



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA  
E AMBIENTAL**

**EFICIÊNCIA DE TELHADOS VERDES NO CONTROLE DA GERAÇÃO DO  
ESCOAMENTO SUPERFICIAL EM ÁREAS URBANAS POR MEIO DE  
MODELAGEM HIDROLÓGICA**

**KAROLYNE AQUINO ALEXANDRE BRECKENFELD**

Natal  
2019

KAROLYNE AQUINO ALEXANDRE BRECKENFELD

**EFICIÊNCIA DE TELHADOS VERDES NO CONTROLE DA GERAÇÃO DO  
ESCOAMENTO SUPERFICIAL EM ÁREAS URBANAS POR MEIO DE  
MODELAGEM HIDROLÓGICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Ada Cristina Scudelari

Coorientador: Prof. Dr. Gustavo Barbosa Lima  
Silva

Natal  
2019

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN  
Sistema de Bibliotecas - SISBI  
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Breckenfeld, Karolyne Aquino Alexandre.

Eficiência de telhados verdes no controle da geração do escoamento superficial em áreas urbanas por meio de modelagem hidrológica / Karolyne Aquino Alexandre Breckenfeld. - 2019.  
74 f.: il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Natal, RN, 2019.

Orientadora: Profa. Dra. Ada Cristina Scudelari.

Coorientador: Prof. Dr. Gustavo Barbosa Lima Silva.

1. Modelo chuva-vazão - Dissertação. 2. Drenagem urbana - Dissertação. 3. LID - Dissertação. 4. SWMM - Dissertação. I. Scudelari, Ada Cristina. II. Silva, Gustavo Barbosa Lima. III. Título.

RN/UF/BCZM

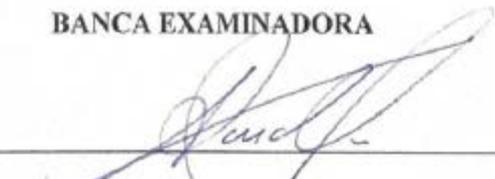
CDU 626.862.4

KAROLYNE AQUINO ALEXANDRE BRECKENFELD

**EFICIÊNCIA DE TELHADOS VERDES NO CONTROLE DA GERAÇÃO DO  
ESCOAMENTO SUPERFICIAL EM ÁREAS URBANAS POR MEIO DE  
MODELAGEM HIDROLÓGICA**

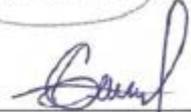
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária e Ambiental.

**BANCA EXAMINADORA**



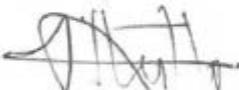
---

Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Ada Cristina Scudelari – Orientadora (UFRN)



---

Prof. Dr. Gustavo Barbosa Lima Silva – Coorientador (UFPB)



---

Prof. Dr. Antônio Marozzi Righetto – Examinador Interno (UFRN)



---

Prof. Dr. Adriano Rolim da Paz – Examinador Externo (UFPB)

Natal  
2019

## AGRADECIMENTOS

Ao PPgESA (Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) e à UFRN (Universidade Federal do Rio Grande do Norte), pelo espaço concedido para a realização dessa pesquisa.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pela concessão da bolsa de estudos durante o período de dedicação exclusiva.

À prof<sup>a</sup>. Ada Cristina Scudelari, pela orientação e por ter sido uma das principais responsáveis pela elaboração da minha dissertação. Obrigada por acreditar em mim e por todo incentivo.

Ao prof. Gustavo Barbosa Lima Silva, que me coorientou e apresentou contribuições significativas no desenvolvimento do trabalho, sempre presente e disposto a ajudar. Obrigada pelos seus ensinamentos e dedicação à pesquisa científica.

Aos profs. Antônio Marozzi Righetto e Adriano Rolim da Paz, pela disponibilidade em compor a banca e contribuições ao trabalho. Obrigada por aceitarem o convite.

A todo o corpo docente do PPgESA pelos ensinamentos e incentivo à pesquisa e aos funcionários da UFRN, em especial à Pedro Gustavo e Célia.

Aos meus amigos do mestrado, em especial Jéssica Freire, que compartilha comigo desde a graduação as alegrias e desafios da vida acadêmica. Obrigada pela companhia, por ter se tornado uma irmã, dividindo apartamento e a estrada em nossas idas e vindas constantes entre João Pessoa e Natal. À Alexya Brendha, Maria Helena e Rosa Oliveira, por terem tornado o período de aulas mais leve e divertido. À Camila de Mello, pelas inúmeras contribuições na pesquisa e paciência no ensinamento.

Ao DER-PB (Departamento de Estradas de Rodagem da Paraíba), por todo apoio e conhecimento adquirido, em especial à eng. Isabelly Vasconcelos.

Ao meu marido, Victor Lins, por todo companheirismo, compreensão nas minhas ausências e apoio durante esse período. Obrigada por tudo.

À minha família, em especial à minha mãe, Ednalda Aquino, minha avó, Irega Aquino e meu tio, Eliézio Aquino, por todo suporte, orações e torcida pelas minhas conquistas. Obrigada por todo amor, ensinamento e sacrifícios.

À Deus e Nossa Senhora, razão, princípio e fim de tudo.

Por fim, a todos aqueles que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho, o meu sincero agradecimento.

## RESUMO

A utilização de telhados verdes oferece diversos benefícios ambientais para a região onde estão inseridos, no qual os ganhos em drenagem urbana tem sido o tema de estudos recentes. Isso se justifica devido aos amortecimentos nas vazões de pico de eventos de chuva obtidos pela utilização de telhados verdes. Sendo classificado como um elemento de controle de escoamento na fonte em drenagem urbana, neste estudo, o Storm Water Management Model (SWMM) foi adotado para modelar a resposta hidrológica de um sistema de telhado verde para chuvas intensas na cidade de Natal/RN. A metodologia propôs diferentes eventos de chuva, configurações na camada de substrato, bem como variação na taxa de utilização de telhados verdes na bacia de drenagem. Foi obtida uma diminuição na vazão máxima em até 43,61% e constatado que para análises a nível de bacia de drenagem, não se identifica retardos nos picos do hidrograma devido a superposição das sub-bacias que a compõem.

**Palavras-chave:** Modelo chuva-vazão. Drenagem urbana. LID. SWMM.

## **ABSTRACT**

The application of green roofs offers many environmental benefits for a region where they are inserted, in which the gains in urban drainage have been the subject of recent studies. This is justified by the results of reduction of the peak flow of rainwater with the use of green roofs. In this study, the Storm Water Management Model (SWMM) will be used to model the hydrologic response of a green roof system for intense rainfall in the city of Natal/RN. The methodology proposes rain event variable, as a substrate layer, as well as the rate of green roofs utilization in the drainage basin. A decrease in the maximum flow rate was obtained up to 43.61% and it was verified that for analyzes at the drainage basin scale, no delays are identified in the hydrograph peaks due to the superposition of the subcatchments that compose it.

**Keywords:** Rainfall-runoff model. Urban drainage. LID. SWMM.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - (a) e (b) Residências na Alemanha: país pioneiro na técnica dos telhados verdes.....	14
Figura 2 - (a) e (b) Edificações com coberturas verdes extensivas .....	15
Figura 3 - (a) e (b) Edificações com coberturas verdes intensivas .....	16
Figura 4 - Composição de um telhado verde.....	17
Figura 5 - Agregado utilizado para camada drenante.....	20
Figura 6 - Representação da sub-bacia no SWMM.....	26
Figura 7 - Representação do balanço de massa na sub-bacia .....	26
Figura 8 - Propagação do escoamento em uma Célula de Biorretenção no SWMM .....	30
Figura 9 - Definição dos parâmetros do telhado verde.....	33
Figura 10 - Mapa de situação da área de estudo.....	35
Figura 11 - (a) Discretização da área no Google Earth; (b) Áreas delimitadas em AutoCad Civil 3D; (c) Modelo no SWMM.....	36
Figura 12 - Sentido do fluxo de água na bacia .....	38
Figura 13 – (a) Hietograma do Evento 01; (b) Precipitação Acumulada do Evento 01. 41	41
Figura 14 – (a) Hietograma do Evento 02; (b) Precipitação Acumulada do Evento 02. 41	41
Figura 15 – (a) Hietograma do Evento 03; (b) Precipitação Acumulada do Evento 03. 41	41
Figura 16 - Cenários de ocupação .....	44
Figura 17 - Hidrograma de entrada na Lagoa do Mirassol para TV01 - EV01 .....	46
Figura 18 - Hidrograma de entrada na Lagoa do Mirassol para TV02 - EV01 .....	46
Figura 19 - Hidrograma de entrada na Lagoa do Mirassol para TV03 - EV01 .....	47
Figura 20 - Hidrograma de entrada na Lagoa do Mirassol para TVs - EV01 .....	48
Figura 21 - Hidrograma de saída de lote para situação atual - EV01 .....	48
Figura 22 - Hidrograma de saída de lote para TV03 - EV01 .....	49
Figura 23 - Propagação de escoamento no TV03 - EV01 .....	50
Figura 24 - Teor de umidade no TV03 - EV01 .....	50
Figura 25 - Nível de água no TV03 - EV01 .....	50
Figura 26 - Hidrograma de entrada na Lagoa do Mirassol para TV01 - EV02.....	51
Figura 27 - Hidrograma de entrada na Lagoa do Mirassol para TV02 - EV02.....	51
Figura 28 - Hidrograma de entrada na Lagoa do Mirassol para TV03 - EV02.....	52
Figura 29 - Hidrograma de entrada na Lagoa do Mirassol para TVs - EV02 .....	52
Figura 30 - Hidrograma de saída de lote para situação atual - EV02.....	53
Figura 31 - Hidrograma de saída de lote para TV03 - EV02 .....	53
Figura 32 - Propagação de escoamento no TV03 - EV02.....	54
Figura 33 - Nível de água no TV03 - EV02 .....	54
Figura 34 - Teor de umidade no TV03 - EV02 .....	54
Figura 35 - Hidrograma de entrada na Lagoa do Mirassol para TV01 - EV03.....	55
Figura 36 - Hidrograma de entrada na Lagoa do Mirassol para TV02 - EV03.....	56
Figura 37 - Hidrograma de entrada na Lagoa do Mirassol para TV03 - EV03.....	56
Figura 38 - Hidrograma de entrada na Lagoa do Mirassol para TVs - EV03 .....	57
Figura 39 - Hidrograma de saída de lote para situação atual - EV03.....	57
Figura 40 - Hidrograma de saída de lote para TV03 - EV03 .....	58

Figura 41 - Propagação de escoamento no TV03 - EV03 .....	58
Figura 42 - Teor de umidade para TV03 - EV03 .....	59
Figura 43 - Nível de água para TV03 - EV03 .....	59
Figura 44 - Hidrograma de saída de lote para TV01 - EV01 .....	66
Figura 45 - Propagação do escoamento no TV01 - EV01 .....	66
Figura 46 - Nível de água no TV01 - EV01 .....	67
Figura 47 - Teor de umidade no TV01 - EV01 .....	67
Figura 48 - Hidrograma de saída de lote para TV02 - EV01 .....	67
Figura 49 - Propagação de escoamento no TV02 - EV01 .....	68
Figura 50 - Nível de água no TV02 - EV01 .....	68
Figura 51 - Teor de umidade no TV02 - EV01 .....	68
Figura 52 - Hidrograma de saída de lote para TV01 - EV02 .....	69
Figura 53 - Propagação de escoamento no TV01 - EV02 .....	69
Figura 54 - Nível de água no TV01 - EV02 .....	70
Figura 55 - Teor de umidade no TV01 - EV02 .....	70
Figura 56 - Hidrograma de saída de lote para TV02 - EV02 .....	70
Figura 57 - Propagação de escoamento no TV02 - EV02 .....	71
Figura 58 - Nível de água no TV02 - EV02 .....	71
Figura 59 - Teor de umidade no TV02 - EV02 .....	71
Figura 60 - Hidrograma de saída de lote para TV01 - EV03 .....	72
Figura 61 - Propagação de escoamento para TV01 - EV03 .....	72
Figura 62 - Nível de água no TV01 - EV03 .....	72
Figura 63 - Teor de umidade no TV01 - EV03 .....	73
Figura 64 - Hidrograma de saída de lote para TV02 - EV03 .....	73
Figura 65 - Propagação de escoamento no TV02 - EV03 .....	73
Figura 66 - Nível de água no TV02 - EV03 .....	74
Figura 67 - Teor de umidade no TV02 - EV03 .....	74

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Informações da área de estudo .....	35
Tabela 2 - Caracterização das sub-bacias .....	37
Tabela 3 - Parâmetros de infiltração.....	39
Tabela 4 - Eventos de chuva selecionados para o estudo.....	40
Tabela 5 - Caracterização dos Eventos de Chuva.....	40
Tabela 6 - Parâmetros do telhado verde .....	43

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
<b>2. TELHADO VERDE</b> .....	<b>14</b>
<b>2.1. CLASSIFICAÇÃO</b> .....	<b>14</b>
2.1.1. TELHADOS VERDES EXTENSIVOS .....	15
2.1.2. TELHADOS VERDES INTENSIVOS .....	16
<b>2.2. COMPOSIÇÃO</b> .....	<b>17</b>
2.2.1. ESTRUTURA .....	18
2.2.2. IMPERMEABILIZAÇÃO .....	18
2.2.3. MEMBRANA ANTIRRAÍZES .....	19
2.2.4. DRENAGEM .....	19
2.2.5. SEPARAÇÃO DO SUBSTRATO .....	20
2.2.6. SUBSTRATO .....	20
2.2.7. VEGETAÇÃO .....	21
<b>2.3. APLICAÇÃO</b> .....	<b>21</b>
<b>3. MODELAGEM HIDROLÓGICA</b> .....	<b>25</b>
<b>3.1. STORM WATER MANAGEMENT MODEL</b> .....	<b>25</b>
3.1.1. HIDROLOGIA .....	25
3.1.2. MÓDULO LID: TELHADO VERDE .....	30
<b>4. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>34</b>
<b>4.1. ÁREA DE ESTUDO</b> .....	<b>34</b>
<b>4.2. DADOS DE ENTRADA</b> .....	<b>36</b>
4.2.1. DISCRETIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....	36
4.2.2. ESCOAMENTO SUPERFICIAL .....	37
4.2.3. INFILTRAÇÃO .....	39
4.2.4. EVENTOS DE CHUVA .....	39
4.2.5. CARACTERIZAÇÃO DO TELHADO VERDE .....	42
<b>4.3. CENÁRIOS</b> .....	<b>43</b>
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>45</b>
<b>5.1. EVENTO 01</b> .....	<b>45</b>
<b>5.2. EVENTO 02</b> .....	<b>50</b>
<b>5.3. EVENTO 03</b> .....	<b>55</b>
<b>6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....	<b>60</b>

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	62
APÊNDICE A .....	66
APÊNDICE B.....	69
APÊNDICE C.....	72

## 1. INTRODUÇÃO

O constante desenvolvimento das áreas urbanas leva a um aumento na área de superfícies impermeáveis que criam uma barreira para retenção natural e infiltração de águas pluviais (BURSZTA-ADAMIAK; MROWIEC, 2013; PENG; STOVIN, 2017). O aumento dessas áreas, contribuem para uma concentração mais rápida de escoamento e maior vazão de pico (QIN; LI; FU, 2013). Situações nas quais o processo de urbanização encontra-se muito adensado, o pico de cheia nessas bacias pode chegar a ser seis vezes maior do que o pico desta mesma bacia em condições naturais (TUCCI, 2015).

Os sistemas de drenagem urbana são geralmente projetados para drenar escoamento de áreas impermeáveis como, ruas pavimentadas, estacionamentos, calçadas e telhados durante os eventos de tempestade. No entanto, quando as águas pluviais excedem a capacidade de drenagem, resulta em inundações que afetam o tráfego, danos materiais, carreamento de poluentes aos rios, entre outros problemas (QIN; LI; FU, 2013; CANHOLI, 2014).

Em vista disso, a metodologia convencional aplicada à drenagem urbana vem sendo amplamente discutida. Em um sistema com drenagem eficiente, as legislações podem contemplar restrições de vazões máximas a serem despejadas no sistema de drenagem municipal (BRASIL, 2015) além de outras medidas. Surgem, portanto, novos elementos de drenagem que se baseiam no controle do escoamento na própria fonte (BURSZTA-ADAMIAK; MROWIEC, 2013).

A Alemanha foi o primeiro país a adotar como medida governamental o controle de escoamento em sistemas urbanos com leis sobre gestão de escoamento, orientação tecnológica e políticas de incentivo sobre desenvolvimento de baixo impacto (Low-Impact Development – LID) (PENG et al., 2019).

Dentre diversos dispositivos, LIDs incluem, telhados verdes, microrreservatórios de detenção, pavimentos permeáveis e trincheiras de infiltração. Caracterizado por sua dependência em processos naturais de captação de água, que envolvem infiltração, atenuação, transporte, armazenamento e tratamento, estas técnicas são consideradas uma abordagem sustentável à gestão de águas pluviais (STOVIN; POE; BERRETTA, 2013).

Dentre essas, a utilização de telhados verdes em áreas urbanas é relevante, uma vez que as coberturas das edificações deixam de ser os maiores contribuintes no escoamento superficial e agem como um dispositivo de controle de escoamento na fonte (CATUZZO, 2013). Além desse aspecto, um conjunto de outros pontos positivos é fornecido para o ambiente local, como por exemplo, no conforto térmico e, conseqüentemente, na redução do consumo de energia e dos efeitos de ilha de calor, melhorias visuais nas regiões onde estão inseridos, entre outros (SAADATIAN et al., 2013).

Diversos trabalhos simularam a hidrologia de resposta do telhado verde utilizando modelos adaptados. Eles eram geralmente dedicados a reproduzir o escoamento observado no experimento em escala de telhado ou para extrapolar o impacto do telhado verde na escala de captação urbana (VERSINI et al., 2015).

Ferramentas de modelagem e apoio à decisão podem ser grandes aliados na avaliação da eficácia de LID. Podendo fornecer informações sobre redução do escoamento, aplicação e configurações dos dispositivos e quantificar seus múltiplos benefícios (RADINJA et al., 2019).

Cipolla; Maglionico; Stojkov (2016) consideram o SWMM o software comercial mais comumente utilizado para estudos em drenagem urbana com uso de LID. Adicionado na versão 5 em 2005, de acordo com os referidos autores, o módulo LID garante resultados rápidos e satisfatórios sobre o desempenho de telhados verdes.

Em estudos desenvolvidos por Johannessen; Muthanna; Braskerud et al. (2018) e Johannessen et al. (2019) constatou-se que o modelo SWMM geralmente fornece bons resultados para obtenção de taxas de escoamento.

Introduzido em 2014 como um tipo de LID, o módulo de telhado verde foi estudado por Palla; Gnecco (2015) que concluíram que este pode ser utilizado com sucesso para representar o comportamento hidrológico do dispositivo, calibrando através de parâmetros de solo ao se comparar com dados medidos experimentalmente.

Peng; Stovin (2017) avaliaram a precisão do módulo de telhado verde na versão 5.1.011 do SWMM para eventos de chuvas isolados e contínuos, e concluíram que com a calibração do modelo, o software obtém ótimos resultados, apresentando diferenças

entre o observado e calculado de 0,357% e 0,166% para valores de volume retido e escoado, respectivamente.

Percebe-se que para eventos isolados, telhados verdes apresentam um excelente desempenho. Porém, estudar a eficiência de dispositivos de controle na fonte, como no caso os telhados verdes, torna-se mais relevante quando aplicado à eventos extremos de precipitação, visto que são situações nas quais o sistema de drenagem convencional em muitos casos não atende as vazões.

Deve-se observar que telhados verdes são suscetíveis às suas condições iniciais em termos de teor volumétrico de água no substrato (umidade). Uma vez que sob condições de eventos chuvosos, ao atingir a saturação, a capacidade de retenção de água diminui drasticamente (JOHANNESSEN et al., 2019).

Portanto, esta pesquisa tem como objetivo principal, avaliar, por meio de simulação hidrológica, o efeito cumulativo da aplicação de telhados verdes na geração de escoamento superficial em áreas urbanas considerando situações de chuvas intensas.

Como objetivos específicos, analisar a eficiência de telhados verdes para a sub-bacia da Lagoa do Mirassol, localizada na Zona Sul do município de Natal-RN; verificar o comportamento dos hidrogramas para diferentes configurações de telhados verdes e taxas de utilização na bacia de drenagem através do modelo chuva-vazão SWMM; e, melhorar a compreensão do funcionamento hidrológico nos telhados verdes para diferentes eventos de chuva.

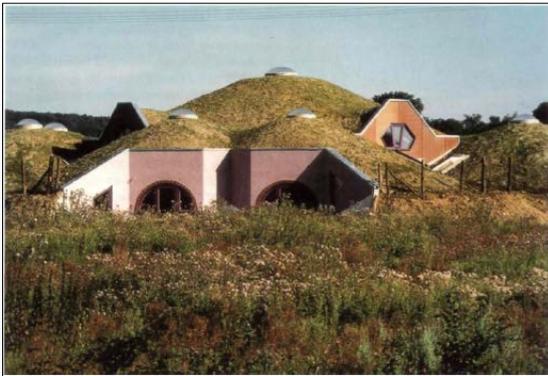
O trabalho está estruturado da seguinte forma: a seção 2 explana sobre telhados verdes, seus principais aspectos e composição; a seção 3 apresenta o modelo chuva-vazão, SWMM, que será utilizado para estimar a resposta hidrológica do telhado verde; a seção 4 descreve a bacia estudada, os dados de chuva utilizados, bem como apresenta a estrutura de modelagem e a metodologia a serem usadas neste estudo; a seção 5 apresenta e discute os resultados obtidos; por fim, a seção 6 apresenta as conclusões levantadas ao longo do trabalho.

## 2. TELHADO VERDE

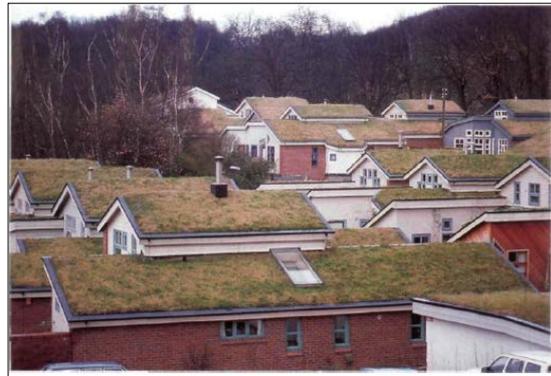
Os telhados verdes (Figura 1) são definidos como um sistema vivo de uma extensão de um telhado (TOLDERLUND, 2010), e correspondem à técnica de aplicação de substrato e vegetação sobre uma camada impermeável com a função de cobertura de uma determinada edificação, podendo apresentar-se inclinada ou plana (SAVI, 2015).

Figura 1 - (a) e (b) Residências na Alemanha: país pioneiro na técnica dos telhados verdes

(a)



(b)



Fonte: Minke (2005)

### 2.1.CLASSIFICAÇÃO

Os sistemas de telhados verdes podem apresentar-se de duas formas, sendo: superficiais, classificados como extensivos quando apresentam espessura na camada de substrato menor que 150 mm; ou profundos, classificados como intensivos quando a camada de substrato possui espessura maior que 150 mm (TOLDERLUND, 2010; BERNDTSSON, 2010; STOVIN; POE; BERRETTA, 2013; FASSMAN-BECK et al., 2013).

Há um terceiro tipo de telhados verdes chamados semi-intensivo que ocorre quando há uma combinação extensiva e intensiva, porém o tipo extenso deve representar 25% ou menos da área total do telhado verde (BIANCHINI; HEWAGE, 2012).

### 2.1.1. TELHADOS VERDES EXTENSIVOS

Os sistemas de telhados verdes extensivos (Figura 2), geralmente apresentam uma profundidade de substrato de aproximadamente 10 a 15 centímetros e são acessíveis apenas para manutenção, reparos e irrigação (TOLDERLUND, 2010). São projetados para serem praticamente auto-sustentáveis, exigindo manutenção mínima e, dependendo do clima, pouca irrigação (BIANCHINI; HEWAGE, 2012).

Figura 2 - (a) e (b) Edificações com coberturas verdes extensivas

(a)



(b)



Fonte: Green Roof Technology, 2019.

O peso típico das coberturas verdes extensivas é de 0,01 a 0,03 kgf/cm<sup>2</sup> quando encontram-se totalmente saturados. Outras vantagens como baixo peso, menor valor de investimento e possibilidade de aplicação em grandes áreas tornam os telhados verdes extensivos mais utilizados. Eles também são fáceis de substituir e podem ser mais apropriados para projetos “retrofit” – modernização de edificações antigas (TOLDERLUND, 2010).

