, correspondente ao código 1 no HYDRUS-1D (ANEXO 1), pois segundo Silva Júnior et al. (2013) esse método garante a estabilidade numérica ao modelo. O peso considerado foi 1 para todos os pontos de observação, isto é, todos os dados possuíam o mesmo grau de precisão.

O *software* HYDRUS-1D requer para a simulação inversa as mesmas informações que para o problema direto, que é o tempo de simulação, informação geométrica (perfil do solo com 240 cm de profundidade), as condições iniciais e as condições de contorno, mais as estimativas iniciais dos parâmetros, a posição dos pontos de observação e o tempo medido com os correspondentes dados.

Para a obtenção dos parâmetros hidráulicos do solo pelo método inverso foi definido um número máximo de interações, pois o código calcula um gradiente (no espaço de parâmetros otimizado) no qual a função objetivo diminui e, em seguida, faz um passo nessa direção e para quando o algoritmo converge ou quando se atinge o número máximo de iterações definido. O valor escolhido foi de 240 iterações, pois foram valores próximos do número máximo de iteração de Souza (2015), Junior (2010) e van Dan (1994). O número de pontos na função objetivo correspondeu ao número de registros de infiltração de cada evento escolhido.

O próximo passo consistiu em fornecer o dado de estimativa inicial, o valor máximo e o mínimo de cada parâmetro de $(\theta_s, \theta_r, K_s, n \text{ e } \alpha)$. Os valores utilizados foram retirados da curva de retenção obtida em laboratório (papel-filtro) e ajustado pelo *software* RETC, dos parâmetros de van Genuchten (1980) estimados pelas funções de pedotransferência do *software* ROSETTA (a partir dos dados de granulometria e de densidade do solo) e dos valores encontrados na literatura. Foram utilizados três “chutes iniciais” para os valores dos parâmetros, pois segundo Šimůnek, Genuchten e Sejna (2009), é recomendável rodar o programa com diferentes estimativas iniciais para

verificar se o programa de fato converge para o mesmo mínimo global na função objetivo, evitando assim possíveis problemas relacionados a convergência e unicidade da solução inversa.

3.1.4.9 Avaliação do desempenho do modelo

A avaliação do desempenho consistiu na comparação entre os dados observados na vala de infiltração pluvial e os valores fornecidos pela simulação do modelo computacional HYDRUS-1D. Pinho (2009) afirma que a avaliação adequada do desempenho de modelos de simulação precisa estar ligada por uma análise conjunta de diversos índices, pois um modelo pode se ajustar bem aos dados experimentais, sem que o processo real em questão seja bem representado. Dessa forma, os seguintes índices estatísticos de erro mais utilizados para o modelo HYDRUS foram utilizados para a avaliação do desempenho do modelo: Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE), R^2 e o coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE). Estes índices foram obtidos através das equações (14), (15) e (16).

O coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), compara os valores simulados com o valor médio obtido experimentalmente. Este coeficiente atribui maior peso às vazões máximas em sua avaliação. Varia de menos infinito até o seu valor máximo, de 1, o qual representa a eficiência máxima (MORIASI et al., 2007). De acordo com Servat e Dezetter (1991), a função de Nash representa de forma excelente a dinâmica dos hidrogramas e os picos de inundação. Seu comportamento é, por outro lado, pior quando os fluxos são baixos.

O coeficiente de determinação é simbolizado por R^2 e indica o grau de colinearidade entre dados simulados e medidos. Assim, a qualidade da regressão é indicada por este coeficiente. Os valores de R^2 variam entre 0 e 1, então quanto mais alto for o Coeficiente de Determinação, menor a variação de erro e, assim, tanto maior será a validade da regressão. Embora o R^2 tenha sido amplamente utilizado para a avaliação de modelos, este coeficiente estatístico é supersensível a valores extremos (outliers) e insensíveis a diferenças aditivas e proporcionais entre as previsões dos modelos e os dados medidos (LEGATES e MCCABE, 1999).

(14)

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\hat{y}_i - y_i)^2}{n}}$$

(15)

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i)^2}$$

(16)

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

Sendo que \hat{y}_i é o dado simulado pelo modelo HYDRUS; y_i é o dado observado; \bar{y} é a média dos valores observados e n é o número de pares de dados.

Para a classificação do desempenho do modelo, utilizou-se as faixas de classificação propostas por Moriasi et al. (2007) e Duda et al. (2012), apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Classificação de desempenho do modelo HYDRUS-1D.

CLASSIFICAÇÃO	NSE	R²
Muito bom	$NSE \geq 90$	$R^2 \geq 0,80$
Bom	$0,90 > NSE \geq 0,80$	$R^2 \geq 0,70$
Satisfatório	$0,80 > NSE > 0,65$	$R^2 \geq 0,60$
Insatisfatório	$NSE \leq 0,65$	$R^2 < 0,60$

Para a avaliação do método realizado em laboratório (papel filtro) consistiu na comparação entre os dados observados (papel filtro) na vala de infiltração pluvial e os valores fornecidos pela simulação do modelo computacional HYDRUS-1D (solução inversa), utilizou-se o Erro Relativo (Equação (17)). Para a classificação, utilizou-se a classificação proposta por van Liew et al. (2007), disposta na Tabela 7.

(17)

$$ER = \frac{|y_{ob} - y_{est}|}{y_{ob}}$$

Sendo que y_{ob} é o parâmetro observado e y_{est} é o parâmetro simulado.

Tabela 7 - Classificação do método realizado em laboratório.

CLASSIFICAÇÃO	ER
Muito bom	$ER \leq 10\%$
Bom	$10\% < ER \leq 15\%$
Satisfatório	$15\% < ER < 25\%$
Insatisfatório	$ER \geq 25\%$

O processamento dos dados para a obtenção dos índices estatísticos foi realizado por meio da criação de uma rotina no *Software* MATLAB (APÊNDICE 1).

4 RESULTADOS E DISCUSSOES

4.1 Densidade do solo

A densidade aparente correspondente a quatro amostras do solo da vala de infiltração encontra-se na Tabela 8.

Tabela 8 - Densidade aparente do solo da vala de infiltração.

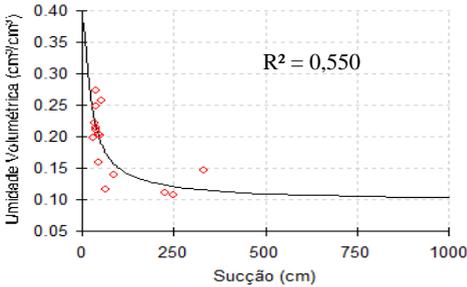
Amostra	Densidade Aparente (g/cm³)	Média	Desvio Padrão
1	1,710		
2	1,475		
3	1,505	1,543	0,097
4	1,480		

A densidade média do solo da vala correspondeu a 1,543 g/cm³, a qual se encontra dentro da normalidade conforme descrito por Reinert et al. (2006) para solos arenosos, pois normalmente apresentam média de densidade elevada. Os valores de densidade do solo (franco arenoso) no estudo de Consensa et al (2010) variaram entre 1,39 a 1,63 g/cm³ nas profundidades entre 0 a 40cm.

4.2 Parâmetros hidráulicos

Diante da necessidade de estimar os parâmetros de van Genuchten (θ_r, α e n), fez-se necessário a obtenção da CRA. Assim, o ajuste da CRA (Figura 14) foi realizado por meio do *software* RETC, a partir dos dados dos pares de umidade, determinados em laboratório pelo método do papel-filtro. O valor de R^2 igual a 0,55 indica a heterogeneidade do bloco de solo indeformado coletado, uma vez que, as amostras foram coletadas em diferentes profundidades.

Figura 14 – Curva de Retenção de Água do solo da vala de infiltração ajustada no *software* RETC.



A Tabela 9 apresenta os valores dos parâmetros de Van Genuchten encontrados por meio da ferramenta Rosetta Lite V.1.1 com base em sub-rotinas neurais e funções de pedotransferência, a partir dos dados de textura, e por meio do *software* RETC, a partir dos dados de laboratório.

Tabela 9 - Parâmetros do modelo van Genuchten (1980) encontrados.

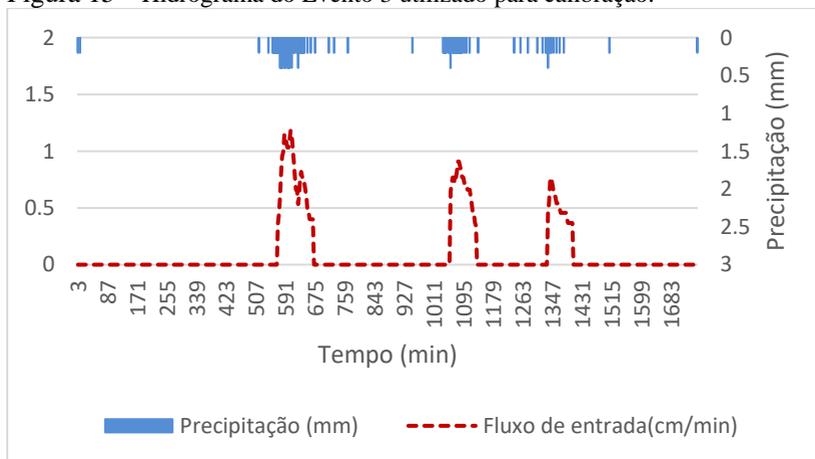
θ_s	θ_r	α	n	l	K_s	Observações
0,383	0,0956	0,069	1,844	0,5	-	RETC
0,377	0,047	0,037	2,049	0,5	0,113	Rosetta Lite

4.3 Calibração do modelo HYDRUS-1D

Para as simulações foram considerados os 6 eventos, sem dias antecedentes com chuva e com os sensores de nível de entrada, saída e do poço funcionando simultaneamente.

Para a calibração do modelo foi escolhido o evento 3 (Figura 15), devido P_{total} estar numa faixa média dos outros eventos e possuir períodos com drenagem e umedecimento do solo.

Figura 15 – Hidrograma do Evento 3 utilizado para calibração.



Para a definição da quantidade de nós no perfil do solo, realizou-se simulações com 3 diferentes valores (101, 721 e 961) para o Evento 3. Os valores do erro do balanço de massa e do tempo de simulação em relação ao número de nós selecionados se encontram na Tabela 10.

Tabela 10 – Valores do erro do balanço de massa e do tempo de simulação em relação ao número de nós selecionados.

Evento	Nós (n ^o)	Erro do balanço de massa (%)	Tempo (seg)
3	101	0,0000	11,78
	721	0,0003	38,86
	961	0,0003	99,90

Pode-se observar na que na Tabela 10, o aumento de nós fez que o tempo de simulação sofresse acréscimo sem aumento expressivo no erro de balanço de massa, dessa forma, foi escolhido uma malha com 101 nós.

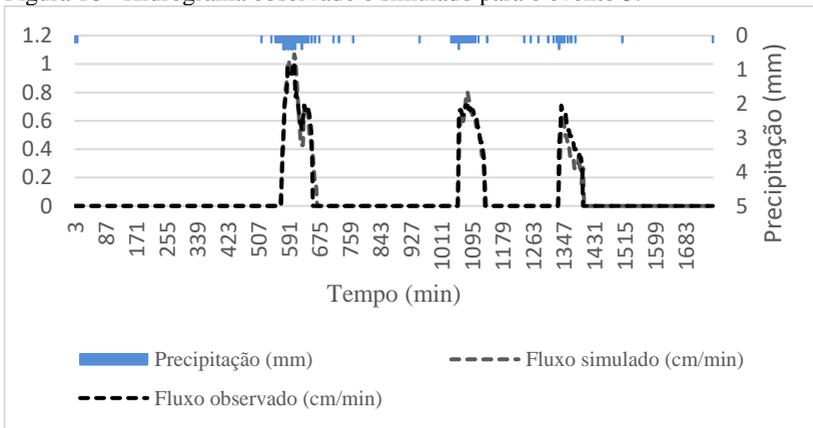
A Tabela 11 apresenta o valor inicial, máximo, mínimo e otimizado para cada parâmetro do modelo de Van Genuchten. Os valores iniciais inseridos para o Evento 3 correspondem aos valores dos parâmetros estimados pelo RETC, já os valores máximos e mínimos foram definidos com base nos valores encontrados na literatura (Tabela 9) e, assim diminuiu-se ou aumentou-se caso a solução numérica do modelo não convergisse.

Tabela 11 – Parâmetros hidráulicos otimizados pela aplicação da solução inversa.

