

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**MODELAGEM DE TELHADO VERDE: UMA ANÁLISE
DA EFICIÊNCIA NO CONTROLE DO ESCOAMENTO
PLUVIAL EM DIFERENTES ESCALAS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Francisco Lorenzini Neto

Santa Maria, RS, Brasil

2014

**MODELAGEM DE TELHADO VERDE: UMA ANÁLISE DA
EFICIÊNCIA NO CONTROLE DO ESCOAMENTO PLUVIAL
EM DIFERENTES ESCALAS**

Francisco Lorenzini Neto

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Civil.**

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Rutinéia Tassi

Santa Maria, RS, Brasil

2014

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Lorenzini Neto, Francisco
MODELAGEM DE TELHADO VERDE: UMA ANÁLISE DA EFICIÊNCIA
NO CONTROLE DO ESCOAMENTO PLUVIAL EM DIFERENTES ESCALAS
/ Francisco Lorenzini Neto.-2014.
135 p.; 30cm

Orientador: Rutinéia Tassi
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, RS, 2014

1. Telhado Verde 2. Modelagem Hidrológica 3. Drenagem
Urbana I. Tassi, Rutinéia II. Título.

© 2014

Todos os direitos autorais reservados a Francisco Lorenzini Neto. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: f.lorenzini@gmail.com

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**MODELAGEM DE TELHADO VERDE: UMA ANÁLISE DA EFICIÊNCIA
NO CONTROLE DO ESCOAMENTO PLUVIAL EM DIFERENTES
ESCALAS**

elaborada por
Francisco Lorenzini Neto

como requisito parcial para obtenção de grau de
Mestre em Engenharia Civil

COMISSÃO EXAMINADORA:

Rutinéia Tassi, Dr.^a
(Presidente/Orientadora)

Rodrigo Braga Moruzzi, Dr. (UNESP)

Débora Missio Bayer, Dr.^a (UFSM)

Santa Maria, 22 de agosto de 2014.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por sempre iluminar e guiar o meu caminho;

À professora Rutinéia Tassi, pela orientação, amizade e oportunidade de aumentar os meus conhecimentos e crescer profissionalmente;

Aos meus pais, Hermes e Liselene, pelo suporte desde os meus primeiros passos, pelo carinho e exemplos de humildade, integridade, dignidade e determinação, que me serviram de base para que a realização deste sonho fosse possível;

Aos meus irmãos, Gabriela e Marcelo, pela amizade e apoio incondicional ao longo destes anos, me dando conselhos e críticas, e por me guiarem nas horas mais difíceis;

Aos meus avós, Célio e Loni, pelo incentivo e exemplo de dedicação e companheirismo;

À minha namorada, Stefany, pelo carinho, cumplicidade e palavras de incentivo nestes últimos meses. Obrigado por estar ao meu lado, você foi fundamental para que eu findasse este projeto;

Aos meus amigos de longa data e aos que fiz durante o mestrado, com os quais sempre pude contar nas horas difíceis. Caberia citar um por um, mas não haveria espaço. Obrigado pela amizade, sem vocês não chegaria até aqui;

Ao meu amigo e colega de profissão, Geraldo, a quem sou muito grato pelos conselhos, desde o meu estágio curricular, a seguir na vida acadêmica. A todos que, de alguma maneira, ajudaram no desenvolvimento desta pesquisa, em especial ao meu amigo Raviel, pela ajuda na construção do experimento;

Aos demais professores do PPGEC, pelo comprometimento para um ensino de qualidade e pelos conhecimentos transmitidos a mim ao longo do curso de mestrado;

À funcionária do PPGEC, Marília, pela disposição em ajudar em todos os momentos em que precisei;

À Universidade Federal de Santa Maria pela estrutura acadêmica e oportunidade de poder aumentar os meus conhecimentos, e a CAPES, pelo auxílio com a bolsa de estudo.

Muito obrigado a todos!!!

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Universidade Federal de Santa Maria

MODELAGEM DE TELHADO VERDE: UMA ANÁLISE DA EFICIÊNCIA NO CONTROLE DO ESCOAMENTO PLUVIAL EM DIFERENTES ESCALAS

AUTOR: FRANCISCO LORENZINI NETO
ORIENTADORA: RUTINÉIA TASSI

Data e Local de Defesa: Santa Maria, 22 de Agosto de 2014.

Os telhados verdes (TVs) têm como uma das suas principais vantagens a retenção de águas pluviais. Para avaliar essa característica em diferentes escalas espaciais, e frente a eventos ainda não monitorados, é imprescindível o uso de modelagem hidrológica. No Brasil, os estudos relacionados à modelagem hidrológica de TVs são incipientes. Portanto, esta pesquisa teve como principal objetivo analisar a eficiência de TVs no controle do escoamento pluvial em diferentes escalas espaciais, a partir de simulações de uma bacia hidrográfica urbana, onde telhados convencionais foram substituídos por TVs. Para isso, foram realizados os seguintes procedimentos: monitoramento de eventos de chuva-vazão de um TV experimental; calibração do volume de chuva efetiva do TV pelo método do CN-SCS modificado; desenvolvimento de um modelo hidrológico do tipo chuva-vazão para o TV; dimensionamento de um sistema de redes de microdrenagem para a bacia simulada sem os TVs utilizando chuvas de projeto; simulação da bacia com uso de TVs para verificar o impacto na redução das vazões de pico e volumes propagados nas redes de drenagem frente a chuvas observadas. O CN médio calibrado para o TV resultou em 83, ficando dentro das expectativas quando comparado com valores encontrados por outros autores para TV com características semelhantes. Nessa calibração também foi possível observar que, em média, o TV reteve 45% do volume de cada evento de chuva. No desenvolvimento do modelo de TV, inicialmente foi calibrada a propagação do escoamento superficial com o uso de modelos conhecidos no meio hidrológico: de onda cinemática (OC) e o hidrograma unitário sintético do SCS (HU-SCS). Como nenhum desses modelos produziu resultados satisfatórios, foi desenvolvido um modelo de propagação baseado na metodologia do HU-SCS, chamado de hidrograma unitário sintético de TV modular (HUS-TVM), sugerindo-se alterações em alguns dos seus parâmetros. O HUS-TVM produziu resultados satisfatórios, com o coeficiente Nash-Sutcliffe resultando em 0,86, substancialmente maior que o obtido com os modelos de OC e HU-SCS (0,67). Com relação à redução das vazões de pico nas redes de microdrenagem, a introdução de TVs nos lotes possibilitou reduzir um diâmetro comercial em 33 e 52% dos trechos das redes de drenagem, para sistemas dimensionados para chuvas de projeto com 5 e 10 anos de período de recorrência, respectivamente. As reduções foram possíveis em diferentes escalas, tanto em trechos de início de rede, com poucos quarteirões contribuintes, como os de final de rede, com vários quarteirões contribuintes. Ainda, verificou-se o efeito do TV nas diferentes escalas analisadas, sendo que sua eficiência foi mais pronunciada em menor escala (em média, as reduções de volume e vazão de pico no lote foram de 48 e 57%, respectivamente), do que em escala de quarteirão(ões), onde essas reduções foram de 32 e 38%. Constatou-se, também, que as maiores reduções ocorreram nos eventos de menor volume de chuva. Portanto, o trabalho permitiu concluir que a efetividade do TV na redução do escoamento pluvial diminui à medida que se aumenta a escala utilizada, e quanto maior é o volume e intensidade da chuva.

Palavras-chave: Telhado Verde, Modelagem Hidrológica, Drenagem Urbana.

ABSTRACT

Master's Dissertation
Post-Graduation Program in Civil Engineering
Universidade Federal de Santa Maria

GREEN ROOF MODELLING: AN ANALYSIS OF THE EFFICIENCY IN THE STORMWATER RUNOFF CONTROL AT DIFFERENT SCALES

AUTHOR: FRANCISCO LORENZINI NETO

ADVISOR: RUTINÉIA TASSI

Defense Date and Place: Santa Maria, August 22th, 2014.

Green roofs (GRs) have as one of its principal advantages the stormwater retention. To evaluate this quality at different spatial scales, and face to not observed events, hydrological modelling is required. In Brazil, studies related to the hydrological modelling of GRs are incipient. Thus, this research had as main objective the analysis of the efficiency of GRs in the stormwater runoff control at different spatial scales, simulating an urban watershed, where conventional roofs were replaced by GRs. To reach this objective were accomplished the following processes: monitoring of rainfall-runoff events of an experimental GR; calibration of the GR effective rainfall volume by the modified SCS-CN method; development of a rainfall-runoff hydrological model for the GR; design of a micro drainage networks system simulating the watershed without GRs and using design storms; simulation of the watershed with the implementation of GRs to evaluate the impact on the reduction of peak flows and volumes propagated into the drainage networks face to observed rainfalls. Calibrated average CN resulted in 83, staying within the expectations when compared to values found by other authors for GR with similar characteristics. In this calibration was also possible to notice the GR retained in average 45% of each rainfall event volume. In the development of the GR model, initially was calibrated the runoff propagation using models known in the hydrological field: kinematic wave (KW) and the synthetic unit hydrograph of the SCS (SCS-UH). None of these models produced satisfactory results, then was developed a propagation model based in the SCS-UH method, which was called synthetic unit hydrograph of modular GR (MGR-SUH), proposing changes in some of its parameters. MGR-SUH produced satisfactory results, with the Nash-Sutcliffe coefficient resulting in 0,86, which was substantially bigger than the values obtained using the KW and SCS-UH models (0,67). Related to the reduction of peak flow in the micro drainage networks, the implementation of GR in the plots allowed to reduce one commercial diameter in 33 and 52% of the drainage networks stretches, for systems designed to 5 and 10-year return period design rainfall, respectively. Reductions were possible at different scales, both in stretches located at beginning of network, with few blocks contributing, and stretches located at end of network, with several blocks contributing. Besides, it was evaluated the GR effect at the different analyzed scales, with bigger efficiency at small scale (in average, the volume and peak flow reductions at the plot scale were 48 and 57%, respectively), than at block(s) scale, where these reductions were 32 and 38%. Also was found that the biggest reductions happened in events of smallest rainfall volume. Thus, this research allowed to conclude that the effectiveness of the GR in the stormwater runoff control decreases as the scale used increases, and also as increases the volume and intensity of the rainfall.

Key-words: Green Roof, Hydrological Modelling, Urban Drainage.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Exemplo de um telhado verde.....	28
Figura 2 -	Telhado verde no prédio Rockefeller Center.	29
Figura 3 -	Esquema das camadas de um telhado verde.	31
Figura 4 -	Telhado verde extensivo em um prédio da Gerdau.....	33
Figura 5 -	Tipos de sistemas de telhados verde extensivos.	34
Figura 6 -	Telhado verde intensivo no Sydney Conservatorium of Music.	35
Figura 7 -	Antiga localização da estrutura em relação ao pórtico da UFSM.	54
Figura 8 -	Atual localização da estrutura em relação ao pórtico da UFSM.	54
Figura 9 -	Vista superior do telhado verde.....	55
Figura 10 -	Esquema transversal do sistema galocha.	56
Figura 11 -	Vista superior do sistema galocha.....	56
Figura 12 -	Espécies de plantas utilizadas na implantação do primeiro TV.....	57
Figura 13 -	Espécies de plantas utilizadas na implantação do primeiro TV.....	58
Figura 14 -	Espécies de plantas utilizadas na implantação do segundo TV.	58
Figura 15 -	Equipamentos utilizados no monitoramento do TV.	60
Figura 16 -	Bacia hidrográfica do Arroio Areia, Porto Alegre – RS.....	65
Figura 17 -	Lote padrão simulado.	66
Figura 18 -	Representação da conexão do lote com sistema de drenagem e planos de escoamento.....	67
Figura 19 -	Seção transversal de ruas e passeios públicos representados.....	68
Figura 20 -	Esquema da composição da rede.	68
Figura 21 -	Configuração da bacia simulada.	69
Figura 22 -	Calibração do evento 20 (28/07/2011) pelos modelos de OC e HU-SCS.....	84
Figura 23 -	Calibração do evento 22 (09/08/2011) pelos modelos de OC e HU-SCS.....	85
Figura 24 -	Calibração do evento 24 (31/08/2011) pelos modelos de OC e HU-SCS.....	85
Figura 25 -	Calibração do evento 33 (16/01/2012) pelos modelos de OC e HU-SCS.....	86

Figura 26 -	Calibração do evento 34 (30/01/2012) pelos modelos de OC e HU-SCS.	86
Figura 27 -	Calibração do evento 35 (06/02/2012) pelos modelos de OC e HU-SCS.	87
Figura 28 -	Calibração do evento 20 (28/07/2011) pelos modelos HU-SCS e HUS-TVM.	89
Figura 29 -	Calibração do evento 22 (09/08/2011) pelos modelos HU-SCS e HUS-TVM.	90
Figura 30 -	Calibração do evento 24 (31/08/2011) pelos modelos HU-SCS e HUS-TVM.	90
Figura 31 -	Calibração do evento 33 (16/01/2012) pelos modelos HU-SCS e HUS-TVM.	91
Figura 32 -	Calibração do evento 34 (30/01/2012) pelos modelos HU-SCS e HUS-TVM.	91
Figura 33 -	Calibração do evento 35 (06/02/2012) pelos modelos HU-SCS e HUS-TVM.	92
Figura 34 -	Relação entre o volume de chuva e a redução dos volumes e vazões de pico no lote e em 1 quarteirão.....	106
Figura 35 -	Hidrogramas simulados para o trecho 1SEG2 (lote) do evento 20... 108	
Figura 36 -	Hidrogramas simulados para o trecho 41MI1 (1 quarteirão) do evento 20.....	108
Figura 37 -	Hidrogramas simulados para o trecho 1SEG2 (lote) do evento 22... 131	
Figura 38 -	Hidrogramas simulados para o trecho 41MI1 (1 quarteirão) do evento 22.....	131
Figura 39 -	Hidrogramas simulados para o trecho 1SEG2 (lote) do evento 24... 132	
Figura 40 -	Hidrogramas simulados para o trecho 41MI1 (1 quarteirão) do evento 24.....	132
Figura 41 -	Hidrogramas simulados para o trecho 1SEG2 (lote) do evento 33... 133	
Figura 42 -	Hidrogramas simulados para o trecho 41MI1 (1 quarteirão) do evento 33.....	133
Figura 43 -	Hidrogramas simulados para o trecho 1SEG2 (lote) do evento 34... 134	
Figura 44 -	Hidrogramas simulados para o trecho 41MI1 (1 quarteirão) do evento 34.....	134
Figura 45 -	Hidrogramas simulados para o trecho 1SEG2 (lote) do evento 35... 135	

Figura 46 - Hidrogramas simulados para o trecho 41MI1 (1 quarteirão) do evento 35.	135
---	-----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Declividade das superfícies.....	66
Tabela 2 -	Características das sub-bacias.	70
Tabela 3 -	Identificação dos trechos por sub-bacias e respectivo número de quarteirões e lotes contribuintes.....	71
Tabela 4 -	CNs utilizados.	73
Tabela 5 -	Eventos monitorados e sua utilização em cada metodologia.	78
Tabela 6 -	Valores de CN estimados e estatísticas para os eventos monitorados	80
Tabela 7 -	Erro de volumes dos hidrogramas observados em relação aos simulados pelos modelos de OC e HU-SCS.	83
Tabela 8 -	Valores calculados para o coeficiente Nash-Sutcliffe para os modelos de OC e HU-SCS.	84
Tabela 9 -	Parâmetros utilizados para a definição do HU-SCS e do HUS-TVM...	89
Tabela 10 -	Erro de volumes dos hidrogramas observados em relação aos simulados pelos modelos de OC, HU-SCS e HUS-TVM.	92
Tabela 11 -	Valores encontrados para o coeficiente Nash-Sutcliffe para os modelos de OC, HU-SCS e HUS-TVM.	93
Tabela 12 -	Exemplos de trechos que tiveram seu diâmetro aumentado.....	98
Tabela 13 -	Eventos de chuva observados utilizados nas simulações.	100
Tabela 14 -	Áreas de contribuição dos trechos analisados.	101
Tabela 15 -	Reduções dos volumes e vazões de pico em cada trecho para o evento 20.....	102
Tabela 16 -	Reduções dos volumes e vazões de pico em cada trecho para o evento 22.....	102
Tabela 17 -	Reduções dos volumes e vazões de pico em cada trecho para o evento 24.....	103
Tabela 18 -	Reduções dos volumes e vazões de pico em cada trecho para o evento 33.....	103
Tabela 19 -	Reduções dos volumes e vazões de pico em cada trecho para o evento 34.....	104

Tabela 20 - Reduções dos volumes e vazões de pico em cada trecho para o evento 35.....	104
Tabela 21 - Reduções dos volumes e vazões de pico em cada trecho para o evento CP-TR5.....	105
Tabela 22 - Reduções médias dos volumes e vazões de pico em cada trecho para todos os eventos.....	107

LISTA DE ABREVIações

- AMC – *Antecedent Moisture Condition*
- BMP – *Best Management Practices*
- CN-SCS – Curva-Número do SCS
- CP-TR5 – Chuva de projeto com período de retorno de 5 anos
- CP-TR10 – Chuva de projeto com período de retorno de 10 anos
- EVA – espuma vinílica acetinada
- HU-SCS – Hidrograma unitário sintético do SCS
- HUS-TVM – Hidrograma unitário sintético do telhado verde modular
- Ia – Abstrações iniciais
- IC – Intervalo de confiança
- ILLUDAS – *Illinois Drainage Simulator*
- IUHM – *Illinois Urban Hydrologic Model*
- LEED - *Leadership in Energy and Environmental Design*
- LID – *Low Impact Development*
- OC – Onda cinemática
- PAC – Programa de Aceleração do Crescimento
- Qp – Vazão de pico
- S – Capacidade máxima de armazenamento de água no solo
- SUDS – *Sustainable Urban Drainage Systems*
- SWMM – *Storm Water Management Model*
- TC – Telhado convencional
- tp – Tempo de pico
- tr – Tempo de recessão
- TV – Telhado verde
- TVM – Telhado verde modular
- UFMS – Universidade Federal de Santa Maria
- VR-WRM – *Vegetated Roof Water Balance Model*
- WSUD – *Water Sensitive Urban Design*

LISTA DE APÊNDICES

Apêndice A - Diâmetros (em metros) dos trechos das redes de microdrenagem calculados com a utilização de telhado convencional (TC) e telhado verde (TV) nos lotes para as chuvas de projeto com período de retorno de 5 (CP-TR5) e 10 anos (CP-TR10).	121
Apêndice B - Número de quarteirões contribuintes para cada trecho dos 70 km das redes de microdrenagem.....	129
Apêndice C - Hidrogramas simulados dos trechos 1SEG2 e 41MI1, correspondentes às vazões escoadas no lote e 1 quarteirão, respectivamente, para os eventos 22, 24, 33, 34 e 35 com a utilização de TC e TV nos lotes..	131

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	23
1.1	Justificativa	23
1.2	Objetivos	25
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2.1	Um histórico sobre telhados verdes	27
2.2	O que é um telhado verde	30
2.2.1	Tipos de telhados verdes	32
2.2.1.1	Extensivos.....	32
2.2.1.2	Intensivos.....	34
2.2.2	Vegetação	36
2.2.3	Substrato.....	39
2.2.4	Sistema de filtragem e drenagem	40
2.3	A importância dos telhados verdes na gestão das águas pluviais.....	42
2.4	Modelagem hidrológica de telhado verde.....	46
2.4.1	Histórico da modelagem de telhado verde	47
2.4.2	Tipos de modelos de telhado verde	47
2.4.3	Percepções a respeito do comportamento dos TVs modelados	51
3	MATERIAIS E MÉTODOS	53
3.1	Monitoramento do telhado verde experimental.....	53
3.1.1	Localização do telhado verde experimental	53
3.1.2	Descrição do telhado verde experimental	55
3.1.3	Monitoramento	59
3.2	Calibração do volume de chuva efetiva	61
3.3	Desenvolvimento de modelo hidrológico chuva-vazão para o telhado verde ..	63
3.4	Análise da eficiência de telhados verdes no controle do escoamento pluvial em diferentes escalas espaciais.....	64
3.4.1	Sistema simulado	64
3.4.2	Modelo hidrológico-hidráulico.....	72
3.4.3	Dimensionamento das redes de microdrenagem	74
3.4.4	Redimensionamento das redes de microdrenagem	75

3.4.5	Análise da eficiência dos telhados verdes na redução de vazões e volumes escoados frente a eventos observados	76
4	RESULTADOS – CALIBRAÇÃO DE EVENTOS E DESENVOLVIMENTO DE MODELO HIDROLÓGICO CHUVA-VAZÃO PARA O TELHADO VERDE	77
4.1	Monitoramento	77
4.2	Calibração do volume de chuva efetiva	79
4.3	Propagação do escoamento superficial	81
4.3.1	Modelo da onda cinemática	82
4.3.2	Modelo do hidrograma unitário sintético do SCS.....	83
4.3.3	Hidrograma unitário sintético proposto para o telhado verde	88
4.4	Conclusões e recomendações.....	93
5	RESULTADOS – ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE TELHADOS VERDES NO CONTROLE DO ESCOAMENTO PLUVIAL EM DIFERENTES ESCALAS.....	97
5.1	Dimensionamento das redes de microdrenagem.....	97
5.2	Redimensionamento das redes de microdrenagem.....	98
5.3	Efeito de TVs na redução de vazões frente a eventos de chuva observados.	99
5.4	Conclusões e recomendações.....	109
6	CONCLUSÃO GERAL	111
	REFERÊNCIAS	113
	APÊNDICES	121

1 INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa

Nas últimas décadas, o aumento desenfreado e sem planejamento da urbanização em diversas cidades brasileiras vem trazendo problemas aos sistemas de drenagem, a ponto desses perderem a sua eficiência.

A perda de áreas verdes, resultado da impermeabilização, altera o regime natural do escoamento nas bacias hidrográficas, aumentando as vazões de pico e os volumes escoados superficialmente.

No Brasil, para a mitigação desses problemas, são utilizadas técnicas higienistas para a drenagem de águas pluviais. Essas técnicas foram inicialmente empregadas no século XIX na Europa, com o objetivo de evacuar rapidamente as águas pluviais das áreas urbanas, utilizando condutos subterrâneos que funcionam por gravidade, o que era necessário, pois o continente era assolado por grandes epidemias de cólera e tifo, doenças de veiculação hídrica (BAPTISTA, NASCIMENTO e BARRAUD, 2011).

Essas técnicas foram praticadas em larga escala no Mundo Ocidental. O primeiro sistema de drenagem “moderno” foi empregado em Hamburgo, na Alemanha, em 1843 (CHOCAT, 1997). No Brasil, elas foram adotadas efetivamente a partir da proclamação da República (SILVEIRA, 1998).

As técnicas higienistas ainda são adotadas mundialmente por causa da sua eficiência hidráulica. Todavia, com o grande aumento da urbanização a partir da segunda metade do século XX, pôde-se observar problemas decorrentes dessas técnicas, como a transferência dos problemas de inundação para a jusante, resultando em novas ampliações das redes e galerias de drenagem pluvial, tornando o sistema ainda mais oneroso (TUCCI e ORSINI, 2005).

Além disso, começaram a surgir também problemas referentes à qualidade da água. No Brasil são comuns os problemas de mau funcionamento dos sistemas de drenagem provenientes da deposição de sedimentos, que derivam dos processos erosivos intensificados pela urbanização e/ou por deficiências no sistema de limpeza urbana (BAPTISTA, NASCIMENTO e BARRAUD, 2011).

A partir dos anos 1970, foram desenvolvidas outras técnicas para tratar o problema, principalmente na Europa e América do Norte. Essas técnicas, chamadas compensatórias, ou “*Best Management Practices*” (BMP), objetivam controlar os efeitos da urbanização sobre os processos hidrológicos a partir do armazenamento e infiltração das águas pluviais em escala de bacia (BAPTISTA, NASCIMENTO e BARRAUD, 2011).

Na década passada, algumas poucas cidades brasileiras começaram a adotar essas medidas, com a utilização de dispositivos como reservatórios de detenção e retenção. Exemplos de cidades que utilizam esse tipo de medida são Porto Alegre e São Paulo, entre outras (SOUZA, CRUZ e TUCCI, 2012).

Entretanto, essas práticas têm alguns aspectos negativos, como limitações físicas, degradação da qualidade das águas pluviais – através do carreamento de poluentes de resíduos sólidos, de sedimentos, além de óleos e metais pesados – e aumento nos custos dos sistemas de drenagem.

Em consequência disso, novas abordagens têm sido estudadas e adotadas, destacando-se os conceitos “*Sustainable Urban Drainage Systems*” (SUDS), no Reino Unido, “*Water Sensitive Urban Design*” (WSUD), na Austrália e “*Low Impact Development*” (LID), na América do Norte (URRUTIAGUER, EDWARDS e CHANDLER, 2010).

Especificamente com relação às LIDs, que são medidas de desenvolvimento urbano de baixo impacto, os efeitos pretendidos são a infiltração, a evapotranspiração e a “filtragem” da água pluvial em escala de lote, melhorando o controle quali-quantitativo dessa. Entre os dispositivos que podem ser empregados no conceito de LID, destacam-se os telhados verdes, pavimentos permeáveis, coletores de água pluvial e trincheiras de infiltração. Essas medidas já são utilizadas na Europa, EUA e Canadá.

Os telhados verdes, foco deste estudo, são utilizados há mais de 30 anos na Alemanha (CARTER e BUTLER, 2008). No Brasil, a aplicação de telhados verdes nas edificações ainda é pouco estudada, embora a utilização de técnicas que empregam o conceito de LID ser estimulada pelo Ministério das Cidades através do PAC (Programa de Aceleração do Crescimento) Drenagem e do programa “Drenagem Urbana Sustentável” (BRASIL, 2006).

Uma das principais vantagens dos telhados verdes com relação ao sistema de drenagem é a sua capacidade de retenção de águas pluviais. Uma maneira de avaliar

a eficácia desta característica é mediante a implantação de uma estrutura com telhado verde, e seu monitoramento em longo período. Quando não são encontrados dados de longo período, como no Brasil, um recurso utilizado é o monitoramento do telhado verde por um período de tempo menor, e a calibração de parâmetros de algum tipo de modelo matemático que possa ser utilizado para avaliar o desempenho da estrutura frente a eventos não monitorados mediante simulação. Além disso, a modelagem permite analisar o desempenho de telhados verdes em diferentes escalas espaciais, desde uma pequena edificação com telhado verde até um conjunto de telhados verdes distribuídos em uma grande bacia hidrográfica urbana.

Verifica-se que no Brasil os estudos relacionados à modelagem hidrológica de telhados verdes são incipientes, sendo que os poucos trabalhos existentes estão relacionados ao entendimento do comportamento de um telhado verde atuando no controle do escoamento pluvial de maneira isolada. Assim, neste trabalho foi desenvolvida uma sequência de atividades que incluíram o monitoramento, a calibração e a validação de um modelo de telhado verde, utilizado para avaliar como a implantação de telhados verdes pode impactar as respostas hidrológicas de uma bacia hidrográfica em diferentes escalas de análise.

1.2 Objetivos

Esta pesquisa teve como objetivo analisar a eficiência de telhados verdes no controle do escoamento pluvial em diferentes escalas espaciais, a partir de simulações de um sistema hidrográfico urbano, onde os telhados convencionais foram substituídos por telhados verdes.

De forma mais específica, objetivou-se:

- a) monitorar eventos de chuva-vazão de um telhado verde;
- b) calibrar o volume de chuva efetiva do telhado verde;
- c) desenvolver um modelo hidrológico do tipo chuva-vazão para o telhado verde;
- d) realizar simulações do sistema com chuvas de projeto, com e sem o uso de telhado verde nos lotes, identificando o impacto no dimensionamento das redes de microdrenagem;

- e) realizar simulações do sistema com chuvas observadas, com e sem o uso de telhado verde nos lotes, objetivando identificar o impacto nas redes de microdrenagem previamente dimensionadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Um histórico sobre telhados verdes

Embora a utilização de telhados verdes (TVs) não seja um conceito difundido mundialmente, ele não representa uma inovação. Na antiguidade, esse tipo de cobertura já era utilizado como jardins de telhado, sendo que os relatos mais antigos sobre esses são os Jardins Suspensos da Babilônia no século VI A.C., considerados uma das sete maravilhas do mundo antigo (TOMAZ, 2005; GETTER e ROWE, 2006).

Na antiga Mesopotâmia, região que hoje corresponde ao Iraque e Kuwait, os sumérios, babilônicos e assírios utilizaram diferentes espécies vegetais para revestir os terraços dos Zigurates, seus templos religiosos (OSMUNDSON, 1999).

Há relatos de que durante a idade média e o renascimento, esse tipo de telhado era principalmente utilizado pelos ricos, embora os monges Beneditinos fizessem uso deles (GETER e ROWE, 2006).

Peck et al. (1999) descreve que em Pompéia, no império romano, um antigo historiador escreveu sobre árvores sendo importadas para TVs, e que também no renascimento, jardins em terraços íngremes e TVs eram comuns na cidade de Gênova.

No renascimento, e ainda nos séculos XVII e XVIII, o uso de trepadeiras e árvores era usual em coberturas de varandas e mausoléus na Itália, França, Espanha e também na Índia (OLIVEIRA, 2009).

Outros povos, como os Vikings, utilizavam camadas de grama nas paredes e telhados das casas com o objetivo de protegerem-se das chuvas e ventos (OSMUNDSON, 1999).

Os TVs fazem parte da história de várias outras regiões, como as ilhas britânicas e os Alpes suíços, que têm uma tradição centenária de telhados vegetados, os precursores dos sistemas modernos de TV (ROSENZWEIG, GAFFI e PARSHALL, 2006). Em outro caso, os primeiros colonos americanos das Grandes Planícies também usaram os TVs no final do século XIX por causa da escassez de madeira (OSMUNDSON, 1999).

Nos tempos contemporâneos, as coberturas verdes têm sido utilizadas há décadas na Europa, principalmente na Alemanha (USEPA, 2009; MENTENS, RAES e HERMY, 2003; ROSENZWEIG, GAFFI e PARSHALL, 2006; STOVIN, DUNNETT e HALLAM, 2007; UHL e SCHIEDT, 2008). Carter e Butler (2008) afirmam que o período de utilização desses telhados nesse país é superior a 30 anos.

Os alemães empregaram essa estrutura inicialmente para mitigar os efeitos nocivos da radiação solar sobre a estrutura do telhado (OBERNDORFER et al., 2007). Eles desenvolveram muitas pesquisas sobre TVs durante a década de 1980 e, de forma mais intensa durante a década de 1990 (MENTENS, RAES e HERMY, 2003). Na figura 1 está apresentado um exemplo dos TVs atualmente empregados na Alemanha, o qual está instalado no Theatro São Pedro, em Porto Alegre – RS.



Figura 1 - Exemplo de um telhado verde.

Fonte: Ecotelhado (2013).

Segundo Flubacher (2002) apud Rosenzweig, Gaffi e Parshall (2006), em 2001, 14% dos telhados planos de novas edificações alemãs eram de TVs, totalizando uma área de aproximadamente 13,5 milhões de metros quadrados. Em 2002, mais de 12% de todos os telhados planos neste país tinham algum tipo de vegetação no telhado (HARZMANN, 2002) e em 2008 esse percentual já era de aproximadamente 15% (HENEINE, 2008).

Vários autores afirmam que apesar dessa estrutura ser utilizada há bastante tempo na Alemanha, apenas há alguns anos essa tecnologia vem sendo aplicada em outros países, como na Suíça, Áustria (STOVIN, DUNNETT e HALLAM, 2007), EUA, Canadá (CARTER e RASMUSSEN, 2005) e Suécia (EMILSSON, 2008).

Nova Iorque nos EUA, além de o Rockefeller Center utilizar jardins de telhado há mais de 75 anos (Figura 2) (ROCKEFELLER CENTER, 2013), é uma das cidades em que mais cresce o número de TVs por ano no mundo. Uma das causas disso é o desconto que a cidade oferece no imposto urbano para quem faz uso do TV. Nessa cidade estão sendo desenvolvidos muitos estudos, pois cerca de 19% de sua área superficial é composta de telhados, tendo grande potencial de aplicação de TVs para mitigação de problemas como cheias e ilha de calor (ROSENZWEIG, GAFFI e PARSHALL, 2006).



Figura 2 - Telhado verde no prédio Rockefeller Center.

Fonte: Greenroofs.com (2013).

Os TVs são aplicados em diversos tipos de edificações, desde residenciais, até comerciais – como hotéis de alto nível e centros de negócios – e industriais (OBERNDORFER et al., 2007; CASTRO e GOLDENFUM, 2010).

Como resultado da utilização crescente de TVs nas edificações, verifica-se a criação de empresas especializadas nesse tipo de estrutura em países europeus, sendo que as primeiras companhias especializadas na criação e implantação de TVs

surgiram no fim da década de 1950, na Alemanha e na Suíça (HINMAN, 2005). A Noruega, Áustria e Inglaterra também contam com empresas especializadas (ARAÚJO, 2007).

No Brasil, foram encontrados poucos relatos antigos sobre a utilização de TVs, sendo o primeiro datado do ano de 1936, quando o arquiteto Roberto Burle Marx projetou um jardim sobre a cobertura da sala de exposições do prédio do Ministério de Educação e Cultura, no Rio de Janeiro (BARRA, 2006). Esse mesmo arquiteto implantou uma cobertura verde no topo do prédio do Banco Safra, em São Paulo (TOMAZ, 2005).