Idealmente uma cobertura do tipo extensiva deverá apresentar uma inclinação mínima de 1,5% a 2% para que a drenagem ocorra de forma natural e sem dificuldades. Também podem ser desenvolvidas em lajes com até 30% de inclinação, no entanto quando se verificam estas inclinações muito acentuadas deve-se atentar para as medidas de controlo de deslizamentos do solo e das plantas (PINTO, 2014).

### 2.1.2. TELHADOS VERDES INTENSIVOS

Os sistemas de telhado verde intensivos tipicamente apresentam uma profundidade de substrato que varia de 15 a 20 centímetros (TOLDERLUND, 2010). Já para Minke (2005) é necessária uma espessura de substrato mínima de 30 cm.

Esse tipo de cobertura verde permite uma maior diversidade de plantas, todavia também são mais pesados que os extensivos. Seu peso varia de 0,04 kgf/cm<sup>2</sup> a 0,07 kgf/cm<sup>2</sup> quando estão totalmente saturados e algumas das vantagens são: maior diversidade de plantas e biodiversidade, melhor gerenciamento de águas pluviais e propriedades de isolamento, maior possibilidade de design e variedade, acessibilidade e uso diário (TOLDERLUND, 2010). As coberturas ajardinadas intensivas assemelham-se a um jardim na cobertura como mostra a Figura 3.

Figura 3 - (a) e (b) Edificações com coberturas verdes intensivas

(a)



(b)



Fonte: Green Roof Technology, 2019.

Os telhados verdes do tipo intensivo apresentam, em geral, uma redução maior do escoamento superficial e uma filtragem da água da chuva superior quando comparado com os telhados verdes do tipo extensivo (SAADATIAN et al., 2013).

Diferente do telhado verde extensivo, a cobertura verde do tipo intensiva se desenvolve em toda a área da cobertura do edifício, permitindo um sistema de drenagem único. Elementos de arquitetura, tais como, caminhos, bancos, mesas e até fontes, são muitas vezes implementados neste tipo de cobertura ajardinada, criando áreas comuns de lazer para os habitantes do edifício, intensificando a relação homem-natureza. Em contrapartida, preocupações com a rega, fertilização, poda, entre outras, terão de ser

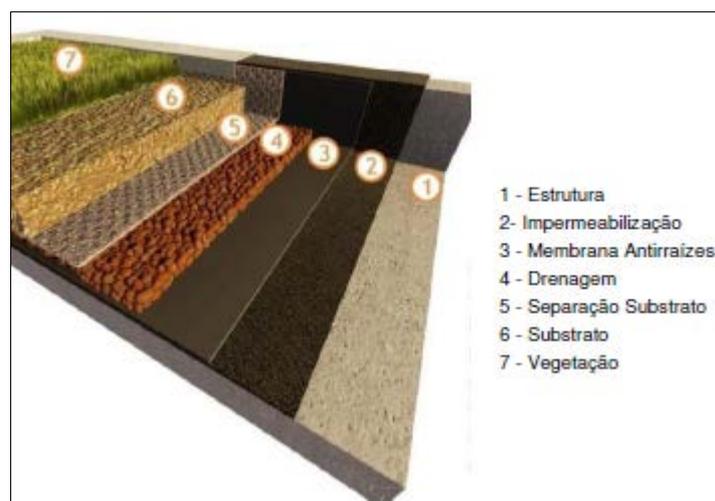
levadas em conta na fase de projeto e contabilizadas na manutenção da cobertura durante a sua existência (PINTO, 2014).

## 2.2.COMPOSIÇÃO

Um telhado verde é um sistema complexo de camadas que trabalham em conjunto para proporcionar estética e desempenhar as mais diversas funções. Ao projetar um telhado verde, é fundamental tomar decisões técnicas e coerentes sobre a inclusão ou exclusão de certas camadas. Algumas camadas são absolutamente necessárias em sistemas de telhado verde e outros são opcionais (TOLDERLUND, 2010).

Para escolher os componentes mais apropriados para o sistema, é útil entender as propriedades técnicas que levam a um desempenho adequado, seja um produto comercialmente disponível ou se precisa ser desenvolvido especialmente para o telhado verde em questão. Outros requisitos como, onde pode ser encontrado, se já existem produtos similares de igual ou melhor qualidade, e se existem atributos específicos que precisam ser especificados para sua instalação e desempenho bem-sucedidos precisam ser analisados (WEILER; SCHOLZ-BARTH, 2009). Na Figura 4 encontram-se os principais elementos que compõem os telhados verdes:

Figura 4 - Composição de um telhado verde



Fonte: Adaptado de Savi, 2015.

### **2.2.1. ESTRUTURA**

Para o dimensionamento da estrutura, deve-se levar em consideração não apenas a carga permanente do telhado verde saturado somado à sua vegetação, como também às cargas pontuais previstas, como circulação de pessoas ou colocação de outros elementos (MINKE, 2005).

Geralmente, a estrutura mais adequada e utilizada para compor as coberturas verdes são as lajes de concreto armado, devido à sua capacidade de carga. No entanto, outros sistemas estruturais podem ser utilizados desde que corretamente dimensionados (WEILER; SCHOLZ-BARTH, 2009).

Outro fator levado em consideração consiste na escolha da inclinação do telhado verde, podendo apresentar-se levemente inclinado ou com elevada inclinação. A escolha depende da finalidade proposta ou uso e praticidade da aplicação. Quando a principal função é maximizar a retenção, aumentando o tempo de detenção do escoamento das águas pluviais, os telhados de baixa inclinação são bem adequados porque a inclinação mínima facilita o atraso e a detenção de águas pluviais (WEILER; SCHOLZ-BARTH, 2009).

### **2.2.2. IMPERMEABILIZAÇÃO**

A impermeabilização consiste na instalação de uma membrana que impede a água de penetrar no edifício (TOLDERLUND, 2010). O objetivo principal da impermeabilização é manter que a umidade indesejada da cobertura verde não atinja a estrutura que se encontra abaixo. A impermeabilização é o elemento protetor primário da laje, localizando-se normalmente abaixo de todos os componentes do sistema (WEILER; SCHOLZ-BARTH, 2009).

É de fundamental importância, realizar uma prova de fluxo para verificar se a membrana não tem vazamentos e é, de fato, impermeável após a instalação da membrana (TOLDERLUND, 2010).

A falha de uma membrana de impermeabilização pode levar à falha de todo sistema, portanto a impermeabilização deve ser escolhida pela compatibilidade com a estrutura onde será implantado o telhado verde. É importante atentar a essa etapa, pois a

má execução ou uso de materiais inadequados podem resultar em patologias futuras na edificação (SAVI, 2015). Isso ajudará a garantir o desempenho a longo prazo de todo o sistema e também ajudará a cumprir com os requisitos do fabricante ou garantia do instalador (WEILER; SCHOLZ-BARTH, 2009).

### **2.2.3. MEMBRANA ANTIRRAÍZES**

A barreira antirraízes protege a integridade do elemento de impermeabilização utilizado na cobertura verde, evitando que raízes indesejadas de plantas atinjam esta camada e a estrutura de suporte (TOLDERLUND, 2010).

As raízes, quando encontram tempo suficiente e um lugar para ir, procuram umidade e nutrientes além do meio de cultivo (substrato). Eventualmente, causam danos à camada de água, às saídas de drenagem e possivelmente a estrutura (TOLDERLUND, 2010).

Quando a base da manta antirraízes é rugosa ou irregular, deve-se colocar abaixo dessa membrana protetora um feltro ou uma camada de areia, com a função de uniformizar e evitar rasgos na mesma (MINKE, 2005).

### **2.2.4. DRENAGEM**

A camada de drenagem destina-se a remover a água adicional que não foi absorvida ou interceptada pela vegetação e permite que a mesma encontre umidade suficiente para manter a vida das plantas (TOLDERLUND, 2010).

Desta forma, a drenagem é item essencial para manter a impermeabilização efetiva, a integridade do sistema estrutural, a sobrevivência das plantas e a durabilidade dos elementos locais, como paredes e pavimentação. Deve ser constituída de um sistema para coletar, absorver, transportar e distribuir a água em toda a cobertura. Além da capacidade de absorção da água, a sua capacidade de armazenamento deve existir, para que posteriormente o excesso de água da chuva ou da irrigação seja liberado através de drenagem superficial ou subterrânea para o sistema de águas pluviais (WEILER; SCHOLZ-BARTH, 2009).

A retenção de água para uma maior absorção pelo meio de plantação e para reduzir o escoamento das águas pluviais pode ser mantida para um tempo na camada de drenagem. Os materiais mais utilizados são agregados graúdos (Figura 5) que melhoram a capacidade da camada para transportar e reter temporariamente a água (TOLDERLUND, 2010).

Figura 5 - Agregado utilizado para camada drenante



Fonte: Tolderlund, 2010.

A espessura da camada de drenagem e os materiais utilizados para realizar adequadamente a drenagem podem ser diferentes. Devendo se adequar a finalidade à qual foram dimensionados (WEILER; SCHOLZ-BARTH, 2009).

### **2.2.5. SEPARAÇÃO DO SUBSTRATO**

O tecido filtrante é um material leve e durável que impede a infiltração de partículas na camada de drenagem, atuando como uma barreira protetora para evitar o entupimento e, conseqüentemente, interrupção no sistema de drenagem (TOLDERLUND, 2010).

### **2.2.6. SUBSTRATO**

A composição do substrato de um telhado verde pode variar muito dependendo do tamanho do sistema adotado, dos materiais disponíveis no local, e das circunstâncias do projeto. Sua granulometria deve consistir em uma diversidade de tamanhos de grãos

para fornecer drenagem enquanto permite uma retenção de água para garantir a disponibilidade de água para as plantas. Todos os componentes e sua relação entre o meio global de crescimento devem ser coordenados com restrições de carga (WEILER; SCHOLZ-BARTH, 2009).

A profundidade do substrato também influencia o desempenho térmico da cobertura, assim como o aumento da umidade no solo devido ao processo de resfriamento evaporativo (SAADATIAN et al., 2013).

### **2.2.7. VEGETAÇÃO**

A vegetação se configura no componente mais característico de um telhado verde. Podendo incorporar diferentes espécies de plantas e funções estéticas, porém esta camada necessita ser cuidadosamente considerada para as condições e os objetivos projetados (TOLDERLUND, 2010).

A natureza extrema do ambiente do telhado verde e o número de microclimas que ele produz precisam ser a principal consideração ao selecionar espécies de plantas. Desta forma, em grande parte dos casos opta-se por adotar plantas que são nativas ou de uma região com um clima semelhante (TOLDERLUND, 2010).

A escolha das vegetações deve também considerar outros fatores, como: resistência à seca e ao frio, altura de crescimento da vegetação e das raízes (MINKE, 2005), pois muitos telhados verdes têm uma camada média de crescimento leve, impossibilitando a estabilidade para arbustos e árvores de maior dimensão. (TOLDERLUND, 2010).

### **2.3.APLICAÇÃO**

Os telhados verdes foram ganhando popularidade na Europa a partir de 1960, por meio dos avanços de estudos científicos na Alemanha que aprovaram uma série de políticas públicas para implantação desta prática sustentável (LUCKETT, 2009). Em 2014, 43% das cidades alemãs ofereciam incentivos fiscais para a instalação de telhados verdes (PINTO, 2014).

Já nos Estados Unidos e Canadá, o movimento vem ganhando força nos últimos 10 anos (LUCKETT, 2009). Em Portland (EUA), os códigos de construção informam que para 0,09 m<sup>2</sup> de telhados verdes construídas, o construtor terá um ganho extra de 0,27 m<sup>2</sup> de área no solo (PINTO, 2014).

A Green Roofs for Healthy Cities - North America Inc. é uma associação de indústria sem fins lucrativos em rápido crescimento que vem trabalhando para promover telhados verdes em toda a América do Norte desde 1999 (LUCKETT, 2009).

No Brasil, a técnica ainda não atingiu grandes espaços, porém aos poucos vem crescendo especialmente nas regiões sul e sudeste (LOUZADA, 2016). Em 30 de novembro de 2012, a Assembleia Legislativa do estado do Rio de Janeiro decretou a lei 6349/2012 que dispõe sobre a obrigatoriedade da instalação do Telhado Verde nos locais que especifica e dá outras providências.

“Art. 1º - Fica o Poder Executivo autorizado a prever a construção dos chamados "Telhados Verdes" nos prédios públicos, autarquias e fundações do Estado do Rio de Janeiro, projetados a partir da promulgação da presente Lei.

[...] Art. 3º - A área destinada, pelas construções edificadas, ao "Telhado Verde" será considerada, para todos os efeitos, como tendo as mesmas características da área permeável.

[...] Art. 5º - O detalhamento técnico para regulamentação da presente Lei ficará a cargo da Secretaria de Estado de Obras, Secretaria de Estado do Ambiente e da Empresa de Obras Públicas do Estado do Rio de Janeiro - EMOP” (RIO DE JANEIRO, 2012).

Em 12 de janeiro de 2015, Recife foi uma das primeiras cidades brasileiras a sancionar uma lei sobre a utilização e obrigatoriedade de telhados verdes em edificações habitacionais multifamiliares e não-habitacionais:

“Art. 1º - Os projetos de edificações habitacionais multifamiliares com mais de quatro pavimentos e não-habitacionais com mais de 400m<sup>2</sup> de área de cobertura deverão prever a implantação de "Telhado Verde" para sua aprovação, da seguinte forma:

I - no pavimento descoberto destinado a estacionamento de veículo das edificações, cuja área não se contabilizará para efeito de área construída, desde que: a) não sejam cobertas as áreas de solo permeável; b) sejam respeitados os afastamentos legais previstos para os imóveis vizinhos; c) seja respeitado um afastamento mínimo de 1m (um metro) e máximo de 3m (três metros) em relação à lâmina do pavimento tipo ou qualquer outro pavimento coberto;

II - exclusivamente para os edifícios multifamiliares descritos no caput, nas áreas de lazer situadas em lajes de Piso, no percentual de 60% (sessenta por cento), e nas áreas de lazer em pavimento de cobertura, em pelo menos, 30% (trinta por cento) de sua superfície descoberta” (RECIFE, 2015).

Do ponto de vista científico, diversos autores estudam os telhados verdes sob diferentes perspectivas: definição do substrato visando melhorar a qualidade do escoamento (VIJAYARAGHAVAN; RAJA, 2014); análise de desempenho dos telhados verdes sob condições climáticas extremas (KLEIN; COFFMAN, 2015); avaliação do impacto hidrológico dos telhados verdes desde nível de edifício à escala de bacia (VERSINI et al., 2015); efeito da heterogeneidade da distribuição espacial no crescimento das plantas e a performance térmica dos telhados verdes (BUCKLAND-NICKS; HEIM; LUNDHOLM, 2016); uso de agregados reciclados no substrato de telhados verdes para diversidade de plantas (MOLINEUX et al., 2015); efeito dissipador de calor e aquecimento interno imposto por um telhado verde extensivo (JIM, 2014); efeito do percentual de compostagem do substrato na produção de vegetais em telhados verdes (EKSI et al., 2015); irrigar ou não irrigar: análise do comportamento de um telhado verde através de um sistema higrotérmico verticalmente resolvido (SUN; BOUZEID; NI, 2014); influência da precipitação sobre o ruído blindado por um telhado verde (RENTERGHEM; BOTTELDOOREN, 2014); medições de nutrientes e mercúrio em escoamento de telhado verde e cascalho (MALCOLM et al., 2014); desempenho hidrológico quantitativo do telhado verde extensivo sob regime de chuvas húmidas-tropicais (WONG; JIM, 2014); parametrização física e sensibilidade de modelos hidrológicos urbanos: Aplicação a sistemas de telhados verdes (YANG; WANG, 2014); dinâmica de escala de telhados verdes extensivos: quantificação do efeito da área de drenagem e das características da precipitação sobre o desempenho hidrológico observado e modelado do telhado verde (HAKIMDAVAR et al., 2014).

Carpenter et al. (2016) analisou o desempenho de um telhado verde com 1.190 m<sup>2</sup> de área na cobertura de uma edificação no estado de Nova York (EUA). Foram quantificados 87 eventos de curta duração para um volume total precipitado variando de 2,5 mm a 17,8 mm. Os resultados mostraram que a retenção de água pode variar entre 88% a 95%, e o retardo no pico de cheia ser de aproximadamente 30 minutos.

Fassman-Beck et al. (2013) estudaram quatro diferentes protótipos de telhados verdes para três localidades distintas em Auckland (NZL). Foram analisados eventos de curta duração, superiores a 2 mm, e verificou-se redução na vazão de pico entre 62% a 90%. Os autores ainda afirmam que o desempenho do telhado verde é influenciado pela duração do período de monitoramento, o que pode explicar o desempenho variável de telhados verdes que se encontra em outros estudos da literatura.

Masseroni; Cislighi (2016) verificaram os benefícios dos telhados verdes para reduzirem os riscos de inundação em escala de bacia hidrográfica através do SWMM. As simulações demonstram que o uso generalizado de telhados verdes em 5% das cobertas, reduz o pico de vazão em aproximadamente 2%. Já para um cenário de 100% de telhados verdes, obteve-se uma redução de cerca de 30% na vazão máxima.

Johannessen; Muthanna; Braskerud et al. (2018) e Johannessen et al. (2019), investigaram as atenuações das taxas de pico com uso de telhados verdes, sendo observadas e simuladas, por meio do software Storm Water Management Model (SWMM), em diferentes locais da Noruega. Foram obtidos resultados de redução na vazão de pico entre 65% a 90%.

### **3. MODELAGEM HIDROLÓGICA**

Dentre os inúmeros modelos matemáticos disponíveis para estudos hidrológicos, tem-se o modelo de gestão de drenagem urbana Storm Water Management Model (SWMM) como um dos mais utilizados e documentados em pesquisas científicas.

#### **3.1. STORM WATER MANAGEMENT MODEL**

O modelo hidrológico SWMM foi desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos da América (The U.S. Environmental Protection Agency – EPA) em 1971, e através de um modelo chuva-vazão, possibilita quantificar e analisar a qualidade do escoamento de águas pluviais em áreas urbanas. Podendo realizar simulações de um único evento chuvoso, assim como para uma simulação contínua de longo prazo (ROSSMAN; HUBER, 2016a).

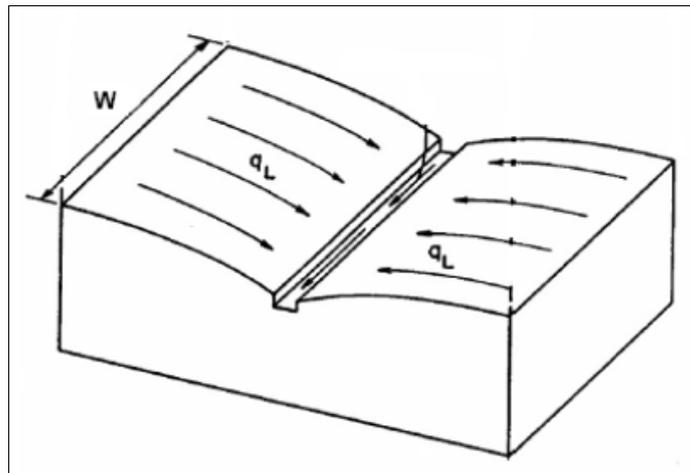
O procedimento de cálculo opera a partir de um conjunto de sub-bacias de drenagem, que durante e após a ocorrência de um evento de chuva, o escoamento é simulado por tubulações, canais, pavimentos, possibilitando ainda a inserção de dispositivos de controle na fonte, como reservatórios de detenção, telhados verdes, pavimentos permeáveis, entre outros. Desta forma, diferentes processos físicos podem ser avaliados na modelagem, dentre estes, o escoamento superficial, infiltração, propagação de vazões, inundações e alagamentos, poluição e contaminação das águas, dentre outros (ROSSMAN; HUBER, 2016a).

A modelagem do SWMM faz uso de soluções discretas ao longo do tempo, a partir dos princípios de conservação de massa, energia e da quantidade de movimento. O algoritmo dos processos físicos estudados na metodologia deste trabalho será descrito com base nos manuais do usuário (ROSSMAN; HUBER, 2016a; ROSSMAN; HUBER, 2016b).

##### **3.1.1. HIDROLOGIA**

A primeira consideração feita pelo modelo é que cada sub-bacia corresponde a uma superfície retangular com declividade uniforme ( $S$ ) e largura constante ( $W$ ), conduzindo a água precipitada para uma saída, considerando que cada sub-bacia funciona como um reservatório não-linear (Figura 6).

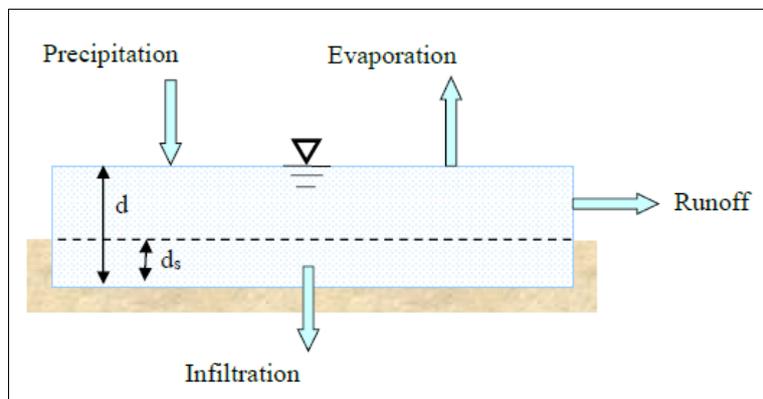
Figura 6 - Representação da sub-bacia no SWMM



Fonte: Rossman; Huber, 2016a

Para quantificar o escoamento superficial, o SWMM parte do princípio da conservação de massa (Figura 7), na qual tem-se que a variação do volume de água na sub-bacia (exemplos: telhado, solo, vegetação, arruamento, entre outros), em um determinado intervalo de tempo corresponde ao balanço de massa entre a diferença dos fluxos de entrada e saída no reservatório simulado.

Figura 7 - Representação do balanço de massa na sub-bacia



Fonte: Rossman; Huber, 2016a

Deve-se observar que a capacidade de armazenamento de água em depressões ( $d_s$ ) na sub-bacia também é considerada, visto que corresponde ao valor armazenável na superfície por alagamento, encharcamento e interceptação da água pluvial.

Da conservação da massa, a variação do nível de água na profundidade  $d$  por unidade de tempo  $t$ , é determinado pela diferença entre as taxas de entrada e saída sobre a sub-bacia ((01):

$$\frac{\partial d}{\partial t} = i - e - f - q \quad (01)$$

Em que:

$i$  = intensidade de precipitação (mm/h);

$e$  = taxa de evaporação (mm/h);

$f$  = taxa de infiltração (mm/h);

$q$  = taxa de escoamento (mm/h).

Considerando que o escoamento através da superfície da bacia se aproxima de um escoamento uniforme em canal retangular, utilizando a equação da vazão em condutos livres proposta por Manning ((02):

$$Q = \frac{1}{n} \cdot Am \cdot Rh^{2/3} \cdot S^{1/2} \quad (02)$$

Em que:

-  $n$  é o coeficiente de rugosidade de Manning;

-  $Am$  é a área molhada do escoamento (m<sup>2</sup>);

-  $Rh$  é o raio hidráulico do escoamento (m);

-  $S$  é a declividade do escoamento (m/m);

-  $Q$  é a vazão (m<sup>3</sup>/s).

Sendo raio hidráulico, perímetro e área molhadas calculados a partir das (03 e(04):

$$Am = W \cdot (d - ds) \quad (03)$$

$$Pm = W + 2(d - ds) \quad (04)$$

Uma vez que o nível da lâmina d'água ( $d$ ) é um valor muito pequeno quando comparado à largura do canal ( $W$ ), admite-se que o perímetro molhado é muito próximo ao valor de  $W$ , obtendo-se a equação (05):

$$RH = (d - ds) \quad (05)$$

Aplicando as equações obtidas anteriormente, tem-se a equação (06):

$$q = \frac{w.S^{1/2}}{A.n} (d - ds)^{5/3} \quad (06)$$

Simplificando a equação 06 pelo uso da constante  $\alpha$ , e aplicando a mesma na equação 01, tem-se a nova equação do balanço hídrico no reservatório (equação 07):

$$\frac{\partial d}{\partial t} = i - f - e - \alpha.(d - ds)^{5/3} \quad (07)$$

Logo, para cada instante de tempo determinam-se os valores de lâmina d'água correspondentes e, conseqüentemente, a vazão de escoamento superficial.