Parâmetros	θ_s	θ_r	α	n	l	K_s
Inicial	0,383	0,098	0,047	2,388	0,5	0,1
Máximo	0,560	0,099	0,060	2,550	0,5	0,6
Mínimo	0	0	0	0	0,5	0
Otimizado	0,3289	0,0324	0,0545	1,5917	0,5	0,1302

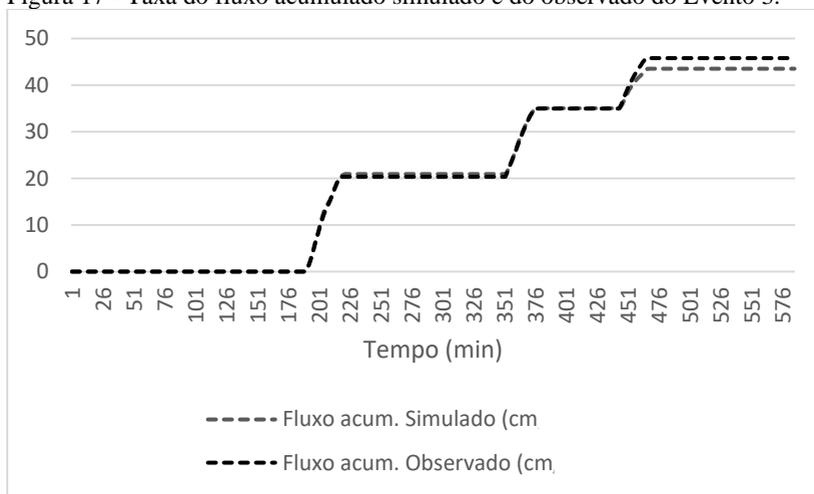
A Figura 16 mostra o hietograma e o hidrograma do fluxo de escoamento superficial observado e simulado para o Evento 3, dessa forma, pode-se observar que houve três picos de chuva, o que causou certos picos de fluxo de entrada e consequentemente de escoamento superficial.

Figura 16 - Hidrograma observado e simulado para o evento 3.



A taxa do fluxo acumulado de saída de água observada e simulada (Figura 17) do Evento 3, mostra o quanto o modelo subestimou o escoamento superficial na vala, o qual totalizou uma taxa de 2,27 cm, ou 5,204%, a menos que o observado.

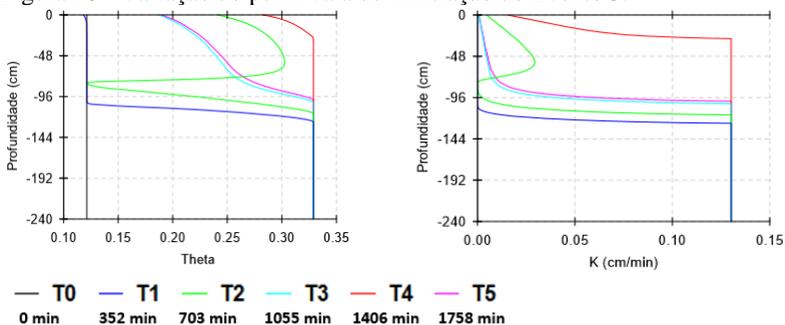
Figura 17 - Taxa do fluxo acumulado simulado e do observado do Evento 3.



A Figura 18a e b contém as curvas de variação da condutividade hidráulica e do conteúdo volumétrico ao longo da profundidade do perfil do solo para tempos selecionados (T) do Evento 3. Portanto, pode-se observar na Figura 18a que as curvas de conteúdo volumétrico possuem esse formato devido as variações do aquífero (pressão) e da franja capilar. Dessa forma, o fluxo de infiltração alcança a zona saturada (aquífero do Campeche). No T1 a superfície do solo está completamente seca, pois não havia fluxo de água dentro a vala. A elevação da umidade do T2 corresponde o final do primeiro pico de entrada de água (Figura 16) e cai no T3 devido ao intervalo sem entrada de água na vala. A superfície do solo no T4 está mais próxima da saturação e perde umidade no T5 devido ao intervalo de exposição a atmosfera.

Em meio não-saturado os poros encontram-se preenchidos por água e ar, o que faz com que a condutividade hidráulica nesta situação decresça. Sendo assim, as curvas de variação de condutividade hidráulica (K) (Figura 18b), atingindo o seu valor máximo na saturação (K_s), o que significa que possui relação direta com as curvas de conteúdo de água.

Figura 18 - Variação do perfil vala de infiltração do Evento 3.



As variáveis estatísticas usadas para comparação entre os valores observados e simulados são apresentadas na Tabela 12. Os valores da Raiz do Erro Quadrático da Média (RMSE) medem a precisão do modelo, e variam de 0,0 a 1,0. Quanto mais próximo à zero (0) for o valor de RMSE, mais preciso é o modelo. Já o coeficiente de determinação (R^2) e a Eficiência de modelagem Nash-Sutcliffe (NSE) indicam que o modelo representou da melhor maneira os dados observados quando se aproximam de um (1). Os valores obtidos se encontram na Tabela 12.

Tabela 12 - Valores dos estimadores estatísticos encontrados.

EVENTO	ESTIMADORES				
	RMSE	NSE	Classificação	R^2	Classificação
3	0,020	0,94	Muito bom	0,85	Muito bom

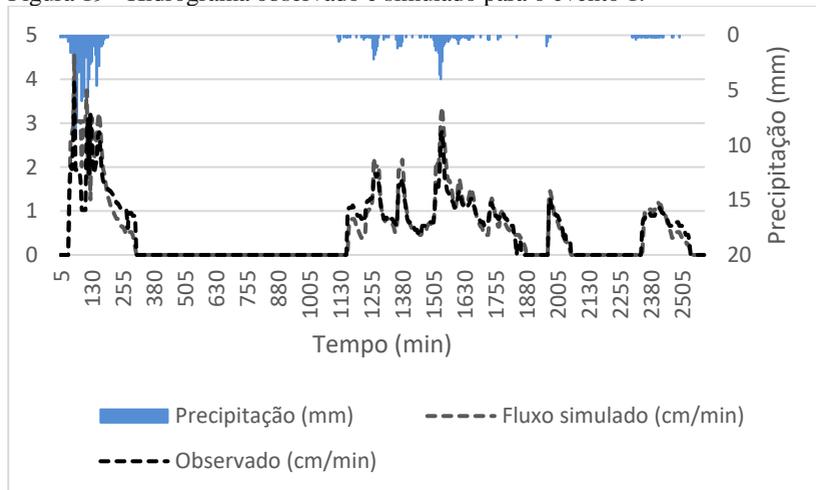
De acordo com a classificação da Tabela 6, o desempenho do Evento 3 foi classificado como muito bom. Zeng et al. (2013) encontraram boa concordância entre os valores de umidade do solo medidos e simulados utilizando o HYDRUS-1D, com eficiência da modelagem de Nash-Sutcliffe variando de 0,4865 a 0,9180. O mesmo foi observado por Mujovo (2014) com NSE variando entre 0,58 a 0,99; Caiqiong e Jun (2016) com um Coeficiente Médio de Eficiência de Nash-Sutcliffe de 0,411 e RMSE de 0,031 e Meng et al. (2014) com RMSE em torno de 0,014 e 0,036; e R^2 de 0,95 e 0,76.

4.3.1 Validação do modelo

4.3.1.1 Evento 1

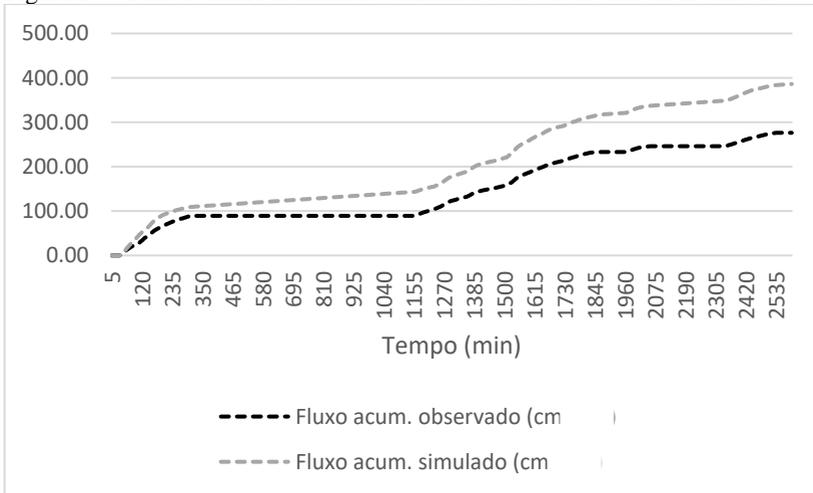
A Figura 19 mostra o hietograma e o hidrograma do fluxo de escoamento superficial observado e simulado para o Evento 1, dessa forma, pode-se observar que diferentemente dos outros eventos, este possui picos de maior intensidade pluviométrica.

Figura 19 - Hidrograma observado e simulado para o evento 1.



A taxa do fluxo acumulado de saída de água observada e simulada (Figura 20) do Evento 1, mostra o quanto o modelo superestimou o escoamento superficial na vala, o qual totalizou uma taxa de 112,836 cm ou 39,114%, a mais que o observado.

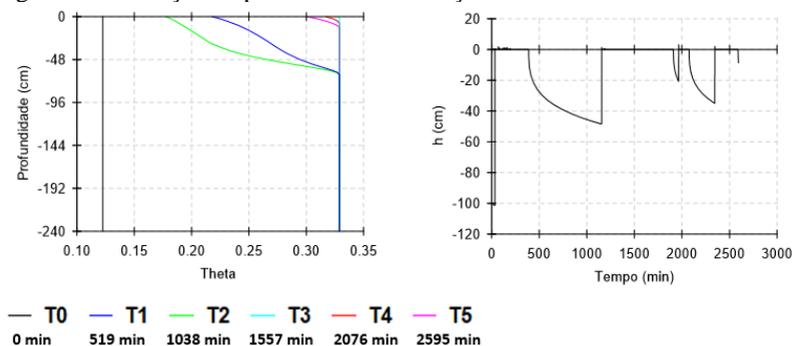
Figura 20 - Taxa do fluxo acumulado simulado e do observado do Evento 1.



A Figura 21 a e b contém as curvas de variação da condutividade hidráulica e do conteúdo volumétrico ao longo da profundidade do perfil do solo para tempos selecionados (T) do Evento 1. Portanto, pode-se observar na Figura 21a que as curvas de conteúdo volumétrico possuem esse formato devido às variações do aquífero (pressão) e da franja capilar. Dessa forma, o fluxo de infiltração alcança a zona saturada (aquífero do Campeche). A superfície do solo no T1 estava com um teor de umidade de 0,18 devido à precipitação ter finalizado e começou o processo de drenagem devido ao término da chuva (final do evento) e assim o solo foi perdendo umidade no T2. Já no T3 e T4, o solo estava saturado ao longo do perfil e no T5 a superfície do solo perdeu umidade devido ao término da chuva e o nível freático se encontrava cerca de 60 centímetros da superfície da vala.

A (Figura 21b) mostra o potencial mátrico ao longo do perfil do solo, dessa forma, pode-se observar que até 200 minutos houve afluxo de água na superfície do solo.

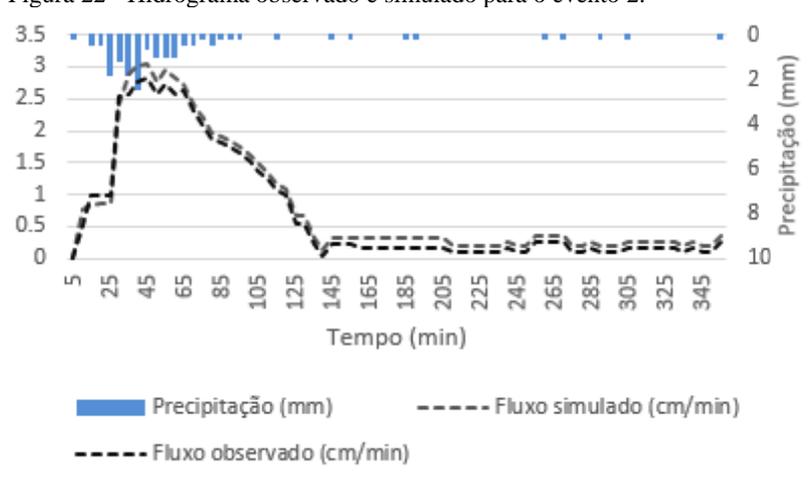
Figura 21 - Variação do perfil vala de infiltração do Evento 1.



4.3.1.2 Evento 2

A Figura 22 mostra o hietograma e o hidrograma do fluxo de escoamento superficial observado e simulado para o Evento 2, dessa forma, pode-se observar que houve três picos de chuva, o que causou certos picos de fluxo de entrada e consequentemente de escoamento superficial.

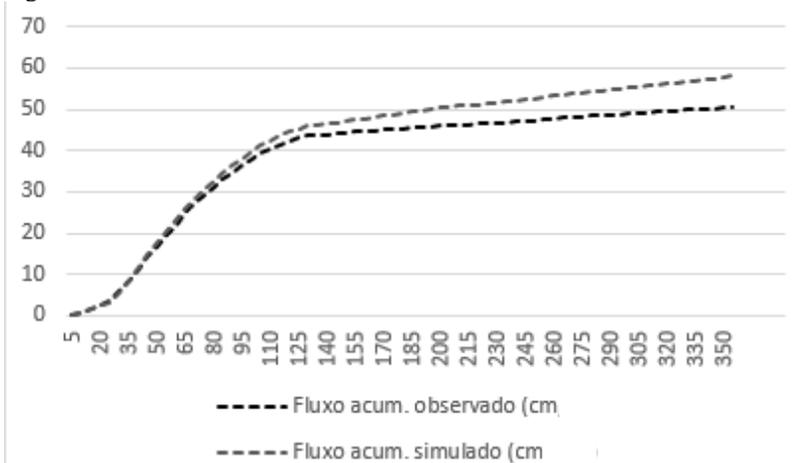
Figura 22 - Hidrograma observado e simulado para o evento 2.



A taxa do fluxo acumulado de saída de água observada e simulada (Figura 23) do Evento 2, mostra o quanto o modelo superestimou o

escoamento superficial na vala, o qual totalizou uma taxa de 7,038 cm, ou 13,289%, a mais que o observado.