Atualmente verifica-se que mesmo de uma forma ainda tímida, o número de coberturas verdes vem crescendo no país. Em algumas cidades como Porto Alegre – RS, São Paulo – SP, Garopaba – SC e Rio de Janeiro – RJ, já é possível encontrar um grande número de TVs. Em 2011, foi instalado na cidade do Rio de Janeiro o primeiro TV em uma escola do país, no Colégio Estadual Erich Walter Heine (ECOTELHADO, 2013).

De acordo com o levantamento efetuado no decorrer deste estudo, verificou-se que no Brasil há poucas empresas atuando no ramo de TVs. Destacam-se a Ecotelhado, com sede em Porto Alegre – RS, e a Instituto Cidade Jardim, localizada em Itu – SP e Rio de Janeiro – RJ, ambas conhecidas como referência em infraestrutura verde urbana no país.

2.2 O que é um telhado verde

Existem várias definições para o conceito de TVs, porém todas os caracterizam como telhados ou coberturas que possuem sobre eles algum tipo de vegetação. Além dessa denominação, essas estruturas também são chamadas de telhados verdes vivos, telhados vivos, telhados vegetados, jardins de telhados e “ecotelhados”, entre outros.

Conforme Carter e Butler (2008), TVs são estruturas que convertem a superfície impermeável de um telhado em espaços multifuncionais em áreas urbanas, utilizando vegetação e materiais adequados para telhados especiais. Esses materiais geralmente formam várias camadas, com diferentes finalidades e, de

acordo com Castro e Goldenfum (2010), eles devem ser adequados para a aplicação da cobertura vegetal.

Normalmente os TVs consistem de uma camada de vegetação, uma de substrato e uma de drenagem (MENTENS, RAES e HERMY, 2006; EMILSSON, 2008). Além dessas camadas, também há uma camada de filtragem (TAYLOR, 2008) e uma membrana impermeável (LAZZARIN, CASTELLOTTI e BUSATO, 2005).

Na figura 3 há um esquema geral da estrutura de camadas do TV. Essas modificações em relação ao telhado convencional são feitas para suportar o crescimento da vegetação (KEEFE et al., 2008).

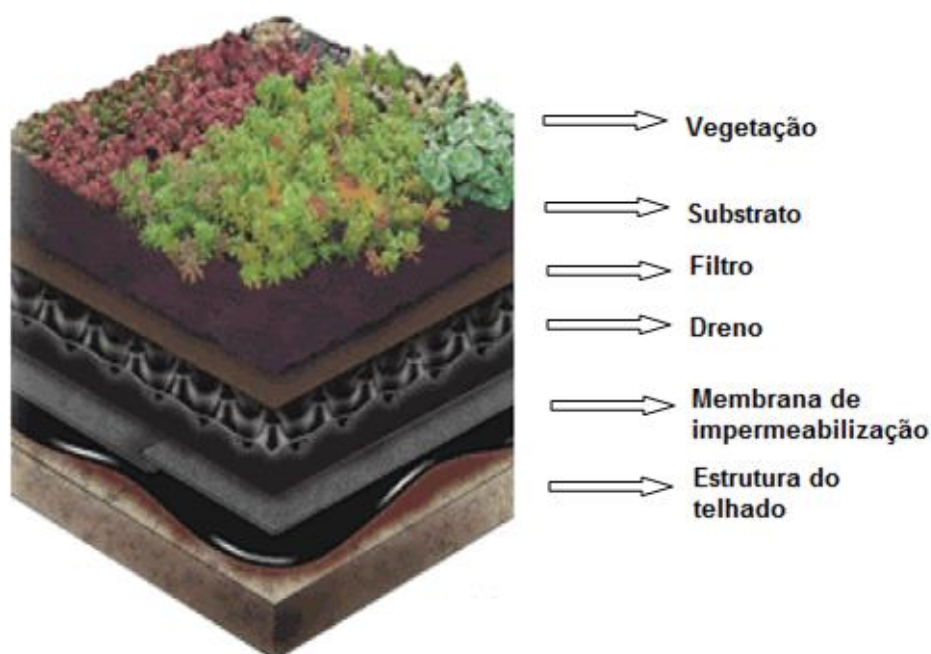


Figura 3 - Esquema das camadas de um telhado verde.

Fonte: Adaptado de Hathaway, Hunt e Jennings (2008).

De acordo com Mentens, Raes e Hermy (2003), cada uma das camadas da estratificação possui uma função específica:

- a) vegetação: maior potencial de retenção de água no substrato, ainda com funções de evapotranspiração e interceptação;
- b) substrato: fornece água e nutrientes para a vegetação. É onde, durante a chuva, a água pode ser temporariamente armazenada;

- c) filtragem: previne que partículas finas do substrato sejam transportadas para a drenagem, a qual perderia a sua eficiência;
- d) drenagem: é necessária em telhados com pouca declividade para que não aconteçam encharcamentos e estresse da cultura;
- e) impermeabilização: formada de uma membrana impermeável que evita o contato direto da água com a estrutura do telhado.

2.2.1 Tipos de telhados verdes

Os TVs podem ser classificados em intensivos e extensivos, embora algumas literaturas possam apresentar outras classificações¹. Mentens, Raes e Hermy (2006) afirmam que os dois principais tipos de TVs são usualmente caracterizados com base na profundidade da camada de substrato: os extensivos são pouco profundos, com espessura máxima do substrato de 15 cm, enquanto os intensivos possuem substrato superior a este valor, chegando até a 60 cm (PECK et al., 1999).

2.2.1.1 Extensivos

Os TVs extensivos (Figura 4) são uma modificação moderna do conceito jardim de telhado (OBERNDORFER et al., 2007). Nesse tipo de TV, a maior parte da vegetação é geralmente composta por espécies com maior resistência à seca, como o *Sedum*, para minimizar os custos e a manutenção, além de ervas, gramíneas e musgos (GETTER e ROWE, 2006).

¹ Os TVs podem ser classificados de acordo com a possibilidade de acesso, sendo chamados de acessíveis e inacessíveis. TVs acessíveis são espaços exteriores abertos e têm a finalidade de serem utilizados por pessoas como jardins, enquanto que telhados inacessíveis podem ser acessados apenas para manutenção periódica (PECK et al., 1999). De acordo com Getter e Rowe (2006), os TVs extensivos geralmente seriam os inacessíveis, enquanto os acessíveis seriam os intensivos.

Além de serem instalados em superfícies planas, os telhados extensivos podem ser instalados também em superfícies íngremes, sendo o ângulo máximo de 45° (MENTENS, RAES e HERMY, 2006).



Figura 4 - Telhado verde extensivo em um prédio da Gerdau.

Fonte: Ecotelhado (2013).

De acordo com Carter e Butler (2008), além de apresentarem substratos finos, eles têm pouca variedade de plantas, custos relativamente pequenos com manutenção e possuem peso que pode ser comparado a um telhado convencional, não requerendo, portanto, intervenções estruturais (EMILSSON, 2008).

Ainda, de acordo com Peck et al. (1999), os TVs extensivos permitem adaptações nas construções existentes, devido a sua leveza, são mais baratos e requerem menos materiais que os intensivos.

Conforme Oberndorfer et al. (2007), os TVs extensivos podem ser separados em sistemas completos, modulares, ou manta de vegetação pré-cultivada (Figura 5). Nos sistemas completos, cada componente, incluindo a membrana do telhado, é instalado como parte integral do telhado; nos modulares, as bandejas de vegetação cultivadas *in situ* são instaladas acima do telhado existente; e nas mantas de vegetação pré-cultivada o substrato, as plantas, materiais de drenagem, e barreiras de raiz são rolados sobre a cobertura existente.

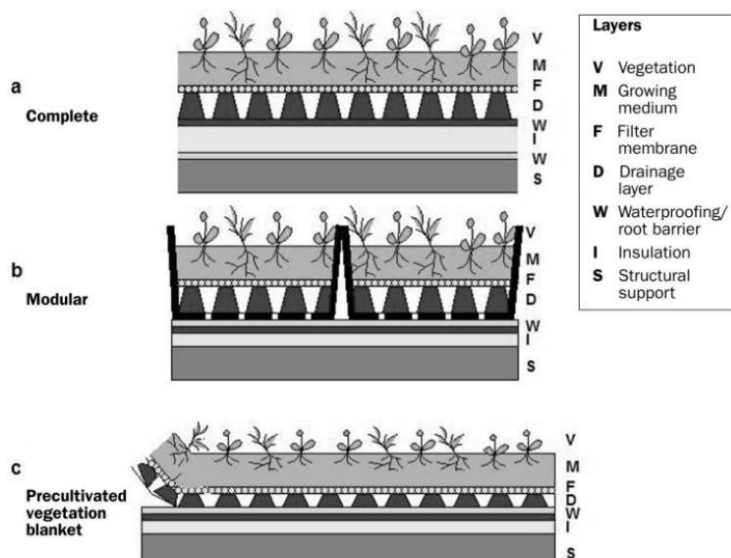


Figura 5 - Tipos de sistemas de telhados verde extensivos.

Fonte: Oberndorfer et al. (2007).

2.2.1.2 Intensivos

Os TVs intensivos (Figura 6) possuem maior profundidade do substrato. Eles são projetados para se assemelharem à paisagem encontrada no nível do solo natural (GETTER e ROWE, 2006).

Nesse tipo de TV, gramas, flores, árvores e arbustos são os principais constituintes da vegetação. Esse tipo é usualmente instalado em telhados com uma declividade menor que 10° e, dependendo se há ou não acesso a eles, e pelo seu desenho, pode ainda ser utilizado como jardim de telhado (MENTENS, RAES e HERMY, 2006; GETTER e ROWE, 2006).

Os telhados intensivos apresentam algumas desvantagens, como o acréscimo no peso e no custo de manutenção, embora possuam maior potencial de aumentar a diversidade de plantas empregadas e têm maior capacidade de retenção de água (CARTER e BUTLER, 2008). Enquanto os TVs extensivos possuem peso variando entre 50 a 170 kg/m², dependendo do sistema, os intensivos pesam de 290 a 970 kg/m² (PECK et al., 1999; EMILSSON, 2008).



Figura 6 - Telhado verde intensivo no Sydney Conservatorium of Music.

Fonte: The Sydney Morning Herald (2013).

Com esse acréscimo de peso, esses telhados podem ser apenas utilizados quando a capacidade de suporte da estrutura do telhado não for excedida, portanto as construções devem ser adequadamente projetadas para suportar um TV intensivo (KEEFE et al., 2008).

Quanto à irrigação desses telhados, Peck et al. (1999) relatam que ela deve ser mais frequente comparado ao telhado extensivo, provavelmente em virtude do tipo de vegetação, e que para a sua implantação deve haver um instalador experiente e um consultor estrutural e paisagístico.

A escolha entre o sistema de TV intensivo ou extensivo depende exclusivamente do propósito primário do telhado, do tipo de construção, do seu tipo de utilização, além de condições microclimáticas (RAES e HERMY, 2006). Os TVs extensivos são adequados para construções leves e baixas, já os intensivos são mais adequados para edificações pesadas (LAZZARIN, CASTELLOTTI e BUSATO, 2005).

Além disso, TVs intensivos exigem investimentos substanciais em cuidados com as plantas (OBERNDORFER et al., 2007). Essas desvantagens dos TVs intensivos fazem com que a maioria dos países detentores desta tecnologia opte pela implantação do tipo extensivo (GETTER e ROWE, 2006; KEEFE et al., 2008).

Carter e Butler (2008) afirmam também que é provável que a grande maioria dos novos TVs na América do Norte será do tipo extensivo, considerando o exemplo

alemão e as condições atuais de mercado que enfatizam o máximo custo-benefício. Na Alemanha, em 2002, telhados extensivos eram de longe os mais implantados, com mais de 80% dos TVs (HARZMANN, 2002).

Na Suécia, conforme Emilsson (2008), muitos dos telhados que estão sendo construídos são telhados finos extensivos, construídos também de acordo com a tradição alemã de TVs.

A seguir são apresentadas algumas particularidades sobre critérios relacionados aos materiais e processos de instalação e manutenção dos sistemas de TVs.

2.2.2 Vegetação

A vegetação é uma das partes mais importantes do TV. Vários fatores devem ser levados em conta na sua escolha, alguns deles são: intenção do projeto, apelo estético, condições ambientais locais, incluindo macro e microclima, composição e profundidade do substrato, seleção da planta e métodos de instalação e manutenção (GETTER e ROWE, 2006).

Para Persch (2012), a cobertura vegetal deve ser selecionada de acordo com o tipo de telhado a ser empregado, com o clima e sistema construtivo para que se adapte perfeitamente ao substrato. A possibilidade de competição entre as espécies escolhidas para o telhado e a invasão de outras nativas, trazidas pelo vento ou pássaros, também deve ser levada em conta.

A estética do TV também deve ser analisada, pois é uma importante ferramenta para aceitação pública dessa tecnologia, principalmente naqueles telhados em que se pretende um contato direto da população (DUNNETT et al., 2008). Além disso, como existe uma dinâmica da vegetação, é provável que com o tempo ela venha a sofrer modificações da composição original (KÖHLER, 2006).

O clima da região também é muito importante na hora da escolha da vegetação. Fatores como quantidade de chuvas, temperaturas extremas e vento são determinantes para a manutenção da vegetação e a identificação da necessidade de um sistema de irrigação (OBERNDORFER et al., 2007).

As espécies vegetais a serem implantadas dependem principalmente do tipo do telhado vegetado, podendo variar desde uma fina camada de suculentas até jardins de coberturas verdes com arbustos e mesmo árvores de pequeno porte (UHL e SCHIEDT, 2008).

Nos telhados intensivos, há uma gama muito maior de espécies possíveis de implantação, devido à maior profundidade de substrato e a irrigação, normalmente indispensável nesse tipo de sistema. No entanto, os telhados intensivos são apontados como os mais suscetíveis ao aparecimento de ervas daninhas (OBERNDORFER et al., 2007).

Os TVs extensivos possuem um menor conjunto de plantas que podem ser empregadas, isso deve-se ao seu substrato mais fino e de eles dependerem mais de eventos chuvosos, necessitando de espécies que sejam altamente tolerantes à seca, ou então, ao frio extremo e geada. Nesse tipo de telhado, a planta também deve ter fácil propagação e estabelecimento e alta densidade de cobertura do solo, reduzindo a potencial erosão do substrato e o crescimento de ervas daninhas (GETTER e ROWE, 2006).

Como já descrito anteriormente, a escolha das plantas depende, além do sistema construtivo, do fator clima. As espécies que mais se adaptam aos climas mais secos e quentes são as suculentas, pois têm como características a baixa transpiração e a alta retenção de água. O *Sedum*, um dos gêneros de plantas da família das Crassuláceas (*Crassulacean Acid Metabolism*) tem sido amplamente empregado em TVs (VILLAREAL e BENGTTSSON, 2005; HILTEN, LAWRENCE e TOLLNER, 2008; SHE e PANG, 2010; SHERRARD e JACOBS, 2012), pois possui alta tolerância ao estresse hídrico (MENTENS, RAES e HERMY, 2006; MACIVOR, RANALLI e LUNDHOLM, 2010), e se adequa muito bem aos substratos mais finos (VANWOERT et al., 2005). Ainda há outras suculentas comumente utilizadas, como a *Sempervivum*, a *Euphorbia*, a *Delosperma* (SNODGRASS, 2005), a *Phedimus*, e a *Hylotelephium* (EMILSSON, 2008).

De acordo com alguns estudos, o *Sedum* pode sobreviver mais de 100 dias sem água (LASSALLE, 1998). Monterusso, Rowe e Rugh (2005) afirmaram que 100% das espécies de *Sedum* estudadas por eles sobreviveram por quase 2 anos sem irrigação quando plantadas em plataformas de telhados. Heinze (1985) comparou o uso de espécies de *Sedum* com gramíneas e herbáceas perenes em TV. O referido pesquisador concluiu que a espécie *Sedum* teve predominância sobre as

demais, exceto nos TVs intensivos. Nesses, onde o substrato é mais profundo, espécies de maior porte tiveram maior crescimento fazendo sombreamento e tornando o ambiente desfavorável ao *Sedum*.

Além das suculentas, espécies nativas também têm potencial para servirem em telhados extensivos, pois geralmente são adaptadas ao clima local. Entretanto, algumas de suas características devem ser observadas, como a resistência ao microclima do telhado e à baixa profundidade do substrato. O estudo sobre a vegetação nativa deve ser enfatizado, pois promove e favorece a biodiversidade e conservação da natureza (OBERNDORFER et al., 2007). Algumas plantas nativas podem ser estudadas, principalmente as encontradas em regiões semidesérticas, pois presume-se que elas sejam tolerantes aos períodos de baixa pluviometria.

Nesse contexto, uma espécie nativa de climas tropicais e subtropicais, conhecida popularmente por Falso-Boldo (*Coleus barbatus*) já foi testado em um TV extensivo situado na Universidade Federal de Santa Maria – Santa Maria, RS – e teve uma boa resposta, sobrevivendo por longos períodos sem precipitação, e suportando baixas temperaturas no inverno (LORENZINI et al., 2013).

A partir da revisão da literatura, observa-se que um grande número de pesquisas sobre a seleção da vegetação para TVs tem se concentrado em analisar plantas que prosperam em condições secas; poucos estudos têm testado plantas de zonas úmidas, as quais podem ser adequadas em TVs situados em regiões de climas úmidos (MACIVOR, RANALLI e LUNDHOLM, 2010).

Quanto à aplicação das plantas, elas podem ser estabelecidas diretamente sobre o telhado através de sementes, ou plantadas no nível do solo em mantas ou módulos e posteriormente fixadas sobre o telhado, sendo que essa última escolha tem a desvantagem de necessitar de transporte até a cobertura. Na Suécia, a aplicação da vegetação pré-cultivada é mais comum, porém, no restante da Europa continental, técnicas de plantio e sementeira *in situ* são mais corriqueiras por apresentarem menor preço (EMILSSON, 2008).

O clima também interfere para a implantação da vegetação. Para Getter e Rowe (2006), o tempo ideal para plantar a vegetação é na primavera após a última geada, ou durante o outono, antes da primeira geada, e uma irrigação inicial será exigida imediatamente após o plantio e durante as primeiras semanas, dependendo da quantidade de precipitação.

Em alguns casos há a necessidade de irrigação. Nos telhados extensivos, as plantas são regadas e fertilizadas apenas até que sejam estabelecidas, sendo que, após isso, a manutenção consiste de duas a três visitas anuais para retirada de espécies invasoras e arbustos e inspeção da membrana (PECK et al., 1999). Além dessas atividades, durante a manutenção também pode ser realizada a substituição do substrato, a poda da vegetação e a limpeza dos drenos.

2.2.3 Substrato

O substrato, que é imprescindível às plantas, também deve ser adequado. Segundo Getter e Rowe (2006), o substrato ideal é constituído por um equilíbrio de material leve, bem drenado, resistente e com boa capacidade de retenção de água e nutrientes.

Para Emilsson (2008), os substratos devem levar em conta os requisitos de peso do telhado, a capacidade de retenção de água e difusão de oxigênio para as raízes das plantas, além da resistência do substrato à erosão pelo vento e água (FLL, 2002).

A composição do substrato é de suma importância. Para Roth-Kleyer (2001), ela é um compromisso entre as características físicas e químicas, por um lado, e da disponibilidade de material e de preços, por outro. Segundo Ampim et al. (2010), a composição do substrato ainda pode variar com a vegetação alvo, tipo de telhado e condições climáticas.

O substrato geralmente tende a ter uma base altamente mineral, com pequenas quantidades de matéria orgânica (aproximadamente 10% do peso), sendo que a argila leve expandida e tijolo moído são materiais comumente empregados (OBERNDORFER et al., 2007), assim como xisto expandido e ardósia (AMPIM et al., 2010). Tipicamente é composto por uma mistura à base de minerais de areia, cascalho, tijolo moído, turfa, matéria orgânica e um pouco de terra (PECK et al., 1999). Beattie e Berghage (2004) afirmam que, além desses materiais, ainda podem ser incluídos pedrapomes, perlite, vermiculita e azulejos. Outros materiais têm sido estudados para a aplicação no telhado, como os reciclados e residuais granulares.

Os materiais reciclados são apreciados por seu impacto ambiental reduzido em relação à extração e produção de novos materiais e pelo seu baixo preço.

Entretanto, o uso de materiais reciclados, por vezes, pode ser problemático devido a severas restrições ambientais no que diz respeito, por exemplo, a metais pesados ou conteúdo de nutrientes (KOLB, TRUNK e EPPEL, 2001).

Há também um crescente interesse na utilização de materiais residuais granulares leves que se situam próximo ao telhado, pois representam uma fonte sustentável de substratos (OBERNDORFER et al., 2007).

Altos níveis de matéria orgânica ou adição de fertilizantes no substrato podem resultar num substrato fértil demais, o que alguns estudos sugerem que causa a morte de algumas espécies de plantas (GETTER e ROWE, 2006). Dunnett e Kingsbury (2004) afirmam que substratos de baixa à média fertilidade incentivam uma maior diversidade de plantas, reduzindo a agressividade de espécies dominantes.

A composição do substrato também influencia na sua densidade. O substrato da empresa Ecotelhado, por exemplo, composto de materiais orgânicos e sintéticos oriundos da indústria de reciclagem (ECOTELHADO, 2013), possui densidade igual a 373 kg/m³ (BAROSKY, 2011), considerada baixa. Em um estudo feito por Moran, Hunt e Jennings (2003), um substrato composto por areia e ardósia expandida apresentou densidade igual a 993 kg/m³ quando seco, e 1250 kg/m³ quando saturado. Em alguns casos, para reduzir esses valores, são incluídos plásticos na composição do substrato (AMPIM et al., 2010).

2.2.4 Sistema de filtragem e drenagem

O sistema de filtragem consiste de uma camada filtrante que se situa entre a camada de substrato e a camada de drenagem. O filtro tem a finalidade de evitar a colmatção do dreno, fazendo com que ele não perca a sua eficiência.

Segundo USEPA (2013b), o filtro é usualmente um geotêxtil que, ao mesmo tempo, permite que o excesso de água escoe para fora do substrato e previne que as partículas finas sejam carreadas e colmatem o dreno. Os geotêxteis, que possuem diversas aberturas de filtração, devem ser escolhidos de acordo com o diâmetro das partículas do solo.

A camada de drenagem é a responsável por reter a água das precipitações e escoá-las até os drenos. Geralmente ela é assentada diretamente sobre uma membrana impermeável.

Segundo Heneine (2008), a camada de drenagem possui diversas funções, variando de acordo com o design e material como: armazenamento de água, alargamento da zona de raízes e espaço para a aeração do sistema.

Para Lazzarin, Castellotti e Busato (2005), essa camada tem a função de recriar a condição natural para o crescimento da vegetação, acumulando a água em pequenos reservatórios e também permitindo a drenagem do excesso de água.

De acordo com USEPA (2013b), a camada de drenagem tende a permanecer parcialmente seca quando não está em uso, permitindo ao ar fluir entre os poros do substrato e prevenir condições anaeróbias.

O formato e a composição dessa camada podem variar bastante. Segundo Heneine (2008), devido às restrições de peso da cobertura, a camada deve ser feita de materiais leves, como borracha ou plástico. Para Lazzarin, Castellotti e Busato (2005), a camada de drenagem pode ser feita de polietileno reciclado ou borracha. Em outro estudo, realizado por Emilsson (2008), o TV utilizado na pesquisa possuía uma camada de drenagem composta de espuma reciclada. Conforme USEPA (2013a), a camada também pode ser composta de xisto ou argila expandida.

A sua forma pode variar bastante, mas um tipo bem usual é a chamada “caixa de ovos”, composta de material sintético, que tem como característica a retenção das águas pluviais pelos pequenos reservatórios, as quais ficam disponíveis para as plantas em períodos de baixa pluviometria.

Quando se utiliza argila expandida, dependendo das dimensões, da declividade e direção do telhado, pode ser necessária a inclusão de um sistema de drenagem composto de tubulações em forma de grelha (USEPA, 2013a).

A limpeza dos drenos também é essencial, pois a obstrução dos drenos por folhas e galhos pode resultar em água parada sobre a estrutura do telhado, podendo causar infiltração na estrutura e também doenças fúngicas e até morte das plantas (DUNNETT e KINGSBURY, 2004).

2.3 A importância dos telhados verdes na gestão das águas pluviais

Os TVs apresentam inúmeras vantagens. Eles têm sido utilizados mundialmente para mitigar os impactos ambientais negativos e econômicos das coberturas impermeáveis nas cidades (GETTER e ROWE, 2006).

No Brasil, os benefícios ambientais das coberturas vegetadas vieram à tona somente nos últimos anos, com a introdução da certificação LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*) e a exigência de controle de escoamento pluvial em várias cidades através dos planos diretores de drenagem urbana. Essa exigência é resultado das coberturas impermeáveis representarem grande parte da superfície horizontal das áreas edificadas das cidades. Frazer (2005) afirma que esse valor pode chegar até 32%, sendo os telhados importantes no fluxo de energia e de águas nas edificações.

As principais vantagens das coberturas verdes são a retenção de águas pluviais (VILLARREAL e BENGTSSON, 2005; GETTER e ROWE, 2006; OBERNDORFER et al., 2007) e a redução das temperaturas urbanas (LAZZARIN, CASTELLOTTI e BUSATO, 2005), com conseqüente diminuição do consumo de energia e atenuação do efeito ilha de calor.

O emprego de TVs ainda possui outros benefícios para as edificações, como melhorias estéticas, na qualidade do ar e da água, criação de habitat para plantas e animais, além de isolamento acústico (DUNNETT e KINGSBURY, 2004) e resistência ao fogo (KÖHLER, 2003).

Entre os TVs, os extensivos são os mais utilizados para prover essas funcionalidades, principalmente por apresentarem fácil aplicação e gerenciamento. Para Oberndorfer et al. (2007), os TVs extensivos são comumente instalados para fornecer serviços específicos, como as reduções das temperaturas no verão e a retenção das águas pluviais.

Alguns fatores como a vegetação, substrato e componentes estruturais da edificação que influenciam no desempenho das funções citadas acima (DUNNETT e KINGSBURY, 2004).

Uma característica importante dos TVs é a sua capacidade de retenção de águas pluviais. Sendo assim, é importante salientar e discutir essa característica com mais detalhes, o que é feito a seguir.

A retenção de águas pluviais pelos TVs é uma das principais vantagens desse tipo de cobertura. Na Europa Ocidental, essa característica tem sido estudada há cerca de 20 anos, especialmente na Alemanha (UHL e SCHIEDT, 2008). Nos países em desenvolvimento, como no Brasil, as pesquisas relacionadas ainda são bastante incipientes.

No Brasil, a retenção das águas pluviais vem sendo praticada mediante a introdução de técnicas compensatórias, internacionalmente conhecidas como BMP (*Best Management Practices*), notadamente com o uso preferencial de pequenos reservatórios nas edificações.

Entretanto, em países desenvolvidos vem ganhando destaque o emprego de tecnologias que proporcionem o Desenvolvimento de Baixo Impacto (LID – *Low Impact Development*), especialmente nos locais onde a urbanização ainda não está consolidada. Essa medida surgiu nas últimas décadas através da busca por técnicas e dispositivos de manejo sustentável, em virtude da demanda por soluções ambientais (SOUZA, CRUZ e TUCCI, 2012).

As LIDs têm ênfase no controle do escoamento pluvial na fonte a partir da sua retenção. Essas têm apresentado resultados satisfatórios quanto à preservação de áreas, manutenção de processos hidrológicos, eficiência de tratamento de águas pluviais, redução de gastos em sistemas de drenagem, integração com atividades de interesse da sociedade e aceitação popular de medidas (SOUZA, CRUZ e TUCCI, 2012).

Essas medidas podem ser encontradas em várias regiões dos EUA, Canadá e Europa (SOUZA, CRUZ e TUCCI, 2012). No Brasil, o Ministério das Cidades tem estimulado a utilização de LIDs para implantação e ampliação de sistemas de drenagem sustentáveis (BRASIL, 2006).

Entre as LIDs, pode-se destacar o TV, a trincheira de infiltração e os pavimentos permeáveis. Sobre o TV, foco deste trabalho, há vários estudos realizados sobre retenção de águas pluviais.

De acordo com Peck et al. (1999), alguns estudos em Berlim mostraram que os TVs retêm 75% da precipitação que incide neles, o que traduz em uma imediata redução de vazão para 25% dos níveis normais. Em um estudo feito por Köhler et al. (2002), os autores afirmaram que os TVs podem reduzir o escoamento total anual de uma edificação de 60 a 79%.

Na Carolina do Norte, EUA, foram implantados dois TV extensivos, e com o seu monitoramento foi possível determinar que cada um deles reteve aproximadamente 60% de toda a chuva observada durante um período de 9 meses (MORAN, HUNT e JENNINGS, 2003). Em pesquisa realizada entre 2003 e 2004, Carter e Rasmussen (2005) avaliaram a retenção de águas pluviais em TVs, analisando 32 eventos de chuva. Os valores de retenção variaram de 39 a 100%, com uma média da ordem de 78%.

Um estudo feito na região de Bruxelas, na Bélgica, por Mentens, Raes e Hermy (2006) mostrou que a implementação de TV extensivos em apenas 10% das edificações já causaria resultados na redução do escoamento, representando uma redução de 2,7% na região e 54% considerando individualmente as edificações.

Rosenzweig, Gaffi e Parshall (2006), em um estudo nos EUA, afirmaram que a retenção da água de um evento de precipitação monitorado ficou em torno de 80% do seu volume. Stovin, Dunnett e Hallam (2007) estudaram um TV na cidade de Sheffield, no Reino Unido, e concluíram que a retenção média das águas pluviais foi igual a 34% durante a primavera de 2006.

De acordo com Taylor (2008), na cidade de Seattle, também nos EUA, embora o desempenho das coberturas verdes sobre a retenção dos volumes precipitados seja variável, a retenção esperada para um TV extensivo nessa cidade fica em torno de 24 a 51%. Em uma pesquisa feita em dois TVs, na Carolina do Norte, EUA, Hathaway, Hunt e Jennings (2008) concluíram que cada telhado reteve 64% de toda a precipitação registrada no período de monitoramento. A USEPA (2009) afirma que os TVs são capazes de reter 50% do volume anual de precipitação por meio da retenção e evapotranspiração.

No Brasil também há estudos sobre a retenção de águas pluviais por TVs. Um estudo feito em um telhado localizado na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) mostrou que a utilização do TV como medida do controle quantitativo do escoamento pluvial é muito satisfatória. No período em que ele foi monitorado, chegou-se a valores médios de 40% de redução do volume escoado comparado com o telhado convencional, sendo que em períodos de baixa pluviometria esses valores ultrapassaram até 90% (PERSCH et al., 2011). Essa diferença é causada pela maior capacidade de armazenamento de água no telhado em períodos de estiagem.

Em estudo análogo, Castro e Goldenfum (2010) mostraram que os valores de redução do escoamento superficial a partir da sua retenção pelos TVs chegaram até

97,5% nas primeiras 3 horas após o início da chuva, e após 6 horas esses valores variaram de 26,6 a 100%.

A habilidade dos TVs como sistema de retenção de águas pluviais depende de alguns fatores, incluindo tipo da cobertura (intensiva ou extensiva), tipo de solo, tipo de vegetação, volume e intensidade de um evento chuvoso, umidade antecedente do solo e inclinação da estrutura (ROSENZWEIG, GAFFI e PARSHALL, 2006; UHL e SCHIEDT, 2008; MORUZZI, MOURA e BARBASSA, 2013).

Segundo Uhl e Schiedt (2008), a profundidade da camada de substrato claramente domina o efeito de retenção de água da chuva, comparada a outros detalhes construtivos, como a inclinação dos telhados, fato esse mostrado no estudo conduzido por Mentens, Raes e Hermy (2006), no qual a capacidade anual de retenção de águas pluviais variou de 75%, para TVs intensivos (profundidade média do substrato igual a 15 cm), a 45%, para TVs extensivos (profundidade média do substrato igual a 10 cm).

Um estudo feito em Portland e Michigan (EUA) mostrou que a retenção de águas pluviais variou de 66 a 69% em telhados com mais de 10 cm de substrato (MORAN, HUNT e SMITH, 2005). Outros estudos apontam que em substratos mais finos a retenção de águas pluviais varia de 25 a 100% (BEATTIE e BERGHAGE, 2004). Essa grande variabilidade nos resultados para uma mesma espessura do substrato é bastante influenciada pela umidade antecedente do solo.

Com relação à inclinação do telhado, quanto maior a inclinação do TV menor é a retenção das águas pluviais. Em uma pesquisa, considerando uma intensidade pluviométrica de 0,4 mm/min, os telhados com inclinações de 2°, 8° e 14° retiveram respectivamente, 62, 43 e 39% do total precipitado (VILLAREAL e BENGTTSSON, 2005).

No estudo de Moruzzi, Moura e Barbassa (2013) foi analisado o efeito da inclinação em TVs extensivos construídos em escala piloto, nos quais as reduções do escoamento pluvial foram de 1,01, 34,7 e 39% para inclinações de 10, 20 e 30%, respectivamente.

As estações do ano também influenciam na retenção das águas pluviais. Mentens, Raes e Hermy (2006), a partir de um estudo, analisaram a porcentagem do escoamento superficial durante o verão e o inverno, e notaram que o escoamento superficial foi significativamente maior durante o inverno, igual a 80%, contra 52% no

verão, período mais chuvoso (na Alemanha) e, portanto, de menor capacidade de armazenamento de água no solo.

Segundo Peck et al. (1999), no Canadá, no verão as taxas de retenção geralmente variam entre 70 e 100%, e no inverno entre 40 e 50%, dependendo de fatores como profundidade do substrato, vegetação, temperatura, radiação solar e vento.