O processo de infiltração no solo pode ser simulado por três diferentes métodos, no qual o usuário pode optar a metodologia que melhor se adeque a seu estudo. Sendo estas:

- Método do SCS (Soil Conservation Service): estima a infiltração a partir de uma aproximação do método Curva Número (CN) do NRCS (National Resources Conservation Service) que calcula o escoamento superficial;

- Método de Horton: baseia-se em soluções empíricas;

- Método de Green-Ampt: considera o umedecimento por coluna de solo, separando as camadas com umidades iniciais e saturadas; sendo esse utilizado na metodologia desta pesquisa.

Pelo critério de Green-Ampt, a velocidade da água dentro da zona úmida é dada pela Lei de Darcy como uma função da condutividade hidráulica saturada  $K_s$ , a sucção capilar ao longo da frente molhada  $\psi_s$ , a profundidade da água na superfície  $d$ , e a profundidade da camada saturada abaixo da superfície,  $L_s$  (equação 08):

$$fp = K_s \left[ \frac{d + L_s + \psi_s}{L_s} \right] \quad (08)$$

A profundidade da camada saturada  $L_s$  pode ser expressa em função da infiltração cumulativa  $F$ , e o déficit inicial de umidade a ser preenchido abaixo da frente de molhamento,  $\theta_d = \theta_s - \theta_i$  como  $L_s = F / \theta_d$ . Substituindo equação 08 e assumindo que  $d$  é pequeno comparado com as outras profundidades, tem-se a equação de Green-Ampt para condições saturadas (equação 09):

$$fp = K_s \left[ 1 + \frac{\psi_s \cdot \theta_d}{F} \right] \quad (09)$$

A equação 09 pode ser utilizada somente após a camada saturada se desenvolver na superfície do solo. Antes deste momento, a capacidade de infiltração será igual à intensidade da chuva ( $fp = i$ ) e  $F = F_s$ . Ao decorrer do tempo, é verificado se a saturação foi alcançada resolvendo a equação 09. Caso o valor de  $F_s$  obtido pela equação 10 seja igual ou superior a infiltração acumulada,  $F$ , a saturação foi alcançada.

$$F_s = \frac{K_s \cdot \psi_s \cdot \theta_d}{i - K_s} \quad (10)$$

Observe que não há cálculo de  $F_s$  quando  $i \leq K_s$ , embora  $F$  ainda seja calculado durante todo evento. Finalmente, neste esquema, a infiltração real  $f$  é a mesma que o valor potencial  $fp$  ( $f = fp$ ).

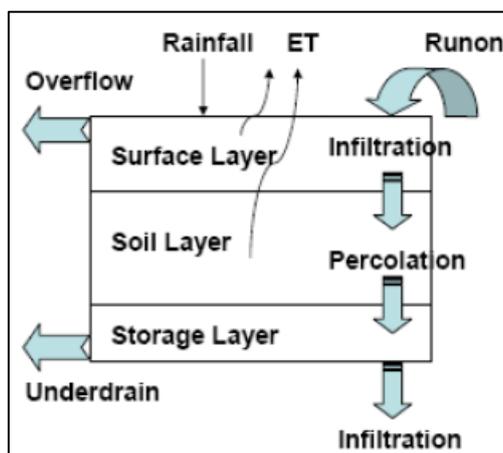
Li et al. (2019) estudou o processo de evapotranspiração para telhados verdes e concluiu que apenas para simulações de longa duração, o processo resulta em implicações importantes para a avaliação do desempenho hidrológico da LID.

Portanto, como o foco deste trabalho é a análise de eventos intensos e isolados, o processo de evapotranspiração não será abordado em detalhes, diante sua complexidade, dependendo de muitos fatores, porém que não tem representatividade nos resultados para a metodologia abordada neste estudo.

### 3.1.2. MÓDULO LID: TELHADO VERDE

O módulo que representa os telhados verdes tem as mesmas camadas de superfície e solo que a célula de biorretenção (Figura 8), porém com uma camada drenante na face inferior, que fornece volume para armazenamento temporário da água, enquanto o escoamento do telhado verde é calculado com base na equação de Manning com um coeficiente de rugosidade específico para cada camada (JOHANNESSEN et al., 2019).

Figura 8 - Propagação do escoamento em uma Célula de Biorretenção no SWMM



Fonte: Rossman; Huber, 2016b

O módulo para inserção de métodos de baixo impacto (LID) no SWMM, simula, dentre outros dispositivos de controle de escoamento, os telhados verdes. A modelagem é fundamentada no conceito de equilíbrio da umidade, sendo o parâmetro responsável por controlar o movimento de água na vertical em diferentes camadas (PENG; STOVIN, 2017).

As diferentes camadas verticais que compõem o módulo de telhado verde, tais como: espessura, propriedades físicas dos materiais e características da sub-bacia, são definidas por unidade de área (QIN; LI; FU, 2013). Permitindo que os telhados verdes possam ser implementados facilmente em diferentes sub-bacias (PALLA; GNECCO, 2015).

O telhado verde no SWMM é constituído por três camadas horizontais, sendo estas: camada superficial, camada de solo e camada de armazenamento. A camada superficial corresponde a cobertura vegetada que recebe precipitação direta ( $i$ ). A perda

de água pode ser pelo processo de evapotranspiração ( $e_1$ ), por infiltração para a camada de solo ( $f_1$ ) e por escoamento superficial ( $q_1$ ). A segunda camada contém uma mistura de solo modificada, denominada substrato, que tem por função proporcionar o crescimento da vegetação. Recebe infiltração da camada superficial ( $f_1$ ), e perde água pelo processo de evapotranspiração ( $e_2$ ) e percolação para a camada inferior ( $f_2$ ). Essa, por sua vez, consiste em uma camada de armazenamento formada por materiais granulares como brita grossa ou cascalho. Recebe a água percolada do substrato ( $f_2$ ) e perde água por evaporação ( $e_3$ ) e por um sistema de drenagem de saída do dispositivo ( $q_3$ ). As equações 11, 12 e 13 representam o escoamento nas camadas de superfície, solo e drenagem, respectivamente (ROSSMAN; HUBER, 2016b):

$$\phi_1 \frac{\partial d_1}{\partial t} = i - e_1 - f_1 - q_1 \quad (11)$$

$$D_2 \frac{\partial d_2}{\partial t} = f_1 - e_2 - f_2 \quad (12)$$

$$\phi_3 \frac{\partial d_3}{\partial t} = f_2 - e_3 - q_3 \quad (13)$$

A taxa de escoamento da superfície da camada de solo ( $q_1$ ) é calculada usando a equação de Manning para o escoamento superficial uniforme. Sob a suposição de que a largura da área de fluxo é muito maior que a profundidade, é obtida a equação 14 (ROSSMAN; HUBER, 2016b):

$$q_1 = \frac{1}{n_1} \sqrt{S_1} \left( \frac{W_1}{A_1} \right) \phi_1 (d_1 - D_1)^{5/3} \quad (14)$$

Em que:

- $n_1$  é o coeficiente de rugosidade de Manning;
- $S_1$  é a declividade do telhado (m/m);
- $W_1$  é o comprimento total ao longo da borda do telhado (m);
- $A_1$  é a área do telhado (m<sup>2</sup>);
- $\phi_1$  é a fração vazia de volume da camada superficial;
- $d_1$  é a profundidade da lâmina d'água acumulada na camada superficial (m);
- $D_1$  é a profundidade de armazenamento na camada superficial (m).

É considerado que a taxa de fluxo de saída da camada drenante ( $q_3$ ) obedece ao fluxo em canal aberto uniforme dentro dos canais da manta. Assim, pode ser expresso pela equação 15 (ROSSMAN; HUBER, 2016b):

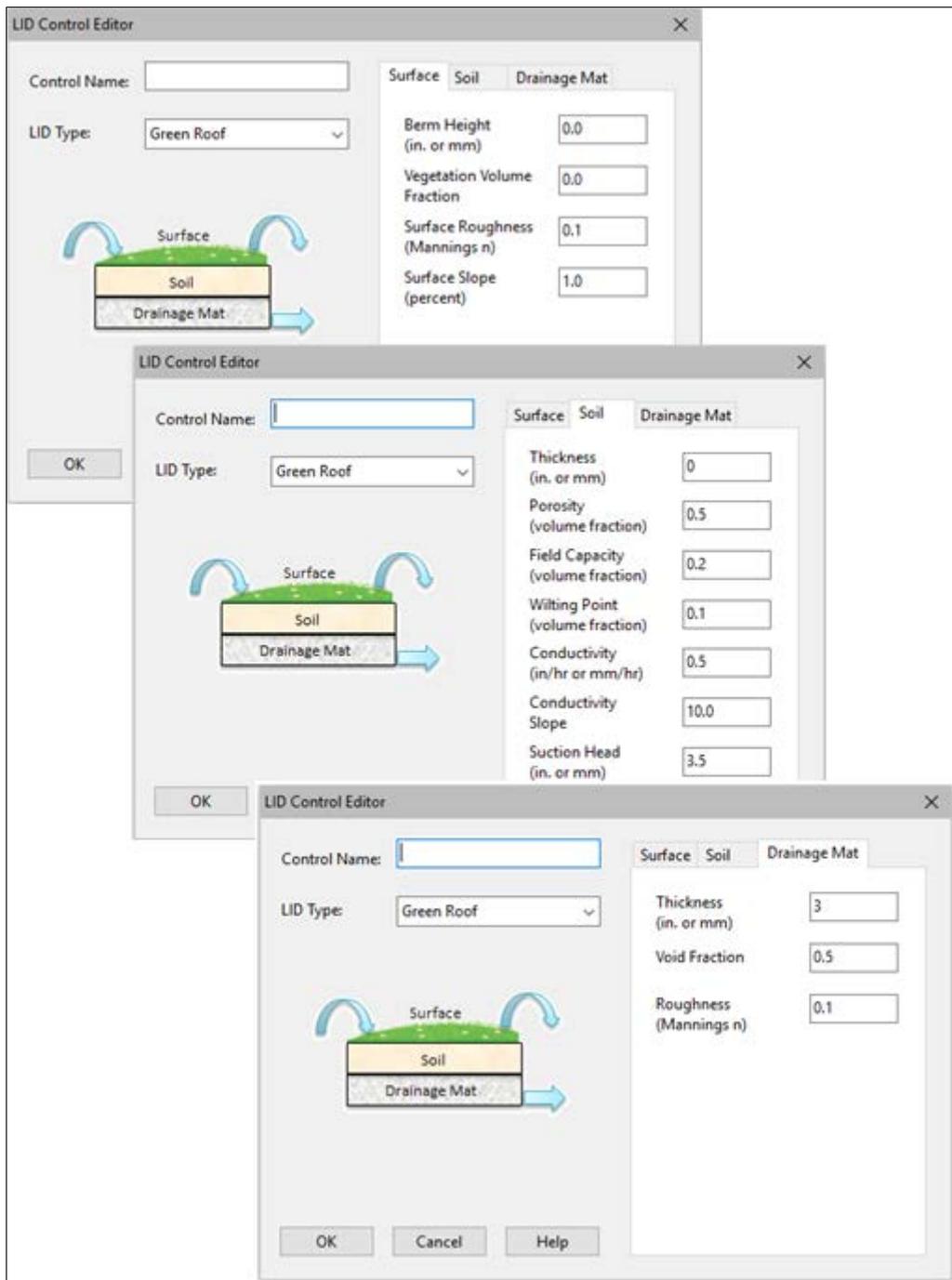
$$q_3 = \frac{1}{n_3} \sqrt{S_1} \left( \frac{W_1}{A_1} \right) \phi_3 (d_3)^{5/3} \quad (15)$$

Em que:

- $n_3$  é o coeficiente de rugosidade de Manning;
- $S_1$  é a declividade do telhado (m/m);
- $W_1$  é o comprimento total ao longo da borda do telhado (m);
- $A_1$  é a área do telhado (m<sup>2</sup>);
- $\phi_3$  é a fração vazia de volume da camada drenante;
- $d_3$  é a profundidade da lâmina d'água acumulada na camada drenante (m).

Todos esses parâmetros de superfície são fornecidos pelo usuário como dados de entrada para caracterização do telhado verde. A Figura 9 apresenta as janelas com os dados padrão do programa.

Figura 9 - Definição dos parâmetros do telhado verde



## **4. MATERIAL E MÉTODOS**

### **4.1.ÁREA DE ESTUDO**

A cidade de Natal está localizada na região Nordeste do Brasil com uma extensão de 167,264 km<sup>2</sup> e altitude média de 30 metros acima do nível do mar. Caracterizada por um clima tropical chuvoso quente com verão seco, as médias anuais das temperaturas máxima, média e mínima registradas são de 30°C, 27,1°C e 21°C, respectivamente. Sua umidade relativa média anual é de 76% e o número de horas de insolação corresponde a 2.700 horas/ano. A precipitação pluviométrica média na cidade é de 1.583,5 mm/ano, com período chuvoso compreendendo os meses de fevereiro a setembro (RIO GRANDE DO NORTE, 2008).

A cidade possui um relevo de natureza ondulado, devido formações dunares, que alcançam altitudes de 80 metros, e um afloramento da formação barreiras com cobertura de dunas que se transformam em falésias, caracterizando grande parte da faixa litorânea da região. Desta forma, resulta em um sistema de drenagem natural muito falho, constituído de inúmeras bacias de drenagem fechadas com fluxo radial convergente para depressões interiores, que em períodos chuvosos transformam-se em grandes lagos. Logo, grande parte das soluções adotadas nos últimos anos envolve a construção de sistemas de drenagem isolados que conectam-se à lagoas de detenção e infiltração, o que requer grandes áreas para acúmulo dos volumes escoados (NATAL, 2009).

No ano de 2009, foi publicado o Plano Diretor de Drenagem Urbana e Manejo de Águas Pluviais (PDDMA) da cidade de Natal, no qual foi ampliada a classificação das bacias de drenagem, que anteriormente englobavam apenas parte do município (NATAL, 2009). De acordo com o PDDMA, a cidade de Natal encontra-se dividida em em 20 bacias hidrográficas, sendo seis na Zona Norte de Natal e 14 nas Zonas Leste, Oeste e Sul. Estas que por sua vez subdividem-se, resultando em 86 sub-bacias de drenagem (NATAL, 2009).

No Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB) publicado em 2014, a partir de informações coletadas pela equipe técnica responsável, foram levantados e cadastrados 120 pontos de alagamento na cidade de Natal (NATAL, 2014). Dentre eles, tem-se a Lagoa de infiltração e detenção do Mirassol, que dispõe de um posto

pluviográfico de responsabilidade da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) nas imediações (aproximadamente 385 metros). Logo, optou-se por utilizá-la para delimitação da área de estudo (Tabela 1), possibilitando simulações de eventos reais de chuvas intensas.

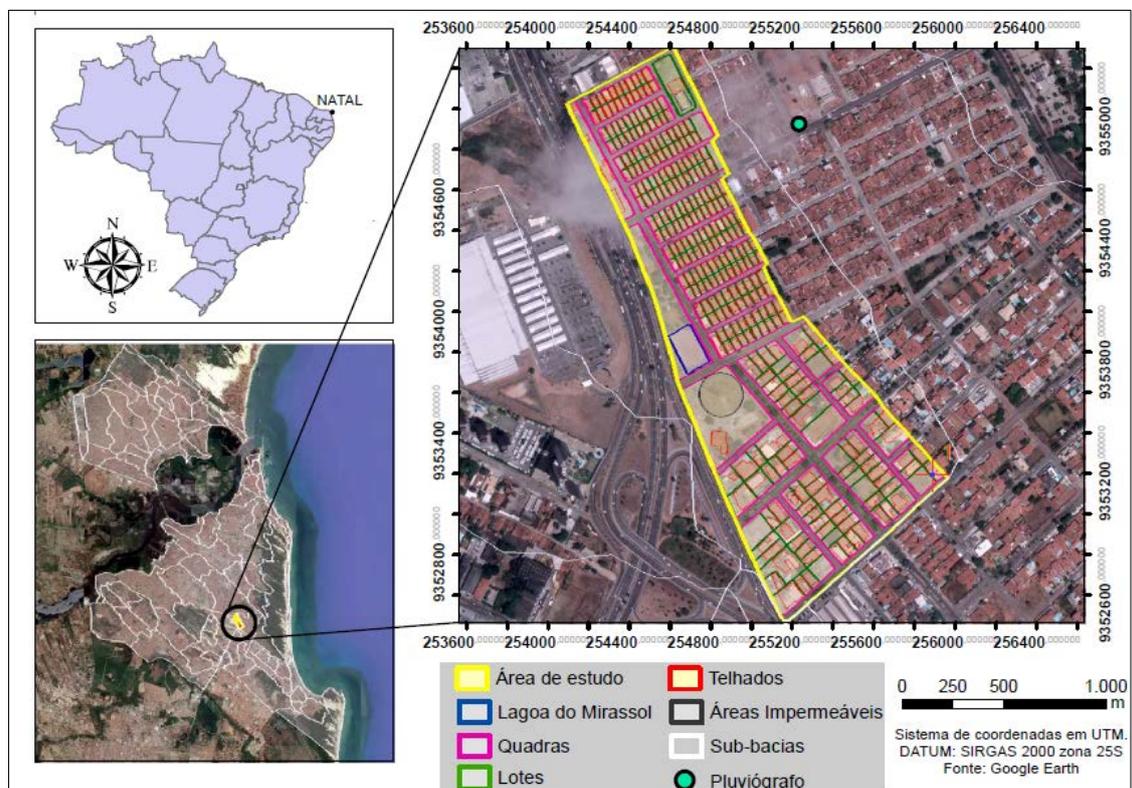
Tabela 1 - Informações da área de estudo

Área	Localização	Bacia hidrográfica	Sub-bacia de drenagem	Exutório
0,182 km <sup>2</sup> (18,2 ha)	Bairro de Capim Macio (Zona Sul)	Parque das Dunas (Bacia XI)	XI.3B	Lagoa do Mirassol

Fonte: Adaptado de Natal, 2009.

A região a ser estudada localiza-se no bairro de Capim Macio na Zona Sul da cidade de Natal, possuindo uma área de 0,182 km<sup>2</sup> (18,2 hectares) e uma ocupação predominante de residências unifamiliares ao norte e centros comerciais ao sul. Caracteriza-se como uma bacia do tipo fechada, com fluxo de escoamento superficial direcionado à lagoa de retenção e infiltração do Mirassol de área de aproximadamente 2.150 metros quadrados. Na Figura 10 tem-se o mapa de situação da área a ser estudada.

Figura 10 - Mapa de situação da área de estudo



## 4.2. DADOS DE ENTRADA

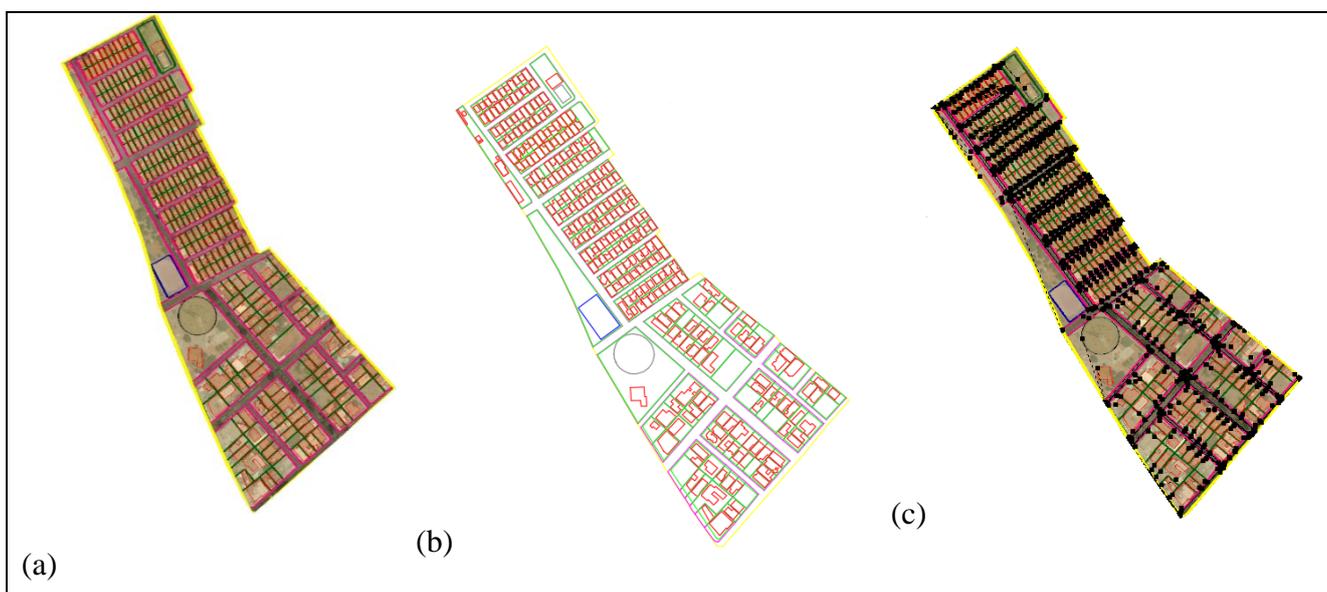
### 4.2.1. DISCRETIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Para o nível de detalhe desejado, uma vez que se pretende analisar diferentes taxas de utilização de telhados verdes na bacia, optou-se por uma discretização por lotes.

Foram previstas as áreas de cobertura conforme identificadas visualmente pelo Google Earth e considerado nas áreas internas pertencentes aos lotes residenciais e comerciais, 20% de área permeável de acordo com exigências do Plano Diretor do município de Natal. É importante ressaltar que nas áreas internas dos lotes, foram subtraídas as áreas dos telhados, e assim atribuídas as porcentagens de 20% para área permeável e 80% para área impermeável. Também foram consideradas calçadas na frente dos lotes com largura de 1,50 metros, arruamentos, e identificadas áreas públicas como praças e quadras, terrenos baldios e estacionamentos.

Cada superfície delimitada no Google Earth de acordo com o uso e ocupação do solo correspondeu a uma sub-bacia, totalizando 993 sub-bacias. Posteriormente foram exportadas para o AutoCad Civil 3D, com o objetivo de extrair as informações de área, longitude e latitude das sub-bacias, à fim de fornecer ao SWMM (Figura 11).

Figura 11 - (a) Discretização da área no Google Earth; (b) Áreas delimitadas em AutoCad Civil 3D; (c) Modelo no SWMM.



De acordo com a ocupação identificada na região, foram caracterizadas as sub-bacias conforme dados de entrada solicitados pelo software. Para a declividade das sub-bacias foi considerado que os telhados são do tipo colonial (comumente encontrado na região) com uma declividade de 25%, mínima recomendada na bibliografia (MOLITERNO, 2010). Para definir a declividade transversal dos arruamentos e pisos de calçadas/áreas públicas, optou-se por 3%, conforme recomendação do Manual de Drenagem do município (NATAL, 2009).

Um resumo dos parâmetros adotados encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2 - Caracterização das sub-bacias

Sub-bacia	Área Impermeável (%)	Largura W (m)	Declividade (%)	Coef. Manning n	
				Imp.	Perm.
<b>Telhado</b>	100	Variável	25	0,011 <sup>1</sup>	-
<b>Área Interna</b>					
<b>Lote (Res. ou Comercial)</b>	80	Variável	3	0,011 <sup>1</sup>	0,016 <sup>1</sup>
<b>Calçada</b>	100	Variável	3	0,011 <sup>1</sup>	-
<b>Área Interna</b>					
<b>Lote (Público)</b>	75	Variável	3	0,011 <sup>1</sup>	0,016 <sup>1</sup>
<b>Solo Exposto</b>	0	Variável	3	-	0,016 <sup>1</sup>
<b>Estacionamento</b>	100	Variável	3	0,011 <sup>1</sup>	-
<b>Arruamento</b>	100	6-9	Variável	0,011 <sup>1</sup>	-

Fonte: <sup>1</sup>Engman (1986 apud Rossman; Huber, 2016a).

#### 4.2.2. ESCOAMENTO SUPERFICIAL

Devido à ausência de rede de galerias de microdrenagem na região, foi considerado que a contribuição proveniente de cada sub-bacia (telhados, áreas internas remanescentes aos lotes, arruamentos, calçadas, estacionamento e áreas públicas), é então encaminhada superficialmente através de sarjetas e arruamentos até o exutório, a Lagoa do Mirassol. A Figura 12 indica o sentido do escoamento ao longo da bacia.

Figura 12 - Sentido do fluxo de água na bacia



Foram adotadas sarjetas que cobriam todo o perímetro das quadras, nos quais cada sarjeta correspondia à um conduto. Cada sarjeta (conduto) recebia contribuição dos nós, ou seja, cada lote contribuía diretamente para os nós, podendo cada nó receber diversas contribuições em uma mesma quadra

Para assemelhar-se ao escoamento em sarjeta, adotou-se condutos de formato triangular com declividade longitudinal correspondente a encontrada na localidade. Foi considerado que a lâmina de escoamento de água poderia ocorrer desde a sarjeta até o eixo do arruamento. Ao total foram contabilizados 81 nós e condutos.