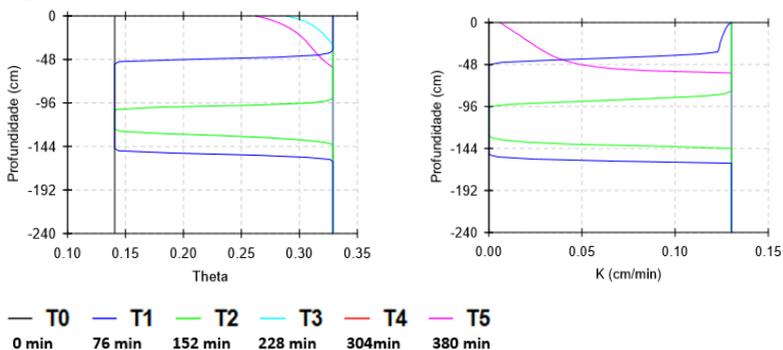
Figura 23 - Taxa do fluxo acumulado simulado e observado do Evento 2.



A Figura 24a e b contém as curvas de variação da condutividade hidráulica e do conteúdo volumétrico ao longo da profundidade do perfil do solo para tempos selecionados (T) do Evento 1. Portanto, pode-se observar na Figura 24a que as curvas de conteúdo volumétrico possuem esse formato devido às variações do aquífero (pressão) e da franja capilar. Dessa forma, o fluxo de infiltração alcança o aquífero do Campeche. No T1 a superfície está completamente saturada, pois logo no início do evento havia fluxo intenso de água dentro a vala. O mesmo permanece no T2 devido à permanência de lâmina d'água na superfície do solo. No T3 houve a entrada de ar devido ao solo não ter recuperado a capacidade de campo e no T4 o perfil inteiro permanece saturado e; volta a entrar ar nos poros no T5.

Em meio não-saturado os poros encontram-se preenchidos por água e ar, o que faz com que a condutividade hidráulica nesta situação decresça. Sendo assim, as curvas de variação de condutividade hidráulica (K) (Figura 24b) possui valores em função da umidade do solo, atingindo o seu valor máximo na saturação (K_s), o que significa que possui relação direta com as curvas de conteúdo volumétrico.

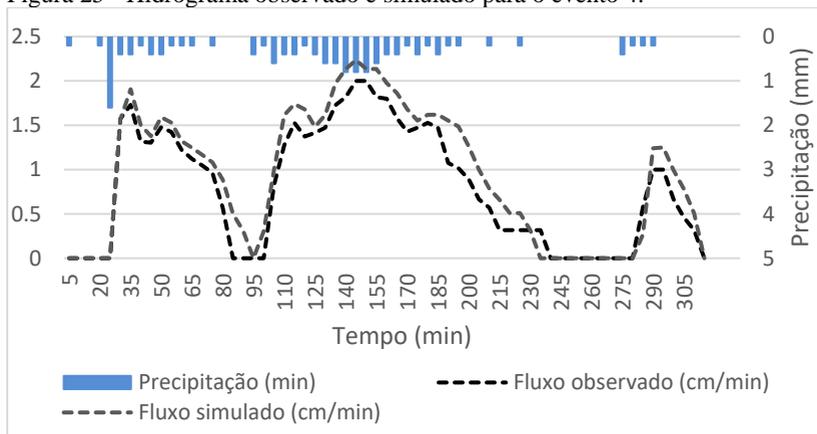
Figura 24 - Variação do perfil vala de infiltração do Evento 2.



4.3.1.3 Evento 4

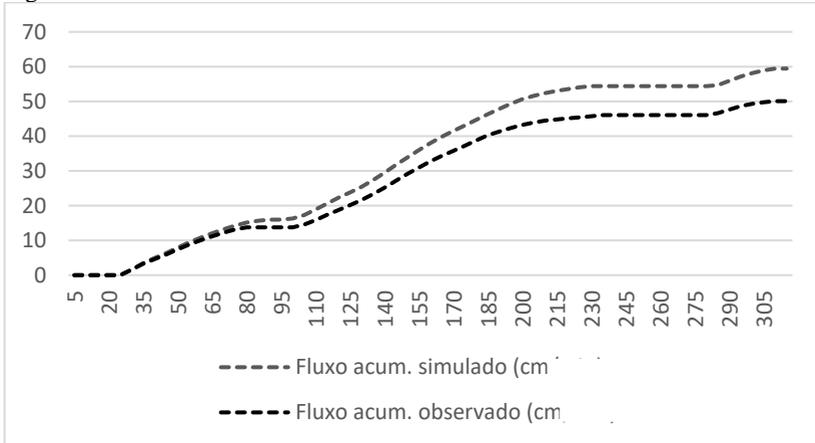
A Figura 25 mostra o hietograma e o hidrograma do fluxo de escoamento superficial observado e simulado para o Evento 4, dessa forma, pode-se observar que houve três picos de chuva, o que causou certos picos de fluxo de entrada e consequentemente de escoamento superficial.

Figura 25 - Hidrograma observado e simulado para o evento 4.



A taxa do fluxo acumulado de saída de água observada e simulada (Figura 26) do Evento 4, mostra o quanto o modelo superestimou o escoamento superficial na vala, o qual totalizou uma taxa de 9,843 cm, ou 18,703%, a mais que o observado.

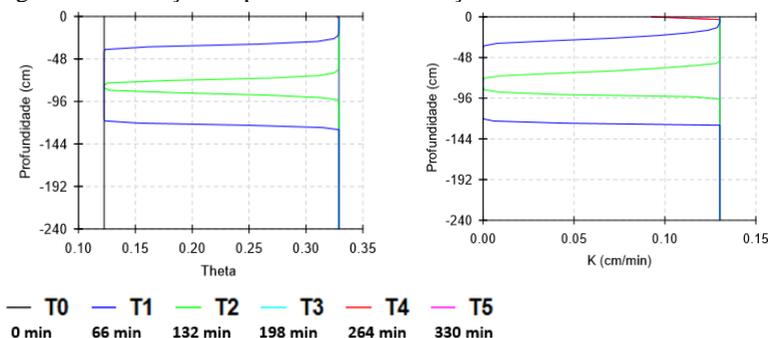
Figura 26 - Taxa do fluxo acumulado simulado e do observado do Evento 4.



A Figura 27 a e b contém as curvas de variação da condutividade hidráulica e do conteúdo volumétrico ao longo da profundidade do perfil do solo para tempos selecionados (T) do Evento 4. Portanto, pode-se observar na Figura 27a que as curvas de conteúdo volumétrico possuem esse formato devido as variações do aquífero (pressão) e da franja capilar. Dessa forma, o fluxo de infiltração alcança a zona saturada (aquífero do Campeche). Os três picos suavizados do Evento 4 fez com que produzissem curvas de drenagem (saturação e dessaturação) no T1 e T2. A superfície do solo se encontrava saturada no T3, T4 e T5.

Em meio não-saturado os poros encontram-se preenchidos por água e ar, o que faz com que a condutividade hidráulica nesta situação decresça. Sendo assim, as curvas de variação de condutividade hidráulica (K) (Figura 27b) obtiveram o seu valor máximo de 0,1302 cm/min equivalente a condutividade saturada K_s .

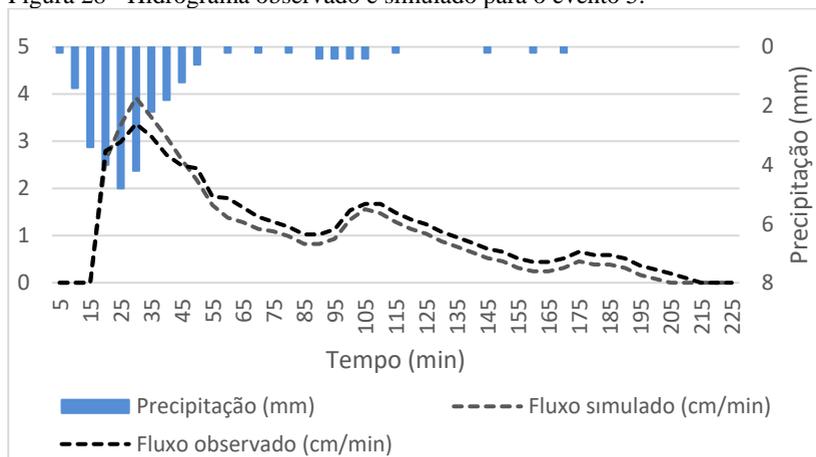
Figura 27 - Variação do perfil vala de infiltração do Evento 4.



4.3.1.4 Evento 5

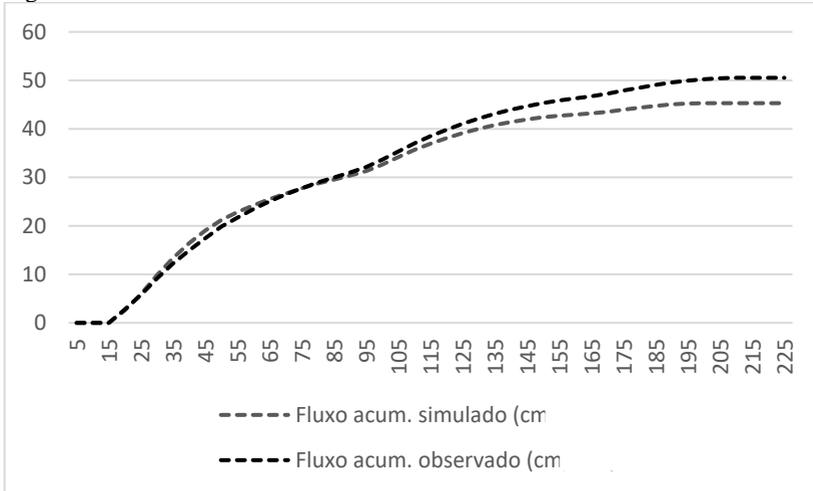
A Figura 28 mostra o hietograma e o hidrograma do fluxo de escoamento superficial observado e simulado para o Evento 5, dessa forma, pode-se observar que houve três picos suavizados de chuva, o que causou certos picos de fluxo de entrada e consequentemente de escoamento superficial.

Figura 28 - Hidrograma observado e simulado para o evento 5.



A taxa do fluxo acumulado de saída de água observada e simulada (Figura 29) do Evento 5, mostra o quanto o modelo subestimou o escoamento superficial na vala, o qual totalizou uma taxa de 5,84 cm, ou 11,540%, a menos que o observado.

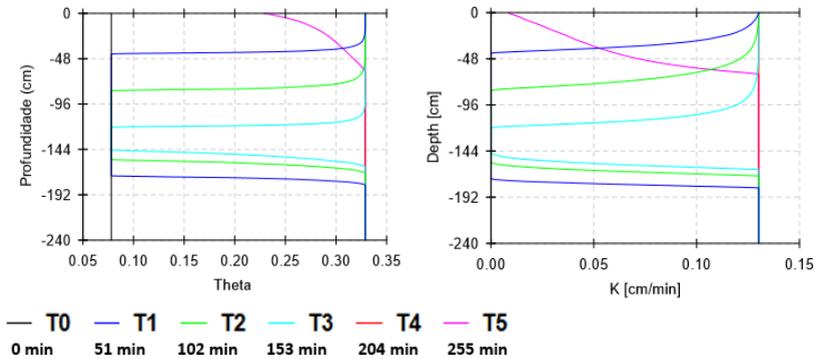
Figura 29 - Taxa do fluxo acumulado simulado e observado do Evento 5.



A Figura 30a e b contém as curvas de variação da condutividade hidráulica e do conteúdo volumétrico ao longo da profundidade do perfil do solo para tempos selecionados (T) do Evento 5. Portanto, pode-se observar na Figura 30a que as curvas de conteúdo volumétrico possuem esse formato devido as variações do aquífero (pressão) e da franja capilar. Dessa forma, o fluxo de infiltração alcança a zona saturada (aquífero do Campeche). Os três picos suavizados do Evento 5 fez com que produzissem curvas de drenagem (saturação e dessaturação) no T1, T2 e T3. A superfície se encontrava saturada no T4 e começou o processo de drenagem devido ao término da chuva (final do evento).

Em meio não-saturado os poros encontram-se preenchidos por água e ar, o que faz com que a condutividade hidráulica nesta situação decresça. Sendo assim, as curvas de variação de condutividade hidráulica (K) (Figura 30b) obtiveram o seu valor máximo de 0,1302 cm/min equivalente a condutividade saturada K_s . Isto resultou na formação de lâmina d'água na superfície do solo no T1 e T3.

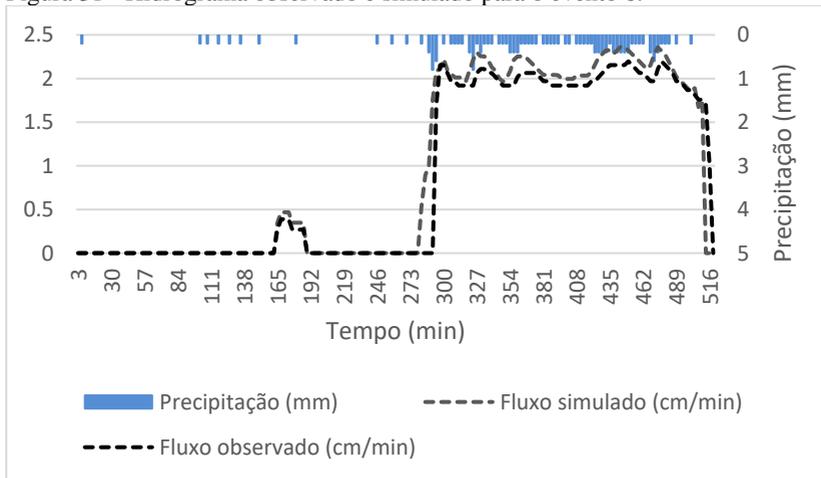
Figura 30 - Variação do perfil vala de infiltração do Evento 5.