Uhl e Schiedt (2008) afirmam que TVs reduzem o escoamento pluvial anual e sazonal consideravelmente. Em seu estudo, na Alemanha, o coeficiente de escoamento anual variou entre 23 e 38%, durante o verão ficou entre 16 e 31%, e no inverno entre 40 e 60%.

Os TVs também influenciam na redução das vazões de pico. Stovin, Dunnett e Hallam (2007) concluíram que com a utilização de uma cobertura verde, a redução média do pico de vazão foi igual a 57%. Já Taylor (2008) afirma que a redução esperada para as vazões de pico é de 15 a 32%.

Uma importante análise realizada nos estudos de Carter e Rasmussen (2005), Moran, Hunt e Jennings (2003), Villareal e Bengtsson (2005), Carter e Jackson (2007), Hilten, Lawrence e Tollner (2008), Palla et al. (2008) e Tang (2012), é o impacto do volume de chuva na efetividade dos TVs na retenção das águas pluviais. Nesses estudos é sugerido que quanto maior é o volume de chuva, menor é a efetividade dos TVs na redução do escoamento pluvial. Portanto, observa-se que a capacidade de armazenamento de água dos TVs reduz à medida que se aumenta o volume de chuva.

Analisando os resultados obtidos pelos autores citados, pode-se afirmar que geralmente o TV é eficiente como estrutura de retenção de águas pluviais. Essa eficiência varia com alguns fatores, como o tipo de sistema, tipo de solo, tipo de vegetação, estação do ano, entre outros.

2.4 Modelagem hidrológica de telhado verde

Os TVs têm como uma das suas principais vantagens a retenção das águas pluviais, como descrito previamente. Pretendendo avaliar esta característica, é imprescindível a implantação de uma estrutura e seu monitoramento em longo

período. Quando não são encontrados dados de longo período, como no Brasil, uma solução é monitorar a estrutura por um período de tempo menor, e calibrar parâmetros de um modelo hidrológico, almejando avaliar o desempenho da estrutura frente a eventos não monitorados. Além disso, a modelagem possibilita analisar o desempenho de TVs em diferentes escalas espaciais, desde uma edificação com TV até um conjunto de TVs distribuídos em uma bacia hidrográfica urbana.

2.4.1 Histórico da modelagem de telhado verde

A modelagem de TV é uma abordagem relativamente nova, com estudos desenvolvidos principalmente a partir da segunda metade da década de 2000, como os de Carter e Jackson (2007), Hollander (2007), Palla et al. (2008) e Tang (2012), que realizaram análises em escala de bacia hidrográfica. Além destes, autores como Mentens, Raes e Hermy (2003), Villareal e Bengtsson (2005), Hilten, Lawrence e Tollner (2008), Kasmin, Stovin e Hathway (2010), She e Pang (2010), Sherrard e Jacobs (2012) e Vesuviano, Sonnenwald e Stovin (2013), realizaram simulações em escala de telhado.

2.4.2 Tipos de modelos de telhado verde

Nos estudos citados anteriormente foram empregadas várias metodologias na modelagem de TV. Segundo Tang (2012), revisões bibliográficas sugerem que os métodos de modelagem de TV atuais se dividem em quatro tipos de abordagens:

- a) métodos que utilizam o método da Curva-Número do SCS (CN-SCS), e que dependem de análise estatística de escoamento coletadas em estações experimentais;
- b) modelos físicos, desenvolvidos para aplicações de águas subterrâneas, que resolvem as equações de campo para escoamento em meio não saturado;
- c) modelos analíticos, que tratam os TVs como uma combinação de reservatórios de armazenamento lineares;

- d) modelos de balanço hídrico, que tratam os TVs como reservatórios simples com saídas restritas.

Na sequência são apresentados alguns estudos em que essas e outras abordagens foram utilizadas.

No estudo de Mentens, Raes e Hermy (2003) é apresentado um esboço de um modelo de balanço hídrico para um TV. Para avaliar a retenção de água pluvial e validar as simulações, foi utilizado um TV experimental. O modelo de balanço hídrico proposto não considera apenas as características climáticas, mas também a orientação e inclinação do telhado, bem como as características dos diferentes tipos de TV. Nesse estudo, foi concluído que, para estimar o efeito de um TV específico, é necessário o emprego de um modelo de balanço hídrico e, também, a consideração da inclinação e orientação do telhado, pois essas variáveis são essenciais na determinação da evaporação.

Villareal e Bengtsson (2005) analisaram os dados de diversos eventos de chuva-vazão em um pequeno TV, composto da espécie vegetal *Sedum album*, por meio de programação linear para estimar um hidrograma unitário. Nesse estudo, os autores analisaram o efeito da inclinação do telhado e da condição de umidade antecedente do solo. Os resultados obtidos indicam que a inclinação do telhado não influencia na retenção das águas pluviais quando o solo encontra-se saturado, não alterando as vazões de pico e volumes do hidrograma. Porém, quando o solo encontra-se inicialmente seco, a retenção aumenta com a redução da inclinação.

Carter e Jackson (2007) utilizaram a modelagem hidrológica para analisar o impacto de TV em diversas escalas espaciais de uma bacia hidrográfica em Athens, EUA. A modelagem foi realizada com o uso do *software StormNet Builder*, no qual a infiltração e a propagação do escoamento são realizadas pelo método do CN-SCS e da onda cinemática, respectivamente. O *StormNet Builder* utiliza o modelo *Storm Water Management Model* (SWMM) como mecanismo de análise. No estudo foi demonstrado que a ampla implementação de TV na bacia hidrográfica pode reduzir as vazões de pico em até 26%, embora não altere o tempo de pico.

Hollander (2007) propôs um modelo matemático de chuva-vazão para TV e pesquisou o efeito da implementação de TV no controle do escoamento pluvial. O autor utilizou o método modificado de Green-Ampt para calibrar os parâmetros do modelo hidrológico utilizado, o *Illinois Drainage Simulator* (ILLUDAS). O modelo foi

utilizado para simular os efeitos do TV sobre diversas condições de chuvas e escalas de abrangência de TV em uma bacia hidrográfica, com a substituição de telhados convencionais por TVs variando de 0 a 100%. Os resultados obtidos pelo modelo ILLUDAS indicam que a utilização de TV na bacia reduziu os volumes e vazões de pico do escoamento superficial para todas as intensidades de chuva simuladas, principalmente nos eventos menos intensos e com cenários de maior cobertura de TV.

Hilten, Lawrence e Tollner (2008) também utilizaram a modelagem hidrológica para estudar a efetividade dos TVs no controle do escoamento pluvial. No estudo, foi avaliado o desempenho de um TV modular na redução do escoamento pluvial frente a diferentes eventos de chuva. Para isso, foi desenvolvido um modelo hidrológico de chuva-vazão utilizando-se o modelo HYDRUS-1D, que simula o transporte da umidade do solo. Os parâmetros do modelo foram calibrados com dados obtidos no monitoramento de um TV de 37 m², composto de várias espécies de *Sedum*, localizado em Athens, EUA. A partir de simulações com chuvas de projeto, observou-se que o volume do evento de chuva influencia sensivelmente o desempenho dos TVs no controle do escoamento pluvial, retendo completamente chuvas de pequenos volumes (menores que 25,4 mm) e detendo chuvas de maiores volumes.

No estudo de Palla et al. (2008), para avaliar a retenção de TV em escala de bacia, foi utilizado o modelo hidrológico SWMM, no qual a determinação da parcela de escoamento superficial é realizada pelo método do CN-SCS, a propagação do escoamento pelo método da onda cinemática. A percolação profunda da zona saturada para a água subterrânea foi considerada igual a zero e a evapotranspiração foi desconsiderada. O modelo foi calibrado e validado para um TV extensivo de 2,5 m² situado em Genova, Itália.

Nesse estudo foram realizadas simulações com três diferentes cenários de implementação de TVs em escala de bacia (10%, 20% e 100% de substituição de telhados convencionais por TVs) e com uma série temporal de chuva de 18 anos, cuja discretização temporal era de 1 minuto. A modelagem hidrológica demonstrou que a ampla implementação de TVs na bacia pode reduzir significativamente a vazão de pico (51% em média), dependendo fortemente do volume de chuva, com 76% de redução para eventos entre 0 e 1 mm, e 27% para eventos entre 25 e 400 mm.

Kasmin, Stovin e Hathway (2010) construíram um modelo conceitual simples de balanço hídrico para simular os processos hidrológicos que ocorrem

nos TVs. O objetivo principal do estudo foi obter um método robusto de identificação de valores mensais de evapotranspiração. O modelo compreende um componente de armazenamento de umidade do substrato, que representa a capacidade média do TV em reter a água pluvial, e um componente de armazenamento transitório.

She e Pang (2010) construíram um modelo com base física em FORTRAN para simular o escoamento de águas pluviais no TV. O diferencial neste modelo é a consideração da capacidade de campo e a drenagem da água da chuva através de vácuo para fora do meio de cultura, devido à gravidade antes da saturação do meio. Os dados de chuva-vazão utilizados para calibração e validação do modelo foram obtidos por uma estação localizada em uma edificação em Portland, EUA, e estavam discretizados em intervalos de 5 minutos. O TV de 0,80 m² e declividade de 2,1% é coberto pela espécie *Sedum*. Os resultados indicam que para chuvas com período de retorno de 1, 2 e 4 anos, a redução da vazão de pico foi de cerca de 47%, 54% e 52%, respectivamente.

Sherrard e Jacobs (2012) desenvolveram, calibraram e validaram um modelo de balanço hídrico de TV, chamado de VR-WRM (*Vegetated Roof Water Balance Model*), utilizando dados de um TV modular experimental localizado em Durham, EUA, que possui como vegetação várias espécies de *Sedum*. O VR-WRM é um modelo de balanço hídrico diário unidimensional com um único e uniforme compartimento de armazenamento de solo. As entradas do modelo são a precipitação e o orvalho, e as saídas são o armazenamento, escoamento e evapotranspiração. A partir de simulações com dados observados de chuva, os resultados mostraram que, em média, a redução do escoamento das águas pluviais foi de 32% para o período de estudo (simulação de longo período), e de 57% por evento.

No estudo desenvolvido por Tang (2012), também foi utilizado um modelo hidrológico para analisar o efeito da implementação de TVs em uma bacia hidrográfica urbana. Nesse estudo, foi utilizado o *Illinois Urban Hydrologic Model* (IUHM) como modelo base para o sistema de drenagem, e um modelo matemático foi desenvolvido para simular o impacto dos TVs na bacia, o qual foi calibrado utilizando-se dados do monitoramento de um TV localizado em Illinois, EUA.

As simulações foram realizadas com diferentes cenários de abrangência de TVs na bacia (10% a 40%) e com diferentes tipos de chuva, sendo duas hipotéticas e duas reais. Os resultados indicaram que a implementação de TVs impacta na

diminuição do volume e vazão de pico do escoamento pluvial, a qual depende da distribuição temporal, do volume da precipitação, e da cobertura do TV.

Vesuviano, Sonnenwald e Stovin (2013) desenvolveram um tipo de modelagem de TV por camadas, separando a modelagem da camada de substrato da camada de drenagem. Essas camadas foram representadas no modelo por meio de reservatórios, com a vazão de saída da camada de substrato sendo igual à vazão de entrada da camada de drenagem.

2.4.3 Percepções a respeito do comportamento dos TVs modelados

Diante dos estudos de caso previamente apresentados, verifica-se que, embora cada estudo apresente metodologia inerentemente diferente, em todos eles foi concluído que os TVs são efetivos em reduzir o escoamento pluvial. Além disso, os autores citados identificaram a modelagem hidrológica como uma importante ferramenta nessa análise.

Alguns autores ainda concluíram que apesar de benéficos, os TVs sozinhos não podem ser utilizados para prover o completo controle das águas pluviais em escala de bacia (CARTER e JACKSON, 2007; PALLA et al., 2008), e que, para isso, é necessário complementar o emprego de TVs com outros dispositivos, como pavimentos permeáveis, coletores de águas pluviais e trincheiras de infiltração (PALLA et al., 2008).

Outra análise realizada em alguns desses estudos, é que a redução significativa das vazões de pico pode resultar em benefícios econômicos, como mudanças nos diâmetros das tubulações de drenagem pluvial (CARTER e JACKSON, 2007; PALLA et al., 2008).

A pesquisa bibliográfica realizada neste contexto revelou que no Brasil os estudos relacionados à modelagem hidrológica de TVs são incipientes. Sendo assim, acredita-se que o modelo de TV desenvolvido, calibrado e validado neste trabalho possa representar um avanço nesta linha de pesquisa.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para analisar a eficiência de telhados verdes (TVs) no controle do escoamento pluvial em diferentes escalas espaciais, foram realizadas simulações de um sistema representado por uma bacia hidrográfica urbana, a qual foi simulada considerando a substituição dos telhados convencionais por TVs. Neste capítulo é apresentada a metodologia empregada para o monitoramento de eventos de chuva-vazão de um TV (Capítulo 3.1), a calibração do volume de chuva efetiva (Capítulo 3.2), o desenvolvimento de um modelo hidrológico do tipo chuva-vazão para o TV (Capítulo 3.3) e a realização das simulações do sistema (Capítulo 3.4).

3.1 Monitoramento do telhado verde experimental

No presente capítulo são apresentadas as características do TV experimental implantado e o processo para o seu monitoramento.

3.1.1 Localização do telhado verde experimental

Os dados referentes ao comportamento do TV, como precipitação e escoamento superficial, utilizados para a determinação de chuva efetiva e desenvolvimento do modelo hidrológico, são produto do monitoramento de um TV extensivo, do tipo modular, instalado junto às dependências do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) em Santa Maria – RS.

O TV foi instalado em uma estrutura do tipo casa em madeira, no ano de 2010 (Figura 7). Durante o monitoramento, toda a estrutura teve que ser deslocada, por aproximadamente 90 m (Figura 8). Isso ocorreu entre o final de 2012 e o início de 2013 devido a obras de pavimentação no local original.



Figura 7 - Antiga localização da estrutura em relação ao pórtico da UFSM.

Fonte: Google Earth (2014).



Figura 8 - Atual localização da estrutura em relação ao pórtico da UFSM.

Fonte: Google Earth (2014).

3.1.2 Descrição do telhado verde experimental

Como descrito previamente, o TV construído é extensivo, do tipo modular (TVM). A cobertura da casa de madeira possui uma área total aproximada de 12 m², sendo essa dividida em duas regiões iguais: uma com telhado convencional de fibrocimento e outra com TVM (Figura 9). Neste trabalho, não foi realizado nenhum estudo com a porção do telhado convencional.

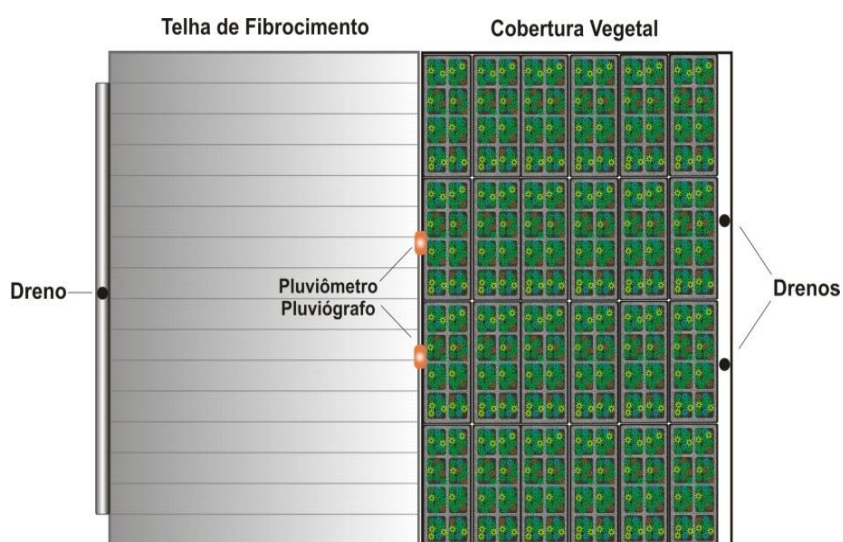


Figura 9 - Vista superior do telhado verde.

Fonte: Persch (2012).

Especificamente, na área do TVM, doravante chamado simplesmente de TV, foram dispostos 24 módulos pré-fabricados e doados pela empresa Ecotelhado de Porto Alegre – RS. Os módulos são de EVA (espuma vinílica acetinada) reciclada moída e aglomerada com cimento Portland CP-V com adição de cinzas (ECOTELHADO, 2013).

Os módulos (Figuras 10 e 11) são retangulares e possuem dimensões externas de 35 x 70 cm, com 9 cm de espessura. Eles são assentados sobre galochas de Pet reciclado com cerca de 3 cm de altura, as quais tem a função de reter a água da chuva, sendo essa utilizada pela vegetação em períodos de estiagem.

Cada módulo possui em seu interior oito subdivisões (células) quadradas, com 12 cm de lado e 4 cm de espessura. Nessas células são inseridos o substrato e a vegetação, que fazem a retenção das águas pluviais.

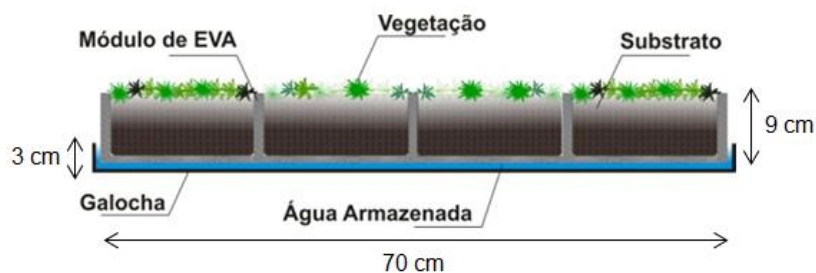


Figura 10 - Esquema transversal do sistema galocha.

Fonte: Adaptado de Persch (2012).

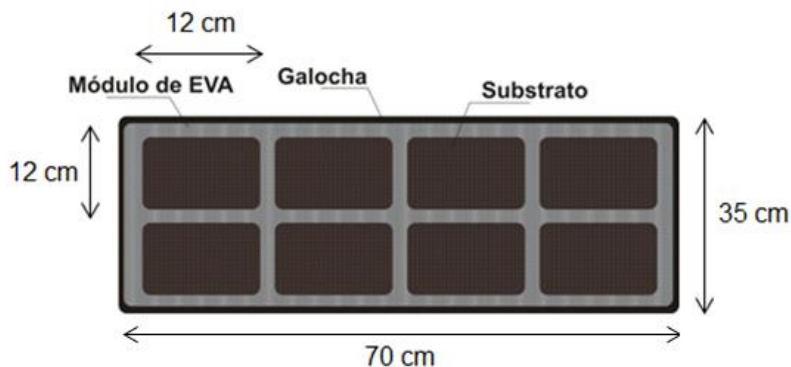


Figura 11 - Vista superior do sistema galocha.

Fonte: Adaptado de Persch (2012).

O substrato utilizado no preenchimento das células de cada módulo foi terra vegetal, adubada e humificada, normalmente utilizada em serviços de jardinagem, misturada à terra existente nas mudas de plantas utilizadas na instalação.

Quanto à vegetação, na primeira construção do telhado foram utilizadas as espécies: gazânia – *Gazania rigens* (Figura 12(a)), calanchôe – *Kalanchoe blossfeldiana* (Figura 12(b)), falso boldo – *Coleus barbatus* (Figura 12(c)), clorofito –

Chlorophytum comosum (Figura 12(d)), aspargo ornamental – *Asparagus-densiflorus* ‘*sprengeri*’ (Figura 13(a)) e rosinha de pedra - *Echeveria glauca* (Figura 13(b)).

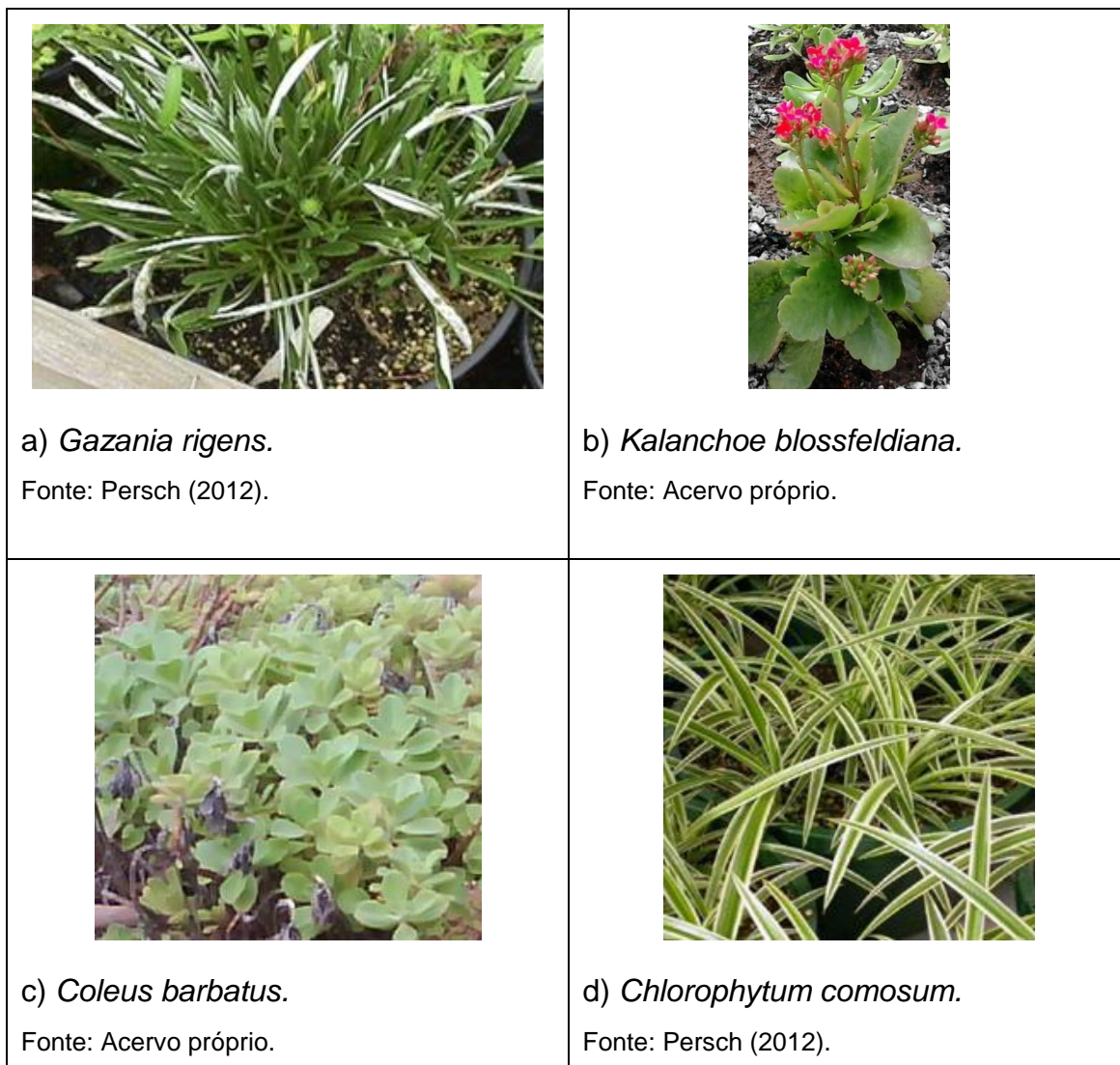


Figura 12 - Espécies de plantas utilizadas na implantação do primeiro TV.

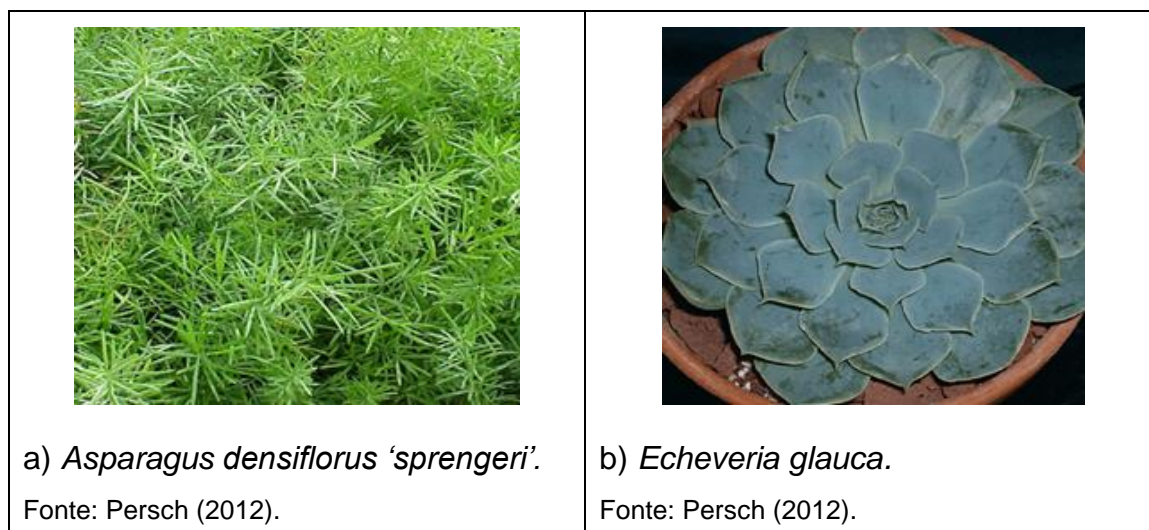


Figura 13 - Espécies de plantas utilizadas na implantação do primeiro TV.

Na reconstrução do telhado foram utilizadas as espécies *Coleus barbatus* e *Kalanchoe blossfeldiana*, por apresentarem maior resistência ao clima subtropical da região, além do bálsamo – *Sedum album* (Figura 14(a)) e sedum estrela – *Sedum dendroideum* (Figura 14(b)), as quais são indicadas para esse tipo de telhado, pois possuem alta resistência ao estresse hídrico e adequam-se muito bem a substratos mais finos. As quatro espécies utilizadas na reconstrução do telhado foram as que apresentaram maior resistência às intempéries, como secas e geadas.

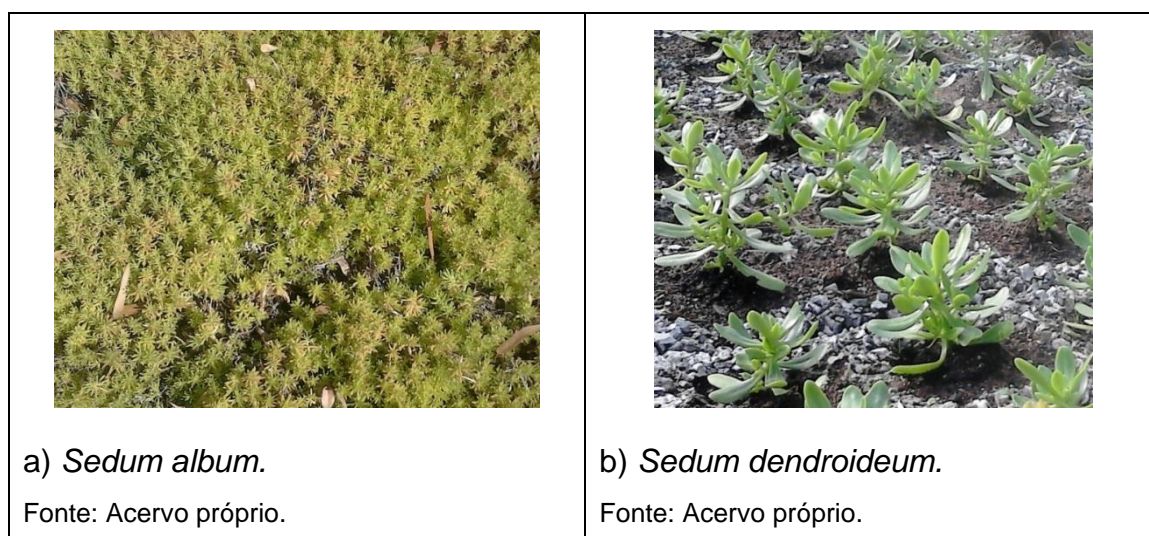


Figura 14 - Espécies de plantas utilizadas na implantação do segundo TV.

A estrutura ainda possui uma camada de impermeabilização constituída de uma lona plástica instalada sob o TV para evitar infiltração da água pluvial na estrutura.

3.1.3 Monitoramento

O monitoramento dos eventos de chuva-vazão do TV, utilizados no processo de determinação/calibração da chuva efetiva e no desenvolvimento do modelo de propagação de escoamento, foi realizado entre Novembro de 2010 e Abril de 2013, compreendendo 29 meses.

Os eventos de chuva utilizados na determinação/calibração da chuva efetiva foram obtidos a partir de um pluviômetro e de um pluviógrafo instalados sobre o telhado (Figura 9). O pluviômetro utilizado é do tipo sem medidor interno, no qual as leituras são feitas por uma proveta graduada de 10 mm (Figura 15(a)). O pluviógrafo é do tipo báscula (Figura 15(b)), marca Solar. Para definir o intervalo de tempo dos eventos a serem registrados, foi realizada uma série de testes iniciais, nos quais identificou-se que um intervalo de tempo de 2 minutos seria suficiente para futuras análises, incluindo a calibração do modelo de propagação do escoamento superficial. Os dados eram armazenados em uma estação com *data logger* instalada dentro da casa de madeira (Figura 15(c)).

Um reservatório de 500 litros acomodado sob o telhado (Figura 15(d)), recebe o volume de escoamento gerado a partir do TV (chuva efetiva). Esse reservatório foi previamente cubado, e a água é drenada até o mesmo por meio de um condutor vertical em PVC. Dentro do reservatório também foi instalado um sensor de pressão (Figura 15(e)), com intervalo de medição idêntico ao da chuva, com a finalidade de monitorar os níveis d'água ao longo de eventos de chuva, os quais foram transformados em dados de vazão pelo *data logger*. Também foi realizada a leitura do nível de água dentro do reservatório após cada evento, com auxílio de uma régua, e então foram determinados os volumes escoados em função da cubagem previamente realizada. O reservatório foi esvaziado e limpo após os eventos chuvosos.



Figura 15 - Equipamentos utilizados no monitoramento do TV.

3.2 Calibração do volume de chuva efetiva

Para a calibração do volume de chuva efetiva do TV foi utilizado o método da Curva-Número do SCS (CN-SCS), aplicado a um conjunto de 48 eventos monitorados de chuva-vazão. A determinação da chuva efetiva (Equação 1), de acordo com o método, considera que as abstrações iniciais sejam consideradas como 20% da capacidade máxima de armazenamento de água no solo.

$$P_{ef} = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S}, \quad (1)$$

Em que:

P_{ef} : Chuva efetiva (mm);

P : Precipitação (mm);

S : Capacidade máxima de armazenamento de água no solo (mm);

I_a : Abstrações iniciais, incluindo perdas por armazenamento na superfície, interceptação, infiltração inicial e outros (mm) e corresponde a 20% de S .

No equacionamento apresentado, as variáveis P_{ef} e P são conhecidas, a partir do monitoramento, e S relaciona-se com o valor do CN (Equação 2).

$$CN = \frac{25400}{S + 254} \quad (2)$$

Destaca-se que, no caso do TV, o critério de utilização das perdas iniciais pode conduzir a resultados não muito realistas, especialmente devido à reduzida capacidade de interceptação e retenção superficial nos módulos. Dessa forma, foi proposto uma modificação da equação original do método, de tal forma que o cálculo fosse realizado sem a consideração da parcela das perdas iniciais a partir da equação 1. Resultou assim, uma nova equação, com a variável incógnita S isolada, sendo o objetivo da calibração (equação 3).

$$S = \frac{P^2 - P_{ef} \cdot P}{P_{ef}} \quad (3)$$

Esse procedimento foi realizado em razão das incertezas associadas ao processo de determinação da interceptação no TV. Portanto, no equacionamento modificado para o TV, a variável S passa a representar a capacidade máxima de armazenamento de água no substrato do TV acrescida de perdas por interceptação. Na equação 3 são conhecidas as variáveis P (volume de chuva total) e P_{ef} (escoamento superficial coletado no reservatório).

A determinação do valor de S a partir da equação 3 permitiu calcular o CN de todos os eventos, com o uso da equação 2.

Posteriormente, eventos e os valores de CN determinados foram agrupados em função de diferentes condições de umidade antecedente do solo, as AMCs (*Antecedent Moisture Condition*), as quais foram utilizadas considerando as culturas estabelecidas (TUCCI, 2005), conforme:

- a) AMC I: situação em que os solos estão secos. A precipitação acumulada dos cinco dias anteriores é menor que 13 mm;
- b) AMC II: situação média em que os solos correspondem à umidade da capacidade de campo. A precipitação acumulada dos cinco dias anteriores é maior que 13 mm e menor que 28 mm;
- c) AMC III: situação em que ocorreram precipitações consideráveis nos cinco dias anteriores e o solo encontra-se saturado. A precipitação acumulada dos cinco dias anteriores é maior que 28 mm.

Com os valores de CN classificados em cada AMC, foi realizada uma análise estatística envolvendo o cálculo de valores médios, medianos, máximos, mínimos, desvios padrão, e também utilizando um intervalo de confiança (IC) igual a 95%.

3.3 Desenvolvimento de modelo hidrológico chuva-vazão para o telhado verde

Após a conclusão da calibração do volume de chuva efetiva, realizou-se a calibração do modelo de propagação do escoamento superficial a modelos conhecidos no meio hidrológico, com o intuito de identificar aquele que melhor reproduz o processo de escoamento no TV.