### 4.2.3. INFILTRAÇÃO

Dentre as metodologias de infiltração disponíveis no SWMM, apresentadas anteriormente no capítulo 4 deste estudo, optou-se pelo uso do método de Green-Ampt nas simulações. Alguns autores, como Palla et al. (2011); Versini et al. (2015), fizeram uso do método de Green-Ampt para simular o desempenho de telhados verdes em versões anteriores do SWMM, no qual o módulo de telhado verde ainda não havia sido incorporado.

Essa escolha baseou-se também no fato de que o procedimento de cálculo no módulo LID de telhado verde adota esse método para a determinação da infiltração na camada de substrato. Logo, para padronizar a metodologia de cálculo da infiltração em simulações com e sem telhado verde, foram atribuídos os parâmetros necessários ao método (Tabela 3).

Tabela 3 - Parâmetros de infiltração

<b>Tipo de Solo</b>	<b>Capacidade de Sucção (mm)</b>	<b>Condutividade Hidráulica Saturada (mm/h)</b>	<b>Déficit Máximo de Umidade</b>
<b>Arenoso (Formação Dunas)</b>	49,53 <sup>1</sup>	120,4 <sup>1</sup>	0,34 <sup>2</sup>

Fonte: <sup>1</sup>Rawls et al. (1983 apud Rossman; Huber, 2016a); <sup>2</sup>Clapp; Hornberger (1973 apud Rossman; Huber, 2016a).

### 4.2.4. EVENTOS DE CHUVA

Para determinação dos eventos de precipitação a serem simulados, foram utilizados dados do pluviógrafo da UFRN que fornece dados em intervalos de um minuto e opera desde 01 de abril de 2014.

Nogueira (2018) analisou a série histórica de dados de 01/04/2014 à 31/07/2017 deste posto e validou com dados do mesmo período de um posto pluviométrico do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), que fornece dados diários de precipitação. Também foi realizada uma análise estatística para caracterizar os eventos extremos de

precipitação (EEP) para a cidade de Natal, obtendo o valor de intensidade de 42,8 mm/dia como limiar para ocorrência de um EPP.

Dentre os 27 EPP registrados para a cidade de Natal no estudo realizado por Nogueira (2018), optou-se por utilizar os três eventos de maior intensidade máxima (Tabela 4) no presente estudo para as simulações no SWMM.

Tabela 4 - Eventos de chuva selecionados para o estudo

<b>Evento</b>	<b>Intensidade máxima</b>	<b>Período simulado</b>	
	<b>(mm/h)</b>		
<b>01</b>	76,2	06/07/2017	00:00 – 06:00
<b>02</b>	103,63	11/04/2015	02:00 – 07:00
<b>03</b>	57,912	14/06/2014 - 15/06/2014	18:00 – 08:00

Fonte: Adaptado de Nogueira (2018).

As chuvas de projeto normalmente são definidas com base na curva Intensidade-Duração-Frequência (IDF) da região. Embora os eventos de chuva tenham sido determinados por meio de eventos reais, optou-se por utilizar a curva IDF do município de Natal (Equação 16) para calcular o Período de Retorno (TR) das chuvas, a fim de melhor caracterizá-las.

$$i = \frac{502,47 \times T^{0,1431}}{(t + 10,8)^{0,606}} \quad (16)$$

Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 5.

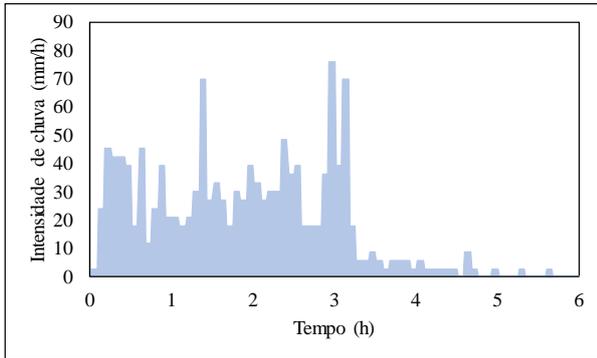
Tabela 5 - Caracterização dos Eventos de Chuva

<b>Evento</b>	<b>Duração da chuva (h)</b>	<b>Total Precipitado (mm)</b>	<b>Período de Retorno (anos)</b>
<b>01</b>	3	113,5	64
<b>02</b>	2	57,4	2
<b>03</b>	14	168,4	12

Os hietogramas dos eventos, assim como os gráficos de precipitação acumulada são apresentados abaixo (Figura 13, Figura 14 e Figura 15).

Figura 13 – (a) Hietograma do Evento 01; (b) Precipitação Acumulada do Evento 01.

(a)



(b)

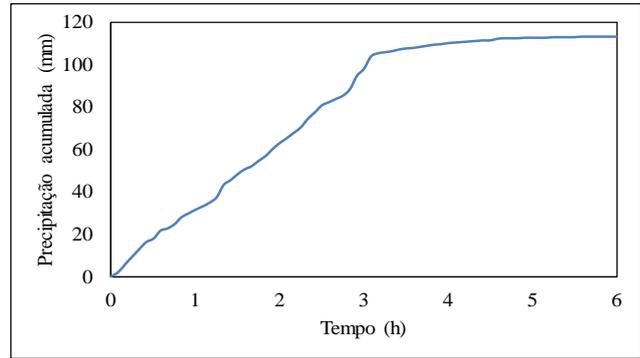
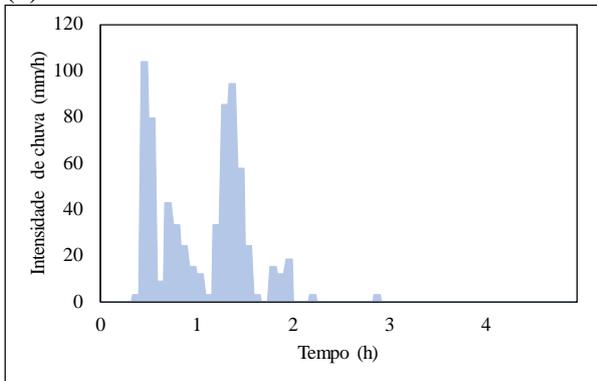


Figura 14 – (a) Hietograma do Evento 02; (b) Precipitação Acumulada do Evento 02

(a)



(b)

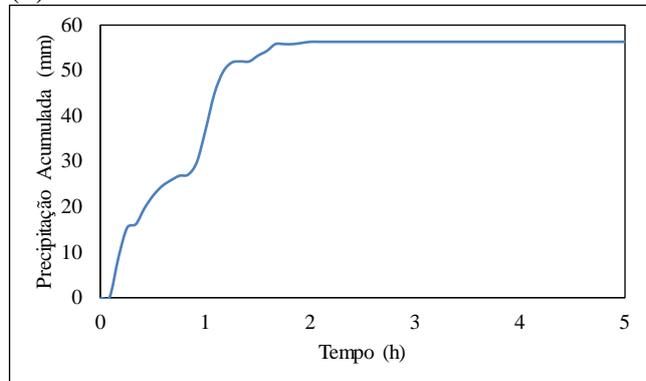
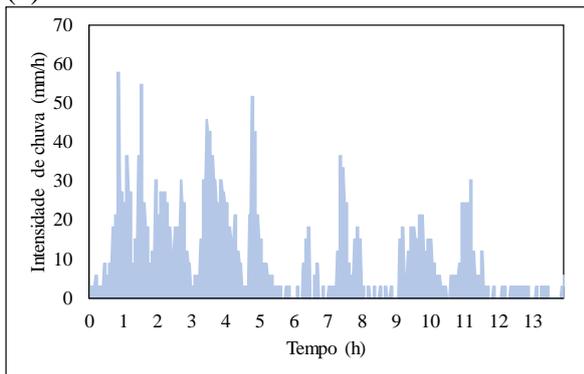
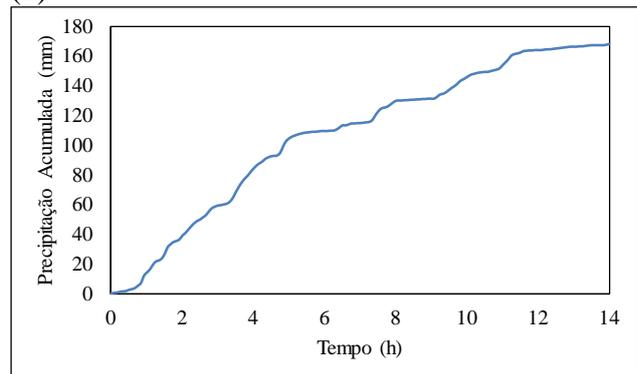


Figura 15 – (a) Hietograma do Evento 03; (b) Precipitação Acumulada do Evento 03

(a)



(b)



#### **4.2.5. CARACTERIZAÇÃO DO TELHADO VERDE**

Na modelagem foi simulado um telhado verde do tipo extensivo com uso de grama esmeralda, cujo nome científico é *zoysia japônica*. Seu uso é justificado pelo fato de ser uma planta de fácil acesso no mercado e adaptação ao clima local e é uma vegetação que cresce até cerca de 15 centímetros, conforme experimento desenvolvido por Araújo (2018). A declividade do telhado verde foi atribuída de acordo com a adotada para as edificações existentes de telha cerâmica.

Os parâmetros de substrato foram considerados com base em um solo franco-arenoso por possuir uma granulometria intermediária entre argilas e areias, e ser compatível com solos adequados ao cultivo (NUNES et al., 2017). Outro detalhe importante sobre a camada de solo, diz respeito a espessura, uma vez que foram simuladas três configurações distintas TV 01, TV 02, TV 03 com 5, 10 e 15 centímetros, respectivamente. Essas espessuras foram adotadas com base em experimentos elaborados por Louzada (2016), Nogueira (2018) e Araújo (2018).

Para a camada de drenagem adotou-se o uso de uma fina camada de cascalho com valores de referência apresentados no manual do SWMM (ROSSMAN; HUBER, 2016b).

É importante destacar que a pesquisa direciona-se ao estudo de eventos de chuvas intensas, logo parâmetros relacionados ao processo de evapotranspiração não desempenham grande relevância nos resultados. Na Tabela 6 encontram-se todos os atributos dados ao módulo LID.

Tabela 6 - Parâmetros do telhado verde

<b>Camada</b>	<b>Parâmetro</b>	
<b>Superfície</b>	Profundidade de armazenamento (mm)	100 <sup>1</sup>
	Fração vazia de volume de vegetação	0,1 <sup>2</sup>
	Coefficiente de rugosidade de Manning	0,3 <sup>3</sup>
	Declividade do telhado (%)	23
<b>Substrato</b>	Espessura (mm)	50-150
	Porosidade (fração de volume)	0,45 <sup>2</sup>
	Capacidade de campo (fração de volume)	0,19 <sup>2</sup>
	Ponto de murcha (fração de volume)	0,085 <sup>2</sup>
	Condutividade hidráulica (mm/h)	11 <sup>2</sup>
	Gradiente da curva de condutividade	10 <sup>2</sup>
	Sucção capilar (mm)	110 <sup>2</sup>
<b>Drenagem</b>	Espessura (mm)	25 <sup>1</sup>
	Fração de vazios	0,4 <sup>1</sup>
	Coefficiente de rugosidade de Manning	0,02 <sup>1</sup>

Fonte: <sup>1</sup>Rossmann; Huber (2016b); <sup>2</sup>Nunes et al. (2017). <sup>3</sup>Engman (1986 apud Rossmann; Huber, 2016a).

### 4.3.CENÁRIOS

Dentre as 993 sub-bacias levantadas inicialmente na discretização, identificou-se as potenciais áreas a serem ocupadas por telhados verdes, ou seja, áreas que atualmente são telhados convencionais de residências ou edifícios comerciais. É uma alta estimativa do potencial de coberturas verdes reais, uma vez que pressupõe que todos os edifícios selecionados tem suporte técnico para implementação de telhados verdes.

Após a identificação de 302 telhados, diferentes cenários de taxas de utilização de foram aplicados para quatro padrões de ocupação, nos quais 25%, 50%, 75% e 100% das unidades se tornariam telhados verdes. Além destes, um cenário correspondente à situação atual (chamado “Situação Real”), sem qualquer infraestrutura de telhado verde, foi utilizada para fazer uma análise comparativa com os demais.

De posse dos dados de entrada necessários ao modelo, pode-se estabelecer os diferentes cenários de estudo (Figura 16):

Figura 16 - Cenários de ocupação

Situação Real	Ocupação 25% TV	Ocupação 50% TV	Ocupação 75% TV	Ocupação 100% TV
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Evento 01</li> <li>• Evento 02</li> <li>• Evento 03</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Evento 01</li> <li>• Evento 02</li> <li>• Evento 03</li> <li>• TV 01</li> <li>• TV 02</li> <li>• TV 03</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Evento 01</li> <li>• Evento 02</li> <li>• Evento 03</li> <li>• TV 01</li> <li>• TV 02</li> <li>• TV 03</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Evento 01</li> <li>• Evento 02</li> <li>• Evento 03</li> <li>• TV 01</li> <li>• TV 02</li> <li>• TV 03</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Evento 01</li> <li>• Evento 02</li> <li>• Evento 03</li> <li>• TV 01</li> <li>• TV 02</li> <li>• TV 03</li> </ul>

Para os cenários propostos foram realizadas 39 simulações, nas quais foram consideradas todas as possíveis combinações de evento de chuva, tipo e ocupação de telhados verdes na área de estudo. Ainda para aprofundar a análise dos resultados, foi escolhido um lote para estudar o desempenho hidrológico no módulo de telhado verde.

O módulo de telhado verde é utilizado para calcular o escoamento para essas superfícies específicas. Atuando em paralelo, no cálculo das contribuições provenientes das sub-bacias de outros tipos de superfícies, para que ao final o SWMM forneça a resposta total da bacia. Logo, pode-se analisar o desempenho hidrológico da aplicação distribuída dos telhados verdes ao extrair informações de redução e retardo na vazão de pico e diminuição nos volumes escoados.

## **5. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

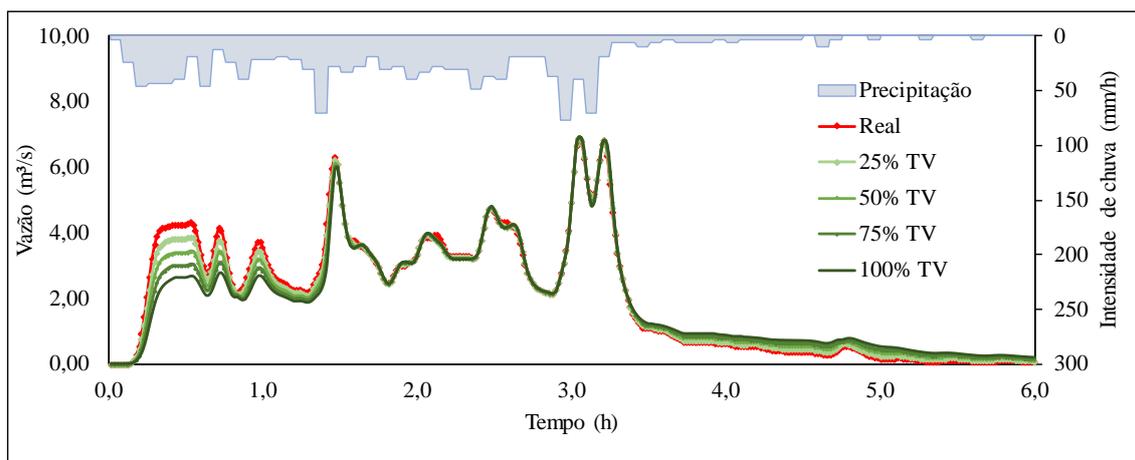
A análise dos resultados foi dividida à nível de lote (sub-bacia) e exutório, para que se tenha conhecimento do funcionamento do telhado verde e da sua contribuição à nível de bacia de drenagem.

### **5.1.EVENTO 01**

A Figura 17 mostra que para a configuração do TV01 foi verificada uma diminuição na vazão do pico aos 90 minutos do evento, sendo de 1,80% para 25% de ocupação, variando em 3,62%, 5,15% e 6,77% para 50%, 75% e 100% de ocupação. Logo em seguida, após um volume de água precipitado de 48,154 mm, anula-se a capacidade de retenção do telhado verde, visto que não há mais amortecimento na vazão para os diferentes cenários.

Também é importante observar que no pico das 3h e 4 minutos pode-se verificar um aumento na vazão inicialmente de 0,03% para o cenário de 25% TV, atingido 0,63% para a condição de 100% de ocupação de telhados verdes. Isso se deve, possivelmente, ao acúmulo de água nas camadas do telhado verde nos primeiros instantes de chuva, que ao se somarem com o volume precipitado quando não há mais capacidade de amortecimento pelo telhado, seja pela saturação do solo ou diminuição na capacidade de armazenamento da superfície, aconteça uma ampliação na vazão de saída naquele instante.

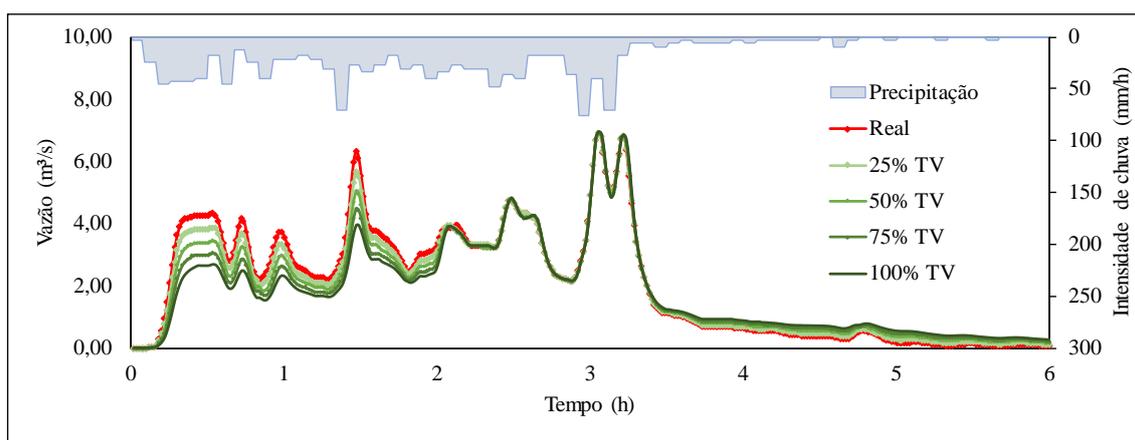
Figura 17 - Hidrograma de entrada na Lagoa do Mirassol para TV01 - EV01



Para o TV02 (Figura 18), como esperado, houve uma maior diminuição da vazão de pico que passou a ser de 10,45% para 25% de ocupação de TV na bacia, atingindo até uma descarga 38% menor em um cenário de total implementação. Outra informação relevante é que o volume total precipitado até o momento que o TV perde a capacidade de amortecimento chegou a 81,026mm em 2h e 3min de precipitação, ou seja, 40% a mais que o TV01.

No segundo pico (3h e 4 min) é mantido o mesmo padrão de aumento de vazão, com apenas uma diminuição máxima de 0,11% em relação ao cenário anterior, sendo justificado pelo mesmo motivo.

Figura 18 - Hidrograma de entrada na Lagoa do Mirassol para TV02 - EV01

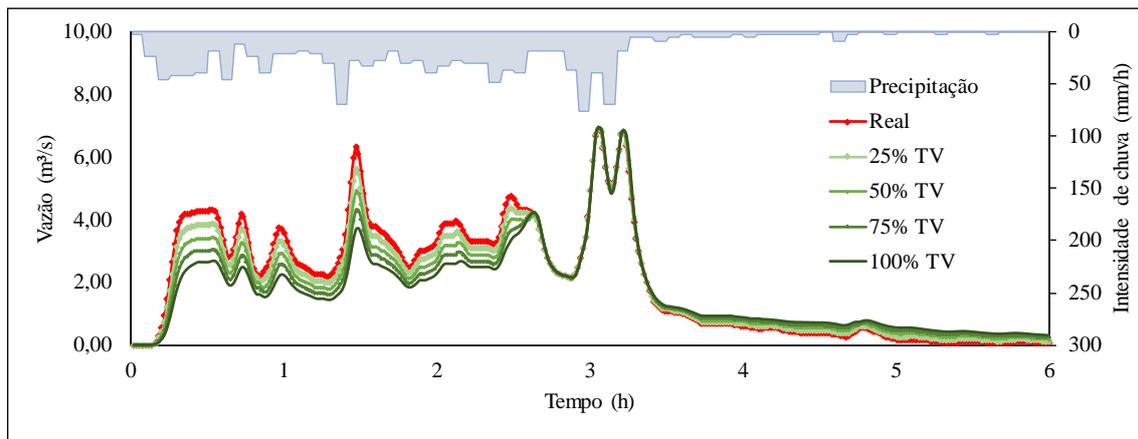


Para o TV03 (Figura 19), a diminuição na vazão de pico, após os primeiros 90 minutos de chuva atinge uma taxa de até 41,82%. E assim como nos dois cenários anteriores, o retardo na vazão de saída, compensa-se a partir das 3h de precipitação. A

capacidade de retenção nessa configuração de TV pouco se diferencia do cenário anterior, armazenando os primeiros 87,884 mm de chuva.

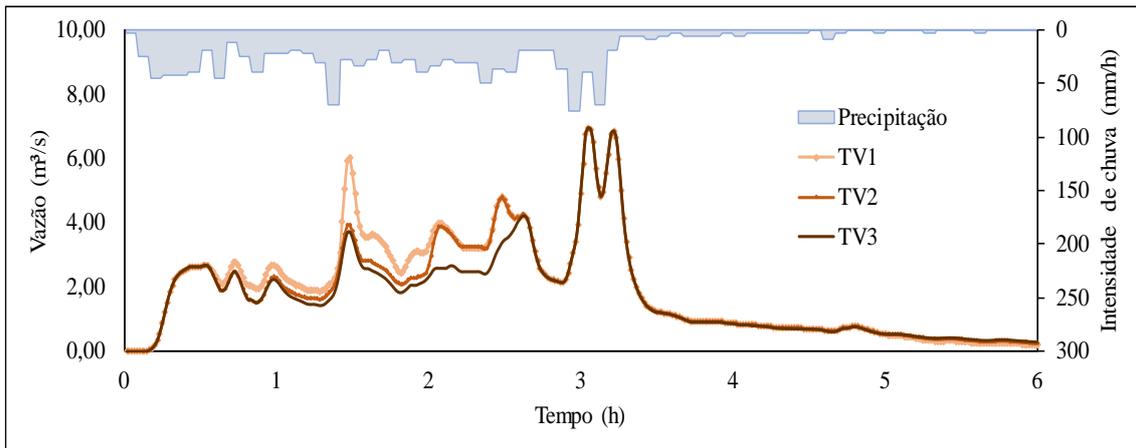
Aproximadamente após 4h de evento, nota-se o mesmo acontecimento nas três situações: a vazão é ampliada conforme aumento da taxa de aplicação de TV. Um fenômeno comum quando se faz uso de dispositivos de controle na fonte, que muito se assemelha ao caso dos microrreservatórios de retenção.

Figura 19 - Hidrograma de entrada na Lagoa do Mirassol para TV03 - EV01



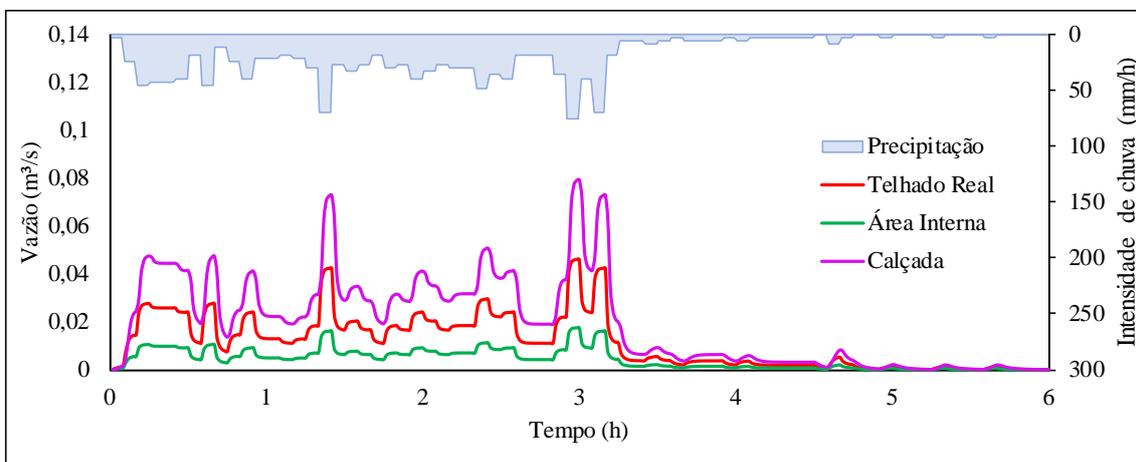
Na Figura 20 foram isolados os hidrogramas das três configurações de telhados verdes para o cenário de 100% de ocupação, com o intuito de analisar o aumento da eficiência quando se aumenta a camada de substrato. Para este evento, nota-se com clareza, que para uma configuração de TV com 10 cm de substrato, o desempenho da LID durante o primeiro pico do hidrograma já atinge a maior eficiência possível. Logo o aumento para um substrato de 15 cm, não demonstra eficiência nesse caso, visto que o desempenho é semelhante para o referido instante e para as maiores vazões registradas após 3h de evento.