4.3.1.5 Evento 6

A Figura 31 mostra o hietograma e o hidrograma do fluxo de escoamento superficial observado e simulado para o Evento 6, dessa forma, pode-se que houve vários picos de fluxo de entrada e conseqüentemente de saída devido à oscilações da precipitação por um intervalo de tempo de 325 minutos.

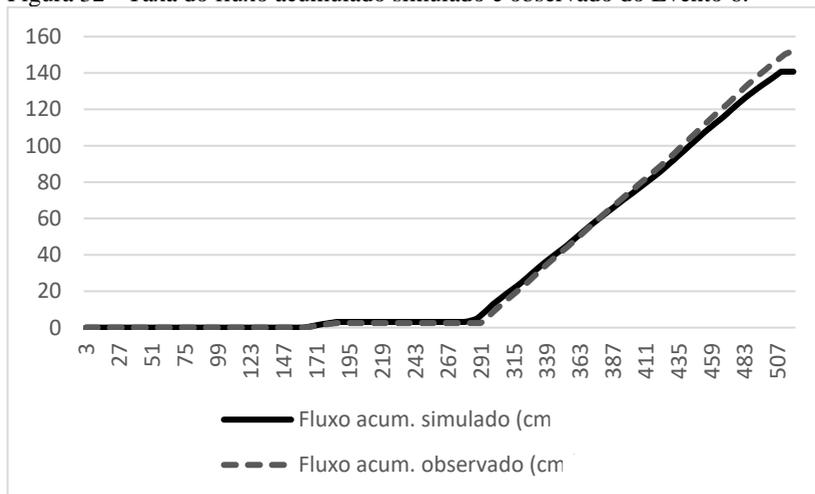
Figura 31 - Hidrograma observado e simulado para o evento 6.



A taxa do fluxo acumulado de saída de água observada e simulada (Figura 32) do Evento 6, mostra o quanto o modelo superestimou o

escoamento superficial na vala, o qual totalizou uma taxa de 5,33 cm, ou 7,531%, a mais que o observado.

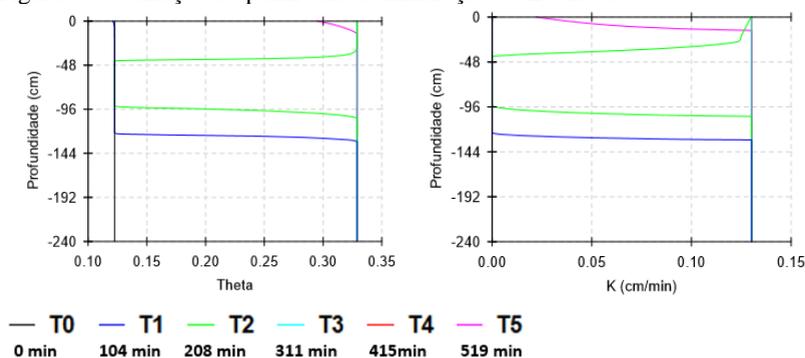
Figura 32 - Taxa do fluxo acumulado simulado e observado do Evento 6.



A Figura 33 a e b contém as curvas de variação da condutividade hidráulica e do conteúdo volumétrico ao longo da profundidade do perfil do solo para tempos selecionados (T) do Evento 6. Portanto, pode-se observar na Figura 33a que as curvas de conteúdo volumétrico possuem esse formato devido as variações do aquífero (pressão) e da franja capilar. Dessa forma, o fluxo de infiltração alcança a zona saturada (aquífero do Campeche). A superfície do solo no T1 estava completamente seca, pois ainda não havia escoamento dentro da vala. No T2, a superfície estava saturada e foi drenando ao longo do perfil. Já para os T3 e T4 o solo se encontrava saturado e no T5 o teor de umidade na superfície do solo passou de 0,3289 (saturado) para 0,29.

Em meio não-saturado os poros encontram-se preenchidos por água e ar, o que faz com que a condutividade hidráulica nesta situação decresça. Sendo assim, No tempo T5 ocorreu a diminuição da perda de água e todas as curvas de variação de condutividade hidráulica (K) (Figura 33b) obtiveram o seu valor máximo de 0,1302 cm/min equivalente a condutividade saturada K_s .

Figura 33 - Variação do perfil vala de infiltração do Evento 6.



4.3.2 Desempenho do modelo

Os valores encontrados para os índices estatísticos (RMSE, NSE e R^2) de todos os eventos encontram-se na Tabela 13.

Tabela 13 - Desempenho das simulações de todos os eventos.

EVENTO	HYDRUS-1D				
	RMSE	NSE	Classificação	R^2	Classificação
1	0,01	0,77	Satisfatório	0,70	Bom
2	0,03	0,89	Bom	0,78	Bom
4	0,06	0,82	Bom	0,75	Bom
5	0,01	0,91	Muito bom	0,85	Muito bom
6	0,02	0,80	Satisfatório	0,72	Bom

Os eventos 1 e 6 foram classificados como satisfatório (NSE) e bom (R^2), já os eventos 2 e 4 obtiveram desempenho bom (NSE) e bom (R^2) e, o evento 5 obteve desempenho muito bom (NSE) e muito bom (R^2). De acordo com estudos de estudos de Tafteh e Sepaskhah (2012); Tan et al (2015); Turco et al. (2017) e Kanzari et al. (2018). Contudo, pode-se observar na Figura 25 e Figura 31, que o fluxo simulado do Evento 1 e 4 não obtiveram um bom ajuste, assim como os diversos picos do Evento 6.

O modelo ainda, superestimou os picos de fluxo de escoamento superficial de todos os eventos. O mesmo foi observado por Hilten e Tollner (2008) ao observar que o modelo o HYDRUS-1D prevê com precisão o escoamento superficial de telhados verdes, especialmente para pequenos eventos de chuva e para quantidades maiores de chuva, o modelo superestimou os valores.

A superestimação e a subestimação do modelo podem ter ocorrido por efeito da falta de especificação do potencial matricial em determinados pontos de monitoramento ao longo do perfil do solo (antecedente e durante os eventos), o que acarretaria em instabilidade da integração numérica das equações no tempo. A dificuldade do algoritmo de otimização em encontrar um conjunto global, devido a quantidade de parâmetros (quatro). Outro fator a ser considerado seria que, a otimização baseou-se na comparação entre o hidrograma observado e simulado do Evento3, que pode não haver informações suficientes nos dados para suportar a otimização robusta dos valores dos parâmetros. Dessa forma, destaca-se a necessidade de ampliar a série de dados e avaliar o comportamento de outros eventos, uma vez que, as precipitações sofrem grande influência da variabilidade sazonal.

A otimização pressupõe que as observações com as quais as simulações são comparadas estão isentas de erros e que o modelo é uma representação verdadeira desses dados. No entanto, Pacheco (2015) relata em seu estudo que os sensores de nível não foram calibrados periodicamente, portanto a possível perda de calibração dos sensores de nível pode ter resultado em fluxos irreais. Assim, o conjunto de parâmetros ideal encontrado pelo modelo HYDRUS-1D pode ser sensível a pequenas alterações nas observações, ao período de observação considerado na calibração.

Tendo em vista os aspectos ambientais positivos da implantação dos dispositivos para o controle do escoamento na fonte, Villanueva et al. (2011) afirma que um dos principais problemas associados com a obrigatoriedade das técnicas compensatórias no Brasil está relacionado com as incertezas sobre os volumes necessários para reservação e as características dos elementos hidráulicos.

Portanto, o HYDRUS-1D pode ser aplicado diretamente para avaliações de desempenho hidrológico, como a previsão de respostas hidrológicas, reduções cumulativas de escoamento e demanda de irrigação para as técnicas compensatórias no geral. Uma vez calibrado para as condições específicas do local, torna-se uma ferramenta conveniente para o dimensionamento, planejamento e previsão de desempenho para um determinado meio. Tendo em vista que o Evento 1

resultaria em um superdimensionamento de 40% do fluxo de escoamento superficial, torna-se necessário a avaliação do comportamento do modelo para outros eventos extremos.

Diante desse contexto, considera-se que o desempenho do modelo HYDRUS-1D foi satisfatório, uma vez que, os eventos possuíam variabilidade na distribuição das precipitações e as simulações sem o monitoramento do potencial matricial ao longo do perfil, se tornam mais complexa, posto às incertezas com relação as condições iniciais do solo.

De forma geral, a validação do modelo indica que o ajuste da solução inversa foi satisfatório e que, conseqüentemente, teve-se um menor tempo computacional se comparado à calibração manual, uma vez que Mujovo (2014) relata em seu estudo que a calibração manual do modelo HYDRUS-1D foi bastante trabalhosa. Isto foi reforçado por Bossarino (2013), pois para estimar os parâmetros de VG, o autor efetuou a calibração do HYDRUS-2D, utilizando seis métodos de otimização de funções não lineares e os seus resultados demonstraram que o método de Nelder-Mead obteve menores resíduos de ajuste do modelo em dois tipos de solos estudados, com qualidade de ajuste superior aos de calibração manual. Em alguns casos, os melhores resultados entre menor erro, menos tempo computacional e menor número de chamadas, foram obtidos pelo método de Levenberg-Marquardt.

4.3.3 Existência de convergência entre os parâmetros

Nesta pesquisa, considerou-se a hipótese de que com a solução inversa com o HYDRUS-1D é possível estimar com melhor acurácia os parâmetros da equação de van Genuchten com os dados de infiltração obtidos em campo do que com aqueles obtidos em laboratório. Para isso, realizou-se uma comparação entre os parâmetros gerados com base em dados de campo e laboratório e, seus respectivos erros relativos (Tabela 14).

Tabela 14 – Parâmetros de vG obtidos a partir de dados de laboratório e solução inversa (campo).

Método	PARÂMETROS					
	θ_s	θ_r	α	n	l	K_s
Laboratório	0,383	0,0956	0,069	1,844	0,5	0,09
Solução inversa	0,329	0,0324	0,0545	1,5917	0,5	0,1302

Erro relativo (%)	14,125	66,109	21,014	13,682	-	44,67
--------------------------	--------	--------	--------	--------	---	-------

O parâmetro θ_r obteve um erro relativo de 66% e, então, foi classificado como insatisfatório. A superestimação de θ_r em laboratório pode ter ocorrido em razão de que, sob condições laboratoriais, as propriedades hidráulicas do solo são obtidas em amostras de solo impondo-se um estado estacionário ou condições transitórias, diferentes das condições de contorno dos estudos obtidos em campo (BASILE et al., 2003). Do mesmo modo, os parâmetros α e n também apresentaram valores superiores em condições de laboratório e foram classificados como satisfatório (21%) e bom (14%). Neste caso, subentende-se que em condições de campo o fenômeno de drenagem passa a ocorrer em potencial mátrico menor do que quando submetidos a ensaios de laboratório.

Costa (2019) e Nascimento et al. (2018), ao realizarem a comparação entre a curva característica de água no solo obtida em laboratório e a obtida pelo método inverso com HYDRUS-1D, notaram que em todas as situações as curvas obtidas em condição de laboratório superestimam o conteúdo volumétrico de água no solo desde a saturação até o potencial de -1.500 kPa.

Os valores de condutividade hidráulica saturada mensuradas pelo Slug Test, Rosetta Lite e pela solução inversa sofreram variabilidade. Tal condição se justifica em consequência de que, a alta variabilidade de K_s ocorre devido às variações contínuas dos processos físicos, químicos e biológicos no solo. Ainda, estudos que compararam metodologias de determinação de K_s mostram diferenças significativas entre os valores obtidos, o que pode ser justificado por limitações experimentais ou matemáticas assumidas pelos métodos (MOHANTY et al., 1994; MESQUITA; MORAES, 2004).

Com relação à umidade de saturação obtidas em laboratório, o erro relativo foi de 14%, e então, foi considerado como Bom. Esta foi menos influenciada pela possibilidade de ar aprisionado nos espaços vazios do solo. Este fato foi apontado por Basile e Copolla (2003) e Costa (2019), ao relatarem que as maiores umidades na saturação de amostras de solos em cilindros volumétricos em laboratório devem-se à facilidade de deslocamento do ar pela amostra, condição diferente das observadas em campo.

De acordo com Beven (2012), a escala das técnicas de medição disponíveis é geralmente muito menor do que a escala na qual os valores

dos parâmetros são necessários. Como no caso do bloco de solo coletado no presente trabalho, que consiste numa técnica de amostragem para a determinação dos parâmetros do solo, porém integram uma área de aproximadamente 1 m². Beven (2012) ainda defende que, mesmo os modelos mais distribuídos, no entanto, exigem valores que representem efetivamente a resposta de um elemento com uma área de 100 m² ou, em muitos casos, uma área muito maior.