Os modelos propostos para testes foram: hidrograma unitário sintético do SCS (SCS, 1957), reservatório linear simples, Muskingun, Muskingun-Cunge linear e onda cinemática (TUCCI, 2005). Para cada um desses modelos foi desenvolvida uma rotina de cálculo para a propagação do escoamento em linguagem FORTRAN. Caso nenhum desses modelos produzisse resultados satisfatórios, seria proposto o desenvolvimento de um novo modelo de TV.

A calibração consistiu em ajustar os parâmetros para cada modelo e então comparar os hidrogramas simulados por cada modelo com os hidrogramas observados no TV. A comparação entre os hidrogramas foi realizada visualmente e por meio da determinação do erro de volume e do coeficiente Nash-Sutcliffe, comumente utilizados para esse tipo de análise.

O erro de volume foi determinado calculando-se a diferença entre os volumes dos hidrogramas observados e simulados (Equação 4). O coeficiente Nash-Sutcliffe foi calculado a partir da equação 5 (TUCCI, 2005).

$$\text{Erro de volume} = 1 - \frac{\text{Volume hidrograma simulado}}{\text{Volume hidrograma observado}} \quad (4)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(Qo_{i+\tau} - Qc_{i+\tau})^2}{\sum(Qo_{i+\tau} - Qm)^2}, \quad (5)$$

Em que:

R^2 : Coeficiente Nash-Sutcliffe;

$Qo_{i+\tau}$: Vazões observadas;

$Q_{c_{i+\tau}}$: Vazões calculadas;

Q_m : Vazão média;

τ : Tempo de antecedência de previsão.

3.4 Análise da eficiência de telhados verdes no controle do escoamento pluvial em diferentes escalas espaciais

Com a ambição de analisar a eficiência de TVs na mitigação dos efeitos do escoamento pluvial em diferentes escalas, foram realizadas simulações do tipo chuva-vazão e propagação em redes de drenagem, desde a escala de lote até a inclusão de vários quarteirões. Neste processo foram realizadas diferentes simulações, que incluíram: simulação de chuvas de projeto para dimensionamento das redes de drenagem sem uso de TV nos lotes; simulação de chuvas de projeto com uso de TV nos lotes visando identificar o impacto nas redes de drenagem previamente dimensionadas e a possibilidade de redução dos diâmetros; simulação de chuvas observadas, com e sem o uso de TV nos lotes, visando identificar o impacto nas redes de drenagem previamente dimensionadas.

Os métodos empregados são descritos mais detalhadamente nos itens:

- a) representação do sistema simulado;
- b) descrição do modelo hidrológico-hidráulico utilizado;
- c) dimensionamento das redes de microdrenagem;
- d) redimensionamento das redes de microdrenagem com a implementação de TV nos lotes, realizando comparação de diâmetros;
- e) análise da eficiência de TVs frente a eventos de chuva observados.

3.4.1 Sistema simulado

O sistema simulado consiste de uma bacia hidrográfica urbana hipotética, composta de 30.720 lotes e com área aproximada de 9,77 km². Essa bacia foi

elaborada por Tassi (2002), com base em dados físicos reais da bacia do Arroio Areia da cidade de Porto Alegre – RS (Figura 16) e, embora seja considerada hipotética, pode-se dizer que guarda grande similaridade com a bacia real.

Os lotes representados nesta bacia são do tipo padrão (iguais), e possuem 300 m², os quais possuem dimensões de 25 x 12 m. Um conjunto de 24 lotes forma um quarteirão que ainda inclui 1,50 m do passeio público – características determinadas com base nos dados reais do bairro. As áreas permeáveis (jardim e recuo frontal), que constituem 51% do total representado, e impermeáveis (calçadas e telhado) do lote padrão podem ser identificadas na figura 17 (TASSI, 2002).

As declividades assumidas para cada superfície do lote padrão estão apresentadas na tabela 1. Outros detalhes a respeito desta montagem podem ser encontrados em Tassi (2002).

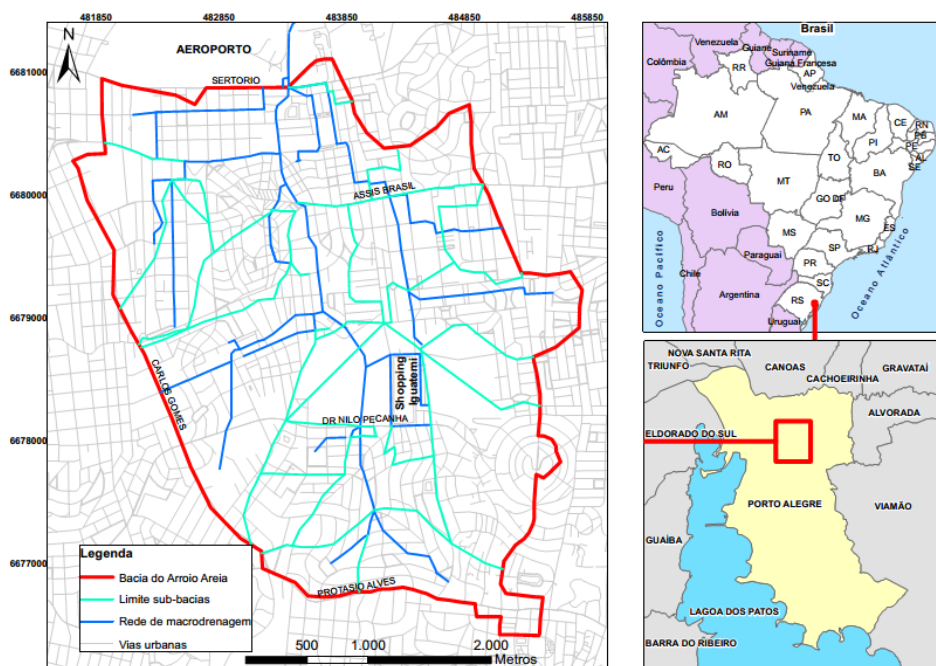


Figura 16 - Bacia hidrográfica do Arroio Areia, Porto Alegre – RS.

Fonte: Tassi (2002).

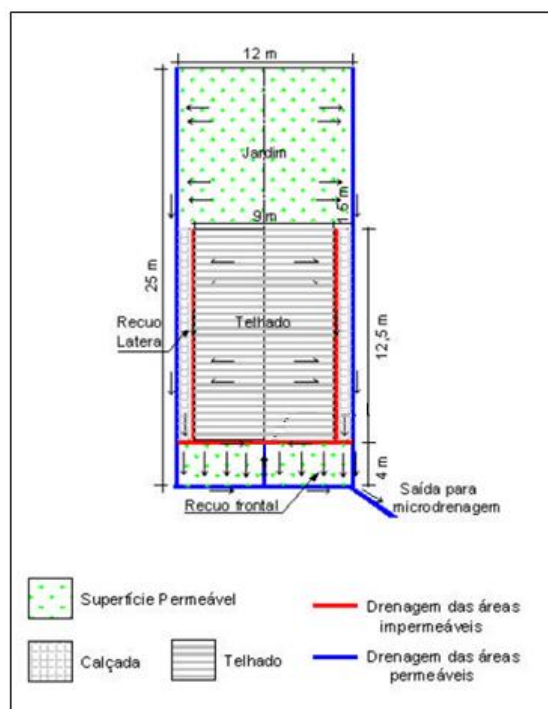


Figura 17 - Lote padrão simulado.

Fonte: Adaptado de Tassi (2002).

Tabela 1 - Declividade das superfícies.

Superfície	Declividade (m/m)
Jardim de fundos	0,015
Telhado	0,120
Recuo lateral	0,020
Calha do telhado	0,005
Recuo frontal	0,020

Fonte: Tassi (2002).

Nesse modelo, os planos de escoamento das águas pluviais do sistema foram representados detalhadamente, possibilitando a representação fiel de todas as superfícies do interior do lote (telhados - TV, áreas pavimentadas, áreas verdes), da via pública e das redes de drenagem, as quais possuem 70 km de extensão. A direção do escoamento superficial em cada plano de escoamento foi admitida conforme descrito a seguir e podem ser observados na figura 18:

- a) dos passeios públicos para as sarjetas;
- b) das ruas para as sarjetas;
- c) das sarjetas para as bocas-de-lobo;
- d) das bocas-de-lobo para o sistema de drenagem;
- e) dos lotes para o sistema de drenagem.

O perfil transversal das ruas, admitidas com largura de 7 m, e dos passeios públicos pode ser observado na figura 19, e a direção do escoamento além dos lotes, na figura 20.

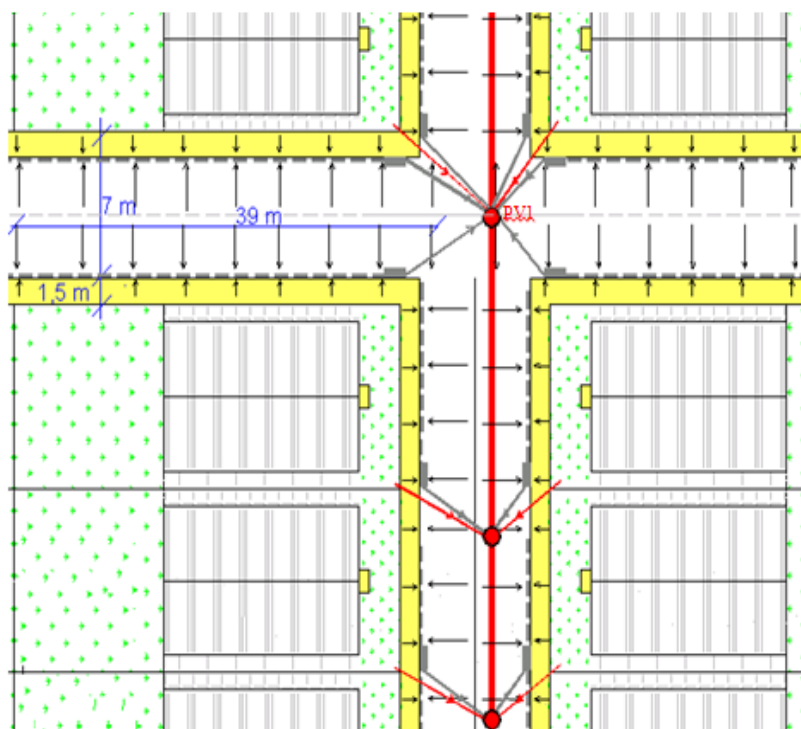


Figura 18 - Representação da conexão do lote com sistema de drenagem e planos de escoamento.

Fonte: Tassi (2002).

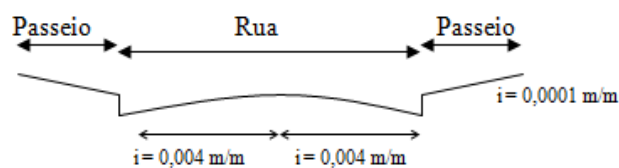


Figura 19 - Seção transversal de ruas e passeios públicos representados.

Fonte: Tassi e Villanueva (2005).

Os quarteirões (Figura 20) que compõem a bacia são constituídos de 24 lotes. O agrupamento de vários quarteirões forma “blocos de quarteirões”, os quais foram distribuídos de modo a abranger toda a bacia, com as declividades e limites das sub-bacias (Figura 21) representados conforme a bacia real, bem como a rede de macrodrenagem, a qual não foi modelada neste estudo.

A representação detalhada do sistema possibilita a obtenção do hidrograma em qualquer plano de escoamento ou ponto do sistema de drenagem, permitindo realizar análises em diferentes escalas espaciais.

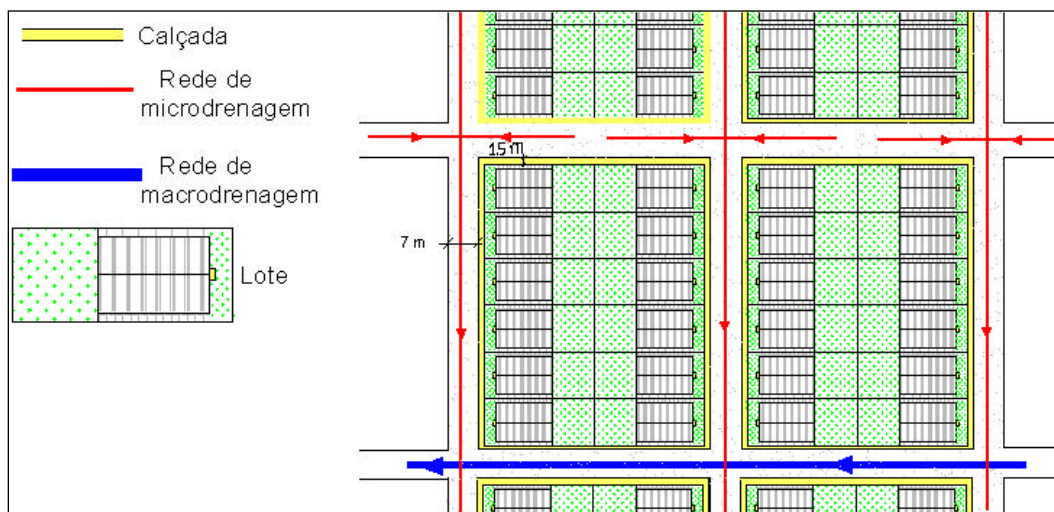


Figura 20 - Esquema da composição da rede.

Fonte: Tassi (2002).

O agrupamento dos quarteirões em blocos originou pequenos coletores ligados às redes de microdrenagem, as quais poderiam tanto estar conectadas à outra rede de microdrenagem como à rede de macrodrenagem. Na figura 21, as sub-bacias são representadas por letras e as redes de macrodrenagem por linhas azuis (TASSI, 2002).

Ao total foram formadas 11 sub-bacias, as quais possuem áreas que variam entre 0,15 e 1,94 km² e declividades entre 0,04 e 6%. Na tabela 2 são apresentadas as áreas de cada sub-bacia e variabilidade das declividades de fundo das suas tubulações (So).

A área impermeável total da bacia é igual a 59%, sendo essa porcentagem devido a 16% das ruas e passeios, considerados totalmente impermeáveis, e a 43% das superfícies impermeáveis dos lotes. Essa porcentagem condiz com a realidade encontrada na bacia do Arroio Areia (TASSI, 2002).

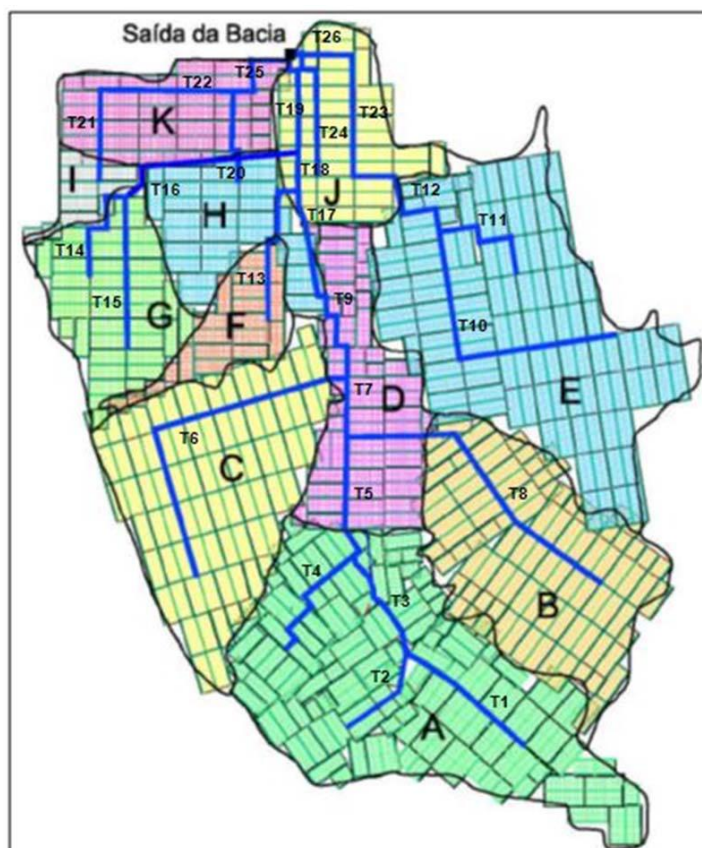


Figura 21 - Configuração da bacia simulada.

Fonte: Tassi (2002).

Tabela 2 - Características das sub-bacias.

Sub-bacias	Área (ha)	So* (%)
		Microdrenagem
A	194	6 – 5
B	130	5 – 4
C	133	5 – 4
D	74	4 – 3
E	186	4 – 3
F	31	4 – 3
G	62	4 – 3
H	44	3 – 2
I	15	3 – 2
J	61	2 – 1
K	56	2 – 1
Total	977	

*So: faixa de variação da declividade de fundo do conduto.

Fonte: Tassi (2002).

Apesar de a bacia ser hipotética na concepção dos lotes, quarteirões e ruas, as características que influenciam nos processos hidrológicos que nela ocorrem, como a permeabilidade do solo, configuração e extensão das redes de drenagem, e declividades foram preservadas (TASSI, 2002; TASSI e VILLANUEVA, 2004).

Na tabela 3 estão apresentadas informações dos trechos de redes da macrodrenagem, com seus respectivos números de quarteirões e lotes contribuintes, além dos trechos da rede de microdrenagem que fazem parte de cada uma das 11 sub-bacias presentes neste trabalho. Esse detalhamento foi realizado para melhor análise das áreas de contribuição da bacia hipotética, já que a análise em diferentes escalas também é um dos objetivos deste estudo. Os trechos de início de rede foram representados pela sigla MI, e os de final de rede, pela sigla RMI.

Tabela 3 - Identificação dos trechos por sub-bacias e respectivo número de quarteirões e lotes contribuintes.

(continua)

Sub-bacia	Trecho Macro drenagem	Quarteirões	Nº de lotes	Trechos de rede de micro drenagem
A	1	69	1656	1RMI9,3x11MI1,
	2	31	744	2x12MI2,4x13MI2,2x15MI2,
	3	42	1008	1x, 1xRMI11, 1xRMI12,
	4	49	1176	1xRMI13
B	8	107	2568	3x22MI2, 5x23MI2,
				3x24MI3, 5x25MI2, RMI42, RMI45, RMI51, RMI59
C	6	121	2904	22MI2, 13x23MI2, 24MI3,
				2x25MI2, RMI62, RMI66, RMI68, RMI70, RMI71, RMI73
D	5	24	576	2x31MI1, 32MI2,
	7	18	432	10x33MI2, 3x35MI2,
	9	28	672	RMI74, RMI83
E	10	38	912	32MI2, 6x33MI2, 6x35MI2,
				RMI85, RMI86, RMI87,
				RMI88, RMI89,
				RMI92,RMI95, RMI97, RMI98
F	13	31	744	RMI106, RMI109
G	14	34	816	RMI114, RMI117, RMI118,
	15	20	480	RMI119, RMI120, RMI 121,
	16	*		RMI122
H	20	39	936	RMI128
I	21	15	360	RMI133

Tabela 3 - Identificação dos trechos por sub-bacias e respectivo número de quarteirões e lotes contribuintes.

(conclusão)

Sub-bacia	Trecho Macro drenagem	Quarteirões	Nº de lotes	Trechos de rede de micro drenagem
J	17	conduto forçado		
	18	conduto forçado		
	19	conduto forçado		
	23	chegada na casa de bomba		3X45MI2, RMI138, RM140, RMI141, RMI142
	24	36	864	
	26	chegada na casa de bomba		
K	22	47	1128	RMI144, RMI147, RMI148, RMI150
	25	chegada na casa de bomba		

* conduto forçado; ** casa de bomba²

3.4.2 Modelo hidrológico-hidráulico

Na modelagem desse sistema utilizou-se um modelo de propagação baseado na teoria da onda cinemática, proposto por Schaake (1971) e aprimorado por Tassi (2002). A utilização desse modelo permite a realização simultânea dos cálculos da chuva efetiva e da propagação do escoamento para o sistema simulado, o qual foi representado até o aporte das redes de micro drenagem às redes de macro drenagem.

Nesse modelo a determinação da chuva efetiva pode ser realizada pelos métodos de Horton ou CN-SCS. O método adotado neste estudo para a determinação da chuva efetiva em todas as superfícies, exceto no caso do TV (no qual a chuva efetiva foi determinada pelo método do CN-SCS modificado), foi o CN-SCS, que possui como parâmetro o CN, o qual depende do tipo, condições de uso, ocupação, e

² Na cidade de Porto Alegre toda região cuja topografia possui cota acima de 9 m é drenada mediante a introdução de condutos forçados. Nas áreas abaixo desta cota, são utilizadas casas de bombas.

umidade antecedente do solo, variando de 0 a 100 (TASSI et al., 2006). Nas simulações o solo e a cobertura existentes na bacia foram classificados no grupo C, admitindo-se o solo em condições normais de umidade (AMCII) (TASSI, 2002).

Os valores de CN adotados para cada plano de escoamento estão apresentados na tabela 4 (TASSI, 2002). Para os TVs empregou-se o valor de CN calibrado conforme a metodologia descrita no item 3.2. O valor adotado para as superfícies impermeáveis, geralmente tabelado em livros e manuais de hidrologia, não modifica-se de acordo com o tipo e umidade antecedente do solo. O valor admitido para as superfícies permeáveis é o apresentado no Plano Diretor de Drenagem Urbana dessa bacia (IPH, 2001).

Tabela 4 - CNs utilizados.

Superfície	CN
Telhado	98
Gramma (áreas urbanas)	74
Calçadas e ruas	98

Fonte: Tassi (2002).

Uma vez determinada a parcela de chuva efetiva, a propagação do escoamento é feita com o método da onda cinemática. Nesse modelo o escoamento pode ser propagado tanto superficialmente como em canais, os quais podem receber contribuições laterais e de montante derivadas de outros canais (TASSI, 2002).

O modelo proposto por Schaake foi adotado por possibilitar o detalhamento da bacia desde a escala de lote e, além disso, apresentar várias vantagens (VILLANUEVA, 1984, apud TASSI, 2002):

- a) flexibilidade: o modelo é capaz de trabalhar com diferentes situações e diferentes enfoques, sem perder em nenhum caso a simplicidade e clareza;
- b) a maioria dos parâmetros utilizados são características físicas e, portanto, podem ser estimados a partir das características do lote e dos condutos;

- c) o modelo Schaake reduz significativamente o trabalho em representar os lotes e compor os quarteirões. Uma vez definido o quarteirão tipo, ou blocos formados pelos quarteirões, basta distribuí-los na bacia, formando o conjunto a ser simulado.

Um dos principais fatores que motivou a adoção do modelo proposto por Schaake é que ele permite alterações na sua programação. A linguagem FORTRAN utilizada pelo modelo possibilita a inclusão de novas rotinas, como o TV e, também, a separação do escoamento em sarjetas e condutos (TASSI, 2002).

3.4.3 Dimensionamento das redes de microdrenagem

Buscando avaliar o impacto dos TVs sobre o dimensionamento de redes de microdrenagem pluvial em diversas escalas espaciais, as redes de microdrenagem foram inicialmente dimensionadas simulando-se o sistema com telhado convencional (TC) nos lotes e utilizando-se uma chuva de projeto com período de retorno de 5 anos (CP-TR5), critério normalmente empregado em Porto Alegre – RS.

Posteriormente, as redes foram dimensionadas com a utilização de uma chuva de projeto com período de retorno de 10 anos (CP-TR10), sendo possível realizar uma comparação entre os diâmetros determinados em cada situação. A CP-TR10 foi considerada como uma segunda alternativa para critério de projeto, já que estruturas de controle de escoamento na fonte devem ser dimensionadas segundo esse critério (IPH, 2001).

As chuvas de projeto foram obtidas a partir da equação IDF determinada para a região do Aeroporto de Porto Alegre (Equação 6), local mais próximo à bacia simulada (BEMFICA, 1999).

Segundo recomendação de diversos autores, utiliza-se a duração da chuva na bacia igual ao tempo de concentração da mesma. Como o tempo de concentração da bacia é de aproximadamente 1 hora, admitiu-se esse valor para a duração das chuvas de projeto (TASSI, 2002). A distribuição temporal das chuvas foi realizada empregando-se o método dos Blocos Alternados (TUCCI, 2013), situando-se o pico das chuvas na metade (50%) da duração dos eventos.

$$i = \frac{826,8 \cdot TR^{0,143}}{(t+13,3)^{0,79}}, \quad (6)$$

Em que:

i = intensidade máxima da chuva em mm/h;

TR = período de retorno da chuva em anos;

t = duração em minutos.

O dimensionamento das redes de microdrenagem foi realizado de montante para jusante na bacia hidrográfica, sempre buscando empregar o menor diâmetro comercial em cada trecho das redes (300 mm). A verificação da capacidade hidráulica era verificada após cada simulação, com a identificação de extravasamentos das redes para as ruas e sarjetas. Caso fosse detectado um armazenamento, o diâmetro era aumentado até comportar os volumes excedentes.

3.4.4 Redimensionamento das redes de microdrenagem

Posteriormente, visando analisar o impacto dos TVs sobre o dimensionamento das redes de microdrenagem, as redes de drenagem previamente dimensionadas foram redimensionadas implementando-se os TVs nos lotes, repetindo-se o processo descrito no item anterior.

Após realizados os dimensionamentos das redes de microdrenagem com e sem a implementação de TV nos lotes para as CP-TR5 e CP-TR10, foi possível realizar uma comparação dos diâmetros necessários em cada trecho, ao longo dos 70 km das redes de microdrenagem.

3.4.5 Análise da eficiência dos telhados verdes na redução de vazões e volumes escoados frente a eventos observados

Para avaliar o impacto que a implementação dos TVs nos lotes promoveria na rede de drenagem, no sentido de reduções de vazões e volumes escoados, foram realizadas simulações do sistema com e sem a implementação de TV nos lotes e a utilização das redes dimensionadas para a CP-TR5. Nessas simulações foram utilizados eventos de chuva observados durante o monitoramento realizado, além do evento de projeto CP-TR5.

A métrica utilizada para avaliar essa eficiência foi a relação entre os volumes propagados nas redes de microdrenagem com uso dos TVs nos lotes e aqueles propagados sem o uso dos TVs nos lotes (Equação 7). Além dessa, também foi utilizada a relação entre as vazões de pico (Q_p) nas duas situações (Equação 8).

$$\text{Relação de volume} = 1 - \frac{\text{Volume hidrograma simulado TC}}{\text{Volume hidrograma simulado TV}} \quad (7)$$

$$\text{Relação de vazão de pico} = 1 - \frac{Q_p \text{ hidrograma simulado TC}}{Q_p \text{ hidrograma simulado TV}} \quad (8)$$

Com o objetivo de avaliar essa eficiência em diferentes escalas de área da bacia hidrográfica, foram realizados cálculos, por meio das equações 7 e 8, para trechos específicos da rede de drenagem, os quais foram selecionados por possuírem diferentes áreas de contribuição. As informações necessárias para essa avaliação foram obtidas a partir da modelagem.

4 RESULTADOS – CALIBRAÇÃO DE EVENTOS E DESENVOLVIMENTO DE MODELO HIDROLÓGICO CHUVA-VAZÃO PARA O TELHADO VERDE

O presente capítulo apresenta os resultados obtidos no atendimento ao objetivo relacionado ao desenvolvimento de um modelo hidrológico do tipo chuva-vazão, e calibração de eventos monitorados no TV.

Os resultados foram organizados de forma a apresentar, inicialmente, o produto do monitoramento realizado; na sequência é apresentado o processo de calibração utilizado para a determinação da chuva efetiva e, por último, são apresentados os modelos de propagação de escoamento utilizados para a geração dos hidrogramas simulados, incluindo o modelo desenvolvido no âmbito deste trabalho. Ao final deste capítulo é apresentada uma discussão geral a respeito dos resultados obtidos.

4.1 Monitoramento

O monitoramento dos eventos de chuva-vazão do TV ocorreu entre Novembro de 2010 e Abril de 2013, compreendendo 29 meses. Na tabela 5 os eventos estão apresentados em ordem cronológica e assinalados com um “x” para qual metodologia foram utilizados, na calibração do CN para determinação da chuva efetiva e/ou no desenvolvimento do modelo de propagação de escoamento.

Tabela 5 - Eventos monitorados e sua utilização em cada metodologia.

(continua)

Data do evento	Nº do Evento	Calibração CN	Modelo de Propagação de Escoamento
24/11/2010	1	X	-
11/12/2010	2	X	-
13/12/2010	3	X	-
20/12/2010	4	X	-
28/01/2011	5	X	-
01/02/2011	6	X	-
04/02/2011	7	X	-
10/02/2011	8	X	-
28/03/2011	9	X	-
13/04/2011	10	X	-
25/04/2011	11	X	-
02/05/2011	12	X	-
11/05/2011	13	X	-
12/05/2011	14	X	-
08/06/2011	15	X	-
21/06/2011	16	X	-
27/06/2011	17	-	-
14/07/2011	18	-	-
21/07/2011	19	-	-
28/07/2011	20	-	X
02/08/2011	21	-	-
09/08/2011	22	-	X
15/08/2011	23	X	-
31/08/2011	24	X	X
06/09/2011	25	X	-
21/09/2011	26	X	-
03/10/2011	27	X	-
06/10/2011	28	X	-
25/10/2011	29	X	-
26/10/2011	30	X	-
10/11/2011	31	X	-
22/11/2011	32	X	-
16/01/2012	33	X	X
30/01/2012	34	-	X
06/02/2012	35	X	X
30/10/2012	36	X	-
12/11/2012	37	X	-
20/11/2012	38	X	-

Tabela 5 - Eventos monitorados e sua utilização em cada metodologia.

(conclusão)

Data do evento	Nº do Evento	Calibração CN	Modelo de Propagação de Escoamento
26/11/2012	39	x	-
03/12/2012	40	x	-
05/12/2012	41	x	-
19/02/2013	45	x	-
25/02/2013	46	x	-
04/03/2013	47	x	-
05/03/2013	48	x	-
08/03/2013	49	x	-
11/03/2013	50	x	-
13/03/2013	51	x	-
21/03/2013	52	x	-
02/04/2013	53	x	-
05/04/2013	54	x	-
12/04/2013	55	x	-
Total	55	48	6

Destaca-se que, embora o período de monitoramento tenha se estendido de 2010 a 2013, ao longo do monitoramento do TV, houve muitos imprevistos. Como se observa, do total de eventos monitorados, foi possível contar com 87% deles para a calibração do valor de CN, e apenas 11% para o ajuste de um modelo do tipo chuva-vazão.

4.2 Calibração do volume de chuva efetiva

Seguindo a metodologia descrita no item 3.2, foram calibrados os valores de CN para cada evento monitorado. Na tabela 6 esses valores estão apresentados, incluindo suas estatísticas, para a totalidade de eventos e, também, de acordo com as condições de umidade antecedente do evento AMCs. Dos 48 eventos utilizados, 71% foram classificados na AMC I, 6% na AMC II e 23% na AMC III.

Os CNs foram determinados desconsiderando a parcela de abstrações iniciais (Ia), correspondente a 20% da capacidade máxima de armazenamento de água no solo (S), conforme proposto na metodologia do CN-SCS. No caso do TV modular, a capacidade de interceptação pela vegetação é praticamente desprezível, considerando a pequena capacidade de cobertura das plantas (PARK e CAMERON, 2008; NAGASE e DUNNETT, 2012), assim o parâmetro S passa a contemplar tanto o volume de água que potencialmente consegue ficar armazenado no solo, na galocha, entre os módulos e a pequena parcela que fica retida na vegetação.

Tabela 6 - Valores de CN estimados e estatísticas para os eventos monitorados.

Classif.	Eventos	P. Média (mm)	CN Médio	CN Mediano	Desvio Padrão	CN Mín.	CN Máx.	CN - IC 95% Inf.	CN - IC 95% Sup.
AMC I	34	33,0	81	85	16	27	100	76	87
AMC II	3	58,1	83	84	13	70	96	68	98
AMC III	11	29,9	86	93	13	61	100	78	93
Total	48	33,8	83	85	15	27	100	78	87

De fato, uma primeira tentativa de calibração considerando a parcela de Ia como 20% de S mostrou que os valores de CN calibrados resultaram muito elevados (em média 94), não sendo compatíveis com os esperados para um TV.

Considerando todos os eventos, o valor médio do CN resultou em 83, ficando dentro das expectativas para um TV quando comparado com valores encontrados por outros autores para TV com características semelhantes, como por exemplo: 86 (CARTER e RASMUSSEN, 2005), 84 (GETTER, ROWE e ANDRESEN, 2007), 75 e 85 (MILLER et al., 2010). A partir da análise dos 48 eventos, observou-se também que, em média, o TV reteve 45% de cada evento de chuva e o volume de armazenamento de água nos módulos foi de 17 L/m².

Os valores médios de CN para as diferentes AMCs também ficaram dentro do padrão esperado, com o menor valor para a AMC I (CN=81) e o maior valor para a AMC III (CN=86).

Analisando os valores de desvio padrão obtidos, variando entre 13 e 16, com média de 15, conclui-se que eles foram relativamente pequenos quando comparados com a faixa de variação do parâmetro CN, que vai de 0 a 100. Porém, segundo Tassi et al. (2006), como geralmente somente valores de CN acima de 50 geram escoamento superficial, desvios padrão nessa faixa podem ser considerados elevados, representando diferenças significativas em uma possível determinação de vazão (ALLASIA e VILLANUEVA, 2007).

Para os resultados encontrados, destaca-se a pequena representatividade de eventos classificados na AMC II, indicando que há necessidade de maior número de monitoramentos de eventos nessa condição, para uma afirmação mais categórica acerca do valor de CN assumido pelo TV.