Figura 20 - Hidrograma de entrada na Lagoa do Mirassol para TVs - EV01



Para um melhor entendimento e interpretação dos resultados, analisou-se o comportamento do telhado verde isoladamente. Para isso, foi escolhido um lote padrão que representasse os demais e foram obtidos os hidrogramas de saída de todas as sub-bacias que o compõem. A Figura 21 apresenta o comportamento do escoamento para a situação real com telhado convencional, no qual o hidrograma da calçada é a superposição das vazões de saída do telhado e da área restante pertencente ao lote.

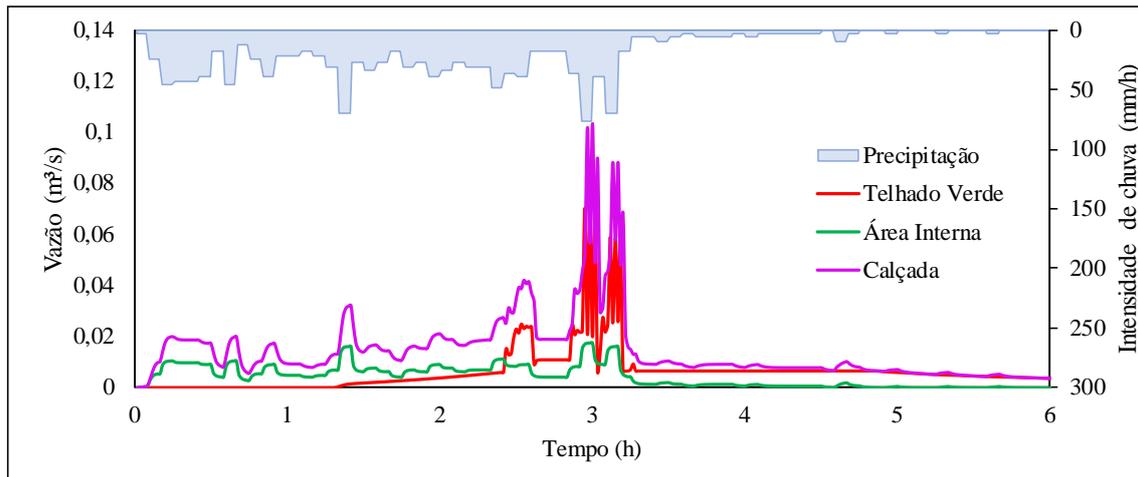
Figura 21 - Hidrograma de saída de lote para situação atual - EV01



Para representar o comportamento do telhado verde, optou-se pela configuração com 15 cm de substrato, TV03 (Figura 22). Os demais resultados para outras configurações encontram-se no Apêndice A. Ao comparar o gráfico anterior com a Figura 22, algumas informações podem ser extraídas. Percebe-se o período de 80 minutos no qual toda precipitação é armazenada no telhado verde, e em seguida,

próximo as 3h de evento, percebe-se uma vazão amplificada pelo telhado verde em comparação ao convencional. Isso ocorre devido um pico de precipitação em um instante no qual o solo já atingiu sua saturação e a lâmina de água na superfície já atingiu seu nível máximo e o excesso de picos pode representar uma instabilidade numérica do modelo.

Figura 22 - Hidrograma de saída de lote para TV03 - EV01



Posteriormente foi observado o comportamento das camadas que constituem o telhado verde. Dessa forma pode-se verificar todo o processo que a água percorre, após a precipitação, desde a infiltração pela camada superficial (vegetação), a percolação pela camada de solo até o escoamento de saída, sendo esse pela camada superficial e/ou drenante (Figura 23). Nota-se que a precipitação inicial, até os 80 minutos, estão no processo de infiltração, armazenados na camada superficial, até que se inicia o processo de percolação no solo e simultaneamente a saída pela camada drenante. É relevante afirmar que a saída pela drenagem é regulada pelo solo, atingindo uma descarga máxima quando ocorre a saturação do solo, ou seja, o teor de umidade atinge 0,45 (Figura 24). Simultaneamente quando o nível de água na vegetação (Figura 25) atinge o limite de armazenamento da camada, 100 mm, inicia-se o processo de transbordamento, ou seja, o escoamento pela superfície.

Figura 23 - Propagação de escoamento no TV03 - EV01

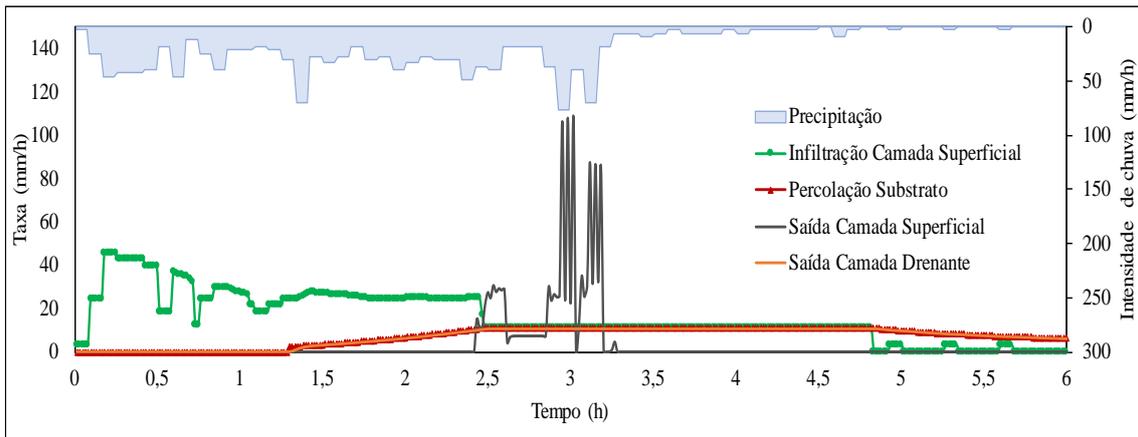


Figura 24 - Teor de umidade no TV03 - EV01

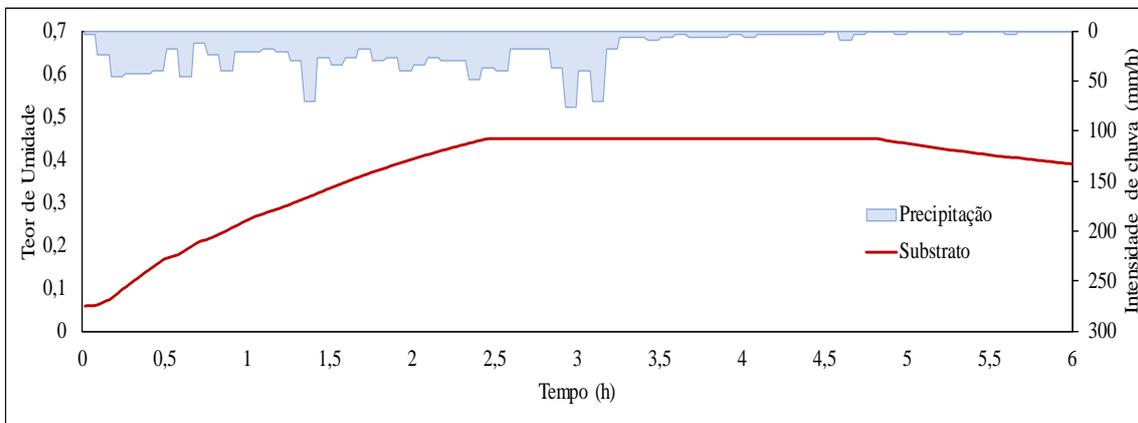
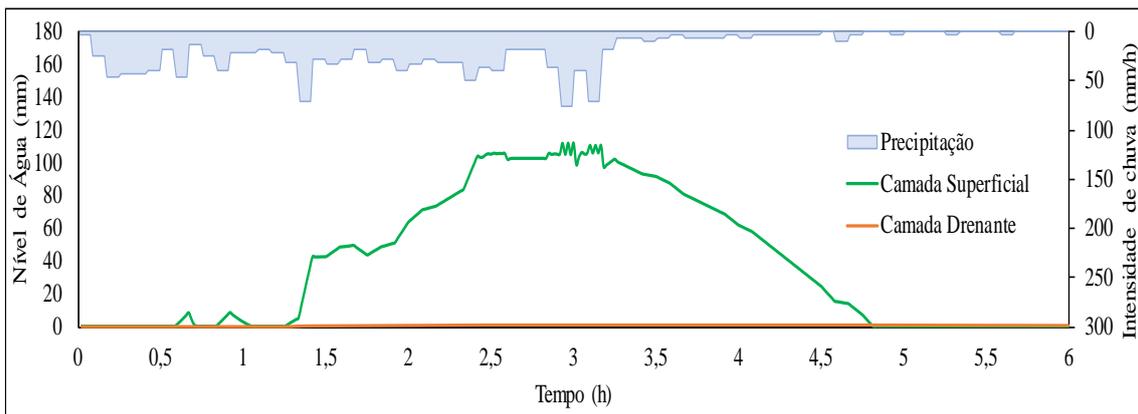


Figura 25 - Nível de água no TV03 - EV01

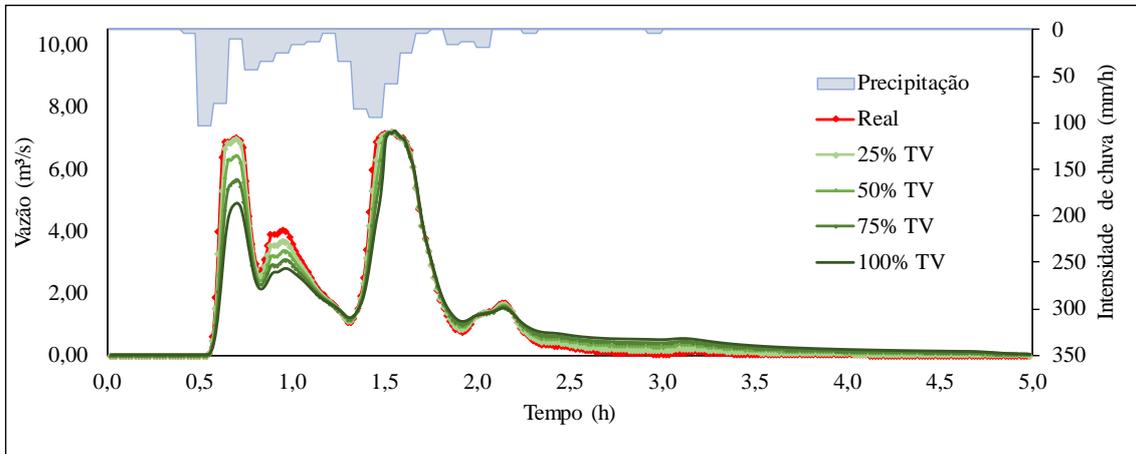


## 5.2.EVENTO 02

Ao analisar o comportamento do escoamento na Figura 26 para o evento 02, percebe-se que o telhado verde desempenha seu papel de retenção até os primeiros 94

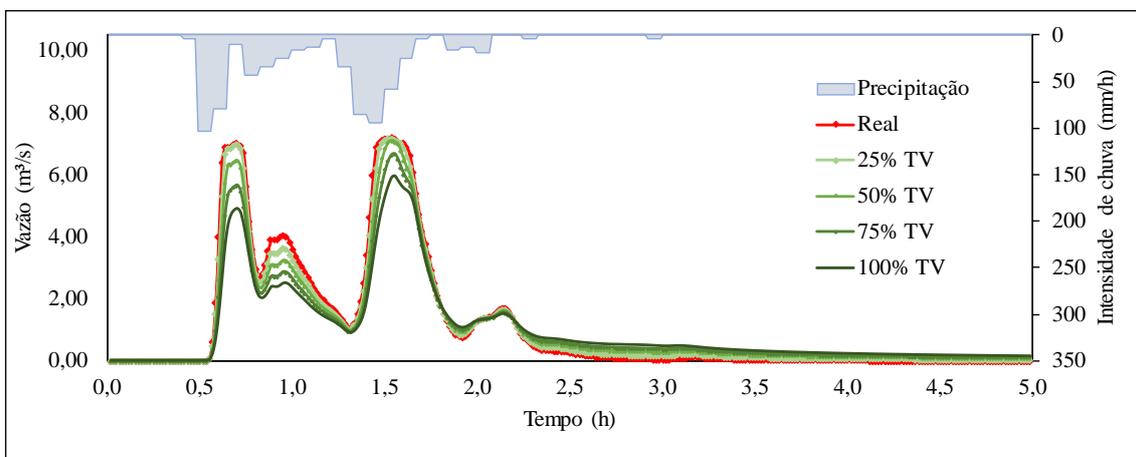
minutos de precipitação, acumulando um total de 51,826 mm. Para o primeiro pico (40 minutos) observou-se uma diminuição na vazão de até 30,45%, enquanto para o segundo (94 minutos) uma diminuição menor de até 0,83% na descarga.

Figura 26 - Hidrograma de entrada na Lagoa do Mirassol para TV01 - EV02



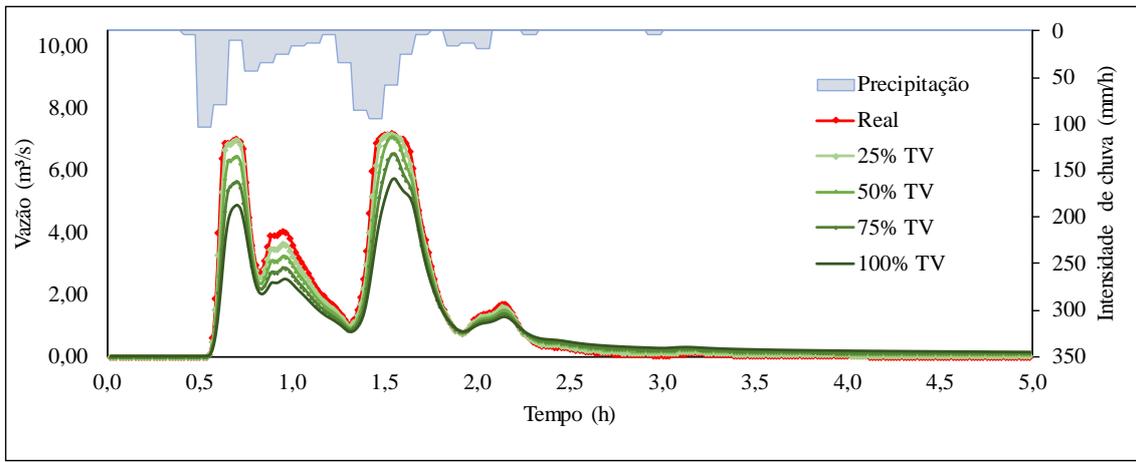
Na Figura 27 verifica-se que quando utilizados telhados verdes com a configuração 2 (10cm de substrato) percebe-se o ganho mais evidente no pico do hidrograma aos 94 minutos de evento, onde a diminuição do pico atinge a taxa de 18,26%, ou seja, 22 vezes menor que o TV01. Nos dois primeiros picos, percebe-se a mesma taxa de diminuição da obtida anteriormente para o TV1, mostrando que a contribuição máxima nesse intervalo de tempo pelo uso de telhados verdes, já foi obtida com a primeira configuração de 5 cm de substrato.

Figura 27 - Hidrograma de entrada na Lagoa do Mirassol para TV02 - EV02



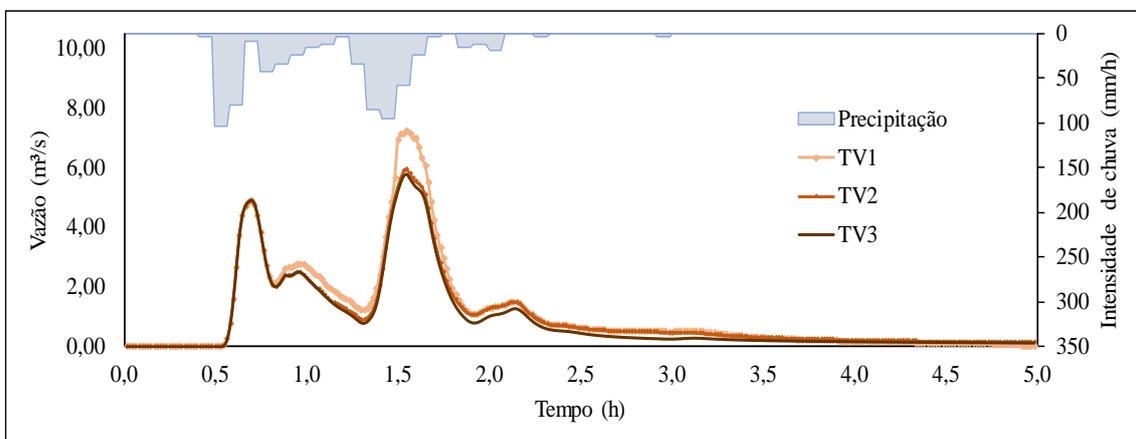
Como esperado, o foco na análise da Figura 28 concentra-se no 3º pico do hidrograma e verifica-se um ganho muito pequeno em relação a situação anterior, menor que 3%, aos 94 minutos de evento chuvoso. Confirmando que para o evento em questão, o TV02 (10 cm de substrato) fornece melhores resultados, uma vez que ao término do evento chuvoso, a contribuição máxima já havia sido obtida. Quantificando esse resultado, verifica-se um retardo de apenas 3 minutos em relação ao hidrograma anterior e um volume acumulado de apenas 1mm a mais.

Figura 28 - Hidrograma de entrada na Lagoa do Mirassol para TV03 - EV02



A Figura 29 confirma o que foi constatado, mostrando que os hidrogramas para utilizações de telhados verdes com 10 ou 15 cm de camada de substrato, se sobrepõem durante quase todo o evento chuvoso. Diferença que se nota apenas após o último pico aos 94 minutos, no qual a contribuição do TV já é irrelevante, visto que as vazões máximas já cessaram.

Figura 29 - Hidrograma de entrada na Lagoa do Mirassol para TVs - EV02



Ao comparar a Figura 30, na qual é apresentado o hidrograma do lote para a situação real, com a Figura 31, para a situação de implementação de telhado verde, percebe-se que a vazão de saída do TV foi nula em quase todo evento, apenas atingindo um pico de vazão após 90 minutos, sendo este 75% menor que o da situação atual. Também convém observar que embora exista a amortização de vazão realizada pelo telhado verde, o impacto final no hidrograma de saída dos lotes sempre será atenuado pela superposição dos hidrogramas de outras bacias que não são influenciadas pelo TV, como é o caso das áreas remanescentes do lote.

Figura 30 - Hidrograma de saída de lote para situação atual - EV02

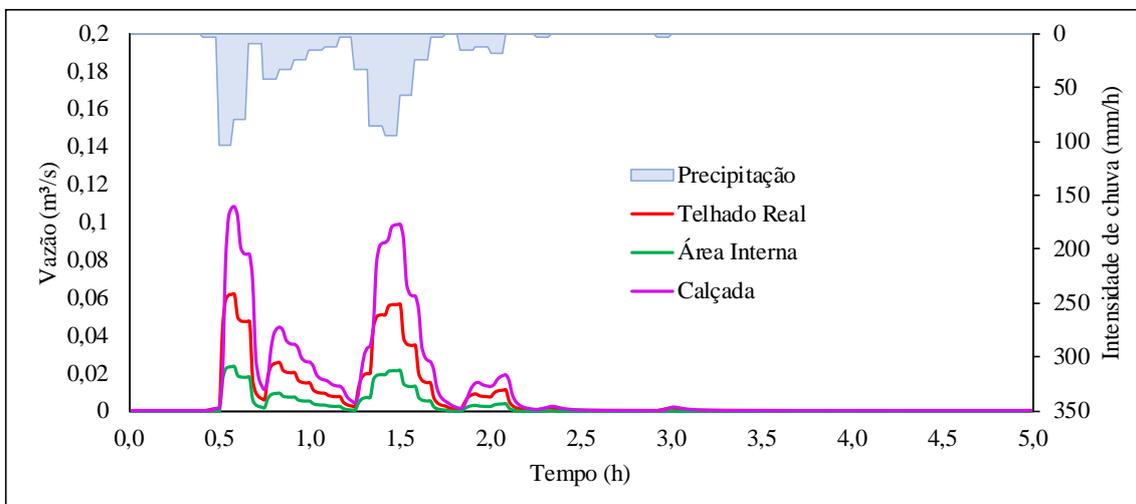
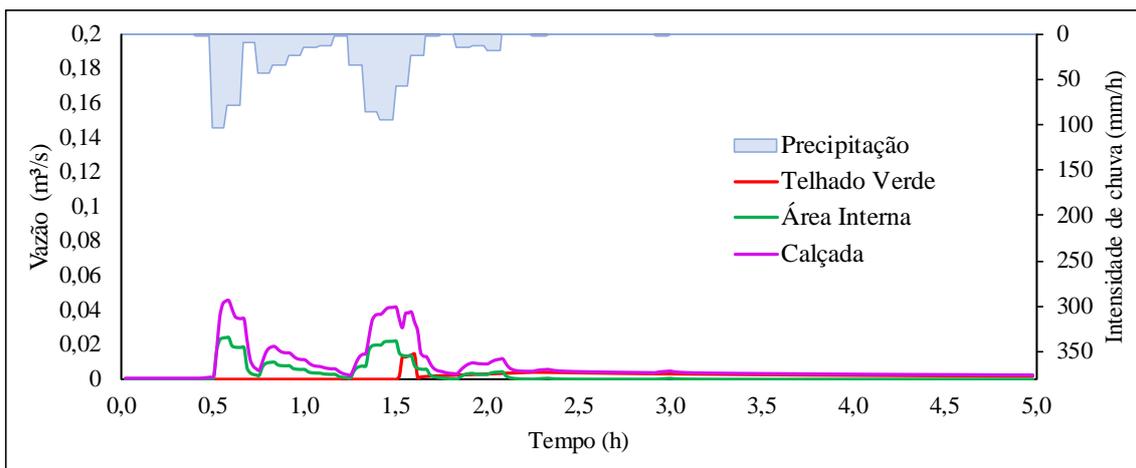


Figura 31 - Hidrograma de saída de lote para TV03 - EV02



Ao analisar a Figura 32 observa-se que o volume de água precipitado nos primeiros 90 minutos passou pelo processo de infiltração até o momento em que a precipitação se intensifica de modo que o volume de água na superfície (Figura 33)

aumenta e inicia o transbordamento, antes mesmo do solo atingir o nível de saturação (Figura 34). Com a diminuição da intensidade da chuva, inicia-se em seguida o processo de secagem do solo, possibilitando a infiltração e percolação do volume de chuva excedente.