Ressalta-se que os parâmetros estimados com base nos dados de laboratório (papel filtro) serviram como valores iniciais (Tabela 11) da solução inversa, porém não resultaram no conjunto de parâmetros com menor erro estatístico entre os dados observados na vala e simulados. Deste modo, fica evidente que os dados coletados em campo permitem estimar os parâmetros da equação de van Genuchten de modo mais coerente que aqueles obtidos em laboratório. Diante deste contexto, com a solução inversa torna-se possível reduzir os custos e o tempo de obtenção dessas propriedades e ainda obter uma representação mais real dessas variáveis.

Silva et al. (2015) e Zeng et al. (2013) afirmam que a umidade do solo é um parâmetro essencial na modelagem de processos hidrológicos pelo *software* HYDRUS. Contudo, faz-se necessário a utilização de sensores para a mensuração instantânea da umidade do solo ao longo do perfil, o qual resulta no aumento dos custos do monitoramento. Dessa forma, a metodologia aplicada no presente trabalho se torna uma alternativa mais acessível para o dimensionamento e monitoramento dos dispositivos de drenagem urbana.

5 CONCLUSÃO

No presente estudo foi analisado o desempenho do modelo computacional HYDRUS-1D de domínio público em simular o fluxo de água na zona não saturada do solo de uma vala de infiltração urbana. Para tal, foi realizada a calibração do modelo, por meio da obtenção dos parâmetros da equação de van Genuchten estimados a partir da solução inversa com base nos dados de infiltração em campo de um evento observado, devidamente selecionado, numa vala de infiltração. A eficiência na predição e acurácia dos resultados simulados foi medida pelo coeficiente de Eficiência de Nash e Sutcliffe (NSE); Raiz do Erro quadrático (RMSE) e o Coeficiente de Determinação (R^2).

Dessa forma, o Evento 3 foi utilizado para a calibração e então os valores dos parâmetros estimados com base nos dados gerados em laboratório foram utilizados com valores iniciais da solução inversa. Então, gerou-se um conjunto de parâmetros “ótimos” e, então, os valores dos erros estatísticos para o Evento 3 foi de 0,009 (RMSE); 0,094 (NSE) e 0,89 R^2 . Estes valores foram classificados como “muito bom” e, assim, atingiu-se a calibração do modelo.

Adiante, para a validação do modelo HYDRUS-1D foram simulados 5 eventos e os valores dos estimadores estatísticos variaram entre 0,01 a 0,06 (RMSE); 0,87 a 0,91 (NSE) e 0,72 e 0,085 (R^2). Conclui-se que o desempenho do modelo HYDRUS-1D para os eventos 1 e 6 foram classificados como satisfatório (NSE) e bom (R^2), já os eventos 2 e 4 obtiveram desempenho bom (NSE) e bom (R^2) e, o evento 5 obteve desempenho muito bom (NSE) e muito bom (R^2). Entretanto, o fluxo simulado do Evento 4 e 1 não tiveram um bom ajuste, assim como os diversos picos do Evento 6.

De forma geral, conclui-se que o desempenho do modelo HYDRUS-1D foi satisfatório, uma vez que, os eventos possuíam variabilidade na distribuição das precipitações e as simulações sem o monitoramento do potencial matricial ao longo do perfil, se tornam mais complexas, em consequência das incertezas em relação às condições iniciais do solo. Vale ressaltar que é necessário ampliar a série de dados e avaliar eventos com comportamentos semelhantes aos eventos 1 e 6. A validação do modelo indica que o ajuste da solução inversa foi satisfatório e que conseqüentemente se teve um menor tempo computacional se comparado à calibração manual.

Os parâmetros estimados com base nos dados de laboratório (papel-filtro) entraram como valores iniciais da solução inversa. Porém, não resultaram no conjunto de parâmetros com menor erro estatístico

entre os dados observados na vala e simulados. Portanto, conclui-se que existiu convergência (superestimação) entre os parâmetros estimados pelos dois métodos (campo e laboratório). Dessa forma, com a solução inversa torna-se possível reduzir os custos e o tempo de obtenção dessas propriedades e ainda obter uma representação mais real dessas variáveis.

6 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Ao final deste estudo recomenda-se a sua continuidade levando em conta os seguintes aspectos:

- Realizar a comparação dos erros entre os eventos simulados a partir de potencial matricial ou de umidade ao longo do perfil;
- Realizar a validação do modelo com mais eventos.

7 ANEXO 1

Code (iConcType)	Location	X	Y	Definition of Y
0	1	Time	Cumulative surface flux	W1-W2: $\text{cum}(q_{op})$ W3: $\text{cum}(q_{op}) = \text{cum}[q_m(1-w) + q_r w]$
	2	Time	Cumulative bottom flux	W1-W2: $\text{cum}(q_{bottom})$ W3: $\text{cum}(q_{bottom}) = \text{cum}[q_m(1-w) + q_r w]$
	3	Time	Cumulative surface matrix flux	W3: $\text{cum}(q_{M,op}) = \text{cum}[q_m(1-w)]$
	4	Time	Cumulative surface fracture flux	W3: $\text{cum}(q_{F,op}) = \text{cum}[q_r w]$
	5	Time	Cumulative bottom matrix flux	W3: $\text{cum}(q_{M,bottom}) = \text{cum}[q_m(1-w)]$
	6	Time	Cumulative bottom fracture flux	W3: $\text{cum}(q_{F,bottom}) = \text{cum}[q_r w]$
1	$iObs$	Time	Pressure head at observation node $iObs$ (W2: mobile zone; W3: matrix)	W1: $h(iObs)$ W2: $h_m(iObs)$ W3: $h_n(iObs)$
	$-iObs$	Time	Fracture pressure head at observation node $iObs$	W3: $h_f(iObs)$
2	$iObs$	Time	Water content at observation node $iObs$	W1: $\theta(iObs)$ W2: $\theta(iObs) = \theta_m(iObs) + \theta_n(iObs)$ W3: $\theta(iObs) = w \theta_f(iObs) + (1-w) \theta_n(iObs)$
	$-iObs$	Time	Fracture water content at observation node $iObs$	W3: $\theta_f(iObs) = w \theta_f(iObs)$
	$nObs + iObs$	Time	Matrix water content at observation node $iObs$	W3: $\theta_n(iObs) = (1-w) \theta_n(iObs)$
	0	Time	Volume of water in the soil profile	W1: $W = \frac{1}{L} \int_{z_{bottom}}^{z_g} \theta dz$ W2: $W = \frac{1}{L} \int_{z_{bottom}}^{z_g} (\theta_n + \theta_m) dz$
				W3: $W = \frac{1}{L} \int_{z_{bottom}}^{z_g} [w \theta_f + (1-w) \theta_n] dz$
	$-iLay$	Time	Volume of water in the $iLay$ subregion	W1: $W_i = \frac{1}{L_i} \int_{z_i}^{z_{i+1}} \theta dz$ W2: $W_i = \frac{1}{L_i} \int_{z_i}^{z_{i+1}} (\theta_n + \theta_m) dz$
	$-(nObs + iLay)$	Time	Volume of water in the $iLay$ subregion	W3: $W_i = \frac{1}{L_i} \int_{z_i}^{z_{i+1}} [w \theta_f + (1-w) \theta_n] dz$
3	1	Time	Surface Flux	W1-W2: q_{op} W3: $q_{op} = q_m(1-w) + q_r w$
	2	Time	Bottom Flux	W1-W2: q_{bottom} W3: $q_{bottom} = q_m(1-w) + q_r w$
	3	Time	Surface Matrix Flux	W3: $q_{M,op} = q_m(1-w)$
	4	Time	Surface Fracture Flux	W3: $q_{F,op} = q_r w$
	5	Time	Bottom Matrix Flux	W3: $q_{M,bottom} = q_m(1-w)$
	6	Time	Bottom Fracture Flux	W3: $q_{F,bottom} = q_r w$
4.0	0	Time	Solute mass in the transport domain	
4.0	$iObs$	Time	Liquid resident concentration at observation node $iObs$ (W2: mobile zone; W3: matrix)	S1-S4: $c(iObs)$ S5-S6: $c_m(iObs)$ S7-S9: $c_n(iObs)$
4.0	$-iObs$	Time	Liquid resident concentration of the second solute at observation node $iObs$	S1-S4: $c_2(iObs)$ S5-S6: $c_{2,m}(iObs)$
4.1	0	Time	Logarithm of the solute mass in the transport domain	
4.1	$iObs$	Time	Logarithm of the liquid resident concentration at observation node	S1-S4: $\log[c(iObs)]$ S5-S6: $\log[c_m(iObs)]$

APÊNDICE 1

```

clear all;
%% Declaração de Variáveis
hydrus_exec='C:\Program Files (x86)\PC-Progress\Hydrus-1D 4.xx\H1D_calc.exe';
hydrus_files='C:\Users\Nivea\Desktop\sim_1';

numero = input('Digite o número do evento desejado:'); %Evento a ser simulado
selector_origin = strcat('C:\Users\Nivea\Desktop\sim_1\SELECTOR_origin',
int2str(numero),'.IN');
selector='C:\Users\Nivea\Desktop\sim_1\SELECTOR.IN';
PROFILE_origin
= strcat('C:\Users\Nivea\Desktop\sim_1\PROFILE_origin',int2str(numero),'.DAT');
PROFILE='C:\Users\Nivea\Desktop\sim_1\PROFILE.DAT';
ATMOSPH_origin =
strcat('C:\Users\Nivea\Desktop\sim_1\ATMOSPH_origin',int2str(numero),'.IN');
ATMOSPH='C:\Users\Nivea\Desktop\sim_1\ATMOSPH.IN';

path = strcat(hydrus_files,'\run_@');
mkdir(path) %create folder for each run
% path=cell(1,num_sim);
copyfile(PROFILE_origin,PROFILE);
copyfile(ATMOSPH_origin,ATMOSPH);
cd('C:\Users\Nivea\Desktop\sim_1')
copyfile(selector_origin,selector)

%% Simulação

cd('C:\Program Files (x86)\PC-Progress\Hydrus-1D 4.xx\');
tic;
!C:\Program Files (x86)\PC-Progress\Hydrus-1D 4.xx\H1D_calc.exe &
je=toc;
[~,temp]=system('tasklist /FI "imagename eq H1D_CALC*"');
while je<3 && strcmp(temp(1:4),'INFO')==0 %je>6
    pause(0.5);
    je=toc;
    [~,temp]=system('tasklist /FI "imagename eq H1D_CALC*"');
end
if je>3 %je>6
    cd('C:\Users\Nivea\Desktop\sim_1');
    system('taskkill /f /im H1D_CALC.EXE /im cmd.exe &');
    copyfile('C:\Users\Nivea\Desktop\sim_1\A_Level.out',path);
    delete A_Level.out;
    copyfile('C:\Users\Nivea\Desktop\sim_1\Balance.out',path);
    delete Balance.out;
    copyfile('C:\Users\Nivea\Desktop\sim_1\I_Check.out',path);
    delete I_Check.out;
    copyfile('C:\Users\Nivea\Desktop\sim_1\Nod_Inf.out',path);
    delete Nod_Inf.out;
    copyfile('C:\Users\Nivea\Desktop\sim_1\Obs_Node.out',path);

```

```

delete Obs_Node.out;
copyfile('C:\Users\Nivea\Desktop\sim_1\Profile.out',path);
delete Profile.out;
copyfile('C:\Users\Nivea\Desktop\sim_1\Run_Inf.out',path);
delete Run_Inf.out;
copyfile('C:\Users\Nivea\Desktop\sim_1\T_Level.out',path);
end

delete T_Level.out;
delete selector.IN
delete PROFILE.DAT
delete ATMOSPH.IN
%% COMPARAR VALORES E PLOTAR GRÁFICO
% -Copiar do excel o Run_Off original
% -Copiar Run_Off de cada simulação
% -Compara-los.
% -Salvar todos os dados em uma matriz MATLAB .MAT

clear SimuladoALL Simulado Observado;
Observado = importdata(strcat('DADOS',int2str(numero),'.txt'));
Simulado = zeros(length(Observado),1);

figure(1)
cd('C:\Users\Nivea\Desktop\sim_1');
clear SimuladoALL;
SimuladoALL = importdata(strcat(path,'\T_Level.out'),' ',9,0);
tempo = 5;
j = 1;
size(SimuladoALL.data);
kk = ans(1);
for k=1:kk
    if(rem(SimuladoALL.data(k,1),5)==0)
        Simulado(j) = SimuladoALL.data(k,15);
        j = j + 1;
    end
end
end
% NSE(Observado,Simulado(:,i))
plot(Observado);
hold on;
plot(Simulado(:),'--');
% title('Comparação entre Simulado e Observado')
% title(horzcat('NSE: ',num2str(NSE(Observado,Simulado)), ' | RMSE: ',num2str(RMSE(Observado,Simulado))));
ylabel('RunOff [cm/min]');
xlabel('Tempo [min]')
legend('Observado','Simulado')
mdl = fitlm(Observado,Simulado);
% sprintf(strcat('NSE: ',num2str(NSE(Observado,Simulado))))
% sprintf(strcat('RMSE: ',num2str(RMSE(Observado,Simulado))))
% sprintf(strcat('R-squared: ',num2str(mdl.Rsquared.Ordinary)))

strcat('NSE: ',num2str(NSE(Observado,Simulado)))
strcat('RMSE: ',num2str(RMSE(Observado,Simulado)))
strcat('R-squared: ',num2str(mdl.Rsquared.Ordinary))
% sprintf('END')