A partir de uma consulta em tabelas com os valores de CN propostos pelo NRCS (1986) e, considerando que o solo seria bastante impermeável (grupo hidrológico D – para comparar com a superfície impermeável abaixo do TV), verifica-se que um valor de CN da ordem de 83 corresponde a uma superfície do tipo coberta por florestas esparsas, ou de pequeno porte com predomínio de gramíneas em áreas rurais; no meio urbano, esse valor de CN estaria relacionado com uma área de parque em meio urbano, onde a cobertura de grama ocupa entre 50 e 75% da área, ou áreas residenciais com 20% de área impermeável. Verifica-se, desta forma, que o TV seria equivalente à manutenção de uma superfície permeável, podendo ser considerado como uma alternativa para compensar o impacto da urbanização em meio urbano.

4.3 Propagação do escoamento superficial

Uma vez concluída a calibração do parâmetro CN para a determinação da parcela de chuva efetiva, foi realizada a calibração da propagação do escoamento superficial com o uso de modelos conhecidos no meio hidrológico, a fim de identificar qual modelo melhor reproduz as condições da propagação do escoamento no TV.

Para uma análise inicial, foram selecionados os seguintes modelos de propagação do escoamento superficial: hidrograma unitário sintético do SCS,

reservatório linear simples, Muskingun, Muskingun-Cunge linear e onda cinemática. A rotina de cálculo para a propagação do escoamento com cada um desses modelos foi feita em linguagem de programação FORTRAN.

Os modelos que produziram melhores resultados foram o da onda cinemática e do hidrograma unitário sintético do SCS. Portanto, os resultados e comentários apresentados na sequência correspondem à aplicação desses dois modelos.

4.3.1 Modelo da onda cinemática

Esse modelo foi escolhido pela facilidade de estimativa de seus parâmetros, pois eles são, na sua maioria, características físicas e, portanto, podem ser determinados a partir das características do TV.

Na calibração do modelo da onda cinemática (OC) foram fornecidas as características físicas do TV, como o comprimento e a declividade do TV. Para a calibração foi realizado o ajuste do parâmetro relacionado à rugosidade da superfície de propagação (n de Manning) e o intervalo de tempo de cálculo, para fins de estabilidade numérica.

O coeficiente de rugosidade de Manning calibrado foi igual a 0,05, valor maior que o correspondente a uma bacia com pouca vegetação (0,02) (TUCCI, 2013). A discretização temporal dos eventos chuvosos que produziu melhores resultados foi de 2 minutos, e o valor do CN variou para cada evento, sendo utilizados os valores calibrados em cada evento correspondente, conforme apresentado no item anterior.

Ao final da simulação, os hidrogramas gerados foram comparados com os hidrogramas observados de forma visual, e a verificação da eficiência do modelo foi medida através do cálculo de erro de volume (Tabela 7) e do coeficiente Nash-Sutcliffe (Tabela 8). Os hidrogramas simulados estão apresentados nas figuras de 22 a 27.

4.3.2 Modelo do hidrograma unitário sintético do SCS

A escolha do hidrograma unitário sintético do SCS (HU-SCS) foi baseada na facilidade de sua aplicação e, também, por apresentar melhores resultados para a faixa de vazões de ajuste, desprezando-se os erros em outras faixas de valores (TUCCI, 2005).

Os parâmetros calibrados foram o tempo de concentração e o intervalo de tempo de discretização da chuva (notar que o monitoramento foi realizado com intervalo de tempo de 2 minutos, sendo este o menor intervalo de tempo possível na calibração). Os melhores resultados obtidos foram 5 e 2 minutos, para o tempo de concentração e intervalo de tempo, respectivamente. O intervalo de tempo suficientemente menor que o tempo de concentração garantiu que não houvesse distorção das distribuições dos volumes e das vazões. Os CNs utilizados foram os mesmos calibrados previamente no item 4.2.

Após as simulações, os hidrogramas gerados pelo HU-SCS foram comparados visualmente com os observados e os simulados pelo modelo de OC. Os hidrogramas simulados pelo modelo do HU-SCS estão apresentados nas figuras de 22 a 27. Além disso, também foi realizada a verificação da eficiência do modelo a partir do cálculo de erro de volume (Tabela 7) e do coeficiente Nash-Sutcliffe (Tabela 8), comparando-se os valores com os encontrados para o modelo de OC.

Tabela 7 - Erro de volumes dos hidrogramas observados em relação aos simulados pelos modelos de OC e HU-SCS.

Data evento	Evento	OC	HU-SCS
28/07/2011	20	5%	-8%
09/08/2011	22	28%	9%
31/08/2011	24	9%	-2%
16/01/2012	33	27%	14%
30/01/2012	34	34%	5%
06/02/2012	35	19%	-2%
Média		20%	7%

Tabela 8 - Valores calculados para o coeficiente Nash-Sutcliffe para os modelos de OC e HU-SCS.

Data evento	Evento	OC	HU-SCS
28/07/2011	20	0,64	0,60
09/08/2011	22	0,74	0,78
31/08/2011	24	0,32	0,45
16/01/2012	33	0,78	0,84
30/01/2012	34	0,70	0,65
06/02/2012	35	0,85	0,70
Média		0,67	0,67

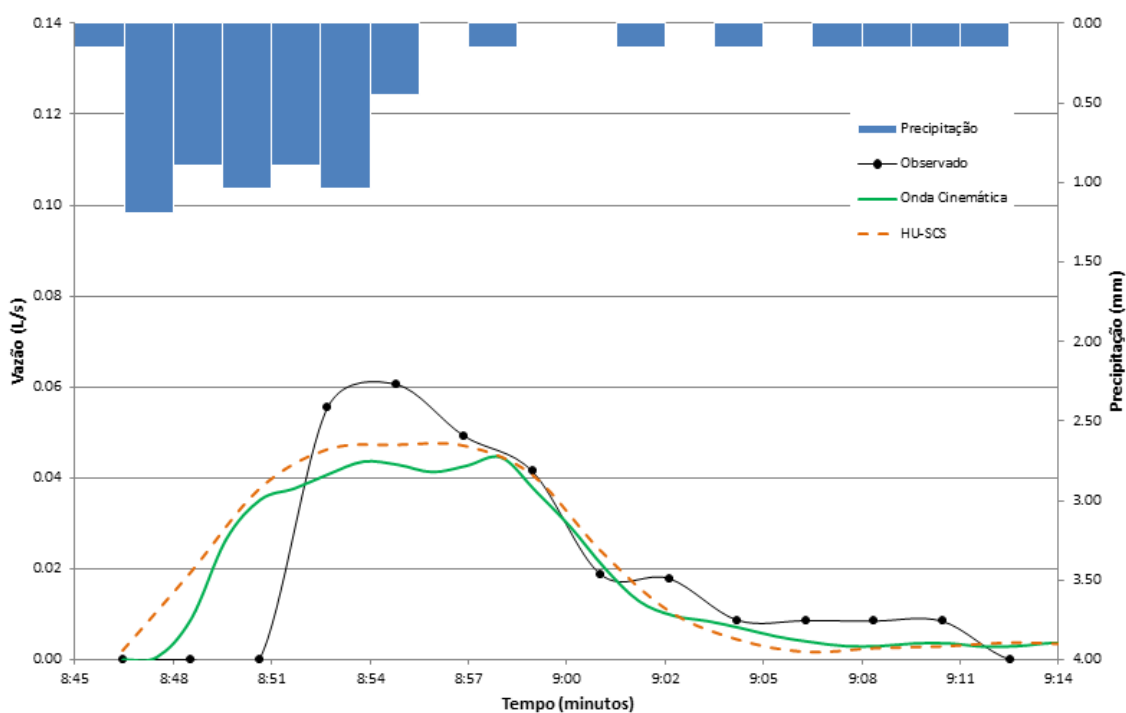


Figura 22 - Calibração do evento 20 (28/07/2011) pelos modelos de OC e HU-SCS.

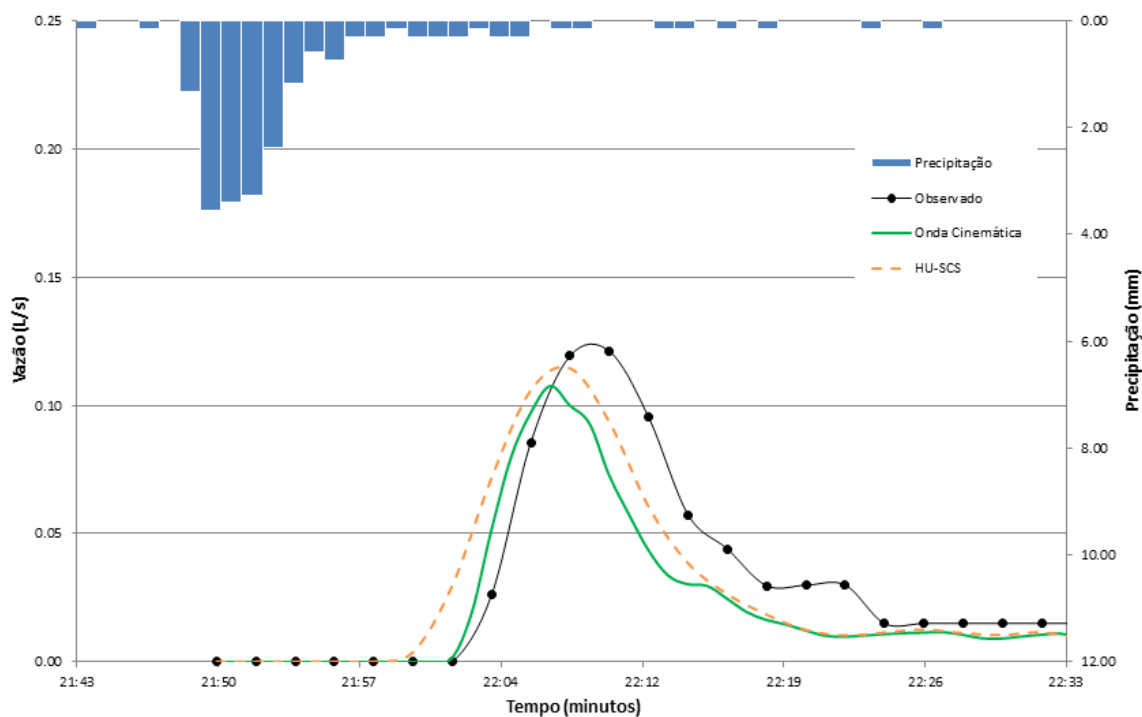


Figura 23 - Calibração do evento 22 (09/08/2011) pelos modelos de OC e HU-SCS.

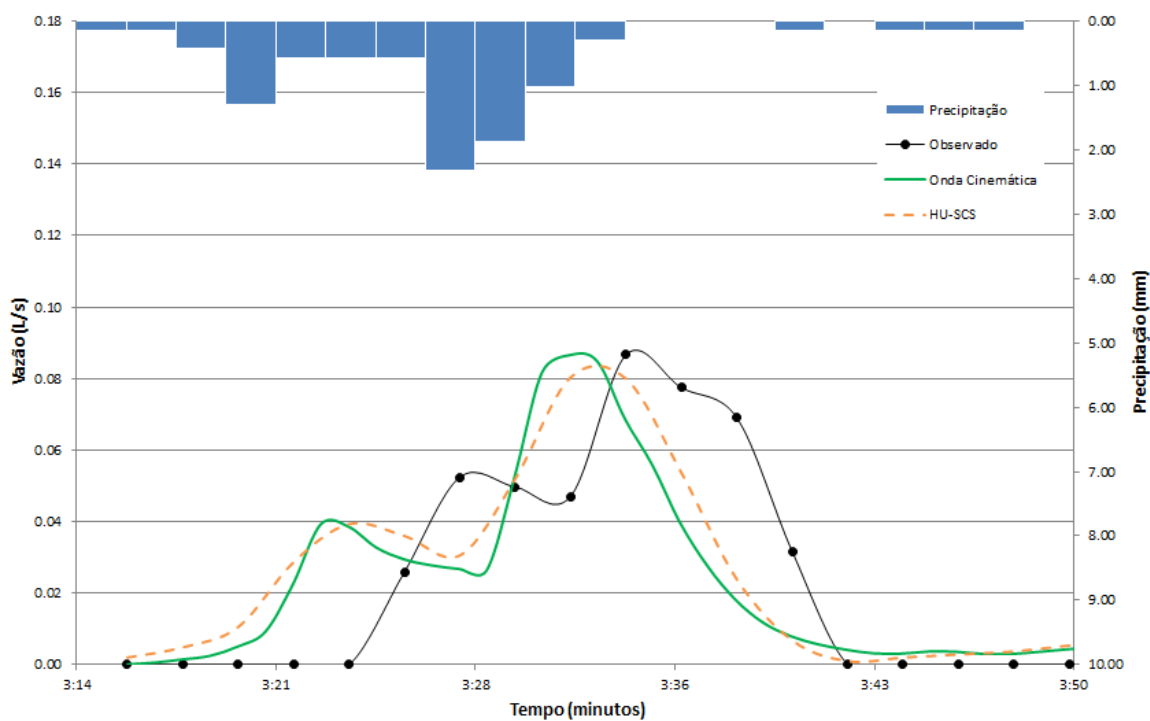


Figura 24 - Calibração do evento 24 (31/08/2011) pelos modelos de OC e HU-SCS.

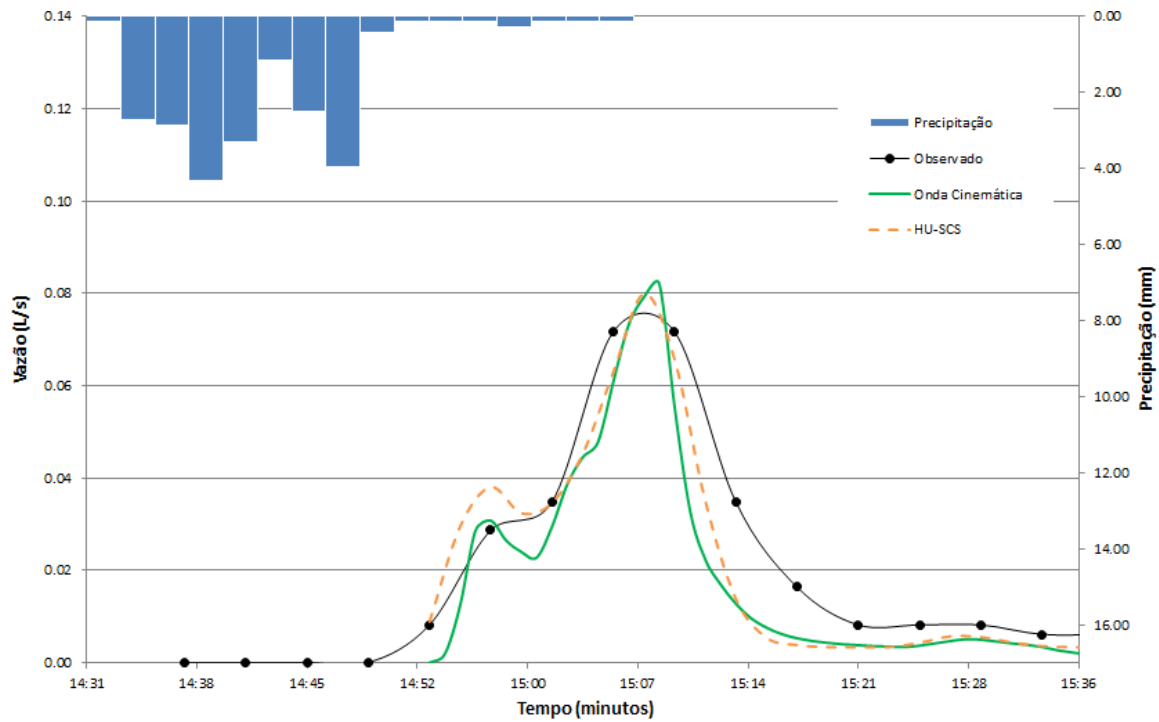


Figura 25 - Calibração do evento 33 (16/01/2012) pelos modelos de OC e HU-SCS.

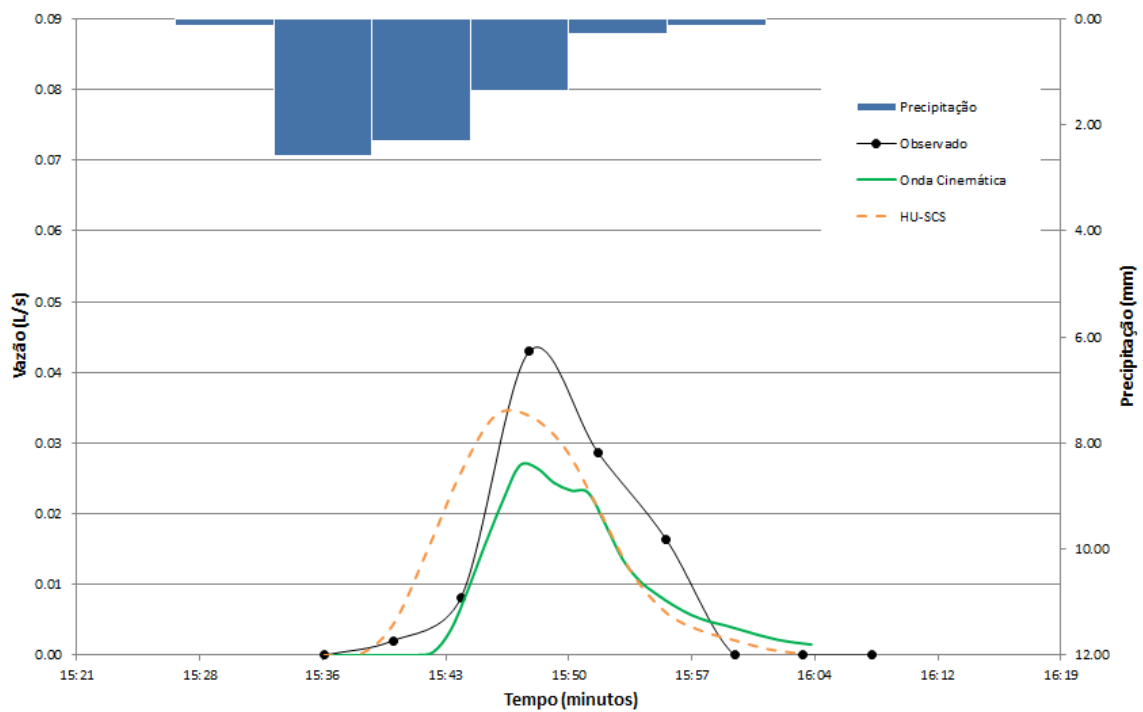


Figura 26 - Calibração do evento 34 (30/01/2012) pelos modelos de OC e HU-SCS.

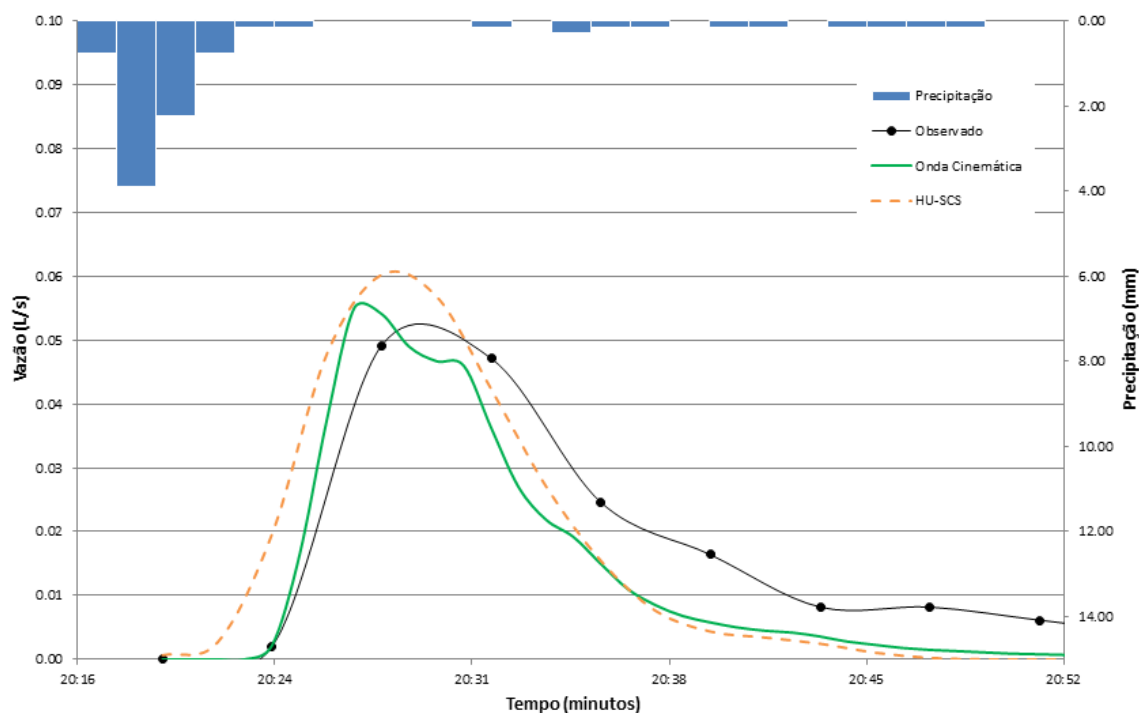


Figura 27 - Calibração do evento 35 (06/02/2012) pelos modelos de OC e HU-SCS.

A calibração dos eventos pelo modelo de OC não foi satisfatório. Em média, os hidrogramas apresentaram volumes subestimados em 20%, atentando aos valores encontrados para os eventos 22, 33, 34 e 35 (Tabela 7). O modelo também gerou hidrogramas com tempos de pico adiantados (eventos 22, 24, 34 e 35) e vazões de pico subestimadas (eventos 20, 22 e 34).

Os valores obtidos para o coeficiente Nash-Sutcliffe variaram de 0,32 a 0,85 (Tabela 8). Em 4 eventos (20, 22, 24 e 34) esses valores ficaram abaixo de 0,75, e a média ficou em 0,67. Sabendo-se que quanto mais perto de 1,00 o valor, maior é a semelhança entre os hidrogramas observado e simulado, pôde-se considerar que o modelo de OC não foi efetivo em reproduzir os hidrogramas observados.

A utilização do modelo do HU-SCS produziu uma sensível melhora nos resultados, relacionados ao erro na estimativa do volume. Os volumes dos hidrogramas simulados aproximaram-se dos volumes dos hidrogramas observados (Tabela 7), os quais ficaram em média 7% maiores. No evento 34, a diferença dos volumes caiu de 34% para 5% comparativamente ao modelo de OC.

Apesar dessa melhora nos volumes, o tempo e a vazão de pico dos hidrogramas simulados pelo HU-SCS permaneceram inalterados em relação aos

gerados pelo modelo de OC, exceto no evento 34, no qual a vazão de pico ficou consideravelmente menor. O coeficiente Nash-Sutcliffe (Tabela 8) melhorou nos eventos 22, 24 e 33, todavia, piorou nos eventos 20, 34 e 35, sendo obtida a mesma média alcançada pelo modelo de OC (0,67).

Como o foco deste estudo é a obtenção de um bom ajuste da vazão de pico, então a eficiência do coeficiente Nash-Sutcliffe serial ideal. Ambos os modelos apresentaram valores semelhantes para esse parâmetro, porém como no HU-SCS as discrepâncias foram menores em relação ao erro de volume, esse poderia ser o modelo mais adequado. No entanto, procurou-se desenvolver um modelo baseado na metodologia do HU-SCS de maneira a melhor representar o TV, apresentado no item 4.3.3.

4.3.3 Hidrograma unitário sintético proposto para o telhado verde

Com o objetivo de melhorar os resultados da propagação do escoamento superficial, foi proposto um modelo de propagação de escoamento para o TV modular baseado em uma modificação na metodologia do HU-SCS.

No hidrograma unitário sintético desenvolvido para o TV modular (HUS-TVM) foram sugeridas alterações em alguns dos parâmetros utilizados no HU-SCS com o objetivo de defasar o tempo de pico dos hidrogramas simulados (Tabela 9). Para isso, foram simulados os mesmos eventos utilizados previamente nos itens 4.3.1 e 4.3.2, e comparados os hidrogramas simulados com os observados, até atingir o ajuste desejado. O resultado foi o aumento do tempo de pico (t_p), a redução do tempo de recessão (t_r) e o conseqüente aumento da vazão de pico (Q_p). Propostos os parâmetros, foi realizada uma verificação do volume unitário do HUS-TVM.

A utilização do HUS-TVM proporcionou uma melhoria nos resultados, com a defasagem do tempo de pico dos hidrogramas simulados (Figuras 28 a 33). O seu emprego não alterou substancialmente o erro nos volumes dos hidrogramas simulados (Tabela 10), porém, o coeficiente Nash-Sutcliffe aumentou consideravelmente (Tabela 11), com valores entre 0,77 e 0,94, e uma média de 0,86.

Tabela 9 - Parâmetros utilizados para a definição do HU-SCS e do HUS-TVM.

HU-SCS	HUS-TVM
$tp = 0,6.tc$	$tp = 1,2.tc$
$tr = 1,67.Tp$	$tr = 0,57.Tp$
$Qp = (0,208.A)/Tp$	$Qp = (0,3538.A)/Tp$

Unidades: tc, tp, Tp e tr (horas); Qp (m³/s/1mm); A (km²).

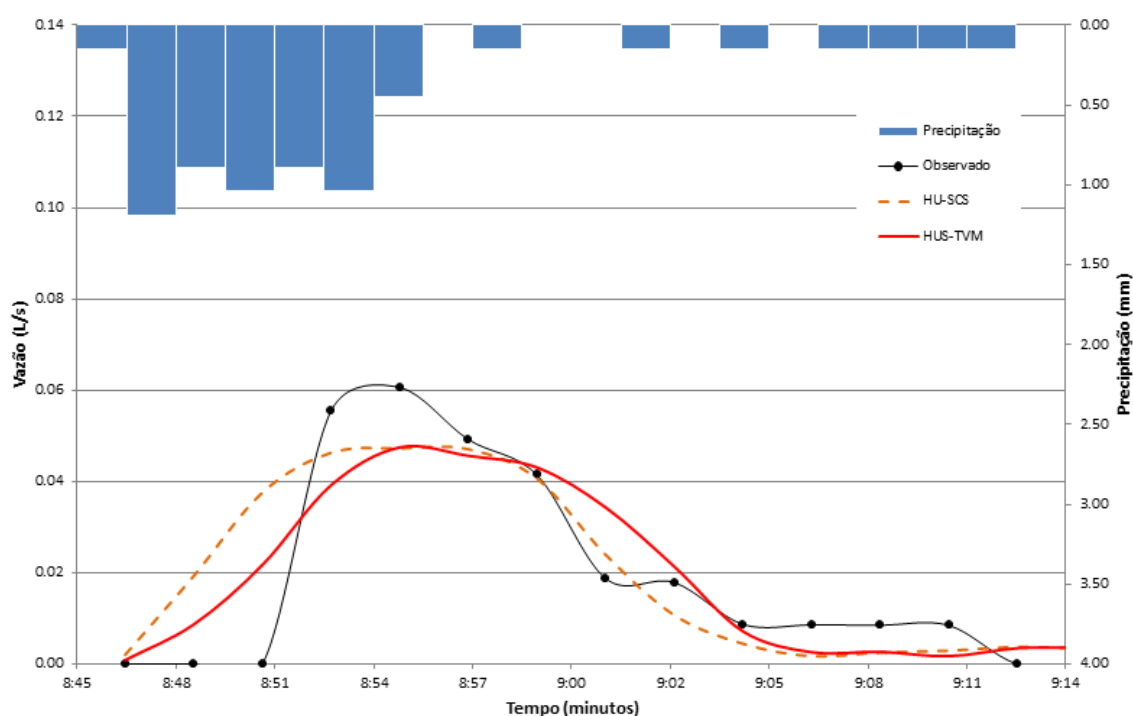


Figura 28 - Calibração do evento 20 (28/07/2011) pelos modelos HU-SCS e HUS-TVM.

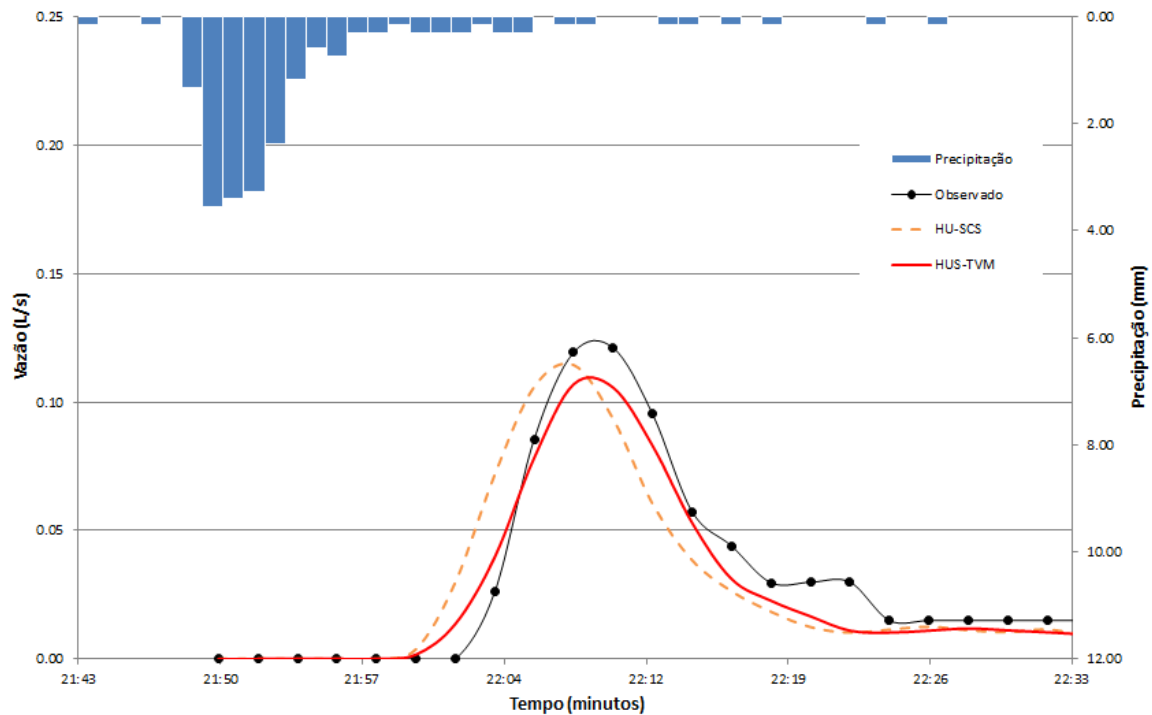


Figura 29 - Calibração do evento 22 (09/08/2011) pelos modelos HU-SCS e HUS-TVM.

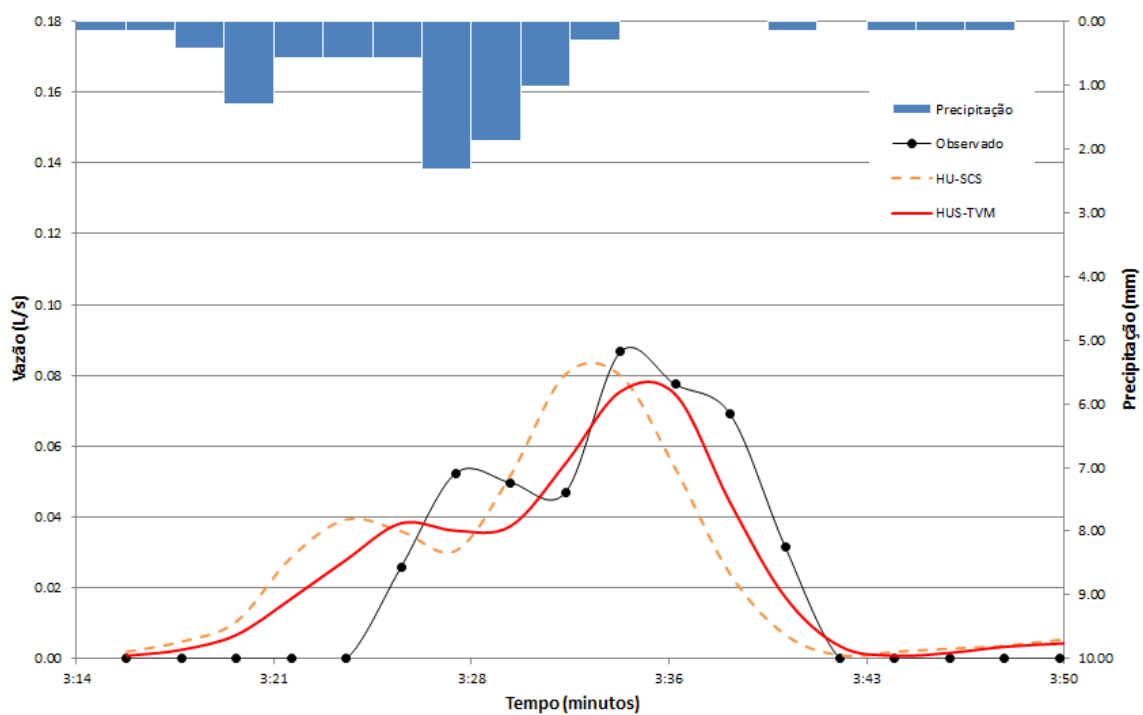


Figura 30 - Calibração do evento 24 (31/08/2011) pelos modelos HU-SCS e HUS-TVM.