Figura 32 - Propagação de escoamento no TV03 - EV02

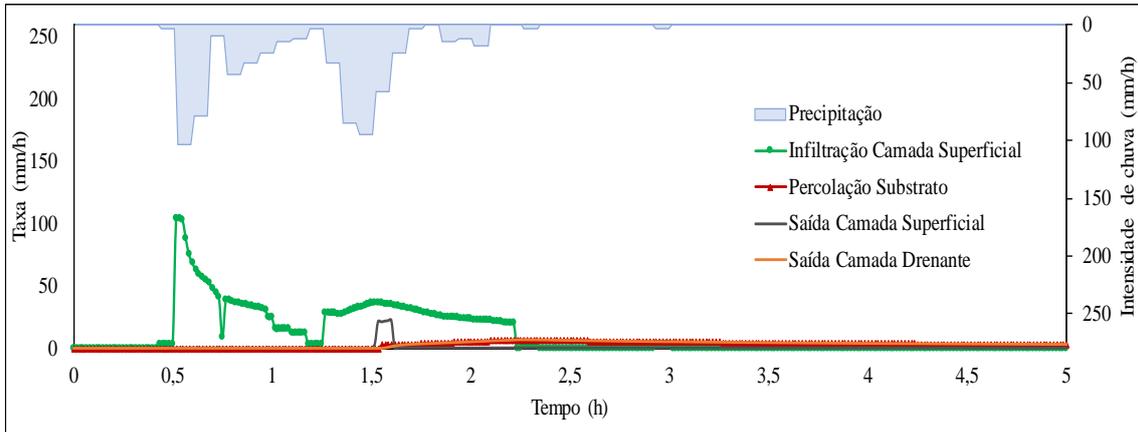


Figura 33 - Nível de água no TV03 - EV02

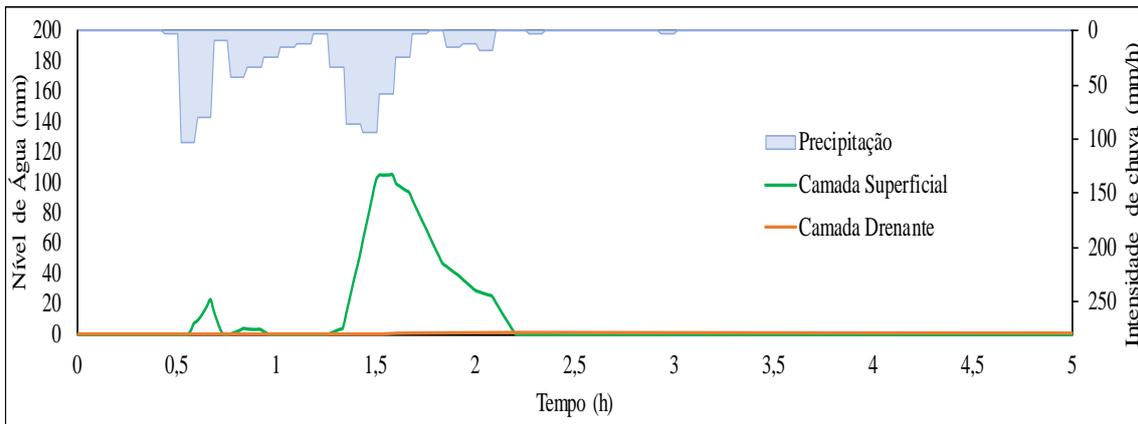
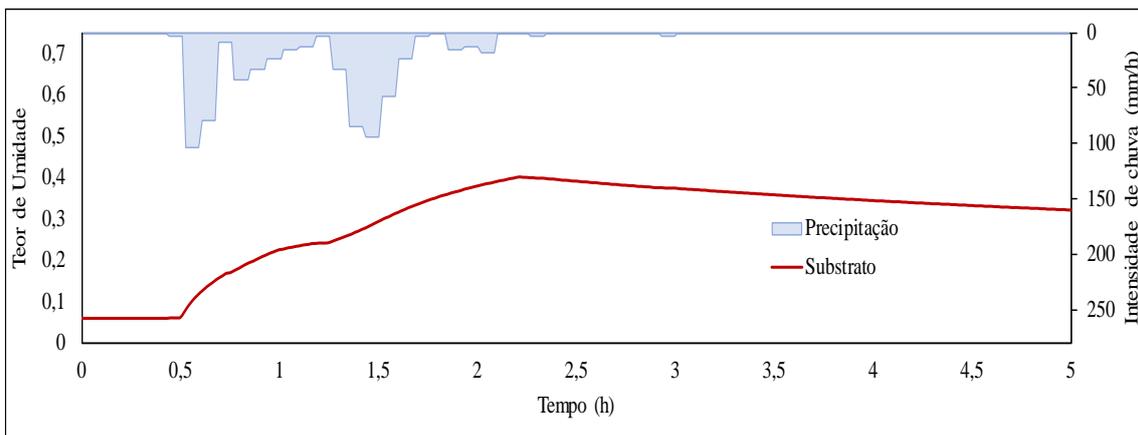


Figura 34 - Teor de umidade no TV03 - EV02

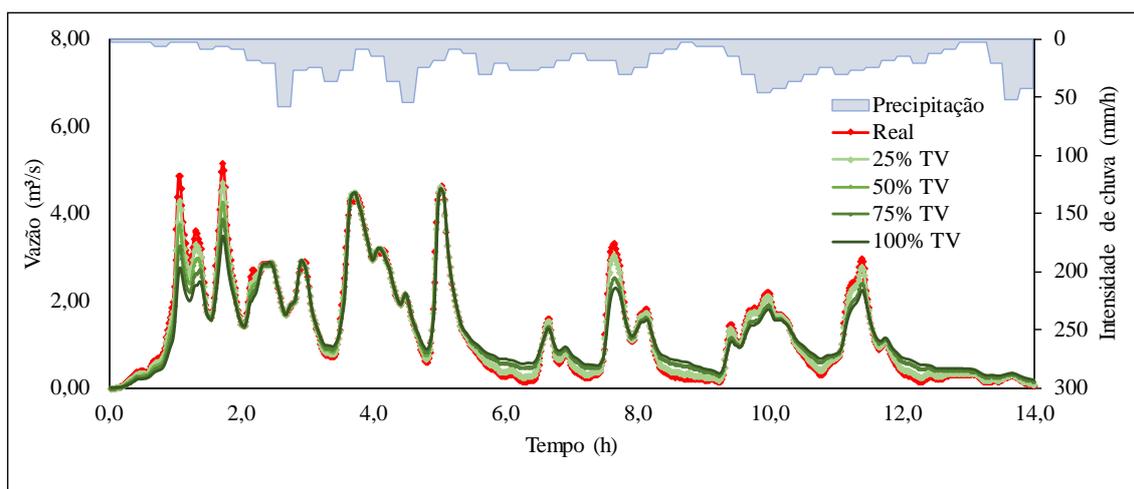


Os demais resultados obtidos para o evento 02, encontram-se no Apêndice B.

### 5.3.EVENTO 03

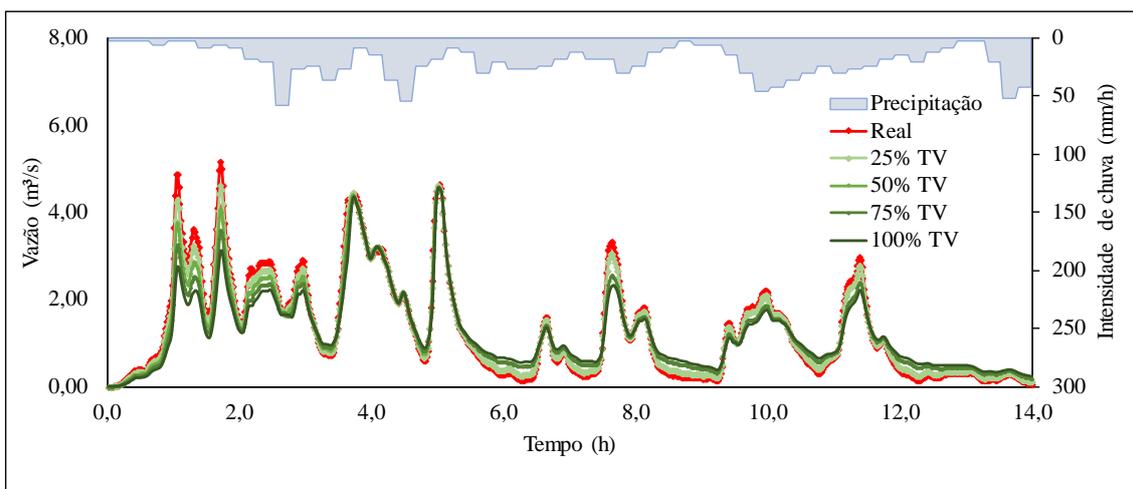
O Evento 03, caracteriza-se como um evento de maior duração, porém com menor intensidade em relação aos demais. A princípio já identifica-se a contribuição da utilização de telhados verdes nesse caso, pois em quase todos os picos do hidrograma percebe-se uma diminuição na vazão (Figura 35). No primeiro pico do hidrograma, que ocorre após 1 hora do início do evento, a diminuição na vazão variou de 11,79% a 43,61% para os cenários de 25% a 100% de ocupação de potenciais telhados verdes. Verifica-se que as 2h e 14 minutos, os hidrogramas se superpõem, instante em que os TV tornam-se ineficientes, se reestabelecendo após 3h e 15 min e atingindo diminuição de até 32,07% na vazão de pico as 7h e 30min do evento.

Figura 35 - Hidrograma de entrada na Lagoa do Mirassol para TV01 - EV03



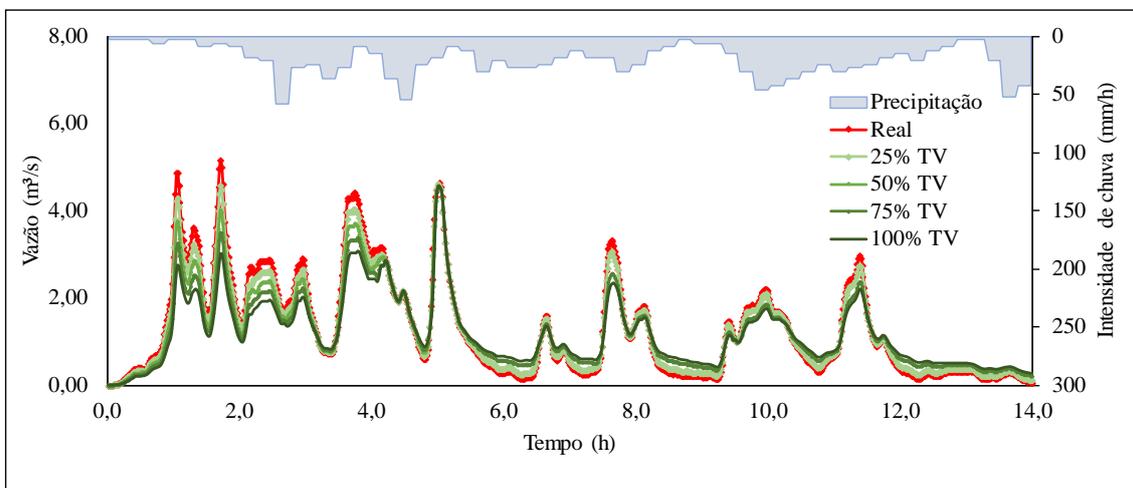
Para a segunda configuração de telhado verde (Figura 36), observa-se uma intensificação na diminuição da maior vazão de pico registrada para o evento no instante de 1h e 42 minutos. Essa diminuição alcançou uma taxa máxima de 39,73% em relação ao hidrograma real e variou de 1,9% a 7,11% quando comparada as vazões obtidas para a configuração do TV01.

Figura 36 - Hidrograma de entrada na Lagoa do Mirassol para TV02 - EV03



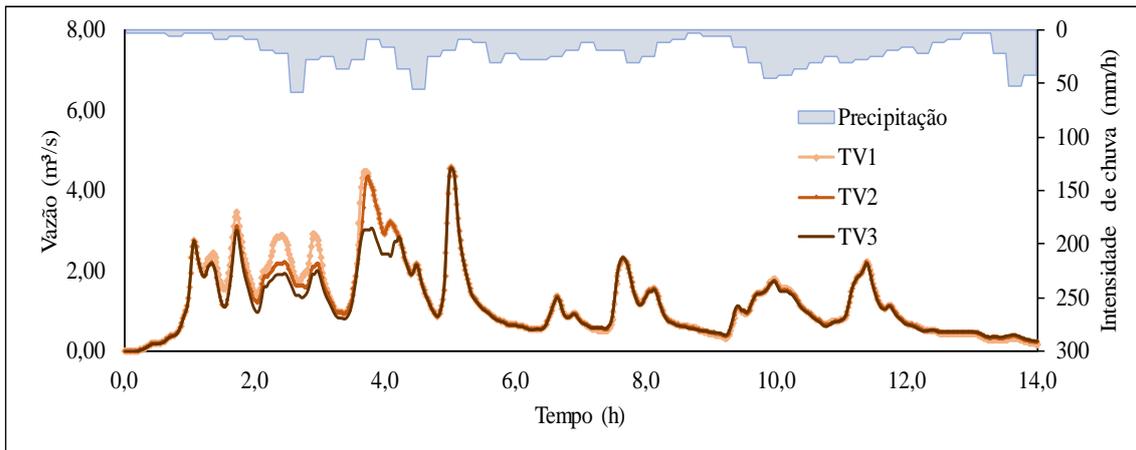
Ao analisar a Figura 37, é possível constatar uma atenuação na vazão de pico após 4 horas do início do evento de até 31,37% para o cenário de 100% de ocupação de TV. Também foi identificada um retorno do telhado verde a exercer contribuição no hidrograma 1h e 15 minutos após o instante que os hidrogramas se superpõem.

Figura 37 - Hidrograma de entrada na Lagoa do Mirassol para TV03 - EV03



Através da Figura 38 é possível identificar que é relevante o aumento na camada de substrato até 15 centímetros apenas nas 4 primeiras horas de evento. Visto que para um evento de maior duração e com vazões de pico espaçadas ao longo do mesmo, a camada de solo necessitaria apresentar uma maior espessura para que o telhado verde tivesse um bom desempenho ao longo de todo evento.

Figura 38 - Hidrograma de entrada na Lagoa do Mirassol para TVs - EV03



À nível de lote, ao obter os hidrogramas de saída para a situação real (Figura 39) e hipotética com implementação de telhados verdes (Figura 40) foi verificado que embora haja uma atenuação relevante nos primeiros picos do hidrograma devido a capacidade de amortecimento de vazão do TV, ocorre também um acréscimo de vazão quando esta capacidade se esgota.

Figura 39 - Hidrograma de saída de lote para situação atual - EV03

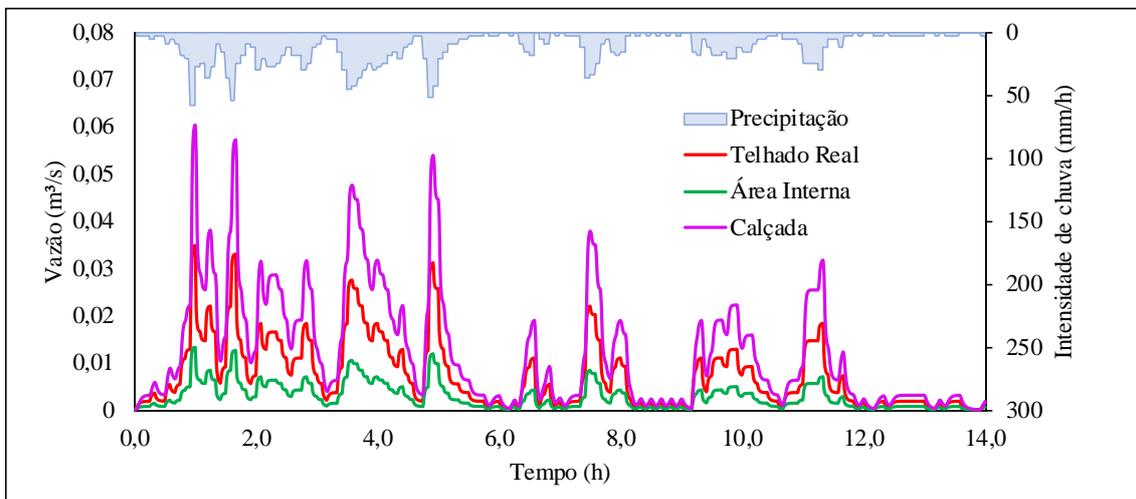
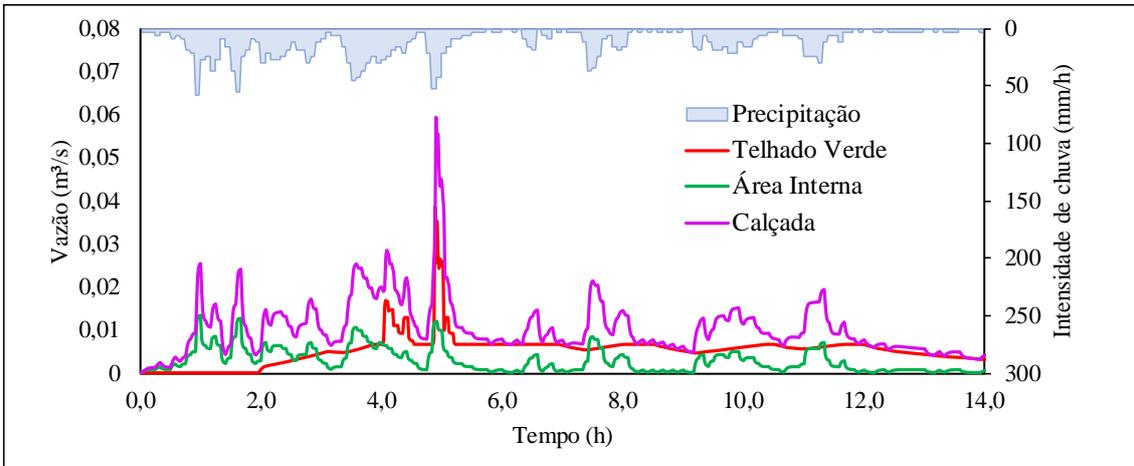


Figura 40 - Hidrograma de saída de lote para TV03 - EV03



Assim como nos eventos anteriores, observa-se pela Figura 41 que todo volume precipitado inicialmente é infiltrado pela camada superficial e que ao longo da chuva, a água vai preenchendo os vazios no solo, até que este atinja seu teor de umidade para saturação (Figura 42). Nesse momento, o nível de água na superfície (Figura 43) se eleva, até o momento em que se inicia o transbordamento pela superfície.

Figura 41 - Propagação de escoamento no TV03 - EV03

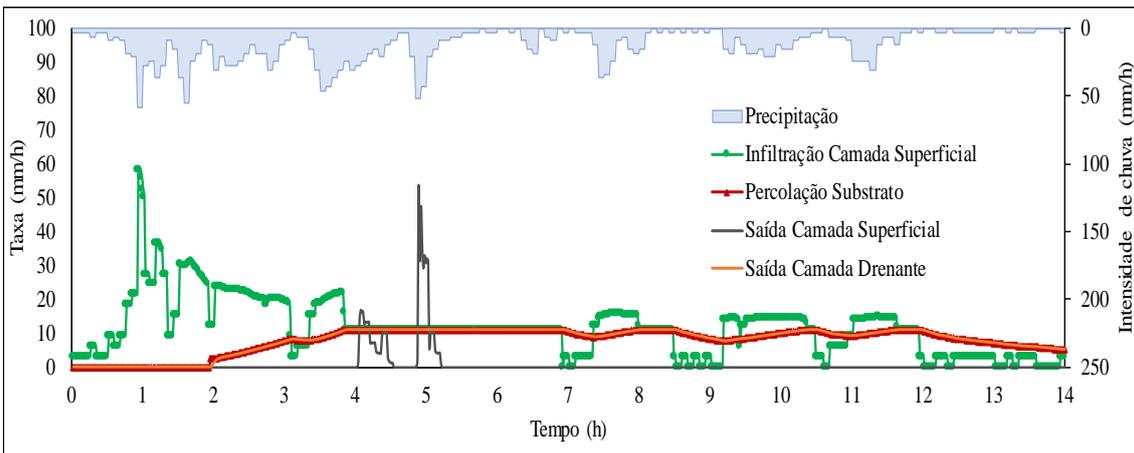


Figura 42 - Teor de umidade para TV03 - EV03

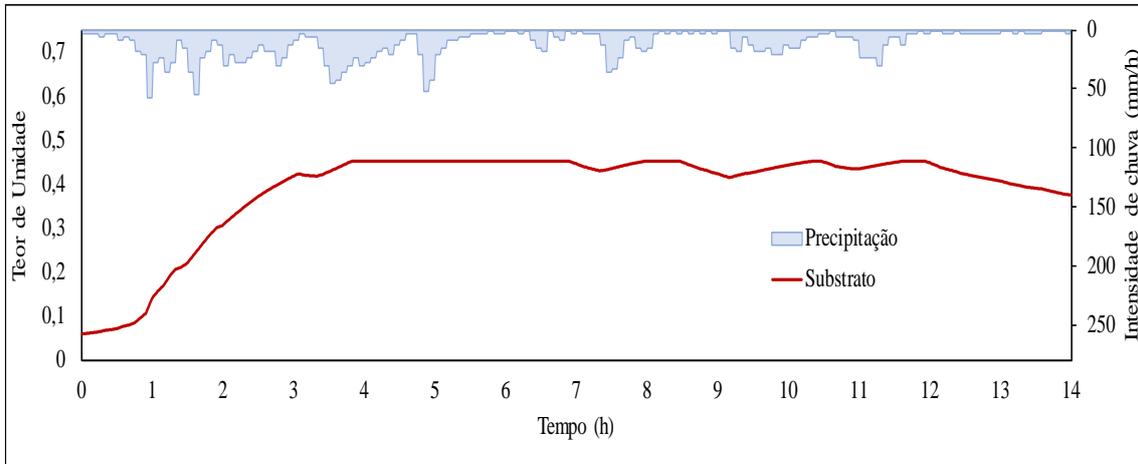
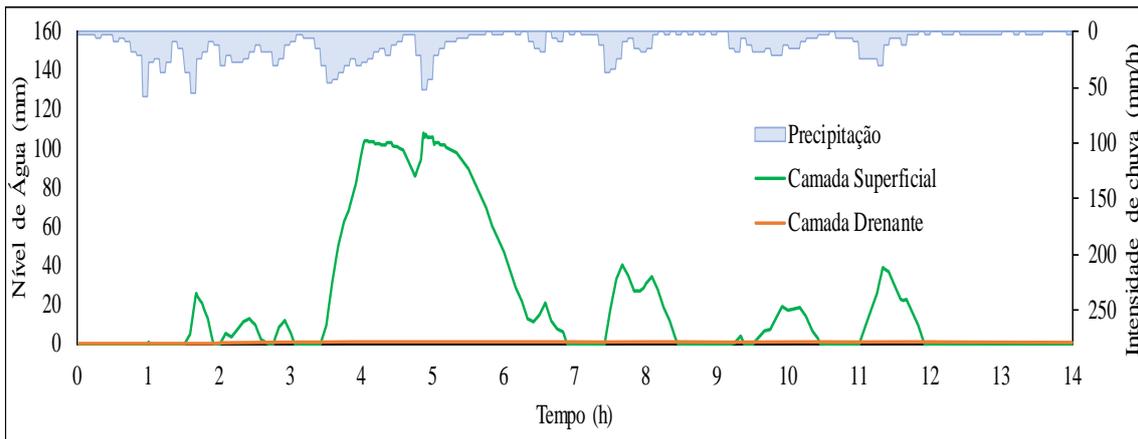


Figura 43 - Nível de água para TV03 - EV03



Os demais resultados obtidos para o evento 03, encontram-se no Apêndice C.

## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

- As simulações para diferentes eventos de precipitação mostraram que para chuvas de maior duração, a contribuição dos telhados verdes tem maior relevância quando as vazões atingem picos máximos próximos ao início do evento.
- Chuvas que se iniciam com menor intensidade, a tendência é que os telhados verdes contribuam de forma negativa para os picos próximos ao fim do evento, aumentando-os em até 0,62%.
- Para todas as simulações, verificou-se que um telhado verde com substrato de 5cm garante resultados bastante inferiores aos demais, atingindo um valor máximo de redução na vazão de pico de apenas 11,79%.
- Telhados verdes com substratos de 10 cm e 15 cm de espessura contribuíram no amortecimento de vazões de pico em até 43,61%. Isto ocorre para picos de eventos intensos e de menor duração, no quais ambos contribuem de maneira semelhante. Já para eventos de maior duração, as configurações simuladas não foram suficientes para atenuar todas as vazões de pico.
- Quando comparado a situação real com telhados convencionais, foram encontrados amortecimentos máximos de vazão de pico de 11,79%, 22,95%, 33,41% e 43,61% para cenários com 25%, 50%, 75% e 100% de áreas de cobertas ocupadas por telhados verdes, respectivamente.
- Não foi verificado retardo nas vazões de pico após simulação com telhados verdes a nível de lote e bacia de drenagem. Isto se justifica devido a superposição dos hidrogramas das sub-bacias.
- A vazão de saída nos telhados verdes pode acontecer de duas maneiras: por escoamento superficial e pela camada drenante. Constatou-se que a saída pela camada de vegetação pode ocorrer quando há saturação do substrato ou quando há uma maior intensidade na chuva, antes mesmo do solo atingir a saturação.

Para trabalhos futuros:

- Utilizar configurações de substratos com espessura igual ou maior a 15 cm, visto que espessuras inferiores dificultam o crescimento de algumas vegetações e garantem pouca eficiência na retenção de água;
- Realizar simulações para chuvas de projeto, por meio do estudo de tempo de concentração, e comparar com simulações para eventos de chuvas reais;
- Calibrar os parâmetros de telhado verde através da construção de um módulo experimental.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, E. E. B. de. **Avaliação da capacidade de retenção de água de chuva em telhados verdes com aplicação de geossintéticos**. 2018. 80 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

BERNDTSSON, J. C. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: a review. **Ecological Engineering**, v. 36, p. 351-360, 2010.