```

APÊNDICE 2

C.P.	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Volume (cm ³)	Púmido (g)	Pesco (g)	Dens. Seca (g/cm ³)	Índice de vazios w (%)	S (%)	Sugão (kPa)	θ (%)					
102	4,695	4,771	4,975	5,005	5,005	5,005	87,88	169,62	147,04	1,67	0,58	15,36	69,70	5,03	25,69
103	4,700	4,705	5,005	5,001	5,005	5,005	86,90	153,46	141,34	1,63	0,63	8,57	36,10	8,69	13,94
104	4,755	4,635	4,915	4,915	4,934	4,934	85,20	159,87	136,58	1,60	0,65	17,05	69,19	3,68	27,33
105	4,703	4,701	5,005	4,905	5,005	5,005	86,33	159,46	138,05	1,60	0,66	15,51	62,54	3,73	24,80
106	4,710	4,705	5,005	5,005	5,005	5,005	87,11	157,88	142,68	1,64	0,62	10,66	45,69	4,28	17,45
107	4,705	4,705	5,005	5,005	5,005	5,005	87,02	144,36	133,16	1,53	0,73	8,41	30,47	6,09	12,87
108	4,710	4,705	5,005	5,001	5,001	5,001	87,07	166,59	148,96	1,71	0,55	11,83	57,14	4,90	20,25
109	4,709	4,705	5,005	5,005	5,005	5,005	87,09	158,08	139,44	1,60	0,66	13,37	54,06	3,55	21,40
110	4,705	4,705	5,005	5,005	5,004	5,004	87,01	151,98	134,74	1,55	0,71	12,79	47,66	2,70	19,81
111	4,695	4,771	4,975	5,005	5,005	5,005	87,88	169,62	156,72	1,78	0,49	8,23	44,89	33,21	14,68
112	4,700	4,705	5,005	5,001	5,005	5,005	86,90	153,46	134,16	1,54	0,72	14,39	53,21	3,21	22,21
113	4,755	4,635	4,915	4,915	4,934	4,934	85,20	159,87	150,67	1,77	0,50	6,11	32,47	24,79	10,80
114	4,703	4,701	5,005	4,905	5,005	5,005	86,33	159,46	141,79	1,64	0,61	12,46	53,83	4,29	20,47
115	4,710	4,705	5,005	5,005	5,005	5,005	87,11	157,88	139,53	1,60	0,65	13,15	53,24	3,6	21,06
116	4,705	4,705	5,005	5,005	5,005	5,005	87,02	144,36	134,69	1,55	0,71	7,18	26,72	22,7	11,12

Onde, C.P: cápsula;
Púmido: Peso úmido;
Pesco: Peso seco; Dens.
Seca: Densidade seca; w
(%): teor de umidade dos
corpos de prova em
porcentagem; S (%): grau
de saturação em
porcentagem; θ (%) teor de
umidade.

8 REFERÊNCIAS

AGAH, Ali Erfani; MEIRE, Patrick; DECKERE, Eric de. Simulation of Phosphorus Transport in Soil Under Municipal Wastewater Application Using Hydrus-1D. **Soil Contamination - Current Consequences And Further Solutions**, [s.l.], p.177-190, 21 dez. 2016. InTech. <http://dx.doi.org/10.5772/66214>.

ALMEIDA, Eurileny Lucas de et al. Filter Paper Method for the Determination of the Soil Water Retention Curve. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l.], v. 39, n. 5, p.1344-1352, out. 2015. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/01000683rbcS20140546>.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (API). Estimation of infiltration and recharge for environmental site assessment. **American Petroleum Institute Publication** 4643, Washington D.C. 1996.

ANDERSON, M. P.; WANG, H. Introduction to Groundwater Modeling, **W.H. Freeman and Company**, 1982.

ANTINORO, C. et al. A simplified approach to estimate water retention for Sicilian soils by the Arya-Paris model. **Geoderma**, [s.l.], v. 213, p.226-234, jan. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.08.004>.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. D5298-03: **Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper**. Philadelphia, 2003. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6457**: Amostras de solo: preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986. 9p

BACHMANN, Jörg; PLOEG, Rienk R. van Der. A review on recent developments in soil water retention theory: interfacial tension and temperature effects. **Journal Of Plant Nutrition And Soil Science**, [s.l.], v. 165, n. 4, p.468-478, ago. 2002. Wiley. [http://dx.doi.org/10.1002/1522-2624\(200208\)165:43.0.co;2-g](http://dx.doi.org/10.1002/1522-2624(200208)165:43.0.co;2-g).

BARBOUR, S Lee. Nineteenth Canadian Geotechnical Colloquium: The soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, [s.l.],

v. 35, n. 5, p.873-894, out. 1998. Canadian Science Publishing. <http://dx.doi.org/10.1139/t98-040>.

BASILE, A.; CIOLLARO, G.; COPPOLA, A. Hysteresis in soil water characteristics as a key to interpreting comparisons of laboratory and field measured hydraulic properties. **Water Resources Research**, v. 39, n. 12, 1355. 2003.

BELOTTI, Fernanda Maria. CAPACIDADE DE RETENÇÃO DE METAIS PESADOS PELO SOLO EM ÁREA DE IMPLANTAÇÃO DE ESTRUTURAS DE INFILTRAÇÃO PARA ÁGUAS PLUVIAIS URBANAS EM BELO HORIZONTE/MG. 2011. 161 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geografia, Departamento de Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

BERTRAND-KRAJEWSKI, J et al. **Mesures en Hydrologie Urbaine et assainissement**. Paris: Tec Et Doc, 2000. 174 p.

BEVEN, Keith. **Rainfall-Runoff Modelling**. 2. ed. London: The Primer, 2012. 472 p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Brasília, 1997. 212p.

BEHERA, S. K.; PANDA, R. K.. Assessing soil and groundwater contamination with HYDRUS-1D: A study from West Bengal. **Environmental Quality Management**, [s.l.], v. 20, n. 3, p.59-75, mar. 2011. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/tqem.20290>.

BICALHO, K.V.; CORREIA, A.G.; FERREIRA, S.; FLEUREAU, J.M. & MARINHO, F.A.M. The use of filter paper method for matric suction measurement of an unsaturated compacted silty sand. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 6., Salvador, 2007. **Anais...** Salvador, Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2007. p.215-219.

BRAIDA, J. A.; Reichert, J. M.; Reinert, D. J.; Veiga, M. Teor de carbono orgânico e a susceptibilidade à compactação de um Nitossolo e Argissolo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, p.131-139, 2010.

BULUT, Rifat; LYTTON, Robert L.; WRAY, Warren K.. Soil Suction Measurements by Filter Paper. **Expansive Clay Soils And Vegetative Influence On Shallow Foundations**, [s.l.], p.243-261, 8 out. 2001. American Society of Civil Engineers. [http://dx.doi.org/10.1061/40592\(270\)14](http://dx.doi.org/10.1061/40592(270)14).

BULUT, Rifat; LEONG, Eng Choon. Indirect Measurement of Suction. **Geotechnical And Geological Engineering**, [s.l.], v. 26, n. 6, p.633-644, 15 maio 2008. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s10706-008-9197-0>.

BURGES, S, J; WIGMOSTA M, S. Land Use and Watersheds: Human Influence on Hydrology and Geomorphology in Urban and Forest Areas. ISBN: 9781118665848: The American Geophysical Union, 2013. 2 vol.

BUTLER, David; DAVIES, Jhon W. (Ed.). Urban drainage. 3. ed. Londres: **Spon Press**, 2011. 625 p.

BROOKS, R. H. & COREY, A. T. Hydraulic properties of porous media, **Hydrology Paper**, 3, Colo. State Univ., Fort Collins, p. 1-27, 1994.

CAIQIONG, Yi; JUN, Fan. Application of HYDRUS-1D model to provide antecedent soil water contents for analysis of runoff and soil erosion from a slope on the Loess Plateau. **Catena**, [s.l.], v. 139, p.1-8, abr. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2015.11.017>.

CAMPBELL, Gaylon S.. A SIMPLE METHOD FOR DETERMINING UNSATURATED CONDUCTIVITY FROM MOISTURE RETENTION DATA. **Soil Science**, [s.l.], v. 117, n. 6, p.311-314, jun. 1974. Ovid Technologies (Wolters Kluwer Health). <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-197406000-00001>.

CAMPBELL, G. S.. Soil water potential measurement: An overview. **Irrigation Science**, [s.l.], v. 9, n. 4, p.265-273, out. 1988. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/bf00296702>.

CAMPBELL, G. S.; SMITH, D. M.; TEARE, B. L. Application of a dew point method to obtain the soil water characteristic. In: SCHWANZ, T. (ed.). **Springer Proceedings in Physics**: 112 - Experimental unsaturated soil mechanics. Berlin: Springer, 2007. p. 71-77.

CANHOLI, Aluísio Pardo. Drenagem urbana e controle de enchentes/Aluísio Pardo Canholi. São Paulo: **Oficina de Textos**, 2005. 302 p.

CAPRARIO, J. **Desenvolvimento de um Instrumento para o Mapeamento de Áreas Suscetíveis a Alagamentos e Inundações Urbanas**. 2017. 223 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

CAPRARIO, J.; RECH, A.S.; TASCA, F.A; FINOTTI, A.R. Influence of drainage network and compensatory techniques on urban flooding susceptibility. **WATER SCIENCE AND TECHNOLOGY**, Artigo Aceito, 2019.

CASAN. Companhia Catarinense de Águas e Saneamento. **Estudo do Manancial subterrâneo da Costa Leste Campeche**. Porto Alegre, 2002. 157p.

CHANDLER R.J., Crilly M.S. & Montgomery-Smith G. A Low-cost Method of Assessing Clay Desiccation for Lowrise Buildings. **Proceedings**, Institute of Civil Engineering, Vol. 92, No. 2, pp. 82–89. 1997.

CHAVES, Henrique. **Sensibilidade do Modelo Hydrus aos Parâmetros Hidráulicos do Solo em Diferentes Texturas**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, [s.l.], v. 14, n. 2, p.33-37, 2009. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v14n2.p33-37>.

CLAUSNITZER, V.; HOPMANS, J. W. Non-linear parameter estimation: LM_OPT. Generalpurpose optimization code based on the Levenberg-Marquardt algorithm. **Land, Air and Water Resources**, [s.l.], 1995.

COELHO, Eugênio F. et al. Desempenho de diferentes guias de ondas para uso com o analisador de umidade TRASE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s.l.], v. 5, n. 1, p.81-87, abr. 2001. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1415-43662001000100015>.

CONCEIÇÃO, B. S. **MODELAGEM DA DINÂMICA DE NITRATO E POTÁSSIO NO SOLO EM BANANEIRAS FERTIRRIGADAS:**

MODELOS PARAMÉTRICOS E MODELO HYDRUS. 2016. 105 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.

COSTA, Wanderley Andrade; OLIVEIRA, Carlos Alberto da Silva; KATO, Eiyti. Modelos de ajuste e métodos para a determinação da curva de retenção de água de um Latossolo-vermelho-amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l.], v. 32, n. 2, p.515-523, abr. 2008. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832008000200006>.

COSTA, Tancio Gutier Ailan. **ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS DA EQUAÇÃO DE VAN GENUCHTEN COM DADOS DE UMIDADE DO SOLO E MODELAGEM INVERSA COM HYDRUS-1D.** 2019. 54 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência do Solo, Departamento de Ciência do Solo, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

DAVIS, Allen P. et al. Hydraulic performance of grass swales for managing highway runoff. **Water Research**, [s.l.], v. 46, n. 20, p.6775-6786, dez. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2011.10.017>.

DECAGON DEVICES INC. **Soil Moisture Sensors: User's Manual**, version 8. Pullman WA 99163 USA, Decagon Devices Inc., 2007.

DEXTER, A.r.. Soil physical quality. **Geoderma**, [s.l.], v. 120, n. 3-4, p.201-214, jun. 2004. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.09.004>.

DUDA, P. B.; HUMMEL, P. R.; DONIGIAN JUNIOR, A. S.. BASINS/HSPF: Model Use, Calibration, and Validation. **Transactions of The Asabe**, [s.l.], v. 55, n. 4, p.1523-1547, 2012. American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE). <http://dx.doi.org/10.13031/2013.42261>.

DUNCAN, Owen. **Comparison of Compartmentalized Dynamic Model, HYDRUS, and Curve Number Methods for Estimating Drainage from Windrow Composting Pads.** 2011. 109 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências, University Of Georgia, Athens, 2011.

DURNER, Wolfgang. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. **Water Resources Research**, [s.l.], v. 30, n. 2, p.211-223, fev. 1994. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/93wr02676>.

FEAM. Fundação Estadual do Meio Ambiente. **Orientações básicas para drenagem urbana**/Fundação Estadual do Meio Ambiente. Belo Horizonte: FEAM, 2006. 32p.

FERNANDEZ, G.P., Chescheir, G.M., Skaggs, R.W., Amatya, D., and Birgand, F. Development and Field Testing of a Watershed Scale DRAINMOD based hydrology and Water Quality Model. In: **International Meeting**. 1997.

FEUERHARMEL, C.; GEHLING, W. Y. Y.; BICA, A. V. D.; PEREIRA, A. Determinação das curvas características de solos coluvionares pelo uso combinado da placa de sucção e método do papel filtro. In: **V Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados**. 2004, São Carlos/SP, pp. 243-248.