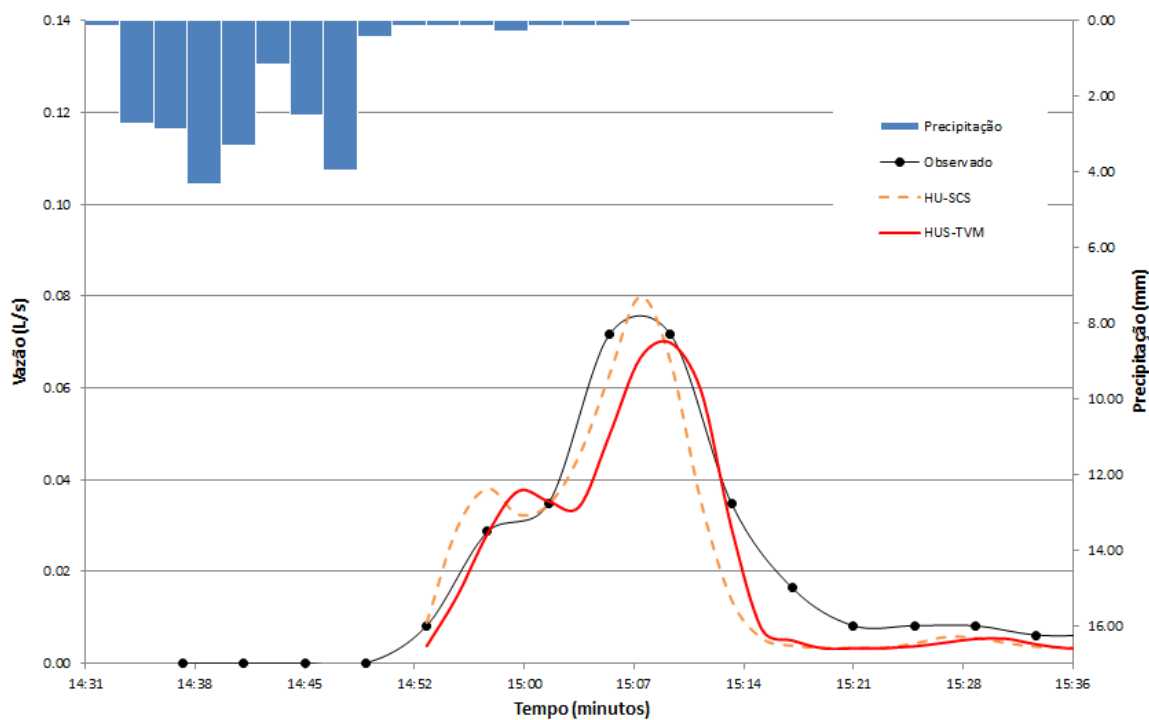


Figura 31 - Calibração do evento 33 (16/01/2012) pelos modelos HU-SCS e HUS-TVM.

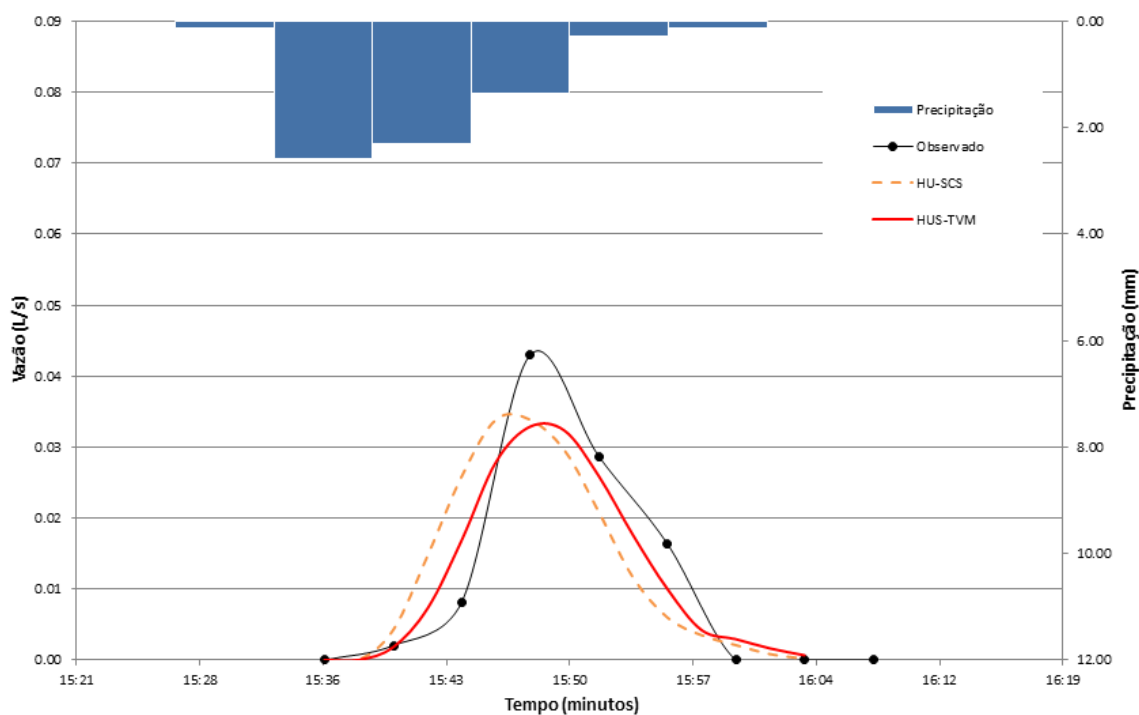


Figura 32 - Calibração do evento 34 (30/01/2012) pelos modelos HU-SCS e HUS-TVM.

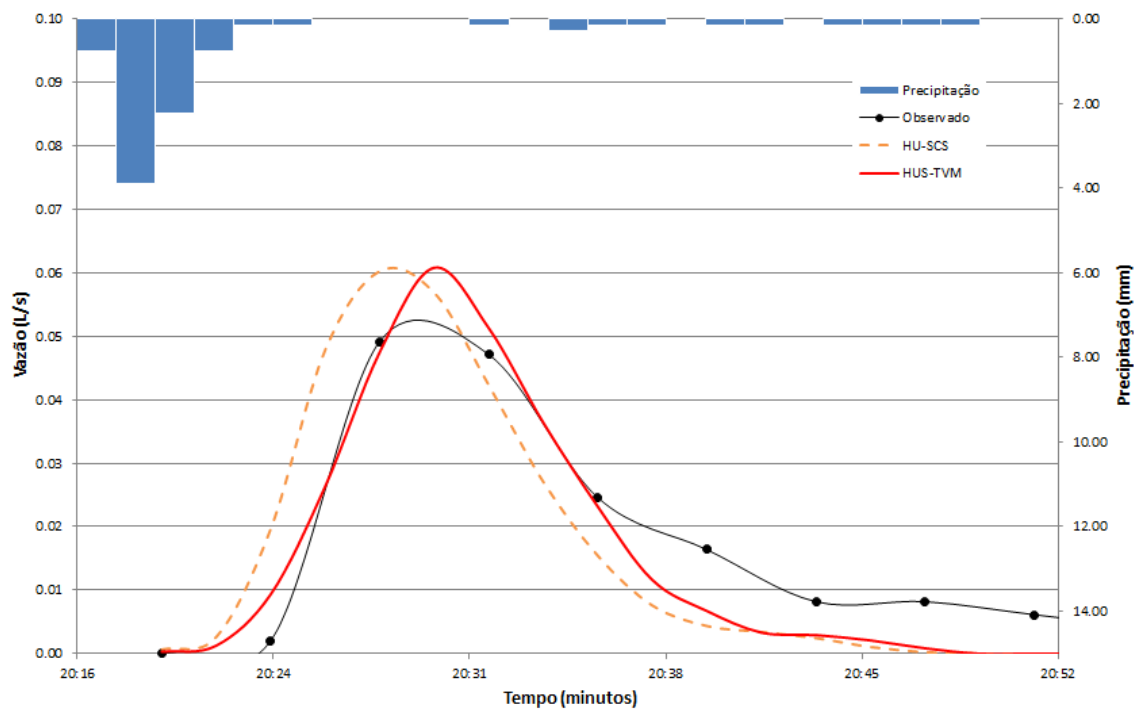


Figura 33 - Calibração do evento 35 (06/02/2012) pelos modelos HU-SCS e HUS-TVM.

Tabela 10 - Erro de volumes dos hidrogramas observados em relação aos simulados pelos modelos de OC, HU-SCS e HUS-TVM.

Data evento	Evento	OC	HU-SCS	HUS-TVM
28/07/2011	20	5%	-8%	-4%
09/08/2011	22	28%	9%	13%
31/08/2011	24	9%	-2%	1%
16/01/2012	33	27%	14%	17%
30/01/2012	34	34%	5%	8%
06/02/2012	35	19%	-2%	1%
Média		20%	7%	7%

Tabela 11 - Valores encontrados para o coeficiente Nash-Sutcliffe para os modelos de OC, HU-SCS e HUS-TVM.

Data evento	Evento	OC	HU-SCS	HUS-TVM
28/07/2011	20	0,64	0,60	0,77
09/08/2011	22	0,74	0,78	0,94
31/08/2011	24	0,32	0,45	0,80
16/01/2012	33	0,78	0,84	0,87
30/01/2012	34	0,70	0,65	0,86
06/02/2012	35	0,85	0,70	0,93
Média		0,67	0,67	0,86

Embora o HUS-TVM, comparativamente ao HU-SCS, não tenha alterado sensivelmente os resultados em relação aos erros de volume (ambos os modelos geraram um erro médio de 7%), os seus coeficientes de Nash-Sutcliffe tiveram em média um aumento expressivo, de 0,67 (HU-SCS) para 0,86 (HUS-TVM). Portanto, quando se quer uma melhor estimativa da vazão de pico é indicada a utilização do HUS-TVM, que é o caso deste trabalho.

A dificuldade em obter-se um ajuste perfeito para o modelo de TV pode ter relação direta com o comportamento do TV, o qual pode ser difícil de explicar do ponto de vista físico. Um exemplo disso, é que, após um evento de chuva, muita quantidade de água pode ficar momentaneamente armazenada no interior e entre os módulos. Posteriormente essa água armazenada pode escoar, mesmo ocorrendo um evento de chuva de pequeno volume, podendo ocasionar um aumento considerável do volume escoado, alterando o hidrograma deste evento.

4.4 Conclusões e recomendações

Analisando-se os resultados obtidos, pôde-se afirmar que os objetivos foram alcançados. A partir da calibração dos eventos monitorados no TV, foi definido o parâmetro a ser utilizado na determinação da chuva efetiva (CN=83, utilizando-se o

método do CN-SCS modificado) e desenvolvido o modelo de propagação de escoamento do TV (HUS-TVM).

Em relação à determinação da chuva efetiva, embora os valores médios do CN – para o total de eventos e os classificados em cada AMC – tenham ficado dentro do esperado, nos próximos estudos deverá ser incluído um maior número de eventos a partir de novos monitoramentos, englobando principalmente as condições AMC II e AMC III, que tiveram baixa representatividade.

Uma verificação não realizada, mas necessária para futuros estudos, diz respeito à estimativa dos valores de CN para eventos que ocorrem nas diferentes estações do ano, o que afeta as taxas de evapotranspiração, alterando também a condição de umidade antecedente do solo. Em um verão muito seco, por exemplo, supõe-se que a capacidade máxima de armazenamento de água no solo seja superior às encontradas nas outras estações, e isso não é considerado ao simplesmente estabelecer a condição de umidade antecedente com base no volume de chuvas acumulado nos cinco dias anteriores, como sugere o método do CN-SCS.

Nos TVMs, embora o processo de interceptação não seja muito expressivo, outro fator que pode ser considerado em um novo trabalho de estimativa do CN é o fisiotipo e a fitossanidade da cobertura vegetal do telhado ao longo dos diferentes eventos monitorados, o que permitiria a obtenção de um fator para estimativa das abstrações iniciais em cada condição.

Como descrito previamente, houve muitos imprevistos ao longo do monitoramento do TV, o que ocasionou a utilização de apenas 11% dos eventos para o desenvolvimento do modelo de propagação de escoamento do TVM. Ocorreram imprevistos como: problemas relacionados à instalação hidráulica do experimento, problemas de leitura do sensor de pressão e do pluviógrafo, burocracia enfrentada na reconstrução da estrutura do TV, problemas de manutenção do equipamento e dificuldades financeiras. Assim, muitos dos eventos monitorados puderam ser utilizados somente para a determinação do valor do parâmetro CN, já que dependiam apenas da leitura manual de nível, restando poucos dados confiáveis para a obtenção de hidrogramas.

Considerando os eventos selecionados para o desenvolvimento do modelo de propagação, os resultados obtidos pelo HUS-TVM mostraram-se aceitáveis em relação à reprodução dos volumes e picos dos hidrogramas observados, com um modelo baseado em uma alteração do HUS-SCS.

Com a aplicação do HUS-TVM, os resultados melhoraram consideravelmente quando comparados aos alcançados pelos modelos de OC e do HU-SCS, com o ajuste do tempo de pico e o aprimoramento do coeficiente Nash-Sutcliffe. Partindo desses resultados, o modelo do HUS-TVM foi escolhido para ser utilizado na propagação do escoamento dos TV na modelagem da bacia hidrográfica hipotética realizada na sequência deste estudo.

5 RESULTADOS – ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE TELHADOS VERDES NO CONTROLE DO ESCOAMENTO PLUVIAL EM DIFERENTES ESCALAS

Objetivando analisar a eficiência dos TVs no controle do escoamento pluvial em diferentes escalas da bacia hidrográfica, neste capítulo são apresentados os resultados das simulações do sistema para chuvas de projeto e chuvas observadas com e sem a implementação de TV nos lotes. Os parâmetros utilizados para os TVs na modelagem hidrológica estão apresentados no capítulo 4.

Nos itens 5.1 e 5.2 são apresentados os resultados das simulações do sistema para chuvas de projeto com período de retorno de 5 e 10 anos, buscando avaliar o impacto dos TVs sobre o dimensionamento de redes de microdrenagem pluvial.

No item 5.3 são apresentados os resultados das simulações do sistema para eventos de chuva observados, pretendendo avaliar a eficiência dos TVs na redução do escoamento pluvial frente a eventos de chuva reais.

5.1 Dimensionamento das redes de microdrenagem

As redes de microdrenagem foram inicialmente dimensionadas simulando-se o sistema montado no modelo Schaake com TC nos lotes e utilizando-se as chuvas de projeto CP-TR5 e CP-TR10, determinadas de acordo com a metodologia descrita previamente. Os dimensionamentos foram realizados empregando-se inicialmente o menor diâmetro comercial em cada trecho das redes (300 mm). A cada simulação do sistema foi verificado se houve ou não extravasamento das redes para as ruas e sarjetas, aumentando-se, se necessário, o diâmetro da tubulação.

A partir da comparação do dimensionamento das redes de microdrenagem realizado com CP-TR5 e CP-TR10, aquele realizado com a CP-TR10 produziu aumento de um diâmetro comercial nas tubulações de 47 trechos, localizados em diversos pontos das redes. Alguns desses trechos e seus respectivos diâmetros calculados para cada chuva de projeto podem ser observados na tabela 12.

Tabela 12 - Exemplos de trechos que tiveram seu diâmetro aumentado.

Trecho	Área de contribuição	Diâmetro 5 anos*	Diâmetro 10 anos*
13MI2	3 Quarteirões	0,4	0,6
14MI1	1 Quarteirão	0,3	0,4
1RMI3	9 Quarteirões	0,6	0,8
RMI84	12 Quarteirões	0,8	1,0
RMI85	24 Quarteirões	1,0	1,2

* Diâmetro em metros.

5.2 Redimensionamento das redes de microdrenagem

Para avaliar o impacto de TVs sobre o dimensionamento de redes de microdrenagem pluvial, foi repetido o processo descrito no item 5.1, redimensionando-se as redes a partir de simulações do sistema com a implementação de TV nos lotes e utilização das CP-TR5 e CP-TR10.

Durante essa simulação foi utilizado o parâmetro CN do TV obtido durante o processo de calibração do volume de chuva efetiva (item 4.2), o qual resultou em 83.

Após esse processo, foi possível comparar os diâmetros em cada trecho dos 70 km das redes de microdrenagem e avaliar o impacto dos TVs na redução dos diâmetros das tubulações, causada pela atenuação das vazões escoadas no sistema.

Verificou-se que a implementação de TV nos lotes gerou redução de um diâmetro comercial em 69 e 106 trechos das redes dimensionadas para as CP-TR5 e CP-TR10, respectivamente; esses valores correspondem a 33 (CP-TR5) e 52% do total de 210 (CP-TR10) trechos simulados. No Apêndice A esses resultados são apresentados em maior detalhe.

Uma análise dos resultados apresentados no Apêndice A, permite identificar que as reduções ocorreram tanto nos trechos de início de rede, com poucos quarteirões contribuintes (trechos indicados pela sigla MI), como os de final de rede, que recebem o escoamento pluvial de vários quarteirões (trechos indicados pela sigla RMI).

Com a introdução de TV nos lotes, o maior número de trechos com possibilidade de redução dos diâmetros foi identificado para a situação em que as redes foram dimensionadas para a CP-TR10. Explica-se esse fato pelo maior número de diâmetros comerciais mínimos empregados no dimensionamento das redes de drenagem para a CP-TR5, os quais não puderam ser diminuídos. Embora não houvesse possibilidade de diminuição de diâmetro nesses trechos, houve uma sensível atenuação dos volumes e das vazões de pico propagados para as redes de drenagem. Em média, considerando todos os trechos, a utilização de TV nos lotes promoveu uma redução do volume escoado de 23,8% e a vazão de pico 29,9%. Para a CP-TR10, esses valores foram de 22,5% e 28,9%, respectivamente.

5.3 Efeito de TVs na redução de vazões frente a eventos de chuva observados

Pretendendo avaliar a redução do escoamento pluvial causada pela implementação de TV nos lotes frente a eventos de chuvas reais, foram realizadas simulações do sistema com as redes dimensionadas para a CP-TR5 com a utilização de 6 eventos de chuva observados, os mesmos utilizados previamente no desenvolvimento do modelo de propagação de escoamento (Capítulo 4), por apresentarem discretização temporal de 2 minutos. Na tabela 13 esses eventos são apresentados conjuntamente aos seus volumes, durações e intensidades máximas. Para efeito de análise, nessa tabela também são apresentados os valores do evento de projeto CP-TR5.

Tabela 13 - Eventos de chuva observados utilizados nas simulações.

Data Evento	Evento	Volume (mm)	Duração (min)	Intens. Máx.(mm/h)
28/07/2011	20	6,69	40	35,68
09/08/2011	22	19,41	50	106,67
31/08/2011	24	9,84	38	69,49
16/01/2012	33	12,20	40	59,22
30/01/2012	34	6,80	36	38,76
06/02/2012	35	7,95	24	58,50
-	CP-TR5	38,63	60	120,63

Para avaliar o efeito dos TV sobre os volumes e vazões propagados nas redes de drenagem em diferentes escalas da bacia hidrográfica, foram comparados os volumes escoados e as vazões de pico dos hidrogramas simulados (para cada um dos sete eventos de chuva apresentados na Tabela 13) em diversos trechos da rede de microdrenagem. Para isso, foram selecionados segmentos que possuem diferentes áreas de contribuição, em termos do número de quarteirões (Tabela 14), lembrando que, juntamente com a representação do quarteirão, a simulação inclui passeios públicos e sistema viário. No Apêndice B pode ser observado o número de quarteirões contribuintes de todos os trechos das redes de microdrenagem.

Tabela 14 - Áreas de contribuição dos trechos analisados.

Trecho	Área de contribuição
1SEG2	1 Lote
41MI1	1 Quarteirão
43MI1	2 Quarteirões
43MI2	3 Quarteirões
45MI2	6 Quarteirões
RMI124	12 Quarteirões
RMI125	21 Quarteirões
RMI128	39 Quarteirões

As reduções dos volumes (VT) e das vazões de pico (Qp) em cada trecho, causadas pela implementação de TV nos lotes, para cada evento de chuva estão apresentados nas tabelas de 15 a 21. Os trechos estão representados por suas respectivas áreas de contribuição.

Tabela 15 - Reduções dos volumes e vazões de pico em cada trecho para o evento 20.

Área de contribuição	Redução	
	VT	Qp
1 Lote	55,54%	60,31%
1 Quarteirão	36,80%	42,26%
2 Quarteirões	36,79%	41,20%
3 Quarteirões	36,79%	41,24%
6 Quarteirões	36,79%	40,95%
12 Quarteirões	36,79%	39,58%
21 Quarteirões	36,79%	39,90%
39 Quarteirões	36,79%	40,07%

Tabela 16 - Reduções dos volumes e vazões de pico em cada trecho para o evento 22.

Área de contribuição	Redução	
	VT	Qp
1 Lote	44,04%	56,16%
1 Quarteirão	29,17%	37,19%
2 Quarteirões	29,17%	37,25%
3 Quarteirões	29,17%	37,25%
6 Quarteirões	29,16%	36,26%
12 Quarteirões	29,16%	35,31%
21 Quarteirões	29,17%	35,32%
39 Quarteirões	29,17%	35,53%

Tabela 17 - Reduções dos volumes e vazões de pico em cada trecho para o evento 24.

Área de contribuição	Redução	
	VT	Qp
1 Lote	52,64%	61,32%
1 Quarteirão	34,93%	41,18%
2 Quarteirões	34,92%	40,69%
3 Quarteirões	34,92%	40,72%
6 Quarteirões	34,92%	39,39%
12 Quarteirões	34,92%	38,77%
21 Quarteirões	34,92%	38,59%
39 Quarteirões	34,92%	38,49%

Tabela 18 - Reduções dos volumes e vazões de pico em cada trecho para o evento 33.

Área de contribuição	Redução	
	VT	Qp
1 Lote	50,43%	56,91%
1 Quarteirão	33,46%	38,95%
2 Quarteirões	33,46%	38,51%
3 Quarteirões	33,46%	38,53%
6 Quarteirões	33,46%	38,15%
12 Quarteirões	33,46%	37,34%
21 Quarteirões	33,46%	37,45%
39 Quarteirões	33,46%	37,68%

Tabela 19 - Reduções dos volumes e vazões de pico em cada trecho para o evento 34.

Área de contribuição	Redução	
	VT	Qp
1 Lote	54,93%	59,32%
1 Quarteirão	36,39%	40,15%
2 Quarteirões	36,38%	38,96%
3 Quarteirões	36,38%	38,94%
6 Quarteirões	36,38%	38,72%
12 Quarteirões	36,38%	38,63%
21 Quarteirões	36,38%	38,78%
39 Quarteirões	36,38%	38,69%

Tabela 20 - Reduções dos volumes e vazões de pico em cada trecho para o evento 35.

Área de contribuição	Redução	
	VT	Qp
1 Lote	45,58%	56,03%
1 Quarteirão	30,22%	39,33%
2 Quarteirões	30,22%	39,76%
3 Quarteirões	30,22%	39,75%
6 Quarteirões	30,21%	39,13%
12 Quarteirões	30,21%	38,24%
21 Quarteirões	30,21%	38,34%
39 Quarteirões	30,21%	38,58%

Tabela 21 - Reduções dos volumes e vazões de pico em cada trecho para o evento CP-TR5.

Área de contribuição	Redução	
	VT	Qp
1 Lote	35,25%	47,04%
1 Quarteirão	24,10%	31,82%
2 Quarteirões	24,10%	30,38%
3 Quarteirões	24,10%	30,42%
6 Quarteirões	24,10%	30,18%
12 Quarteirões	24,10%	28,94%
21 Quarteirões	24,10%	28,47%
39 Quarteirões	24,10%	28,76%

Os volumes e vazões de pico dos hidrogramas gerados pelas simulações com a implementação dos TVs no sistema resultaram consideravelmente menores em relação aos gerados pelas simulações com os TCs.

Os resultados revelaram que as maiores reduções ocorreram nos eventos de menor volume de chuva (eventos 20 e 34), e as menores, nos eventos de maior volume de chuva (eventos 22 e 33), o que já era um efeito esperado, em virtude da redução da capacidade de armazenamento de água no TV. A única exceção é no evento 35, no qual, apesar de apresentar pequeno volume de chuva, houve menor redução, o que pode ser explicado pela alta intensidade e pequena duração do evento.

A análise na escala de lote revela que o volume de chuva e a redução dos volumes escoados nas redes de drenagem relacionam-se com um coeficiente de determinação de 0,81 (Figura 34a), e o volume de chuva e a redução das vazões de pico com um coeficiente de determinação de 0,84 (Figura 34b). No quarteirão, os coeficientes de determinação são de 0,78 (Figura 34c) e de 0,92 (Figura 34d) para a análise da relação entre volume de chuva e redução dos volumes e das vazões de pico, respectivamente. Nota-se que o volume de chuva influencia sensivelmente

nessas reduções. Como observou-se anteriormente que a redução dos volumes e vazões de pico não se altera expressivamente a partir da escala de 1 quarteirão, foram analisadas apenas relações em escala de lote e 1 quarteirão.

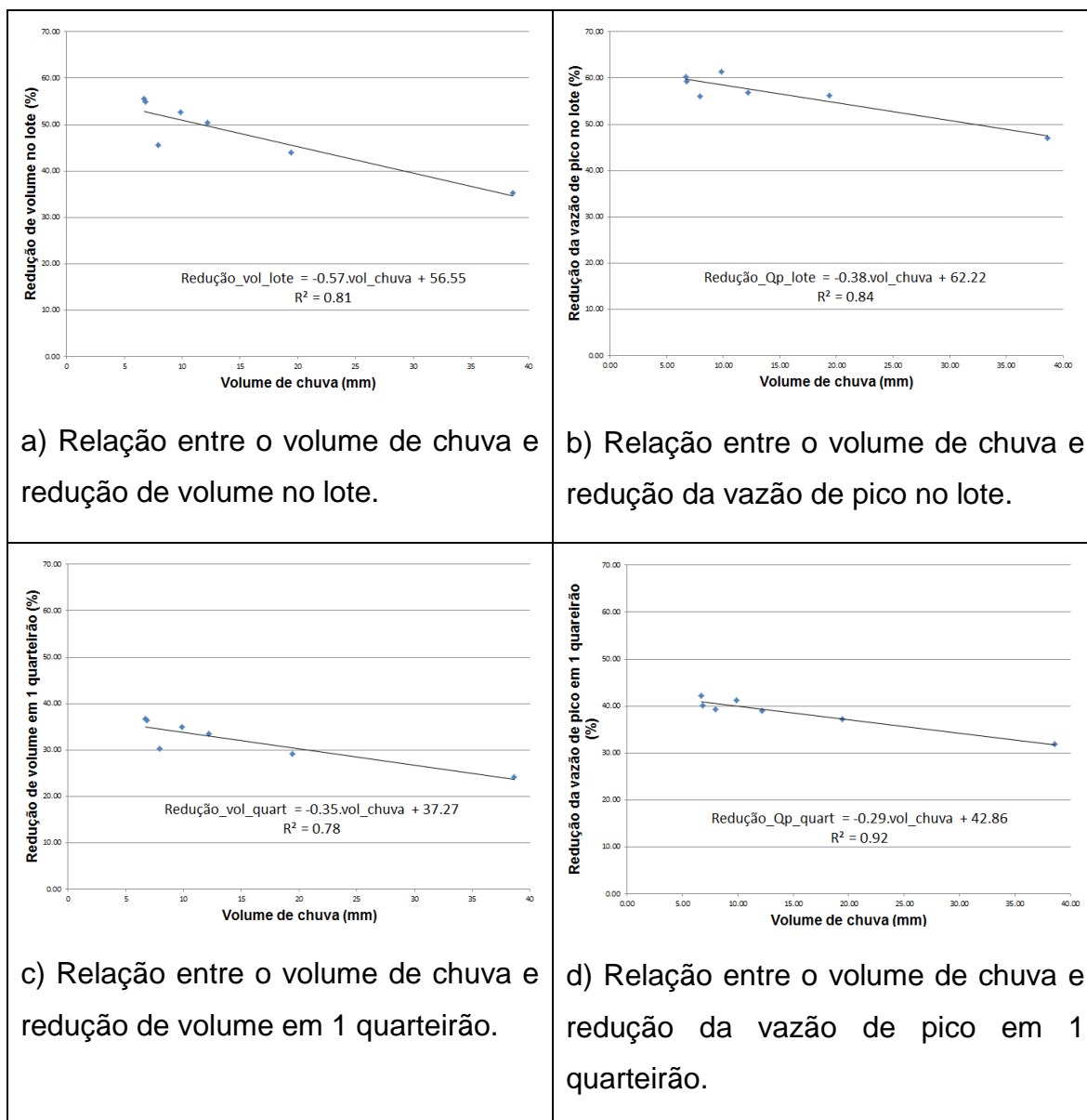


Figura 34 - Relação entre o volume de chuva e a redução dos volumes e vazões de pico no lote e em 1 quarteirão.

Analisando-se a efetividade dos TVs em escala espacial, observou-se que, em média, as reduções de volume e vazão de pico foram maiores no trecho 1SEG2, que apresenta as vazões derivadas apenas de um lote, do que nos trechos 41MI1, 43MI1, 43MI2, 45MI2, RMI124, RMI125 e RMI128, que representam as vazões escoadas em um ou mais quarteirões (Tabela 22), ou seja, a efetividade do TV reduziu com o aumento da escala espacial.

Além disso, notou-se também que as reduções não se alteraram substancialmente a partir da escala de 1 quarteirão (trecho 41MI1). Portanto, a partir dessa constatação e, com o objetivo de elucidar graficamente o impacto dos TVs no escoamento pluvial em diferentes escalas, nas figuras 35 e 36 são apresentados apenas os hidrogramas simulados dos trechos 1SEG2 e 41MI1, correspondentes às vazões escoadas no lote e 1 quarteirão, respectivamente, para o evento 20 (tomado como exemplo), com a utilização de TC e TV nos lotes.

Tabela 22 - Reduções médias dos volumes e vazões de pico em cada trecho para todos os eventos.

Área de contribuição	Redução	
	VT	Qp
1 Lote	48,34%	56,73%
1 Quarteirão	32,15%	38,70%
2 Quarteirões	32,15%	38,11%
3 Quarteirões	32,15%	38,12%
6 Quarteirões	32,15%	37,54%
12 Quarteirões	32,15%	36,69%
21 Quarteirões	32,15%	36,69%
39 Quarteirões	32,15%	36,83%

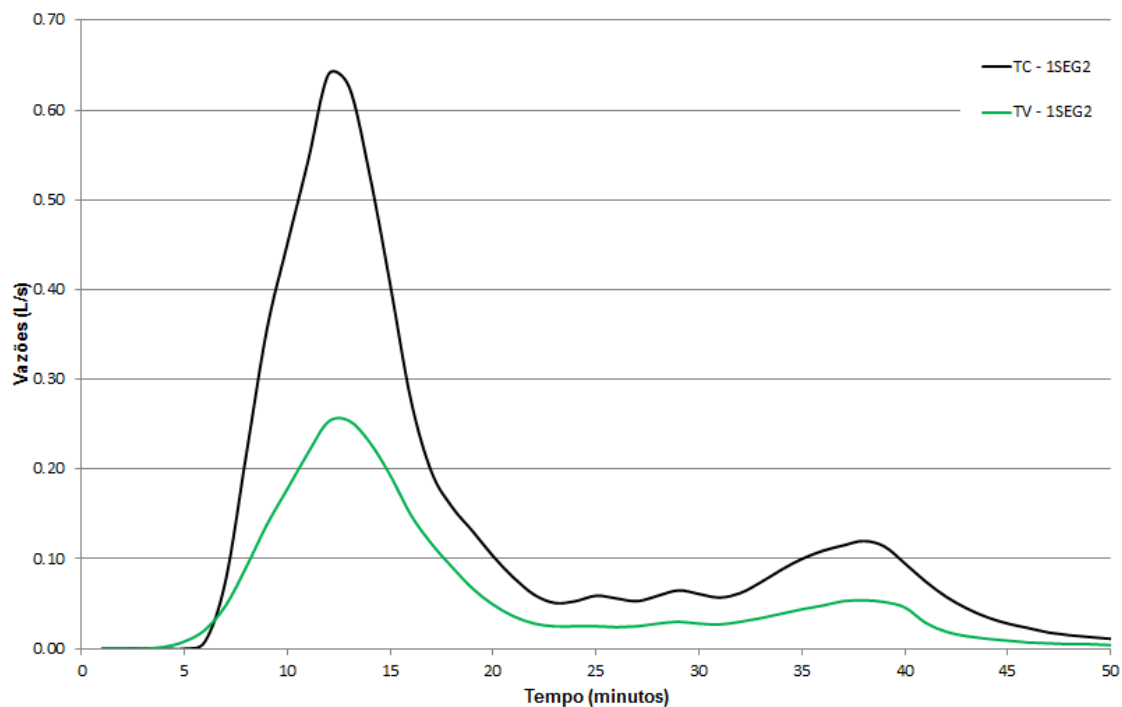


Figura 35 - Hidrogramas simulados para o trecho 1SEG2 (lote) do evento 20.