BIANCHINI, F.; HEWAGE, K. How “green” are the green roofs? Lifecycle analysis of green roof materials. **Building and Environment**, 2012, v. 48, p. 57-65.

BRASIL, Presidência da República – Secretaria de Assuntos Estratégicos. **Carta de Acordo nº 25759/2014. Adaptação às Mudanças do Clima: Medidas de Adaptação Infraestrutura Urbana**. Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. Brasília: 2015.

BUCKLAND-NICKS, M.; HEIM, A.; LUNDHOLM, J. Spatial environmental heterogeneity affects plant growth and thermal performance on a green roof. **Science of the Total Environment**, 2016, v. 553, p. 20-31.

BURSZTA-ADAMIAK, E.; MROWIEC, M. Modelling of green roofs hydrologic performance using EPA’s SWMM. **Water Science & Technology**. 2013, v. 68, p. 36-42.

CANHOLI, A. P. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. São Paulo: Oficina de textos. 2 ed., 2014.

CARPENTER, C. M. G. et al. Water quantity and quality response of a green roof to storm events: Experimental and monitoring observations. **Environmental Pollution**, v. 30, p. 1-9, 2016.

CATUZZO, H. **Telhado Verde: impacto positivo na temperatura e umidade do ar. O caso da cidade de São Paulo**. 2013. 206 p. Tese (Doutorado) – Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

CIPOLLA, S. S.; MAGLIONICO, M.; STOJKOV, I. A long-term hydrological modelling of an extensive green roof by means of SWMM. **Ecol. Eng.**, v. 95, p. 876-887, 2016.

EKSI, M. et al. Effect of substrate compost percentage on green roof vegetable production. **Urban Forestry & Urban Greening**, 2015, v. 14, p. 315-322.

FASSMAN-BECK, E. et al. 4 Living roofs in 3 locations: Does configuration affect runoff mitigation?. **Journal of Hydrology**, v. 490, p. 11-20, 2013.

GREEN ROOF TECHNOLOGY. In: GREEN ROOF TECHNOLOGY FORM AND FUNCTION. **Picture Portfolio**. 2019. Disponível em: <<http://www.greenrooftechnology.com/project-portfolio>>. Acesso em: 11 abril 2019.

HAKIMDAVAR, R. Scale dynamics of extensive green roofs: Quantifying the effect of drainage area and rainfall characteristics on observed and modeled green roof hydrologic performance. **Ecological Engineering**, 2014, v. 73, p. 494-508.

JIM, C. Y. Heat-sink effect and indoor warming imposed by tropical extensive green roof. **Ecological Engineering**, 2014, v. 62, p. 1-12.

JOHANNESSEN, B. G. et al. The transferability of SWMM model parameters between green roofs with similar build-up. **Journal of Hydrology**, v. 569, p. 816-828, 2019.

JOHANNESSEN, B. G.; MUTHANNA, T. M.; BRASKERUD, B. C. Detention and retention behavior of four extensive green roofs in three Nordic climate zones. **Water**, v. 10, n. 671, 2018.

KLEIN, P. M.; COFFMAN, R. Establishment and performance of an experimental green roof under extreme climatic conditions. **Science of the Total Environment**, 2015, v. 512-513, p. 82-93.

LOUZADA, T. de S. **Emprego de geossintéticos na construção de telhados verdes: análise da capacidade de retenção de água**. 2016. 113 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

LUCKETT, K. **Green Roof Construction and Maintenance**. 2009. GreenSource Book, International Code Council. The McGraw-Hill Companies. eBook. ISBN: 978-0-07-160880-0. MHID: 0-07-160880-X.

MALCOLM, E. G. et al. Measurements of nutrients and mercury in green roof and gravel roof runoff. **Ecological Engineering**, 2014, v. 73, p. 705-712.

MASSERONI, D.; CISLAGHI, A. Green roof benefits for reducing flood risk at the catchment scale. **Environ. Earth Sci.**, 75: 579, 2016.

MINKE, G. **Techos verdes: Planificación, ejecución, consejos prácticos**. 2005. 86 p. Fin de Siglo. ISBN: 9974-49-323-4.

MOLINEUX, C. J. et al. Using recycled aggregates in green roof substrates for plant diversity. **Ecological Engineering**, 2015, v. 82, p. 596-604.

MOLITERNO, A. **Caderno de Projetos de Telhados em Estruturas de Madeira**. 2010. 284 p. 4 ed. ISBN: 9788521205548.

NATAL, Prefeitura Municipal. **Plano Diretor de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais da cidade do Natal - Manual de drenagem**. 2009, 256 p., Natal: 2009.

NATAL, Prefeitura Municipal. **Plano Municipal de Saneamento Básico do município de Natal/RN – Produto 02- Diagnóstico da situação do Saneamento**. 2014, 319 p., Natal: 2014.

NOGUEIRA, J. D. de L. **Qualidade da água de telhados verdes na cidade de Natal/RN: análise de pH, condutividade elétrica e turbidez**. 2018. 75 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de pós-graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

NUNES et al. Avaliação do papel dos telhados verdes no desenho e desenvolvimento urbano de baixo impacto ambiental e no controle de enchentes na cidade do Rio de Janeiro. **Labor & Engenho**. v. 11, n. 3, p. 374-393, 2017.

PALLA, A.; GNECCO, I. Hydrologic modeling of Low Impact Development systems at the urban catchment scale. **Journal of Hydrology**, v. 528, p. 361-368, 2015.

PALLA, A. et al. Compared performance of a conceptual and mechanistic hydrologic models of a green roof. **Hydrol. Process**. 26, 73-84, 2011.

PENG, Z. et al. Effects of low-impact development on urban rainfall runoff under diferente rainfall characteristics. **Pol. J. Environ. Stud**. v. 28, n. 2, p. 771-783, 2019.

PENG, Z.; STOVIN, V. Independent Validation of the SWMM Green Roof Module. **J. Hydrol. Eng**, 22(9), 2017.

PINTO, C. I. da R. C. **Introdução às coberturas ajardinadas**. 2014. 62 p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, 2014.

QIN, H.; LI, Z.; FU, G. The effects of low impact development on urban flooding under different rainfall characteristics. **Journal of Environmental Management**, v. 129, p. 577-585, 2013.

RADINJA, M. et al. Assessing stormwater control measures using modelling and a multi-criteria approach. **Journal of Environmental Management**, v. 243, p. 257-268, 2019.

RECIFE, Prefeitura Municipal. Lei Municipal 18.112/2015, de 12 de janeiro de 2015. **Poder Executivo**, Recife, 2015.

RENTERGHEM, T. V.; BOTTELDOOREN, D. Influence of rainfall on the noise shielding by a green roof. **Building and Environment**, 2014, v. 82, p. 1-8.

RIO DE JANEIRO, Governo do Estado. Lei Estadual 6349/12, de 30 de novembro de 2012. **Assembleia Legislativa**, Rio de Janeiro, 2012.

RIO GRANDE DO NORTE, Governo do Estado. **Perfil do seu município**. Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos – SEMARH; Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente do Rio Grande do Norte – IDEMA. v. 10, p. 1-26, Natal: 2008.

ROSSMAN, L. A.; HUBER, W. C. **Storm Water Management Model – Reference Manual. Vol. I – Hydrology**. U.S. EPA. 231 p, Cincinnati, OH: 2016a.

ROSSMAN, L. A.; HUBER, W. C. **Storm Water Management Model – Reference Manual. Vol. III – Water Quality**. U.S. EPA. 159 p, Cincinnati, OH: 2016b.

SAADATIAN, O. et al. A review of energy aspects of green roofs. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2013, v. 23, p. 155-168.

SAVI, A. C. **Telhados verdes: Uma análise da influência das espécies vegetais no seu desempenho na cidade de Curitiba**. 2015. 200 p. Dissertação (Mestrado) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

STOVIN, V.; POE, S.; BERRETTA C. A modelling study of long term green roof retention performance. **Journal of Environmental Management**, v. 131, p. 206-215, 2013.

SUN, T.; BOU-ZEID, E.; NI, G. To irrigate or not to irrigate: Analysis of green roof performance via a vertically-resolved hygrothermal model. **Building and Environment**, 2014, v. 73, p. 127-137.

TOLDERLUND, L. **Design Guidelines and Maintenance Manual for Green Roofs in the Semi-Arid and Arid West**. University of Colorado Denver, 2010. 59 p.

TUCCI, C. E. M. (Organizador). **Hidrologia: Ciência e aplicação**. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH. Coleção ABRH de Recursos Hídricos. 4 ed., v. 4, 943 p, 2015.

VERSINI, P. A. et al. Assessment of the hydrological impacts of green roof: from building scale to basin scale. **Journal of Hydrology**, 2015, v. 524, p. 562-575.

VIJAYARAGHAVAN, K.; RAJA, F. D. Design and development of green roof substrate to improve runoff water quality: Plant growth experiments and adsorption. **Water Research**, 2014, v. 63, p. 94-101.

WEILER, S. K.; SCHOLZ-BARTH, K. **Green Roof Systems – A Guide to the Planning, Design and Construction of Landscapes over Structure**. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2009. 322 p. ISBN: 978-0-471-67495-5.

WONG; G. K. L.; JIM, C. Y. Quantitative hydrologic performance of extensive green roof under humid-tropical rainfall regime. **Ecological Engineering**, 2014, v. 70, p. 366-378.

YANG, J.; WANG, Z. Physical parameterization and sensitivity of urban hydrological models: Application to green roof systems. **Building and Environment**, 2014, v. 75, p. 250-263.

## APÊNDICE A

### ANÁLISE DOS TELHADOS VERDES PARA EVENTO 01

Figura 44 - Hidrograma de saída de lote para TV01 - EV01

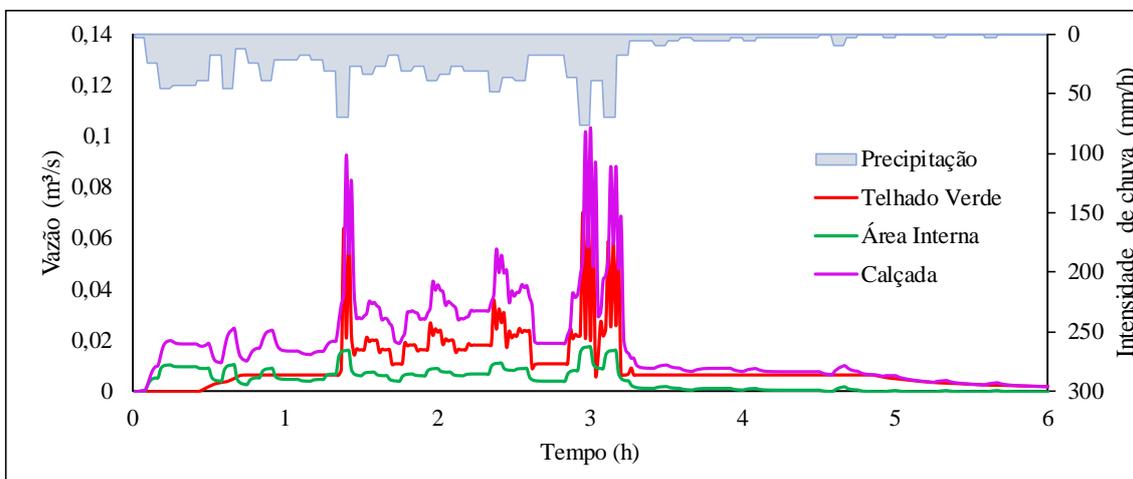


Figura 45 - Propagação do escoamento no TV01 - EV01

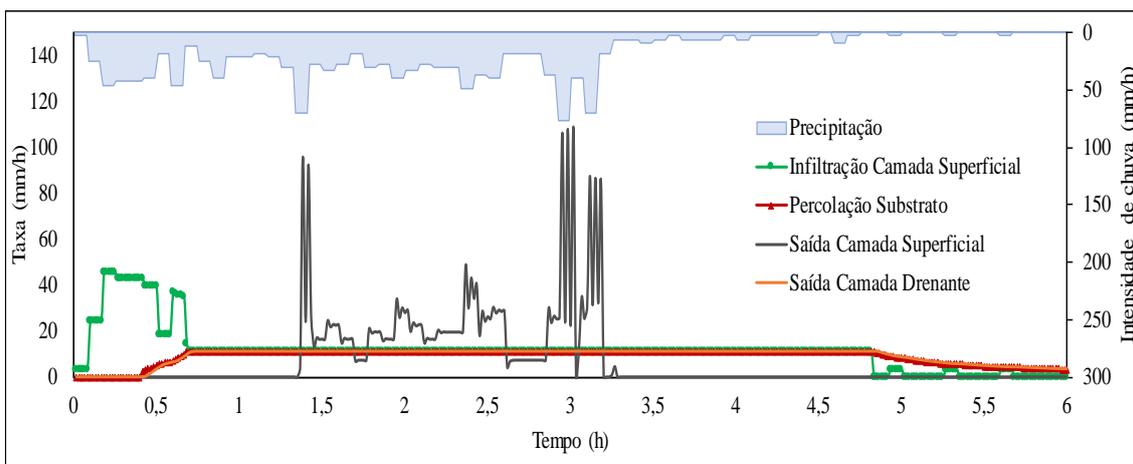


Figura 46 - Nível de água no TV01 - EV01

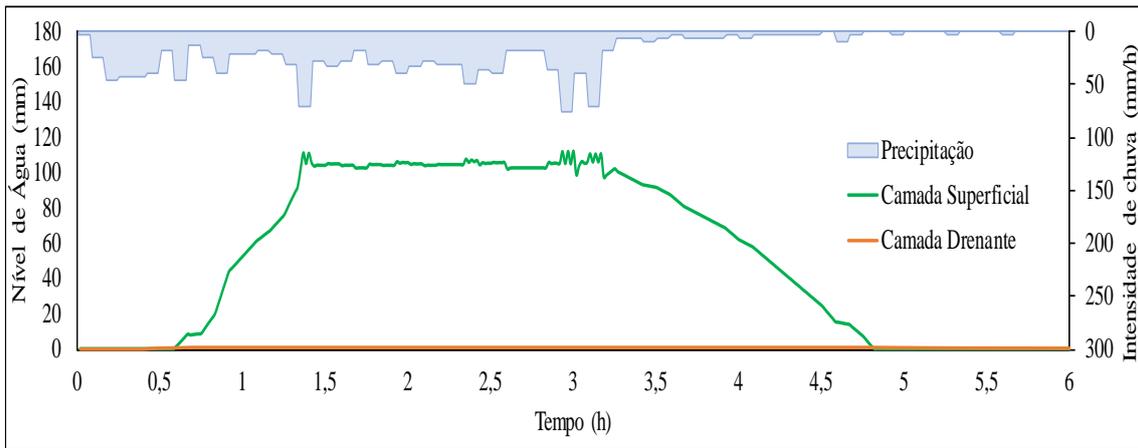


Figura 47 - Teor de umidade no TV01 - EV01

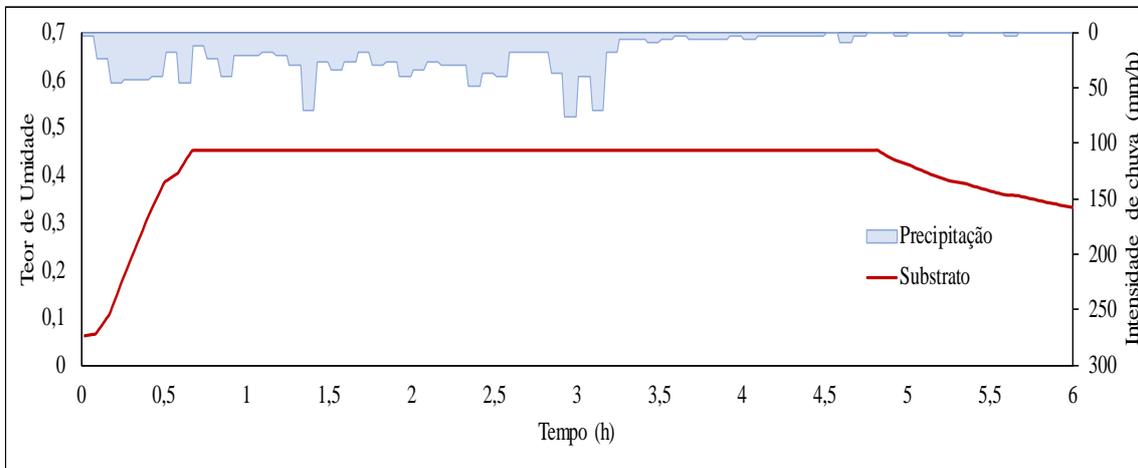


Figura 48 - Hidrograma de saída de lote para TV02 - EV01

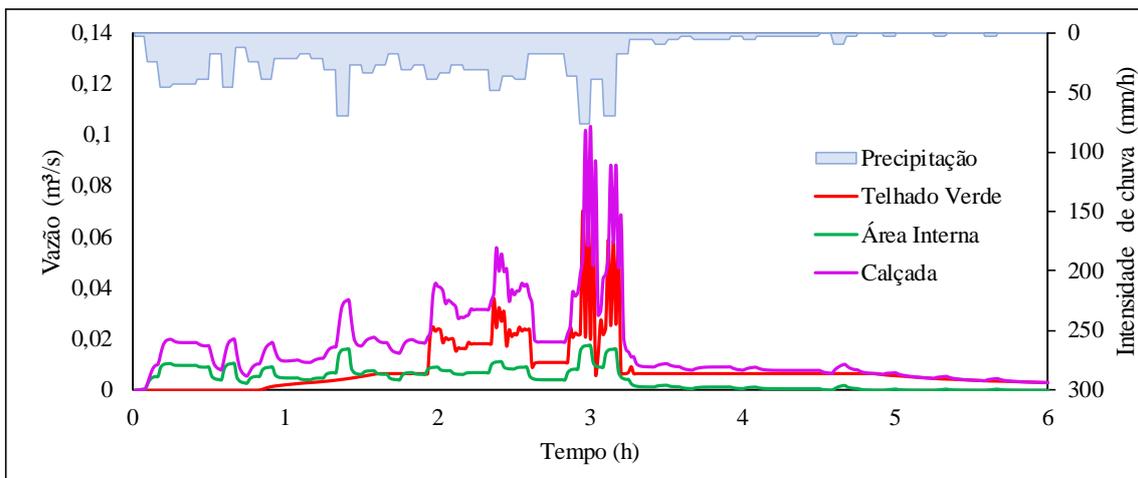


Figura 49 - Propagação de escoamento no TV02 - EV01

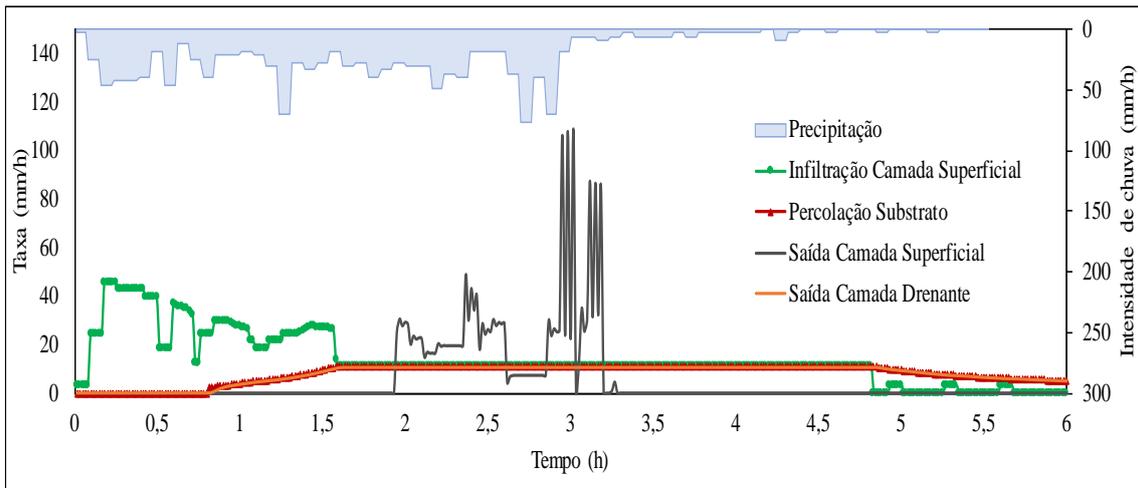


Figura 50 - Nível de água no TV02 - EV01

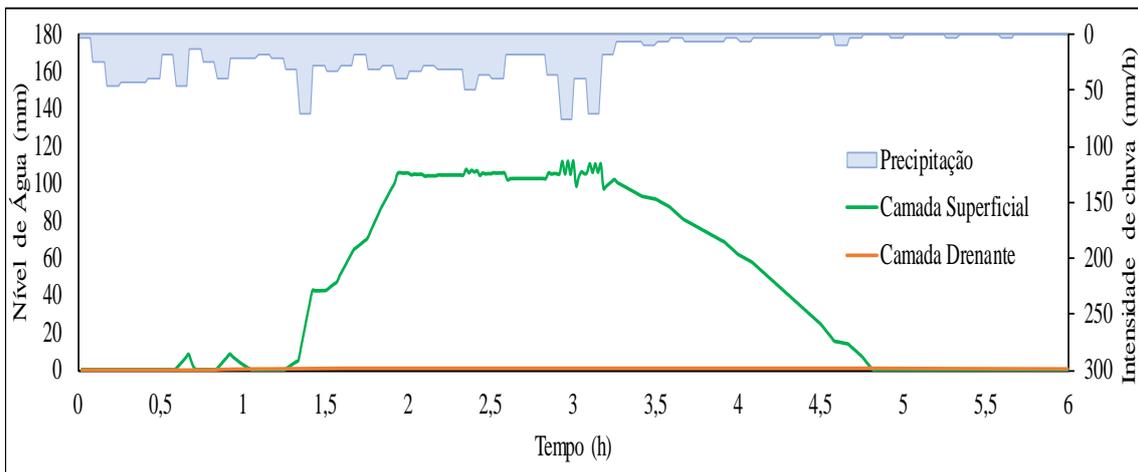
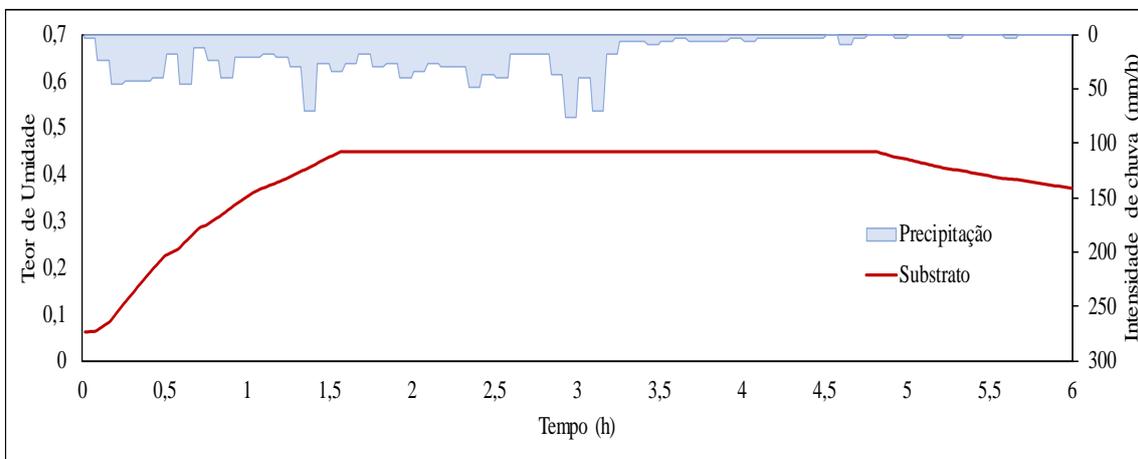