FREDLUND, D.G., XING, A.: **Equations for the soil-water characteristic curve**. Canadian Geotechnical Journal, nº 31, p. 521–532,1994.

GABIRI, Geofrey et al. Modeling Spatial Soil Water Dynamics in a Tropical Floodplain, East Africa. **Water**, [s.l.], v. 10, n. 2, p.1-27, 11 fev. 2018. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w10020191>.

GERSCOVICH, D. M. S.; SAYÃO, A. S. F. J.. Evaluation of the soil-water characteristic curve equations for soils from Brazil. In: **THIRD INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS - UNSAT2002**, 1., 2002, Recife. **Proceedings...** . S.i: S.i, 2002. v. 1, p. 295 - 300. Disponível em: <http://www.eng.uerj.br/deptos/professor/123/UNSAT_2002.pdf>. Acesso em: 01 jun. 2018

GOMES, Jorge Eduardo da Silva. **Estudo sobre fatores que influenciam a acurácia do método do papel-filtro**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. doi:10.11606/D.3.2007.tde-06072007-152808. Acesso em: 2019-03-14.

GONÇALVES, Fernanda Vescovi. **ESTUDO DAS CURVAS DE RETENÇÃO E CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA ESTIMADAS PELA EQUAÇÃO DE VAN GENUCHTEN (1980) PARA DIFERENTES TIPOS DE SOLOS**. 2012. 138 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

GONÇALVES, M. C. et al. Modelação da dinâmica da água e dos sais num Aluviossilolo regado com águas de diferente qualidade: ensaio de validação do modelo HYDRUS-1D com observações em monólitos. *Revista de Ciências Agrárias*, Lisboa, v. 30, p.38-52, jul. 2007.

HAMBLIN, A.p.. Filter-paper method for routine measurement of field water potential. **Journal Of Hydrology**, [s.l.], v. 53, n. 3-4, p.355-360, out. 1981. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694\(81\)90011-1](http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(81)90011-1).

HERZON, Irina; HELENIUS, Juha. Agricultural drainage ditches, their biological importance and functioning. **Biological Conservation**, [s.l.], v. 141, n. 5, p.1171-1183, maio 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biocon.2008.03.005>.

HODNETT, M.g.; TOMASELLA, J.. Marked differences between van Genuchten soil water-retention parameters for temperate and tropical soils: a new water-retention pedo-transfer functions developed for tropical soils. **Geoderma**, [s.l.], v. 108, n. 3-4, p.155-180, ago. 2002. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0016-7061\(02\)00105-2](http://dx.doi.org/10.1016/s0016-7061(02)00105-2).

HUTSON, J.L; WAGENET, R.J. **LEACHM: Leaching Estimation And CHemistry Model. Version 3.0**. Department of Soil, Crop, and Atmospheric Sciences. Research series no. 92.3. New York, Cornell University, p. 121. 1992.

HWANG, C. **Determination of material functions for unsaturated flow**. 2002. 204 f. Dissertação (Doutorado), University of Colorado, Colorado, 2002.

JURRIES, Dennis. **Biofilters**. Portland: S/e, 2003. 57 p. Disponível em: <<https://www.oregon.gov/deq/FilterPermitsDocs/biofiltersV2.pdf>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

KANZARI, Sabri et al. Hydrus-1D model calibration and validation in various field conditions for simulating water flow and salts transport in a semi-arid region of Tunisia. **Sustainable Environment Research**, [s.l.], v. 28, n. 6, p.350-356, nov. 2018. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1016/j.serj.2018.10.001>.

KIEHL, J.E. **Fertilizantes orgânicos**. Piracicaba: Agronômica Ceres, 1985. 492p

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

KOSUGI, Ken'ichirou. Lognormal Distribution Model for Unsaturated Soil Hydraulic Properties. **Water Resources Research**, [s.l.], v. 32, n. 9, p.2697-2703, abr. 1996. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/96wr01776>.

KROES, J.C; van DAM, J.C; HUYGEN, J.; VERVOORT, R.W. SWAP version 2.0, User's Guide. **Simulation of Water Flow, Solute Transport, and Plant Growth in the Soil-Water-Air-Plant environment**. Technical Document 53, DLO Winand Staring Centre, Wageningen. Report 81, Department Water Resources, Wageningen Agricultural University, 1999.

LAPPALA, E.G., Healy, R.W., and Weeks, E.P. **Documentation of Computer Program VS2D to Solve the Equations of Fluid Flow in Variably Saturated Porous Media**. U.S. Geological Survey Water-Resources Denver, Colorado. Investigations Report 83-4099, p. 184. 1993.

LEONG, E.C; RAHARDJO, H. Review of soil-water characteristic curve equations. **Journal of Geotechnical and Geo environmental Engineering**, Dec. 1997.

LEONG, E., He, L.; RAHARDJO, H. "Factors Affecting the Filter Paper Method for Total and Matric Suction Measurements," **Geotechnical Testing Journal**, Vol. 25, No. 3, 2002, pp. 322-333, <https://doi.org/10.1520/GTJ11094J>.

LEONG, E.-c.; TRIPATHY, S.; RAHARDJO, H. Total suction measurement of unsaturated soils with a device using the chilled-mirror dew-point technique. **Geotechnique**, [s.l.], v. 53, n. 2, p.173-182, mar. 2003. Thomas Telford Ltd..
<http://dx.doi.org/10.1680/geot.2003.53.2.173>.

LI, Yong et al. Evaluation of nitrogen balance in a direct-seeded-rice field experiment using Hydrus-1D. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v. 148, p.213-222, jan. 2015. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2014.10.010>.

LIBARDI, P. L., 2005. **"Dinâmica da água no solo"**. Universidade de São Paulo, São Paulo.

LIBARDI, P, L. **Água no solo**. In: De Jong van Lier Q, editor. Física do solo. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; 2010. p.103-52.

LU, Ning; LIKOS, William J. **Unsaturated soil mechanics**. Colorado: John Wiley & Sons, 2002. 584 p.

LUCAS, Alessandro Hirata et al. Avaliação da construção e operação de técnicas compensatórias de drenagem urbana: o transporte de finos, a capacidade de infiltração, a taxa de infiltração real do solo e a permeabilidade da manta geotêxtil. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [s.l.], v. 20, n. 1, p.17-28, mar. 2015. FapUNIFESP (SciELO).
<http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522015020000079923>.

MA, Ying et al. Modeling water infiltration in a large layered soil column with a modified Green–Ampt model and HYDRUS-1D. **Computers And Electronics In Agriculture**, [s.l.], v. 71, p.40-47, abr. 2010. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2009.07.006>.

MASHAYEKHI, Parisa et al. Different scenarios for inverse estimation of soil hydraulic parameters from double-ring infiltrometer data using HYDRUS-2D/3D. **International Agrophysics**, [s.l.], v. 30, n. 2, p.203-210, 1 abr. 2016. Walter de Gruyter GmbH.
<http://dx.doi.org/10.1515/intag-2015-0087>

MARINHO, F.A. M. Os solos não saturados: Aspectos teóricos, experimentais e aplicados. Dissertação de Livre Docência, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

MARINHO, F. A. M. Medição de sucção com o método do papel filtro. In: X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações. **Anais.. X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solo e Engenharia de Fundações.** Foz do Iguaçu, PR, v.2, p.515-522, 1994.

MARINHO, F; PEREIRA, J. H. F. (1998), XI COBRAMSEG – Solos Não Saturados. Apostila do Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Geotecnia. Brasília-Distrito Feral. Novembro de 1998.

MARQUARDT, Donald W.. An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters. **Journal Of The Society For Industrial And Applied Mathematics**, [s.l.], v. 11, n. 2, p.431-441, jun. 1963. Society for Industrial & Applied Mathematics (SIAM). <http://dx.doi.org/10.1137/0111030>.

MÁRQUEZ, D. et al. Assessing the vertical movement of a nematicide in a sandy loam soil and its correspondence using a numerical model (HYDRUS 1D). **Journal Of Soil Science And Plant Nutrition**, [s.l.], n. , p.167-179, 2017. SciELO Comision Nacional de Investigacion Cientifica Y Tecnologica (CONICYT). <http://dx.doi.org/10.4067/s0718-95162017005000013>.

MCKEEN, R.G. **Field studies of airport pavements on expansive clay.** 4th International Conference on Expansive Soils, pp. 242-261. 1980.

NEGM, Amro et al. Assessing the Performance of Thermal Inertia and Hydrus Models to Estimate Surface Soil Water Content. **Applied Sciences**, [s.l.], v. 7, n. 10, p.1-16, 22 set. 2017. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/app7100975>.

MUALEM, Yechezkel. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Research**, [s.l.], v. 12, n. 3, p.513-522, jun. 1976. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/wr012i003p00513>.

MUJOVO, Marla Josefa Nen. **Simulação de fluxo vertical em trincheiras de infiltração urbana.** 2014. 116 f. Dissertação (Mestrado)

- Curso de Engenharia Sanitária Ambiental, Departamento de Engenharia Sanitária Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

MELO, Tirzah Moreira de; LOUZADA, José Antônio. Aplicação e avaliação dos modelos swap e hydrus 1d em diferentes cenários agrícolas. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, [s.l.], v. 6, n. 4, p.261-270, 20 dez. 2012. INOVAGRI. <http://dx.doi.org/10.7127/rbai.v6n400090>.

MENG, Y et al. Modelling Hydrology of a Single Bioretention System with HYDRUS-1D. **The Scientific World Journal**, [s.l.], v. 2014, p.1-10, 2014. Hindawi Limited. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/521047>.

MESQUITA, M. G. B. F.; MORAES, S. O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n.3, p.963-969, mai.-jun., 2004.

MOHANTY, B. P.; KANVAR, R. S.; EVERTS, C. J. Comparison of saturated hydraulic conductivity measurement methods for a glacial-till soil. **Soil Science Society of America Journal**, v.58, p.672-677,1994.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. **Transactions of The Asabe**, [s.l.], v. 50, n. 3, p.885-900, 2007. American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE). <http://dx.doi.org/10.13031/2013.23153>.

NAHRA,,Joumana. Abou. MODELING PHOSPHORUS TRANSPORT IN SOIL AND WATER. 2006. 218 f. Tese (Doutorado) - Curso de Filosofia, Department of Bioresource Engineering, Mcgill University, Montreal, 2006.

NASCIMENTO, I.V.; ASSIS JÚNIOR, R.N.; ARAÚJO, J.C.; ALENCAR, T.L.; FREIRE, A.G.; LOBATO, M.G.R.; SILVA, C.P.; MOTA, J.C.A.; NASCIMENTO, C.D.V. Estimation of van Genuchten equation parameters in laboratory and through inverse modeling with Hydrus-1D. **Journal of Agricultural Science**, v. 10, p. 102-110, 2018

NETO, Malaquias da Silva Amorim. **Balço hídrico segundo Thornthwaite e Mather (1955)**. Comunicado técnico Embrapa, n.34, p.1-18, 1989.

PACHECO, E. F. Avaliação Quali-quantitativa de uma Vala de Infiltração Pluvial em Termos de Retenção de Contaminantes. Estudo de Caso: Distrito do Campeche - Florianópolis Santa Catarina. 2015. 199 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

PINHO, Roque Emmanuel da Costa de. **Teores de água e solutos no solo: desempenho e sensibilidade do modelo Hydrus-1D**. 2009. 83 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Agrícola, Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

PINHO, R.E.C.; MIRANDA, J.H. Avaliação do modelo Hydrus-1D na simulação do transporte de água e potássio em colunas preenchidas com solos tropicais. **Revista de Engenharia Agrícola**, v.34, n.5, p.899-911, 2014.

RASSAM, Daud W.; COOK, Freeman J.. 2. Numerical Simulations of Water Flow and Solute Transport Applied to Acid Sulfate Soils. **Journal Of Irrigation And Drainage Engineering**, [s.l.], v. 128, n. 2, p.107-115, abr. 2002. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9437\(2002\)128:2\(107\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0733-9437(2002)128:2(107)).

REICHARDT, K. **Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera**. Campinas, SP: Fundação Cargill, 1895.

REINERT, D.J et al. Qualidade física dos solos. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 16., Aracaju, 2006. **Resumos e Palestras**. Aracaju, 2006.

RIDLEY, A. M. et al. Soil matrix suction: some examples of its measurement and application in geotechnical engineering. **Geotechnique**, [s.l.], v. 53, n. 2, p.241-253, mar. 2003. Thomas Telford Ltd.. <http://dx.doi.org/10.1680/geot.2003.53.2.241>.

ROSS, M; SHAH. N. **Table Conditions**. v. 14, n. December, p. 1290–1298, 2009.

RUJNER, Hendrik et al. The effects of initial soil moisture conditions on swale flow hydrographs. **Hydrological Processes**, [s.l.], v. 32, n. 5, p.644-654, 12 fev. 2018. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.11446>.

SANTOS, Pedro Tyaquicã da Silva et al. Telhado verde: desempenho do sistema construtivo na redução do escoamento superficial. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 13, p.161-174, mar. 2013.

SANTOS, João Batista Fialho dos. **MONITORAMENTO E SIMULAÇÃO HIDRÁULICA DE UMA TRINCHEIRA DE INFILTRAÇÃO**. 2014. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2014.

SCANLON, Bridget R.; HEALY, Richard W.; COOK, Peter G.. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. **Hydrogeology Journal**, [s.l.], v. 10, n. 1, p.18-39, 17 jan. 2002. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s10040-001-0176-2>.