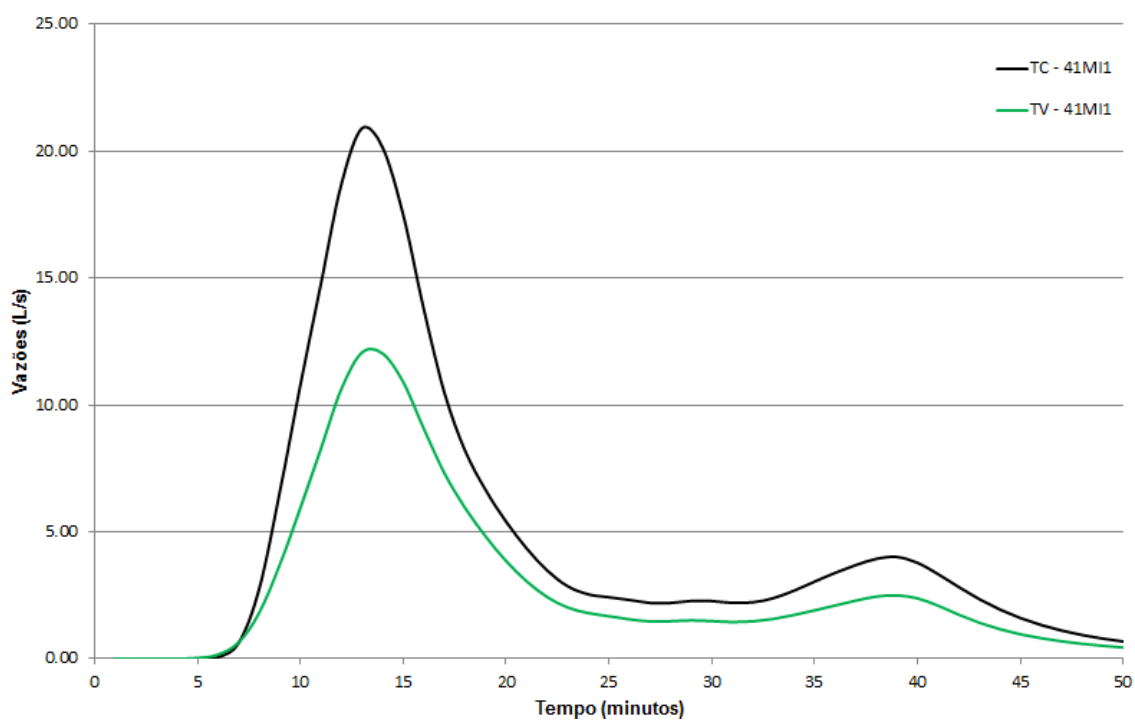


Figura 36 - Hidrogramas simulados para o trecho 41MI1 (1 quarteirão) do evento 20.

Analisando-se os hidrogramas simulados para os dois trechos, observou-se novamente que, em escala de lote (trecho 1SEG2), a redução das vazões foi superior à obtida em escala de quarteirão (trecho 41MI1). Os hidrogramas simulados para os outros 6 eventos podem ser vistos no Apêndice C.

5.4 Conclusões e recomendações

Os volumes escoados e as vazões de pico reduziram consideravelmente com a implementação de TV nos lotes do sistema simulado. Em escala de lotes, estas reduções foram maiores que em escala de quarteirão(ões), concluindo-se que a efetividade dos TVs na redução do escoamento pluvial diminui à medida que se aumenta a escala analisada. A menor eficiência do TV na redução dos volumes e vazões de pico em maior escala de análise (trechos que recebem um ou mais quarteirões) pode ser explicada pelo fato de haver uma maior vazão gerada em áreas impermeáveis, como ruas e sarjetas, onde não existe o efeito do TV.

Verificou-se, também, que o volume de chuva é determinante para a eficiência do TV. Nos eventos de maior volume, e aqueles de alta intensidade, as atenuações dos volumes e vazões de pico foram menores. Com isso, pode-se concluir que, apesar das pequenas diferenças entre os volumes dos eventos de chuva, a efetividade dos TVs no controle do escoamento pluvial está fortemente relacionada ao volume e intensidade desses eventos, sendo maior quanto menor o volume e intensidade da chuva. Alguns outros estudos também chegaram a essa conclusão, como os de Carter e Rasmussen (2005), Moran, Hunt e Smith (2005), Villareal e Bengtsson (2005), Carter e Jackson (2007), Hilten, Lawrence e Tollner (2008), Palla et al. (2008) e Tang (2012).

A partir do controle do escoamento pluvial, os TVs também impactaram na redução dos diâmetros das tubulações das redes de microdrenagem. Dos 210 trechos analisados, foi possível reduzir um diâmetro comercial em 33 e 52% dos trechos das redes dimensionadas para as CP-TR5 e CP-TR10, respectivamente. Com isso pode-se concluir que a implementação de TVs nos lotes ocasionaria economia na instalação de novas redes de microdrenagem, principalmente nas

situações em que são dimensionadas para chuvas de projeto de maior período de retorno, pois possuiriam menor número de trechos de diâmetro comercial mínimo. Portanto, uma análise sugerida é uma avaliação dessa economia.

Nas simulações foram utilizados apenas eventos de chuva de pequenos volumes, os quais foram obtidos no monitoramento do TV e possuíam a discretização temporal de 2 minutos, calibrada previamente no Capítulo 4 para utilização no modelo hidrológico desenvolvido para o TV. Como houve diversos problemas no monitoramento do TV, não foram obtidos eventos de chuva de grandes volumes, então é recomendada a sequência do monitoramento do TV para aumentar o número de eventos a ser incluído na análise.

6 CONCLUSÃO GERAL

De acordo com os resultados encontrados, concluiu-se que os TVs são eficientes no controle do escoamento pluvial, tanto em escala de lote, como em escala de um ou mais quarteirões, apesar dessa eficiência diminuir na medida em que se aumenta a escala de análise. No entanto, comparativamente a um sistema sem TVs, ainda assim é possível obter uma considerável atenuação nas vazões escoadas. Portanto, atingiu-se o objetivo principal, o qual era analisar a eficiência dos TVs na gestão das águas pluviais, a partir do seu controle.

Para atingir esse objetivo, foram cumpridas outras tarefas descritas no decorrer deste trabalho, como o monitoramento de eventos de chuva-vazão de um TV; calibração do volume de chuva efetiva desse TV; desenvolvimento de um modelo hidrológico do tipo chuva-vazão para o TV; avaliação do impacto de TVs sobre o dimensionamento das redes de microdrenagem; e avaliação do impacto de TVs nas redes previamente dimensionadas.

Para a calibração do volume de chuva efetiva, foi utilizado um método modificado do CN-SCS, no qual as abstrações iniciais foram desconsideradas, em virtude da incerteza que esse parâmetro pode representar no caso do TVM, devido à reduzida capacidade de interceptação e retenção superficial nos módulos.

O modelo hidrológico do tipo chuva-vazão, desenvolvido para o TV (HUS-TVM), foi baseado no método do HU-SCS, para o qual foram propostas modificações em alguns de seus parâmetros, objetivando-se melhor representar a propagação do escoamento no TV. Esse modelo foi desenvolvido devido à resultados pouco satisfatórios originados na calibração de eventos com modelos de propagação do escoamento conhecidos no meio hidrológico.

Além disso, concluiu-se que os TVs impactam positivamente no dimensionamento das redes de microdrenagem, a partir da redução do diâmetro das tubulações, causada pela atenuação das vazões de pico. Concluiu-se também que os TVs geram redução expressiva dos volumes e vazões de pico propagados nas redes de microdrenagem previamente dimensionadas.

REFERÊNCIAS

ALLASIA, D. G.; VILLANUEVA, A. O. N. Custo da Incerteza na Macrodrenagem Urbana I: Determinação dos Parâmetros mais Sensíveis na Modelagem de Macrodrenagem Urbana. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 1, p. 65-77. 2007.

AMPIM, P. A. Y. et al. Green Roof Growing Substrates: Types, Ingredients, Composition and Properties. **Journal of Environmental Horticulture**, v. 28, p. 244-252. 2010.

ARAÚJO, S. R. **As Funções dos Telhados Verdes no Meio Urbano, na Gestão e no Planejamento de Recursos Hídricos**. 2007. 21 f. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2007.

BAPTISTA, M.; NASCIMENTO, N.; BARRAUD, S. **Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana**. 2 ed. Porto Alegre: ed. ABRH, 2011.

BAROSKY, T. K. **Plasticidade ornamental e propagação de herbáceas para utilização em telhado verde**. 2011. 134 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2011.

BARRA, E. **Paisagens úteis: escritos sobre paisagismo**. São Paulo: SENAC, 2006. 139 p., il.

BEATTIE, D. J.; BERGHAGE, R. Green roof media characteristics: The basic. In: North American Green Roof Conference: Greening Rooftops for Sustainable Communities, 2., 2004, Portland, Estados Unidos. **Proceedings...**Toronto: The Cardinal Group, 2004.

BEMFICA, D. **Verificação da Aplicabilidade de Padrões de Chuvas de Projeto de Porto Alegre**. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

BRASIL. Ministério das Cidades. **Programa Drenagem Urbana Sustentável**. Manual para apresentação de propostas. 23 f. 2006.

CARTER, T.; BUTLER, C. Ecological impacts of replacing traditional roofs with green roofs in two urban areas. **Cities and the Environment**, Boston, v. 1, art. 9. 2008.

CARTER, T.; JACKSON, C. R. Vegetated roofs for stormwater management at multiple special scales. **Landscape and Urban Planning**, v. 80, p. 84-94. 2007.

CARTER, T.; RASMUSSEN, T. C. Use of green roofs for ultra-urban stream restoration in the Georgia Piedmont (USA). In: Georgia Water Resources Conference, 2005, Athens, Estados Unidos. **Proceedings...** Athens: The University of Georgia, 2005.

CASTRO, A. S.; GOLDENFUM, J. A. Uso de telhados verdes no controle quantitativo do escoamento superficial urbano. **Atitude**, Porto Alegre, v. 7, p. 75-81. 2010.

CHOCAT, B. **Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement**. Paris: Technique & Documentation-Lavoisier, 1997.

DUNNETT, N. et al. Influence of vegetation composition on runoff in two simulated green roof experiments. **Urban Ecosystems**, v. 11, n. 4, p. 385-398. 2008.

DUNNETT, N.; KINGSBURY, N. **Planting Green Roofs and Living Walls**. Portland, OR: Timber Press, 2004.

ECOTELHADO. **Informações: Produtos**. Disponível em: <<http://www.ecotelhado.com.br>>. Acesso em: jan 2013.

EMILSSON, T. Vegetation development on extensive vegetated green roofs: Influence of substrate composition, establishment method and species mix. **Ecological Engineering**, v. 33, n. 3-4, p. 265-277. 2008.

FLL. **Richtlinie für die Planung, Ausführung und Pflege von Dachbegrünungen**. Bonn: Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau E.V., 2002.

FRAZER, L. Paving Paradise. **Environmental Health Perspectives**, v. 113, n. 7, p. 457-462. 2005.

GETTER, K. L.; ROWE, D. B. The Role of Extensive Green Roofs in Sustainable Development. **HortScience**, East Lansing, v. 41, n. 5, ago. 2006.

GETTER, K. L.; ROWE, D. B.; ANDRESEN, J. A. Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention. **Ecological Engineering**, v. 31, p. 225-231, 2007.

GOOGLE EARTH. **Santa Maria – RS: UFSM**. Disponível em: <earth.google.com/intl/pt>. Acesso em: 10 mar 2014.

GREENROOFS.COM: The Resource Portal for Green Roofs. **Projects**. Disponível em: <<http://www.greenroofs.com>>. Acesso em: jan. 2013.

HARZMANN, U. German green roofs. In: Annual Green Roof Construction Conference, 2002. **Proceedings...** Chicago: Roofscapes, Inc., 2002.

HATHAWAY, A. M.; HUNT, W. F.; JENNINGS, G. D. A Field Study of Green Roof Hydrologic and Water Quality Performance. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, Raleigh, v. 51, art. 1, p. 37-44. 2008.

HEINZE, W. Results of an experiment on extensive growth of vegetation on roofs. **Rasen Grünflächen Begrünungen**, Bonn, v. 16, n. 3, p. 80-88. 1985.

HENEINE, M. C. A. S. **Cobertura Verde**. 2008. 49 f. Monografia (Especialização em Construção Civil) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

HILTEN, R. N.; LAWRENCE, T. M.; TOLLNER, E. W. Modeling stormwater runoff from green roofs with HYDRUS-1D. **Journal of Hydrology**, v. 358, p. 288-293. 2008.

HINMAN, C. **Low Impact Development: Technical Guidance Manual for Puget Sound**. Washington: Puget Sound Action Team, 2005. 246 p.

HOLLANDER, D. A. **Mathematical Rainfall/Runoff Modeling Methods for Green Roofs and Their Applications**. 2007. 118 f. Tese (Doutorado)-University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, 2007.

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS – IPH. Bacia do Arroio Areia. In: **Plano Diretor de Drenagem Urbana**. Porto Alegre: Departamento de Esgotos Pluviais de Porto Alegre/DEP, 2001.

KASMIN, H.; STOVIN, V. R.; HATHWAY, E. A. Towards a generic rainfall-runoff model for green roofs. **Water Science & Technology**, v. 62, n. 4, p. 898-905. 2010.

KEEFE, G. et al. Design of a Instrumented Model Green Roof Experiment. In: GeoCongress: Geosustainability and Geohazard Mitigation, 2008, New Orleans, Estados Unidos. **Proceedings...**New Orleans: Geo-Institute of American Society of Civil Engineers, 2008.

KÖHLER, M. Plant survival research and biodiversity: Lessons from Europe. In: Annual Greening Rooftops for Sustainable Communities Conference, Awards and Trade Show, 1., 2003, Chicago, Estados Unidos. **Proceedings...** [s.n.], 2003.

KÖHLER, M. Long-Term Vegetation Research on Two Extensive Green Roofs in Berlin. **Urban Habitats**, v. 4, n. 1, p. 3-26. 2006.

KÖHLER, M. et al. Green roofs in temperates climates and in hot-humid tropics – far beyond the aesthetics. **Environmental Management and Health**, Bingley, v. 13, n. 4, p. 382-391. 2002.

KOLB, W.; TRUNK, R.; EPPEL, J. Recyclingbaustoffe zur Dachbegrünung. **Deutscher Gartenbau**, p. 32-35. 2001.

LASSALLE, F. Wirkung von trockenstreß auf xerophile pflanzen. **Stadt und Grün**, [S.I.], v. 47, n. 6, p. 437-443. 1998.

LAZZARIN, R. M.; CASTELLOTTI, F.; BUSATO, F. Experimental measurements and numerical modelling of a green roof. **Energy and Buildings**, v. 37, p. 1260-1267. 2005.

LORENZINI, F. et al. Calibração e Simulação Hidrológica de um Telhado Verde Utilizando o Método da Curva-Número do SCS. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 20., 2013, Bento Gonçalves. **Anais...**Bento Gonçalves: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2013.

MACIVOR, J. S.; RANALLI, M. A.; LUNDHOLM, J. T. Performance of dryland and wetland plant species on extensive green roofs. In: *Annals of Botany*, 2010. **Proceedings...**Oxford: Oxford University Press, 2010.

MENTENS, J.; RAES, D.; HERMY, M. Greenroofs as a part of urban water management. In: *Water Resources Management*, 2., 2003. **Proceedings...**Southampton: WIT Press, p. 35-44, 2003.

MENTENS, J.; RAES, D.; HERMY, M. Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? **Landscape and Urban Planning**. v.77, p.217-226. 2006.

MILLER, C. et al. Stormwater Policy as a Green Roof (Dis)Incentive for Retail Developers. In: *Cities Alive: Annual Green Roof & Wall Conference*, 8., Vancouver, Canadá, 2010. **Proceedings...** [s.n.], 2010.

MONTERUSSO, M. A.; ROWE, D. B.; RUGH, C. L. Establishment and Persistence of *Sedum* spp. And Native Taxa for Green Roof Applications. **HortScience**, East Lansing, v. 40, n. 2, p. 391-396. abr. 2005.

MORAN, A.; HUNT, B.; JENNINGS, G. A North Carolina Field Study to Evaluate Greenroof Runoff Quantity, Runoff Quality, and Plant Growth. In: *World Water & Environmental Resources Congress*, 2003, Philadelphia, Estados Unidos. **Proceedings...**Reston: Environmental and Water Resources Institute of American Society of Civil Engineers, 2003.

MORAN, A.; HUNT, B.; SMITH, J. Hydrologic and water quality performance from greenroofs in Goldsboro and Raleigh, North Carolina. In: *Watershed Management Conference*, 2005, Estados Unidos. **Proceedings...**Reston: Environmental and Water Resources Institute of American Society of Civil Engineers, 2005.

MORUZZI, R. B.; MOURA, C. C.; BARBASSA, A. P. Influência da Umidade e da Inclinação no Desempenho de Instalação Experimental Piloto de Telhado Verde Extensivo. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 20., 2013, Bento Gonçalves. **Anais...**Bento Gonçalves: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2013.

NAGASE, A.; DUNNETT, N. Amount of water runoff from different vegetation types on extensive green roofs: Effects of plant species, diversity and plant structure. **Landscape and Urban Planning**, v. 104, p. 356-363. 2012.

NRCS. **Urban Hydrology for Small Watersheds**. Washington, DC.: Natural Resource Conservation Service, Conservation Engineering Division, U.S. Department of Agriculture, Washington, DC., 1986.

OBERNDORFER, E. et al. Green Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions, and Services. **BioScience**, v. 57, n. 10, p. 823-833, nov. 2007.

OLIVEIRA, E. W. N. **Telhados verdes para habitações de interesse social: retenção das águas pluviais e conforto térmico**. 2009. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

OSMUNDSON, T. **Roof Gardens: History, Design and Construction**. 1 ed. New York: W. W. Norton & Company, 1999.

PALLA, A. et al. Modelling storm water control operated by green roofs at the urban catchment scale. In: International Conference on Urban Drainage, 2008, Edinburgh, Escócia. **Proceedings...** [s.n.], 2008.

PARK, A.; CAMERON, J. L. The influence of canopy traits on throughfall and stemflow in five tropical trees growing in a Panamanian plantation. **Forest Ecology and Management**, v. 255, p.1915-1925, 2008.

PECK, S. W. et al. **Greenbacks from Green Roofs: Forging a New Industry in Canada**. Canada Mortgage and Housing Corporation, 01 mar. 1999. 78 p.

PERSCH, C. G. et al. Avaliação do Comportamento de um Telhado Verde Sob Condições Climáticas Subtropicais. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 19, 2011, Maceió. **Anais...**Maceió: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2011.

PERSCH, C. G. **Avaliação da Eficiência de um Telhado Verde no Controle Quantitativo do Escoamento Pluvial**. 2012. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

ROCKEFELLER CENTER. **Art & History**. Disponível em: <<http://www.rockefellercenter.com>>. Acesso em: fev. 2013.

ROSENZWEIG, C.; GAFFI, S.; PARSHALL, L. **Green Roofs in the New York Metropolitan Region: Research Report**. Columbia University Center for Climate Systems Research e NASA Goddard Institute for Space Studies, 2006.

ROTH-KLEYER, S. Vegetationstechnische Eigenschaften mineralischer Substratkomponenten zur Herstellung von Vegetationstrag – und Dränschichten für bodenferne Begrünungen. **Dach + Grün**, v. 10, p. 4-11, 2001.

SCHAAKE, J. C. Modeling Urban Runoff as a Deterministic Process. In: **Treatise Urban Water Systems**. Colorado State University, 1971, p. 343-401.

SCS. **Engineering Handbook: Section 4 – Hydrology**. Washington: U.S. Dept. Agr. Supplement A., 1957.

SHE, N.; PANG, J. Physically Based Green Roof Model. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 15, n. 6, p. 458-464, jun. 2010.

SHERRARD, J. A.; JACOBS, J. M. Vegetated Roof Water-Balance Model: Experimental and Model Results. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 17, p. 858-868, ago. 2012.

SILVEIRA, A. L. L. Hidrologia urbana no Brasil. In: **Drenagem urbana: gerenciamento, simulação e controle**. Porto Alegre: ABRH e Editora da UFRGS, cap. 1, p. 7-25, 1998.

SNODGRASS, E. 100 Extensive Green Roofs: Lesson Learned. In: North American Green Roof Conference: Greening Rooftops for Sustainable Communities, 3., 2005, Washington, DC, Estados Unidos. **Proceedings...**Toronto: The Cardinal Group, 2005.

SOUZA, C. F.; CRUZ, M. A. S.; TUCCI, C. E. M. Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto: Planejamento e Tecnologias Verdes para a Sustentabilidade das Águas Urbanas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 2, p. 9-18, abr./jun. 2012.

STOVIN, V.; DUNNETT, N.; HALLAM, A. Green Roofs – getting sustainable drainage off the ground. In: International Conference of Sustainable Techniques in Urban Water Management (Novatech), 6., 2007, Lyon, França. **Proceedings...** v. 1, 2007.

TANG, Y. **Exploring the Response of Urban Storm Sewer System to the Implementation of Green Roofs**. 2012. 108 f. Dissertação (Master of Science in Civil Engineering)-University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, 2012.

TASSI, R. **Efeito dos Microrreservatórios de lote sobre a Macrodrenagem Urbana**. 2002. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

TASSI, R. et al. Determinação do Parâmetro CN Para Sub-Bacias Urbanas do Arroio Dilúvio – Porto Alegre/RS. In: Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste, 1., 2006, Curitiba. **Anais...**Curitiba: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2006.

TASSI, R.; VILLANUEVA, A. O. N. Análise do Impacto dos Microrreservatórios de Lote nos Custos de Uma Rede de Drenagem Urbana. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 9, n. 3, p. 89-98, jul./set. 2004.

TASSI, R.; VILLANUEVA, A. O. N. Uso do Modelo Schaake para a Simulação em Áreas Urbanas, com Representação Detalhada do Planos de Escoamento, Canais de Drenagem e Reservatórios. In: Simpósio de Recursos Hídricos do Sul, 1., e Simpósio de Águas da AUGM, 1., 2005, Santa Maria. **Anais...**Santa Maria: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2005.

TAYLOR, B. L. The Stormwater Control Potential of Green Roofs in Seattle. In: Low Impact Development for Urban Ecosystem and Habitat Protection, 2008, Seattle, Estados Unidos. **Proceedings...**Seattle: American Society of Civil Engineers, p. 1-10, 2008.

THE SYDNEY MORNING HERALD. **Environment**. Disponível em: <<http://www.smh.com.au>>. Acesso em: mar. 2013.

TOMAZ, P. Telhado verde. In: **BMPs Best Management Practices**. 1 ed. 2005. cap. 10. Disponível em: <<http://www.pliniotomaz.com.br>>. Acesso em: 20 nov. 2012.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 2 ed. Porto Alegre: ed. ABRH e Editora da UFRGS, 2005.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 4 ed. Porto Alegre: ed. ABRH e Editora da UFRGS, 2013.

TUCCI, C. E. M.; ORSINI, L. F. Águas urbanas no Brasil: cenário e desenvolvimento sustentável. In: **Brasil. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Gestão do território e manejo integrado das águas urbanas**. Brasília: Ministério das Cidades, 2005. 270 p.

UHL, M.; SCHIEDT, L. Green Roof Storm Water Retention – Monitoring Results. In: International Conference on Urban Drainage, 11., Edinburgh, Escócia, 2008. **Proceedings...** [s.n.], 2008.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, USEPA – **Green Roofs for Stormwater Runoff Control**. Fev. 2009. Disponível em <www.epa.gov/ord>.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, USEPA – **Brownfields** – Jackson Square Redevelopment Initiative Sustainability Pilot. Disponível em: <<http://www.epa.gov>>. Acesso em: jan. 2013a.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, USEPA – **Heat Island** – Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies. Disponível em: <<http://www.epa.gov>>. Acesso em: jan. 2013b.

URRUTIAGUER, M.; EDWARDS, P.; CHANDLER, C. The Evolution of a WSUD Capacity Building Program: The Role of Implementation Targets. In: International Conference on Sustainable Techniques and Strategies for Urban Water Management (Novatech), 7., 2010, Lyon, França. **Proceedings...** [s.n.], 2010.

VANWOERT, N. D. et al. Water Regime and Green Roof Substrate Design Affect *Sedum* Plant Growth. **HortScience**, v. 40, n. 3, p. 659-664. 2005.

VESUVIANO, G.; SONNENWALD, F.; STOVIN, V. A two-stage storage routing model for green roof runoff detention. In: International Conference on Sustainable Techniques and Strategies for Urban Water Management (Novatech), 8., 2013, Lyon, França. **Proceedings...** [s.n.], 2013.

VILLARREAL, E. L.; BENGTTSSON, L. Response of a *Sedum* green-roof to individual rain events. **Ecological Engineering**, v. 25, n. 1, p. 1-7. 2005.

APÊNDICES

Apêndice A - Diâmetros (em metros) dos trechos das redes de microdrenagem calculados com a utilização de telhado convencional (TC) e telhado verde (TV) nos lotes para as chuvas de projeto com período de retorno de 5 (CP-TR5) e 10 anos (CP-TR10).

(continua)

Trecho	Diâmetro (TC) 5 anos	Diâmetro (TV) 5 anos	Diâmetro (TC) 10 anos	Diâmetro (TV) 10 anos
11MI1	0,3	0,3	0,3	0,3
12MI1	0,3	0,3	0,3	0,3
12MI2	0,4	0,3	0,4	0,4
13MI1	0,4	0,4	0,4	0,4
13MI2	0,4	0,4	0,6	0,4
14MI1	0,3	0,3	0,4	0,3
14MI2	0,4	0,4	0,6	0,4
14MI3	0,6	0,4	0,6	0,6
15MI1	0,4	0,4	0,6	0,4
15MI2	0,6	0,6	0,6	0,6
1RMI1	0,3	0,3	0,3	0,3
1RMI2	0,6	0,6	0,6	0,6
1RMI3	0,6	0,6	0,8	0,6
1RMI4	0,8	0,6	0,8	0,6
1RMI5	0,8	0,8	0,8	0,8
1RMI6	0,8	0,8	0,8	0,8
1RMI7	0,8	0,8	0,8	0,8
1RMI8	0,8	0,8	0,8	0,8
1RMI9	1,0	0,8	1,0	0,8
1RMI10	0,4	0,4	0,6	0,4
1RMI11	0,6	0,6	0,6	0,6
1RMI12	0,4	0,3	0,4	0,4
1RMI13	0,6	0,6	0,6	0,6
1MI1	0,3	0,3	0,4	0,3

(continuação)

Trecho	Diâmetro (TC) 5 anos	Diâmetro (TV) 5 anos	Diâmetro (TC) 10 anos	Diâmetro (TV) 10 anos
2MI1	0,3	0,3	0,4	0,3
2MI2	0,4	0,4	0,4	0,4
3MI1	0,4	0,4	0,4	0,4
3MI2	0,6	0,4	0,6	0,6
4MI2	0,6	0,4	0,6	0,6
4MI3	0,6	0,6	0,6	0,6
5MI1	0,6	0,4	0,6	0,6
5MI2	0,6	0,6	0,6	0,6
RMI1	0,6	0,4	0,6	0,6
RMI2	0,6	0,6	0,6	0,6
RMI3	0,8	0,6	0,8	0,6
RMI4	0,8	0,6	0,8	0,8
RMI5	0,8	0,8	0,8	0,8
RMI6	0,3	0,3	0,4	0,3
RMI7	0,6	0,4	0,6	0,4
RMI8	0,6	0,6	0,6	0,6
RMI9	0,4	0,4	0,4	0,4
RMI10	0,6	0,6	0,6	0,6
RMI11	0,4	0,4	0,4	0,4
RMI12	0,6	0,6	0,6	0,6
RMI13	0,3	0,3	0,4	0,3
RMI14	0,8	0,8	0,8	0,8
RMI15	0,3	0,3	0,4	0,3
RMI16	0,6	0,4	0,6	0,4
RMI17	0,6	0,4	0,6	0,4
RMI18	0,6	0,6	0,6	0,6
RMI19	0,8	0,6	0,8	0,6
RMI20	0,3	0,3	0,4	0,3
RMI21	0,6	0,4	0,6	0,6
RMI22	0,3	0,3	0,4	0,3
RMI23	0,4	0,4	0,4	0,4
RMI24	0,6	0,6	0,6	0,6

(continuação)

Trecho	Diâmetro (TC) 5 anos	Diâmetro (TV) 5 anos	Diâmetro (TC) 10 anos	Diâmetro (TV) 10 anos
RMI25	0,8	0,6	0,8	0,8
RMI26	0,4	0,4	0,4	0,4
RMI27	0,6	0,6	0,6	0,6
RMI28	0,8	0,8	0,8	0,8
RMI29	0,3	0,3	0,4	0,3
RMI31	0,6	0,6	0,6	0,6
RMI32	0,6	0,6	0,6	0,6
RMI33	0,3	0,3	0,4	0,3
RMI34	0,6	0,6	0,6	0,6
21MI1	0,4	0,3	0,4	0,3
22MI1	0,3	0,3	0,4	0,3
22MI2	0,4	0,4	0,4	0,4
23MI1	0,4	0,4	0,6	0,4
23MI2	0,6	0,6	0,6	0,6
24MI1	0,4	0,3	0,4	0,3
24MI2	0,6	0,6	0,6	0,6
24MI3	0,6	0,6	0,6	0,6
25MI1	0,6	0,6	0,6	0,6
25MI2	0,6	0,6	0,6	0,6
RMI35	0,4	0,4	0,4	0,4
RMI36	0,6	0,4	0,6	0,6
RMI37	0,6	0,6	0,6	0,6
RMI38	0,6	0,6	0,8	0,6
RMI39	0,8	0,6	0,8	0,6
RMI40	0,8	0,6	0,8	0,6
RMI41	0,3	0,3	0,4	0,3
RMI42	1,0	0,8	1,0	0,8
RMI43	0,4	0,3	0,4	0,3
RMI44	0,8	0,6	0,8	0,6
RMI45	0,8	0,8	0,8	0,8
RMI46	0,6	0,6	0,6	0,6
RMI47	0,4	0,3	0,4	0,3

(continuação)

Trecho	Diâmetro (TC) 5 anos	Diâmetro (TV) 5 anos	Diâmetro (TC) 10 anos	Diâmetro (TV) 10 anos
RMI48	0,6	0,6	0,6	0,6
RMI49	0,6	0,6	0,8	0,6
RMI50	0,4	0,4	0,6	0,4
RMI51	0,6	0,6	0,6	0,6
RMI52	0,4	0,3	0,4	0,3
RMI53	0,6	0,6	0,6	0,6
RMI55	0,6	0,6	0,6	0,6
RMI56	0,4	0,4	0,4	0,4
RMI57	0,6	0,6	0,6	0,6
RMI58	0,3	0,3	0,4	0,3
RMI59	0,8	0,6	0,8	0,6
RMI60	0,8	0,6	0,8	0,6
RMI61	0,8	0,6	0,8	0,8
RMI62	1,0	0,8	1,0	0,8
RMI63	0,3	0,3	0,4	0,3
RMI64	0,8	0,6	0,8	0,6
RMI65	0,3	0,3	0,4	0,3
RMI66	0,8	0,8	0,8	0,8
RMI67	0,6	0,6	0,6	0,6
RMI68	0,8	0,8	0,8	0,8
RMI69	0,6	0,6	0,6	0,6
RMI70	0,8	0,8	0,8	0,8
RMI71	0,6	0,6	0,8	0,6
RMI72	0,6	0,6	0,6	0,6
RMI73	0,8	0,8	0,8	0,8
31MI1	0,4	0,3	0,4	0,3
32MI1	0,4	0,3	0,4	0,3
32MI2	0,4	0,4	0,6	0,4
33MI1	0,6	0,4	0,6	0,4
33MI2	0,6	0,6	0,6	0,6
35MI1	0,6	0,6	0,6	0,6
35MI2	0,6	0,6	0,8	0,6

(continuação)

Trecho	Diâmetro (TC) 5 anos	Diâmetro (TV) 5 anos	Diâmetro (TC) 10 anos	Diâmetro (TV) 10 anos
RMI74	0,6	0,6	0,8	0,6
RMI75	0,4	0,4	0,6	0,4
RMI76	0,6	0,4	0,6	0,4
RMI77	0,6	0,6	0,6	0,6
RMI78	0,6	0,4	0,6	0,4
RMI79	0,6	0,6	0,6	0,6
RMI80	0,6	0,6	0,6	0,6
RMI82	0,8	0,8	0,8	0,8
RMI83	0,8	0,8	0,8	0,8
RMI84	0,8	0,8	1,0	0,8
RMI85	1,0	1,0	1,2	1,0
RMI86	0,8	0,8	0,8	0,8
RMI87	0,8	0,6	0,8	0,6
RMI88	0,8	0,8	1,0	0,8
RMI89	0,6	0,6	0,6	0,6
RMI90	0,6	0,6	0,6	0,6
RMI91	0,8	0,8	0,8	0,6
RMI92	0,8	0,8	0,8	0,8
RMI93	0,6	0,4	0,6	0,4
RMI94	0,8	0,8	1,0	0,8
RMI95	1,0	1,0	1,2	1,0
RMI96	0,8	0,8	0,8	0,6
RMI97	0,8	0,8	0,8	0,6
RMI98	0,6	0,6	0,8	0,6
RMI99	0,4	0,3	0,4	0,3
RMI100	0,4	0,4	0,6	0,4
RMI101	0,6	0,4	0,6	0,6
RMI102	0,6	0,6	0,6	0,6
RMI103	0,8	0,6	0,8	0,6
RMI104	0,8	0,8	0,8	0,8
RMI105	1,0	0,8	1,0	0,8
RMI106	1,0	1,0	1,0	1,0

(continuação)

Trecho	Diâmetro (TC) 5 anos	Diâmetro (TV) 5 anos	Diâmetro (TC) 10 anos	Diâmetro (TV) 10 anos
RMI107	0,6	0,4	0,6	0,4
RMI108	0,6	0,6	0,6	0,6
RMI109	0,8	0,6	0,8	0,8
RMI110	0,4	0,3	0,4	0,3
RMI111	0,6	0,4	0,6	0,4
RMI112	0,6	0,6	0,6	0,6
RMI113	0,8	0,6	0,8	0,6
RMI114	1,0	0,8	1,0	0,8
RMI116	0,6	0,6	0,6	0,6
RMI117	0,8	0,6	0,8	0,6
RMI118	0,6	0,6	0,8	0,6
RMI119	0,6	0,6	0,8	0,6
RMI120	0,6	0,6	0,8	0,6
RMI121	0,6	0,6	0,8	0,6
RMI122	0,6	0,6	0,8	0,6
41MI1	0,4	0,4	0,4	0,4
42MI1	0,4	0,4	0,4	0,4
42MI2	0,6	0,4	0,6	0,4
43MI1	0,6	0,4	0,6	0,6
43MI2	0,6	0,6	0,6	0,6
45MI1	0,6	0,6	0,6	0,6
45MI2	0,8	0,6	0,8	0,6
44MI1	0,4	0,4	0,4	0,4
44MI2	0,6	0,6	0,6	0,6
44MI3	0,6	0,6	0,6	0,6
RMI123	0,8	0,6	0,8	0,6
RMI124	1,0	0,8	1,0	0,8
RMI125	1,2	1,0	1,2	1,0
RMI126	0,8	0,6	0,8	0,6
RMI127	1	0,8	1,0	1,0
RMI128	1,2	1,2	1,5	1,2
RMI129	0,4	0,4	0,4	0,4

(conclusão)

Trecho	Diâmetro (TC) 5 anos	Diâmetro (TV) 5 anos	Diâmetro (TC) 10 anos	Diâmetro (TV) 10 anos
RMI130	0,6	0,6	0,8	0,6
RMI131	0,6	0,6	0,8	0,6
RMI132	0,8	0,8	1,0	0,8
RMI133	1,0	0,8	1,0	1,0
RMI134	0,8	0,6	0,8	0,6
RMI135	0,4	0,4	0,6	0,4
RMI136	0,8	0,8	1,0	0,8
RMI137	1,2	1,0	1,2	1,0
RMI138	1,5	1,2	1,5	1,2
RMI140	0,8	0,8	0,8	0,8
RMI141	0,8	0,6	0,8	0,8
RMI142	0,6	0,6	0,8	0,6
RMI143	1,0	1,0	1,2	1,0
RMI144	1,2	1,0	1,2	1,0
RMI145	0,4	0,4	0,6	0,4
RMI146	0,6	0,6	0,8	0,6
RMI147	0,8	0,8	0,8	0,8
RMI148	0,8	0,8	0,8	0,8
RMI149	0,8	0,6	0,8	0,6
RMI150	1,0	1,0	1,0	1,0

Apêndice B - Número de quarteirões contribuintes para cada trecho dos 70 km das redes de microdrenagem.