Figura 51 - Teor de umidade no TV02 - EV01



## APÊNDICE B

### ANÁLISE DOS TELHADOS VERDES PARA EVENTO 02

Figura 52 - Hidrograma de saída de lote para TV01 - EV02

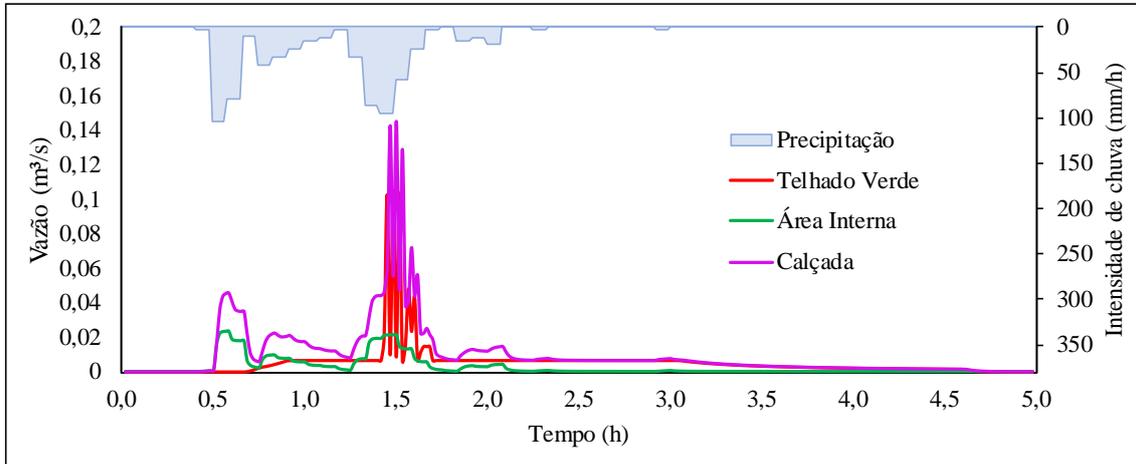


Figura 53 - Propagação de escoamento no TV01 - EV02

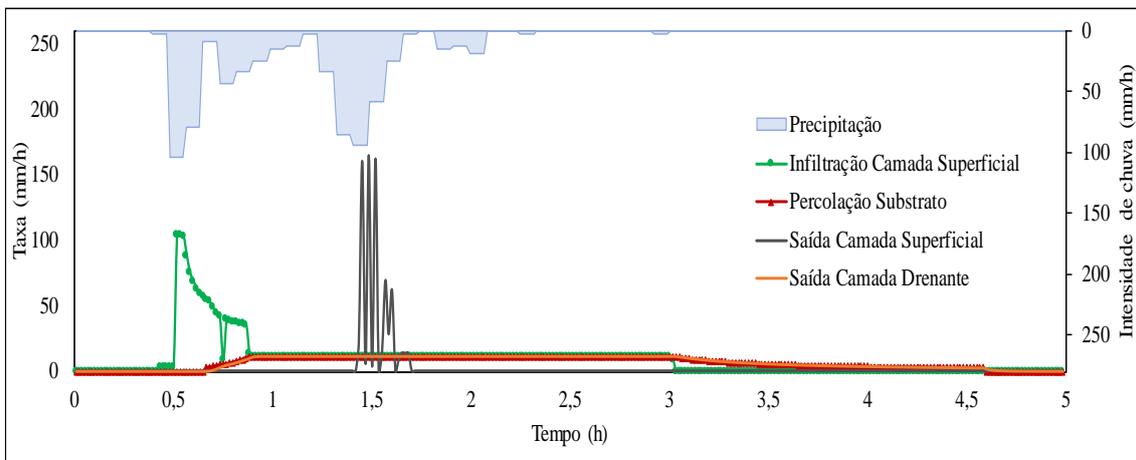


Figura 54 - Nível de água no TV01 - EV02

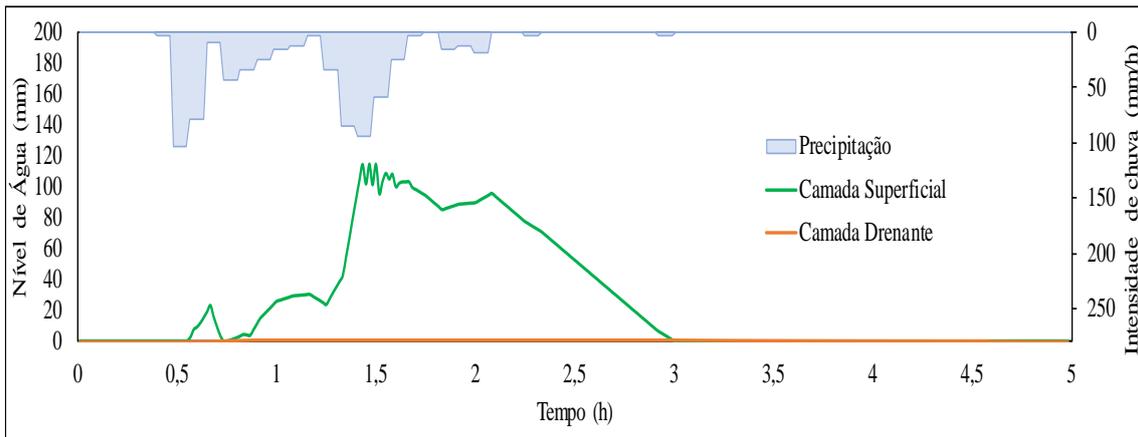


Figura 55 - Teor de umidade no TV01 - EV02

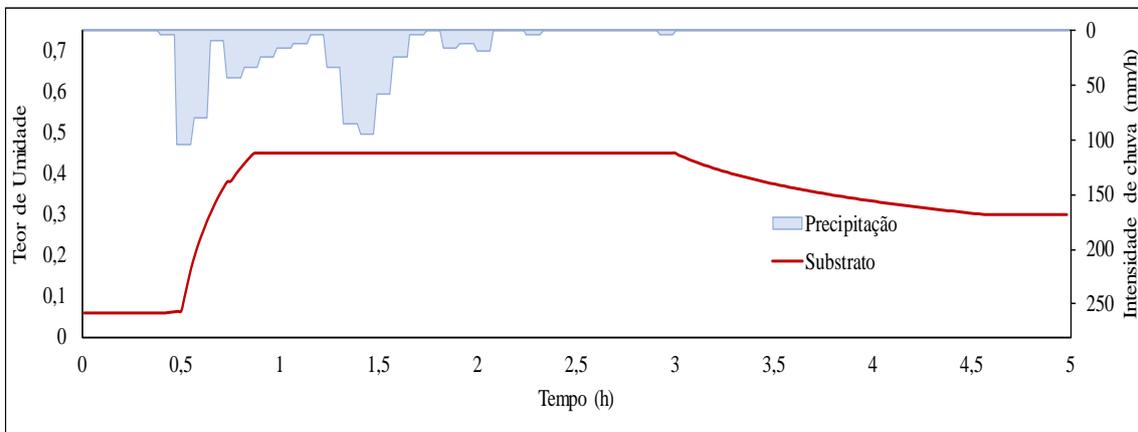


Figura 56 - Hidrograma de saída de lote para TV02 - EV02

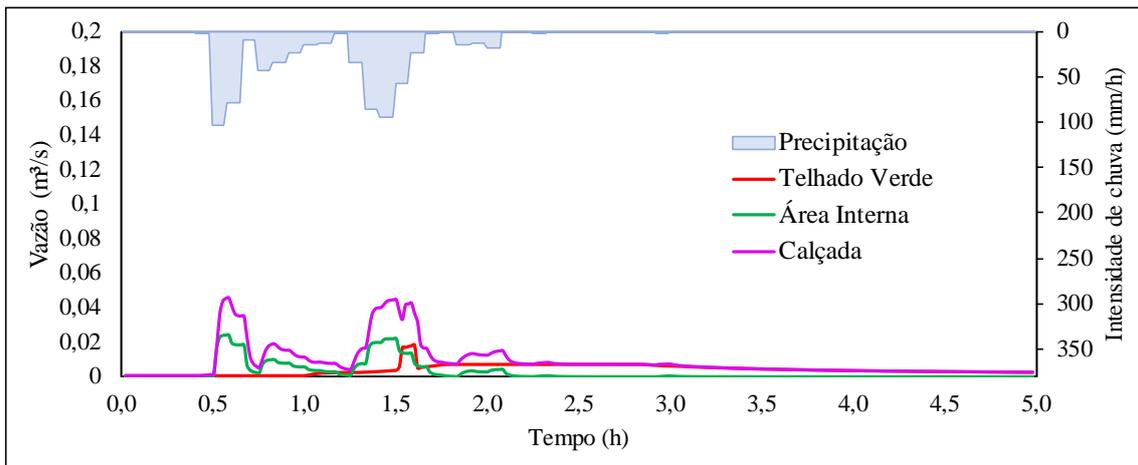


Figura 57 - Propagação de escoamento no TV02 - EV02

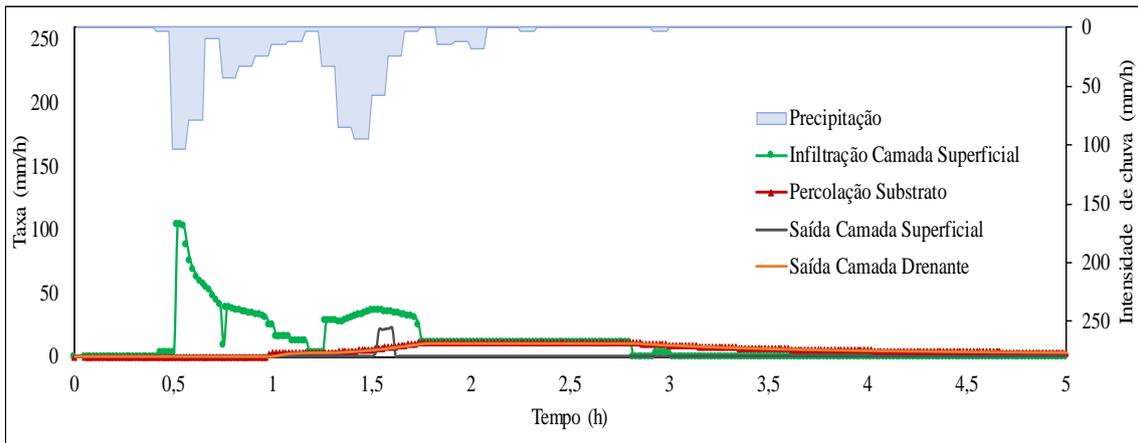


Figura 58 - Nível de água no TV02 - EV02

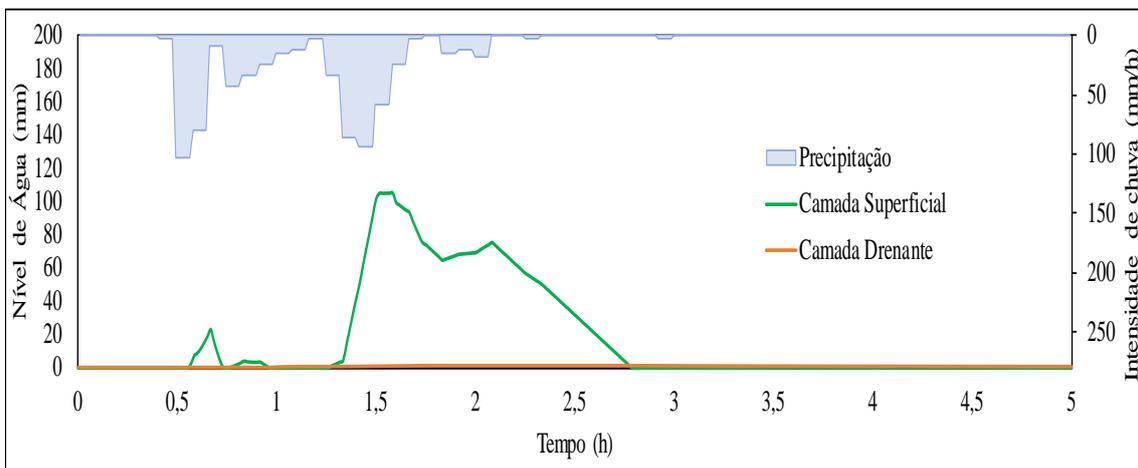
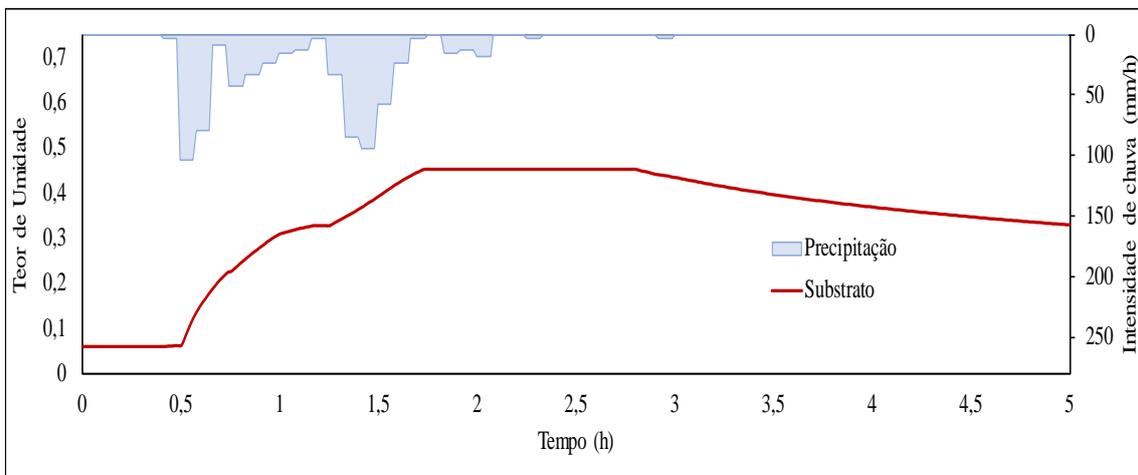


Figura 59 - Teor de umidade no TV02 - EV02



## APÊNDICE C

### ANÁLISE DOS TELHADOS VERDES PARA EVENTO 03

Figura 60 - Hidrograma de saída de lote para TV01 - EV03

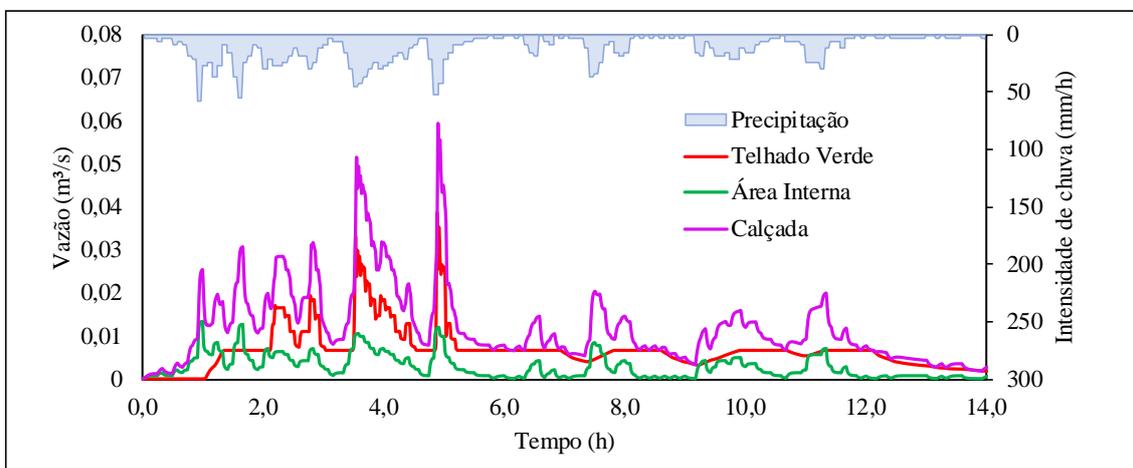


Figura 61 - Propagação de escoamento para TV01 - EV03

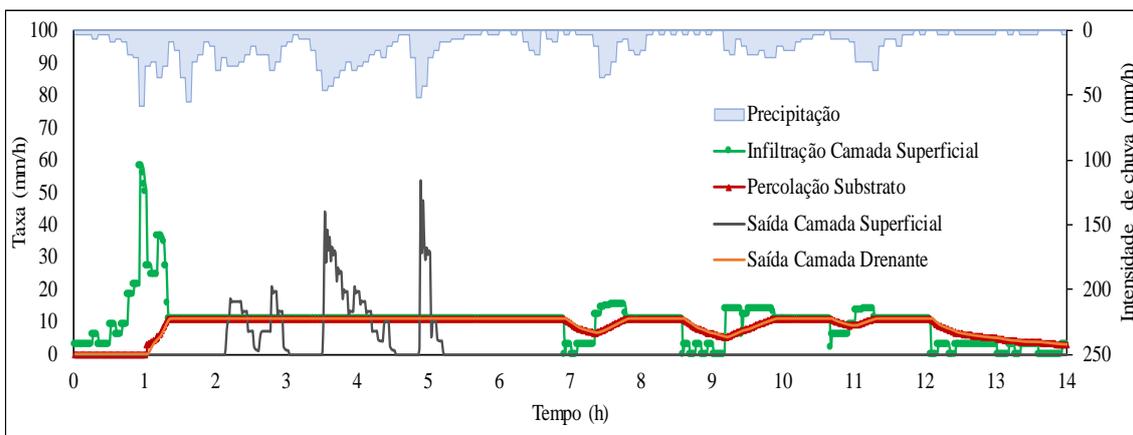


Figura 62 - Nível de água no TV01 - EV03

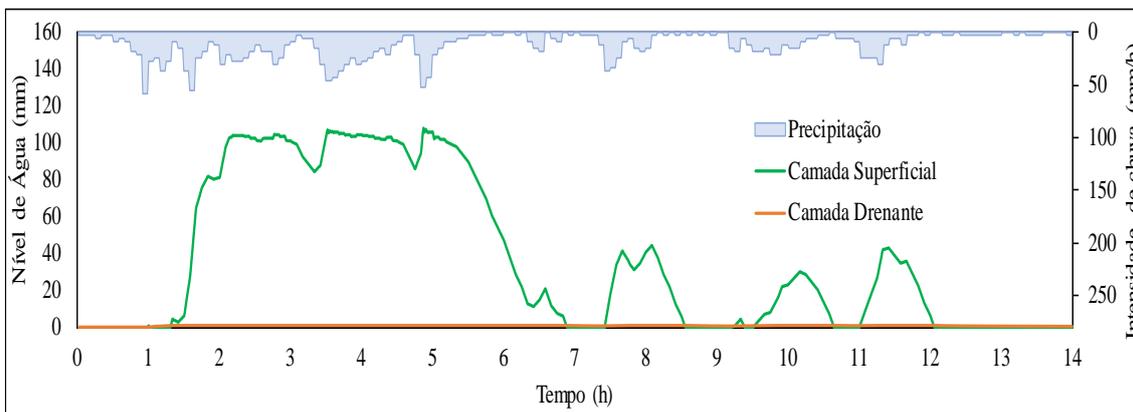


Figura 63 - Teor de umidade no TV01 - EV03

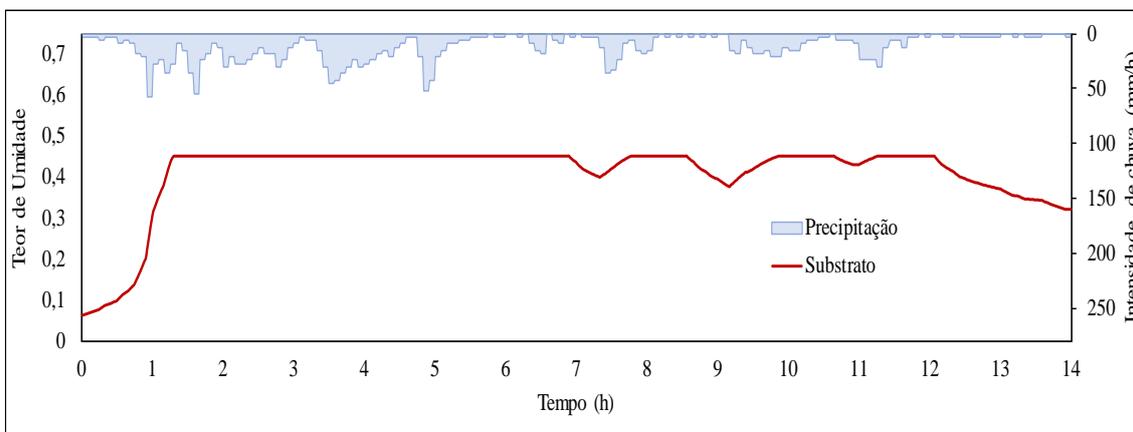


Figura 64 - Hidrograma de saída de lote para TV02 - EV03

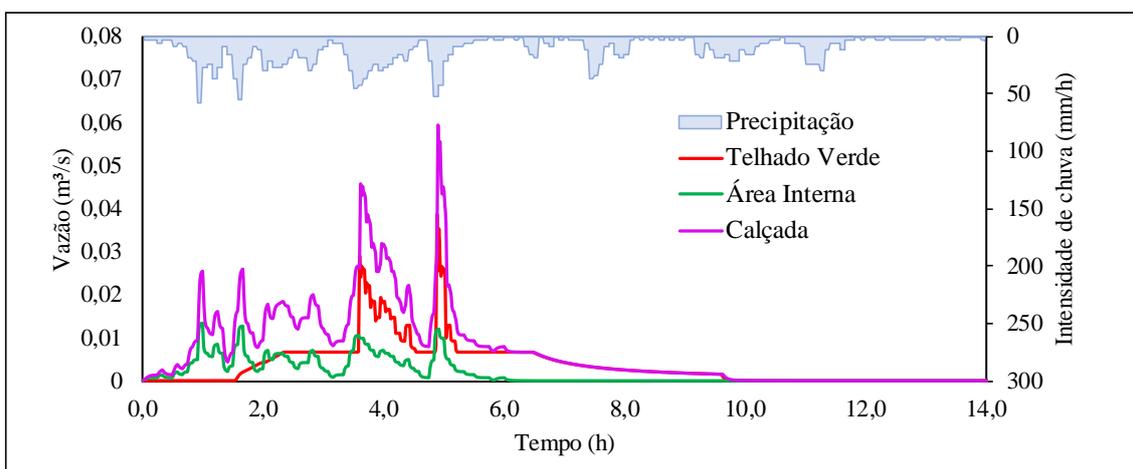


Figura 65 - Propagação de escoamento no TV02 - EV03

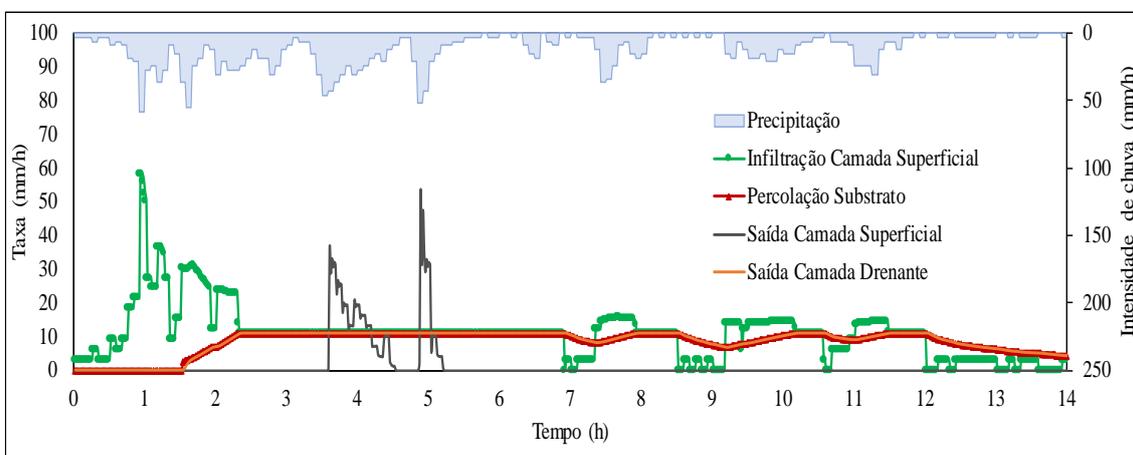


Figura 66 - Nível de água no TV02 - EV03

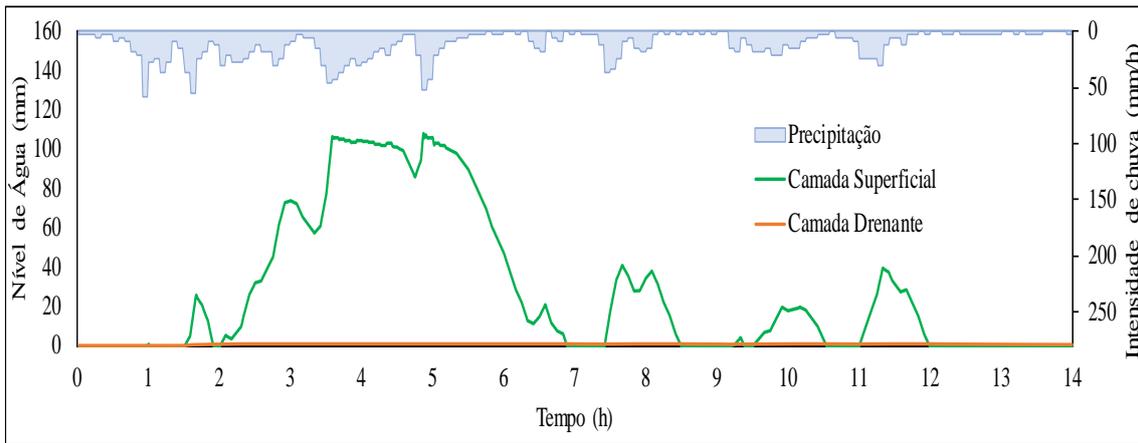


Figura 67 - Teor de umidade no TV02 - EV03