SCHAAP, Marcel G.; LEIJ, Feike J.; VAN GENUCHTEN, Martinus Th.. Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. **Journal Of Hydrology**, [s.l.], v. 251, n. 3-4, p.163-176, out. 2001. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0022-1694\(01\)00466-8](http://dx.doi.org/10.1016/s0022-1694(01)00466-8).

SERVAT, Eric; DEZETTER, Alain. Selection of calibration objective fonctions in the context of rainfall-runoff modelling in a Sudanese savannah area. **Hydrological Sciences Journal**, [s.l.], v. 36, n. 4, p.307-330, ago. 1991. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/02626669109492517>.

SILVA JUNIOR, João José da. **DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA PELO PROBLEMA INVERSO DO SOFTWARE HYDRUS-1D**. 2010. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Agrícola, Departamento de Engenharia, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

SILVA JUNIOR, João José da et al. Determinação da condutividade hidráulica do solo utilizando o problema inverso do software hydrus-1d. **Revista Agro@mbiente On-line**, [s.l.], v. 7, n. 3, p.242-251, 31 dez. 2013. Universidade Federal de Roraima. <http://dx.doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v7i3.1128>.

SILVA, André Henrique Carmo Luiz da. **CONTROLE DA POLUIÇÃO DIFUSA DE ORIGEM PLUVIAL EM UMA VIA DE TRÁFEGO INTENSO POR MEIO DE TRINCHEIRA DE INFILTRAÇÃO E VALA DE DETENÇÃO**. 2009. 169 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Escola de Engenharia, Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

SILVA, J.r.l. et al. Modelagem da dinâmica de umidade do solo em diferentes condições de cobertura no semiárido pernambucano. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal Of Agricultural Sciences**, [s.l.], v. 10, n. 2, p.293-303, 29 jun. 2015. Revista Brasileira de Ciências Agrárias. <http://dx.doi.org/10.5039/agraria.v10i2a4219>.

SILVA, José Roberto Lopes da. **INVESTIGAÇÃO DA DINÂMICA DOS PROCESSOS HIDROLÓGICOS E SEDIMENTOLÓGICOS EM ESCALA DE PARCELA NO SEMIÁRIDO DE PERNAMBUCO**. 2015. 118 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Agrícola, Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2015.

SKAGGS, R.W.. Drainmod. **Methods for design and evaluation of drainage-water management systems for soils with high water tables**. USDA-SCS, South National Technical Center, Fort Worth, TX, USA, 130 p., unpublished, 1980.

SOUZA, Maurício Teixeira; CAMPOS, José Eloi Guimarães. O papel dos regolitos nos processos de recarga de aquíferos do Distrito Federal. **Rem: Revista Escola de Minas**, [s.l.], v. 54, n. 3, p.191-198, jul. 2001. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0370-44672001000300005>.

SOUZA, C.F.; MATSURA, E.E.; TESTEZLAF, R. Experiência de laboratório de hidráulica, irrigação e drenagem da Faculdade de Engenharia Agrícola/UNICAMP no uso da técnica da TDR. In: Matsura, E.E.; Javarez Junior,A.; Gomes, E.P.; Souza, C.F. (eds.). **Aplicações técnicas de TDR na agricultura**. Campinas:FEAGRI/UNICAMPI, p.147-176, 2001.

SOUZA, V.C.B. **Estudo experimental de trincheiras de infiltração no controle da geração do escoamento superficial**. Tese de Doutorado.

Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Porto Alegre, 2002.

SOUZA, C. F.; FOLEGATTI, M. V.; MATSURA, E. E.; OR, D. Calibração da Reflectometria no domínio do Tempo (TDR) Para a Estimativa da Concentração da Solução no Solo, **XXXIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola**. 02 a 06 de Agosto de 2004 - São Pedro – SP.2004.

SOUSA, F. A. de. **A contribuição dos solos originados sobre granitos e rochas alcalinas na condutividade hidráulica, na recarga do lençol freático e na suscetibilidade erosiva – um estudo de caso na alta bacia hidrográfica do rio dos bois em iporá-GO**. Tese (doutorado) - Programa de Pós-graduação em Geografia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.

SOUZA, Vladimir Caramori Borges de. **GESTÃO DA DRENAGEM URBANA NO BRASIL: DESAFIOS PARA A SUSTENTABILIDADE**. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, [s.l.], v. 1, n. 1, p.58-72, 27 mar. 2013. Revista GESTA. <http://dx.doi.org/10.17565/gesta.v1i1.7105>.

SOUZA, Philipe Guilherme Corcino. **OBTENÇÃO DA CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA EM LATOSSOLO EMPREGANDO DADOS DE MINI-INFILTRÔMETRO E TÉCNICAS DE MODELAGEM**. 2015. 104 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências Agrárias, Departamento Ciências Agrárias, Universidade Federal de São João del Rei, Sete Lagoas, 2015.

SUITS, L David et al. Free Energy of Water-Suction-in Filter Papers. **Geotechnical Testing Journal**, [s.l.], v. 28, n. 4, p.12307-12317, 2005. ASTM International. <http://dx.doi.org/10.1520/gtj12307>.

SUITS, L David et al. The Filter Paper Method Revisited. **Geotechnical Testing Journal**, [s.l.], v. 29, n. 3, p.14125-14225, 2006. ASTM International. <http://dx.doi.org/10.1520/gtj14125>.

SÍRIO, D. L. N. Monitoramento e Modelagem da Recarga Freática em Técnica de Drenagem Compensatória. 2014. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Urbana, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2014.

SLIMENE, E. B. et al. Modeling Water Infiltration and Solute Transfer in a Heterogeneous Vadose Zone as a Function of Entering Flow Rates. *Journal Of Water Resource And Protection*, [s.l.], v. 07, n. 13, p.1017-1028, 2015. Scientific Research Publishing, Inc., <http://dx.doi.org/10.4236/jwarp.2015.713083>.

ŠIMŮNEK, J., D. L.; SUAREZ; ŠEJNA, M. The UNSATCHEM software package for simulating one-dimensional variably saturated water flow, heat transport, carbon dioxide production and transport, and multicomponent solute transport with major ion equilibrium and kinetic chemistry, Version 2.0, **Research Report** No. 141, U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, California, 186p., 1996.

ŠIMŮNEK, J., M. Th; van GENUCHTEN; ŠEJNA, M. **The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media.** Version 3.0, HYDRUS Software Series 1, Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, CA, 270 p, 2005.

ŠIMŮNEK, J.; ŠEJNA, M.; SAITO, M.H.; SAKAI, M.; Van GENUCHTEN, M. Th. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. Version 4.08. Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, USA, p.332, 2009.

SOLONE, R. et al. Errors in water retention curves determined with pressure plates: Effects on the soil water balance. **Journal Of Hydrology**, [s.l.], v. 470-471, p.65-74, nov. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.08.017>.

SWARBRICK, G. E., 1995. "Measurement of soil suction the filter paper method". **Unsaturated Soils**, Vol 2, 653 – 658.

TAN, Xuezhi; SHAO, Dongguo; LIU, Huanhuan. Simulating soil water regime in lowland paddy fields under different water managements using HYDRUS-1D. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v. 132, p.69-78, jan. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2013.10.009>.

TAN, Xuezhi et al. Field analysis of water and nitrogen fate in lowland paddy fields under different water managements using HYDRUS-1D. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v. 150, p.67-80, mar. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2014.12.005>.

TAVARES, Maria Hermínia Ferreira; FELICIANO, José Jeremias da Silva; VAZ, Carlos Manoel Pedro. ANÁLISE COMPARATIVA DE MENG, Yingying et al. Modelling Hydrology of a Single Bioretention System with HYDRUS-1D. **The Scientific World Journal**, [s.l.], v. 2014, p.1-10, 2014. Hindawi Limited. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/521047>.

TAFTEH, Arash; SEPASKHAH, Ali Reza. Application of HYDRUS-1D model for simulating water and nitrate leaching from continuous and alternate furrow irrigated rapeseed and maize fields. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v. 113, p.19-29, out. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2012.06.011>.

TOMMASELLI, José Tadeu Garcia; BACCHI, Osny Oliveira Santos. Calibração de um equipamento de TDR para medida de umidade de solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s.l.], v. 36, n. 9, p.1145-1154, set. 2001. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2001000900008>.

TORIDE, N.; LEIJ, F.J.; van GENUCHTEN. **The CXTFIT Code for Estimating Transport Parameters from Laboratory or Field Tracer Experiments, Version 2.0**. USA Salinity Laboratory, Riverside. 1995.

TURCO, Michele et al. Unsaturated hydraulic behaviour of a permeable pavement: Laboratory investigation and numerical analysis by using the HYDRUS-2D model. **Journal Of Hydrology**, [s.l.], v. 554, p.780-791, nov. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.10.005>.

URBONAS, Ben; STAHR, Peter. **Stormwater: best management practices and detention for water quality, drainage, and CSO management**. New Jersey: Englewood Cliffs, 1993. 449 p.

VAN DAM, J. C.; STRICKER, J. N. M.; DROOGERS, P.. Inverse Method to Determine Soil Hydraulic Functions from Multistep Outflow Experiments. **Soil Science Society of America Journal**, [s.l.], v. 58, n.

3, p.647-652, 1994. Soil Science Society of America. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800030002x>.

VAN LIEW, Michael W. et al. Suitability of SWAT for the Conservation Effects Assessment Project: Comparison on USDA Agricultural Research Service Watersheds. **Journal of Hydrologic Engineering**, [s.l.], v. 12, n. 2, p.173-189, mar. 2007. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)1084-0699\(2007\)12:2\(173\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)1084-0699(2007)12:2(173)).

VANDERBORGHT, J. et al. A Set of Analytical Benchmarks to Test Numerical Models of Flow and Transport in Soils. **Vadose Zone Journal**, [s.l.], v. 4, n. 1, p.206-221, 1 fev. 2005. Soil Science Society of America. <http://dx.doi.org/10.2113/4.1.206>.

VANCLOOSTER, M.; VIANE, P.; Diels, J.; CHRISTIAENS, K. WAVE: A mathematical model for simulating water and agrochemicals in the soil and vadose environment. Reference and User's Manual (release 2.0). Louvain-la-Neuve: Universite Catholique de Louvain; Institute for Land and Water Management, 1994. 145p.

van GENUCHTEN, M. Th.. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils¹. **Soil Science Society Of America Journal**, [s.l.], v. 44, n. 5, p.892-898, 1980. Soil Science Society of America. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>.

van Genuchten, M. Th., Non-equilibrium transport parameters from miscible displacement experiments. **Research Report**, n. 119, U.S. Salinity Laboratory, Riverside, CA, 1981.

van GENUCHTEN, M. T.; LEIJ, F. J.; YATES, S. R. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. Riverside: USDA, U.S. Salinity Laboratory, 1991. 93p.

van Genuchten, M.T., Šimůnek, J. Unsaturated-Zone modeling; Progress, Challenges and applications, Wageningen UR frontis series. **In:** Feddes, R.A., de Rooij, G.H., van Dam, J.C. (Eds.). Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, p 39-69, 2004.

VERBIST, K.m.j. et al. Parameterizing a Coupled Surface–Subsurface Three-Dimensional Soil Hydrological Model to Evaluate the Efficiency

of a Runoff Water Harvesting Technique. **Vadose Zone Journal**, [s.l.], v. 11, n. 4, p.1-17, 2012. Soil Science Society of America. <http://dx.doi.org/10.2136/vzj2011.0141>.

VIEIRA, M. L. **Propriedades físico-hídrico-mecânicas do solo e rendimento de milho submetido a diferentes sistemas de manejo**. 2006. 115 p Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2006.

VILLANUEVA, Adolfo et al. Gestão da drenagem urbana, da formulação à implementação. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, [s.l.], v. 8, n. 1, p.5-18, 2011. Associação Brasileira de Recursos Hídricos - ABRH. <http://dx.doi.org/10.21168/rega.v8n1.p5-18>.

VILAR, O.M. **Resistência ao Cisalhamento (Apostila)**. Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 2002.

VIRDI, Makhan. Time Scale of Groundwater Recharge: **A Generalized Modeling Technique**. 2013. 98 f. Tese (Doutorado) - Curso de College Of Engineering, Department Of Civil And Environmental Engineering, University Of South Florida, Tampa, 2013.

VOGEL, Tomas; CISLEROVA, Milena. On the reliability of unsaturated hydraulic conductivity calculated from the moisture retention curve. **Transport In Porous Media**, [s.l.], v. 3, n. 1, p.1-15, fev. 1988. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/bf00222683>.

ZAVATTARO, Laura; GRIGNANI, Carlo. Deriving Hydrological Parameters for Modeling Water Flow under Field Conditions. **Soil Science Society Of America Journal**, [s.l.], v. 65, n. 3, p.655-667, 2001. Soil Science Society of America. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2001.653655x>.

ZENG, W. et al. Soil salt leaching under different irrigation regimes: HYDRUS-1D modelling and analysis. **Journal Of Arid Land**, [s.l.], v. 6, n. 1, p.44-58, 1 jun. 2013. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s40333-013-0176-9>.

ZNIDARCIC, D.; ILLANGASEKARE, T. & MANNA, M. Laboratory Testing and Parameter Estimation for Two-Phase Flow Problems. **ASCE Geotechnical Special Public**, 1991, 1089-1099.