Trecho	Quarteirões	Trecho	Quarteirões	Trecho	Quarteirões
11MI1	1	RMI7	3	RMI37	5
12MI1	1	RMI8	6	RMI38	6
12MI2	2	RMI9	2	RMI39	9
13MI1	2	RMI11	2	RMI40	6
13MI2	3	RMI12	6	RMI41	1
14MI1	1	RMI13	1	RMI42	16
14MI2	3	RMI14	13	RMI44	7
14MI3	4	RMI15	1	RMI45	13
15MI1	3	RMI16	2	RMI46	6
15MI2	6	RMI17	3	RMI47	3
1RMI1	1	RMI18	6	RMI48	9
1RMI2	6	RMI19	8	RMI49	12
1RMI3	9	RMI20	1	RMI50	2
1RMI4	11	RMI21	3	RMI51	4
1RMI5	14	RMI22	1	RMI52	1
1RMI6	16	RMI23	2	RMI53	4
1RMI7	18	RMI24	5	RMI54	5
1RMI8	19	RMI25	11	RMI55	6
1RMI9	25	RMI26	2	RMI56	2
1RMI10	3	RMI27	6	RMI57	5
1RMI11	5	RMI28	13	RMI58	1
1RMI12	2	RMI29	1	RMI59	8
1RMI13	6	RMI30	3	RMI60	7
1MI1	1	RMI31	4	RMI61	8
2MI1	1	RMI32	5	RMI62	16
2MI2	2	RMI33	1	RMI63	1
3MI1	2	RMI34	4	RMI64	7
3MI2	3	21MI1	1	RMI65	1
4MI1	1	22MI1	1	RMI66	11
4MI2	3	22MI2	2	RMI67	5
4MI3	4	23MI1	2	RMI68	10
5MI1	3	23MI2	3	RMI69	4
5MI2	6	24MI1	1	RMI70	10
RMI1	3	24MI2	3	RMI71	6
RMI2	6	24MI3	4	RMI72	4
RMI3	8	25MI1	3	RMI73	10
RMI4	10	25MI2	6	31MI1	1
RMI5	13	RMI35	2	32MI1	1
RMI6	1	RMI36	3	32MI2	2

Trecho	Quarteirões	Trecho	Quarteirões
33MI1	2	RMI116	3
33MI2	3	RMI117	8
35MI1	3	RMI118	6
35MI2	6	RMI119	6
RMI74	5	RMI120	6
RMI75	2	RMI121	6
RMI76	2	41MI1	1
RMI77	3	42MI1	1
RMI78	2	42MI2	2
RMI80	4	43MI1	2
RMI81	6	43MI2	3
RMI82	10	45MI1	3
RMI83	12	45MI2	6
RMI84	12	44MI1	1
RMI85	24	44MI2	3
RMI86	12	44MI3	4
RMI87	6	RMI123	3
RMI88	12	RMI124	12
RMI89	5	RMI125	21
RMI90	3	RMI126	3
RMI91	6	RMI127	15
RMI92	12	RMI128	39
RMI93	2	RMI129	1
RMI94	14	RMI130	5
RMI95	26	RMI131	4
RMI96	6	RMI132	12
RMI97	7	RMI133	15
RMI98	6	RMI134	5
RMI99	1	RMI135	1
RMI100	2	RMI136	7
RMI101	3	RMI137	15
RMI102	4	RMI138	24
RMI103	6	RMI139	7
RMI104	8	RMI140	9
RMI105	17	RMI141	6
RMI106	22	RMI142	3
RMI107	2	RMI143	12
RMI108	4	RMI144	24
RMI109	9	RMI145	1
RMI110	1	RMI146	3
RMI111	2	RMI147	6
RMI112	4	RMI148	6
RMI113	6	RMI149	4
RMI114	16	RMI150	11
RMI115	2		

Apêndice C - Hidrogramas simulados dos trechos 1SEG2 e 41MI1, correspondentes às vazões escoadas no lote e 1 quarteirão, respectivamente, para os eventos 22, 24, 33, 34 e 35 com a utilização de TC e TV nos lotes

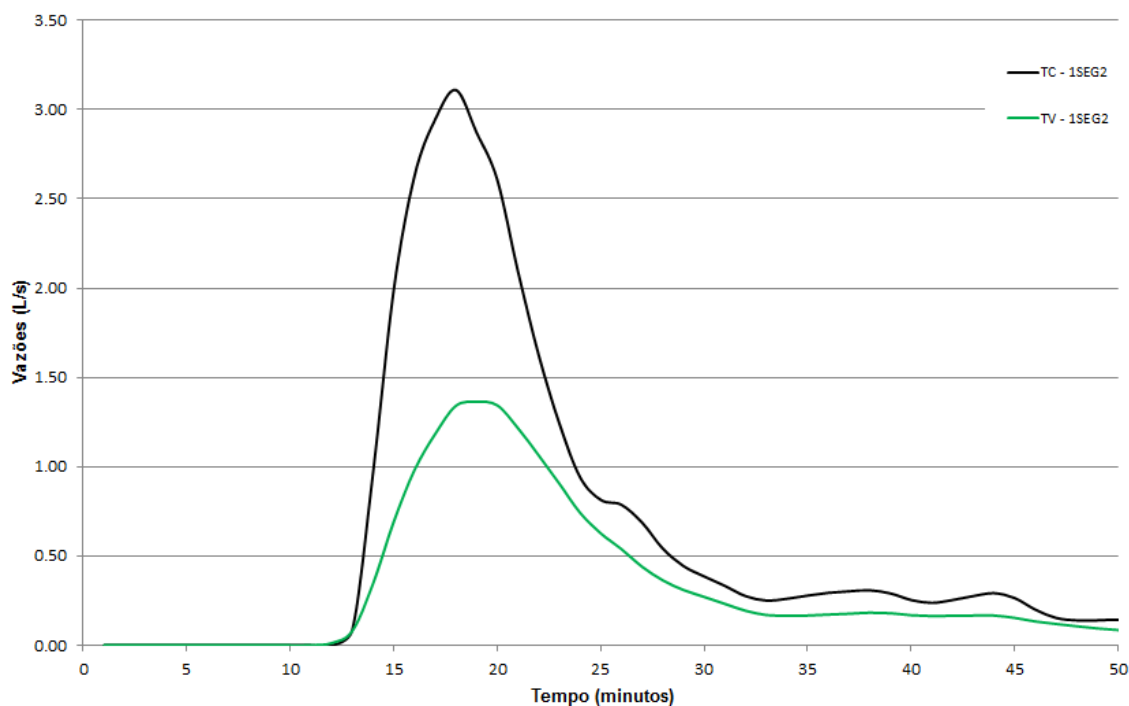


Figura 37 - Hidrogramas simulados para o trecho 1SEG2 (lote) do evento 22.

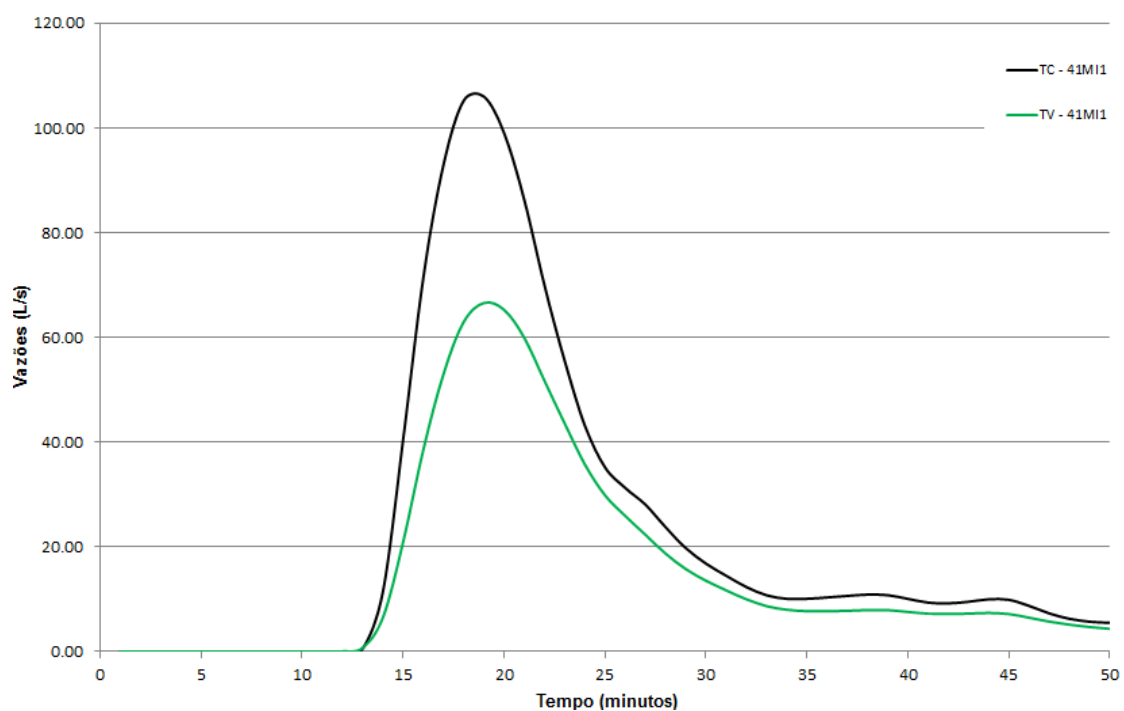


Figura 38 - Hidrogramas simulados para o trecho 41MI1 (1 quarteirão) do evento 22.

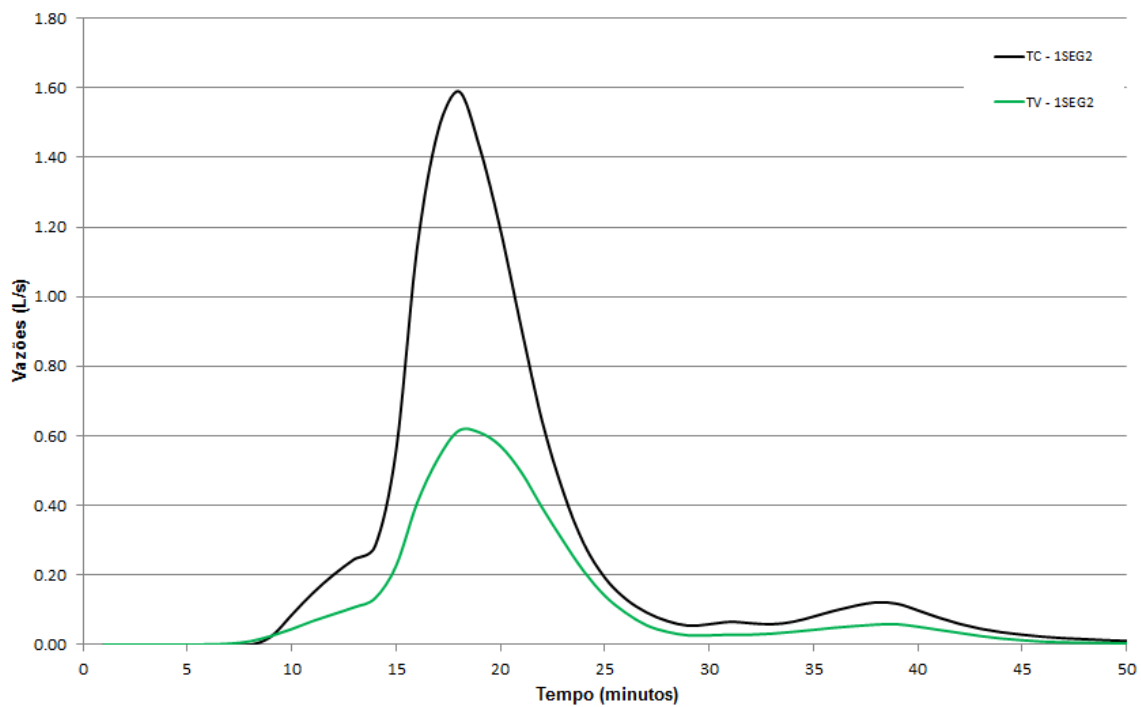


Figura 39 - Hidrogramas simulados para o trecho 1SEG2 (lote) do evento 24.

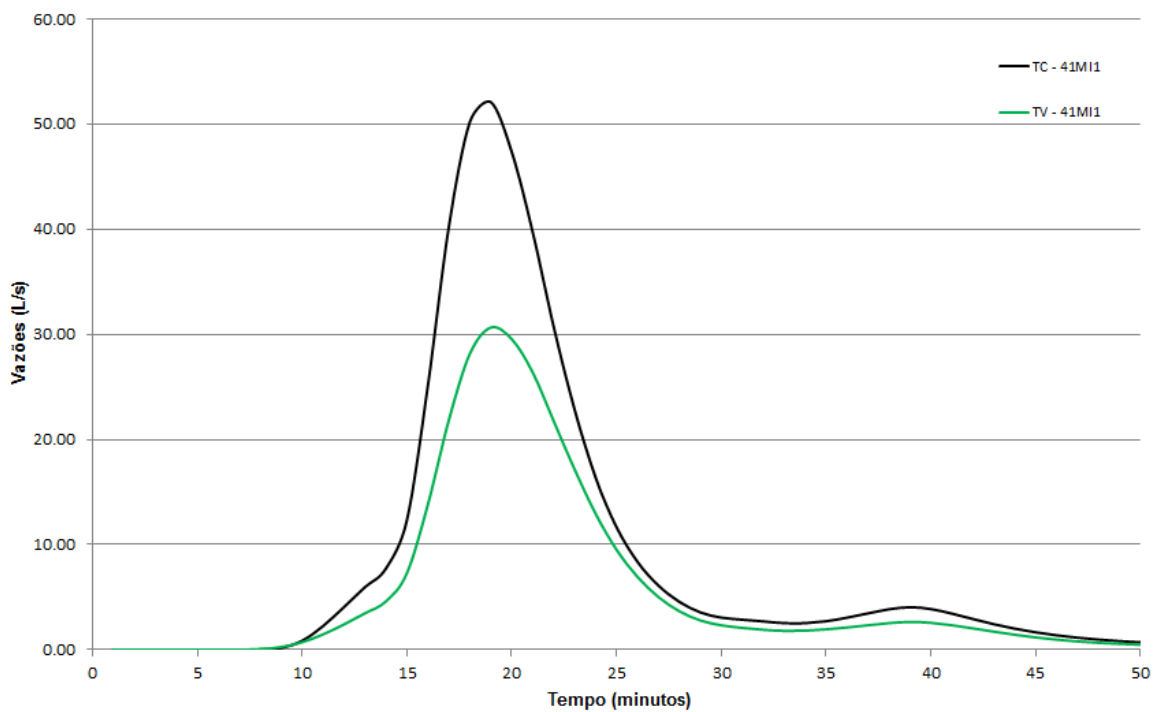


Figura 40 - Hidrogramas simulados para o trecho 41MI1 (1 quarteirão) do evento 24.

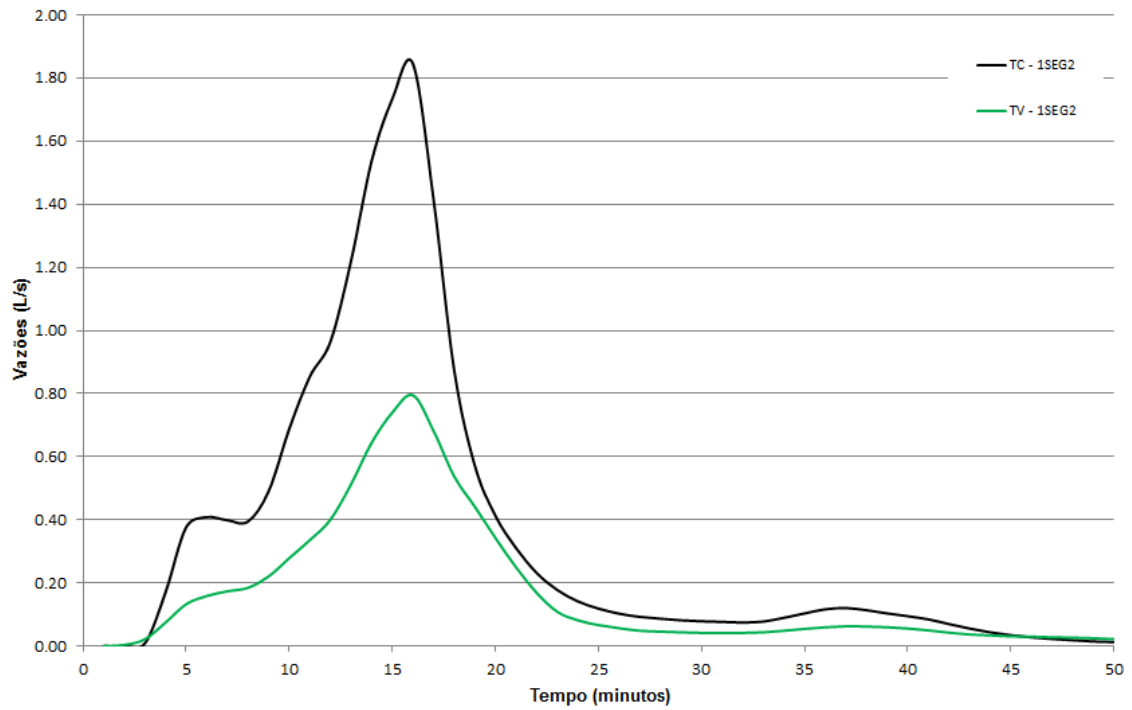


Figura 41 - Hidrogramas simulados para o trecho 1SEG2 (lote) do evento 33.

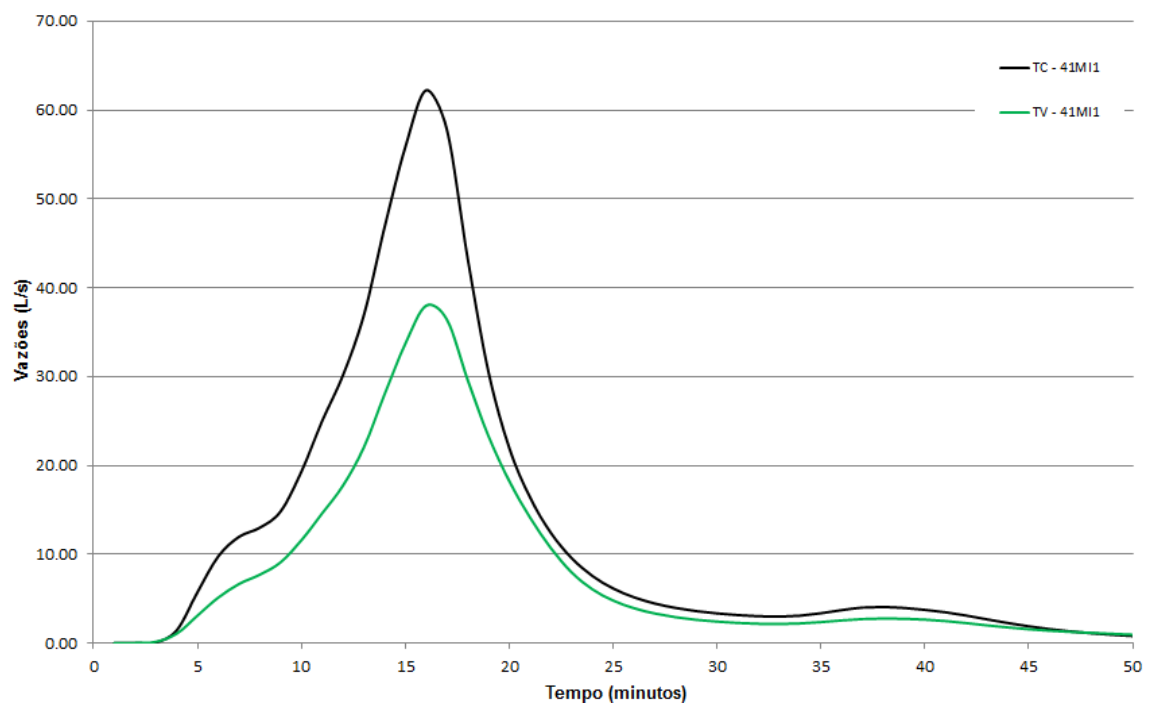


Figura 42 - Hidrogramas simulados para o trecho 41M11 (1 quarteirão) do evento 33.

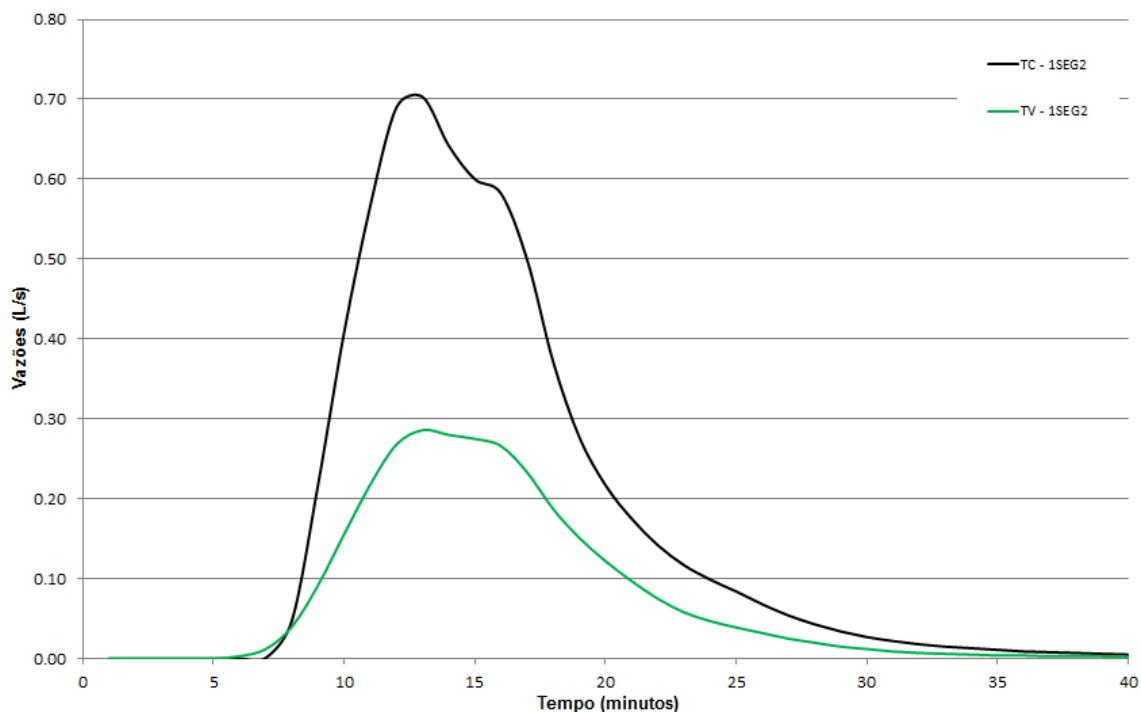


Figura 43 - Hidrogramas simulados para o trecho 1SEG2 (lote) do evento 34.

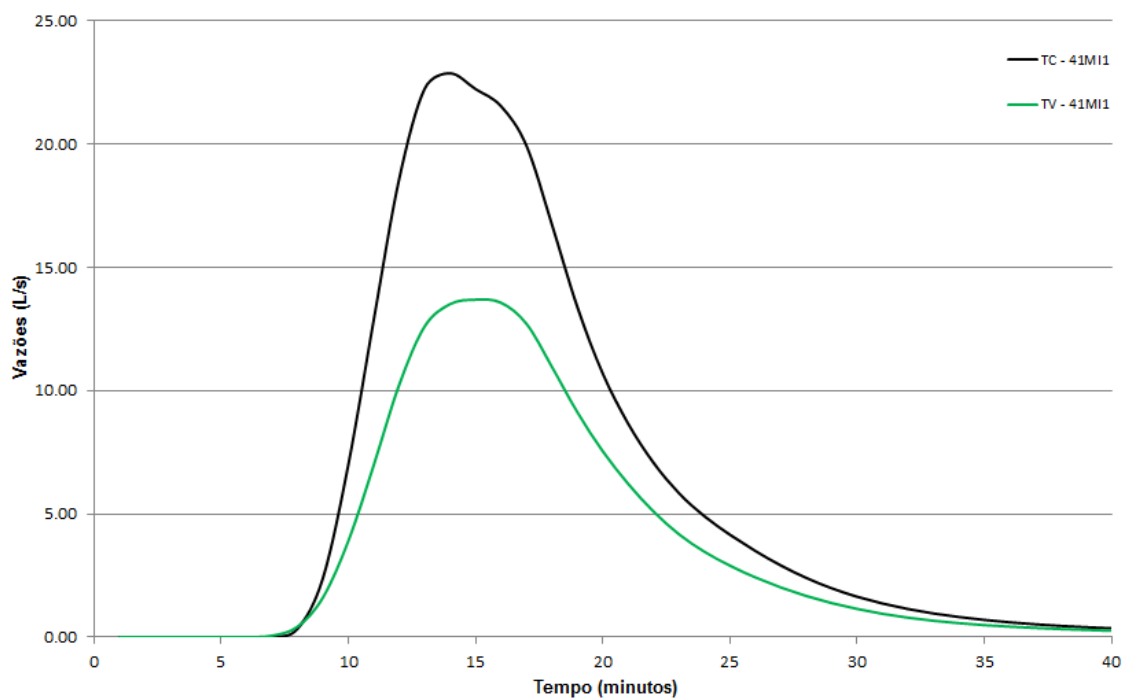


Figura 44 - Hidrogramas simulados para o trecho 41MI1 (1 quarteirão) do evento 34.

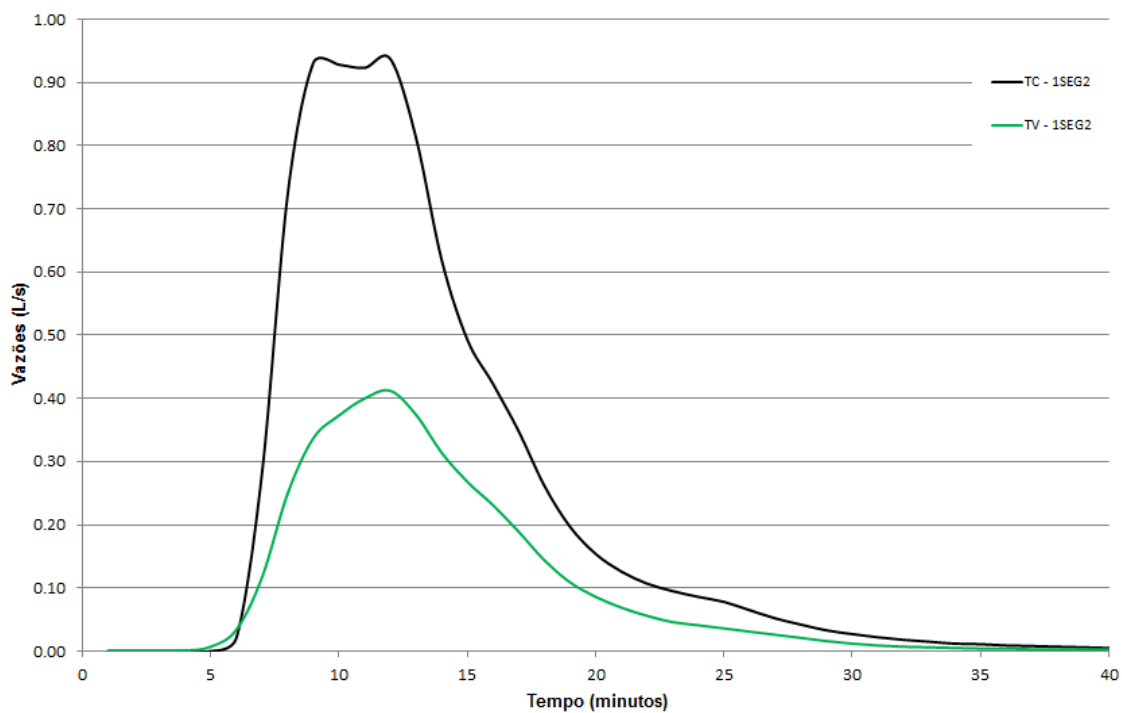


Figura 45 - Hidrogramas simulados para o trecho 1SEG2 (lote) do evento 35.

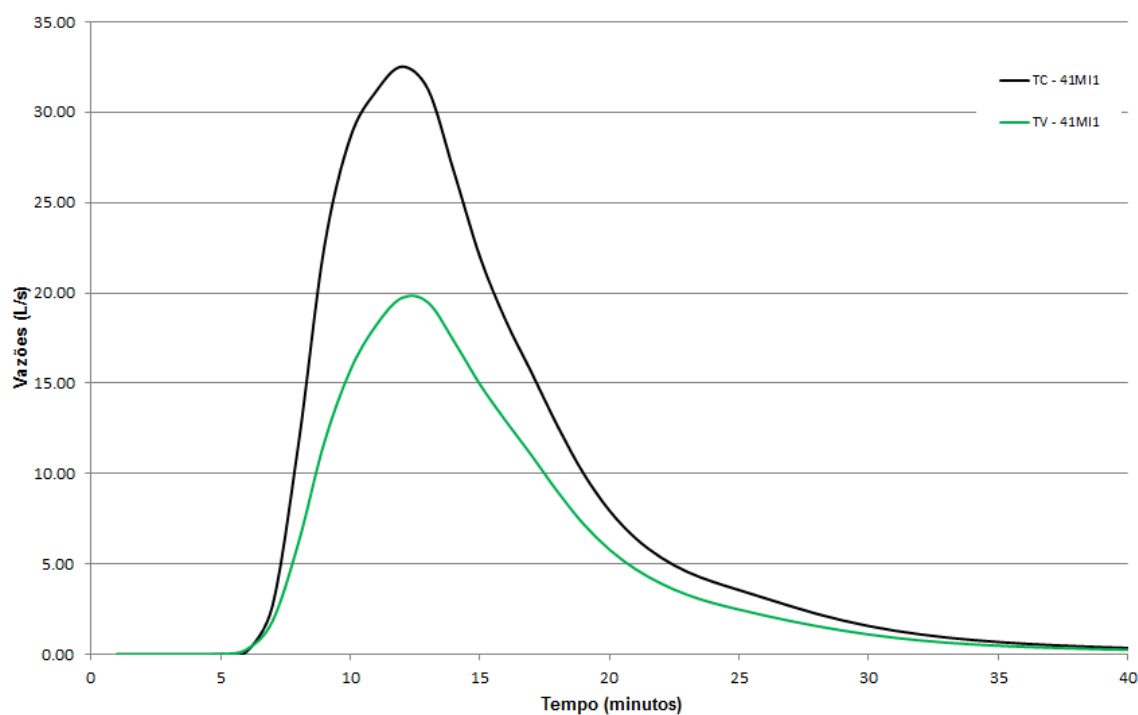


Figura 46 - Hidrogramas simulados para o trecho 41M11 (1 quarteirão) do evento 35.