

UFPA

PPGEC

Universidade Federal do Pará



Vanessa da Rosa Watrin

Desempenho Térmico e Hidrológico de Telhados Verdes Extensivos em Clima Amazônico

TESE DE DOUTORADO

Instituto de Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Tese orientada pelo Prof. Claudio José Cavalcante Blanco, Ph.D.

VANESSA DA ROSA WATRIN

**DESEMPENHO TÉRMICO E HIDROLÓGICO DE TELHADOS VERDES
EXTENSIVOS EM CLIMA AMAZÔNICO**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, ITEC, da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de doutora em Engenharia Civil, na área de concentração de Engenharia Hídrica, linha de pesquisa em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof. Claudio José Cavalcante Blanco, Ph.D.

Belém – Pará

2020

Dedico este trabalho à minha família,
especialmente à Beatriz, razão do meu
viver.

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais a vida, o amor e a educação recebidos. Agradeço à minha irmã Verena por me motivar sempre a ser uma pessoa melhor. Agradeço à minha filha Beatriz por manter a minha criança interior viva. Agradeço ao meu amado Antônio por estar sempre ao meu lado. Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Claudio Blanco por ter confiado na minha capacidade e potencial. Agradeço aos amigos do programa pelo suporte emocional e companheirismo. Agradeço ao GEDAE por ter acolhido meu experimento e por todo o suporte técnico que me foi dado. Agradeço à Universidade Federal do Pará pelo incentivo a minha capacitação profissional com a concessão de licença integral durante estes quatro anos de curso. Por fim, agradeço inclusive aqueles que me ajudaram de forma anônima.

Resumo

O planejamento urbano inadequado produziu grandes impactos ambientais em áreas urbanas como inundações urbanas e ilhas de calor urbanas. Uma nova abordagem para proteger o ambiente urbano trouxe a ideia do Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto (LID), que utiliza dispositivos de controle de águas pluviais, como cisternas, pavimentos permeáveis e telhados verdes. Assim, o objetivo principal desta pesquisa é avaliar o desempenho térmico, na atenuação da carga térmica, e hidrológico, na retenção de água pluvial; e a relação entre redução de temperatura e chuva incidida em telhados verdes extensivos na região amazônica a partir de um experimento em escala reduzida. Os objetivos específicos foram divididos entre: Monitorar o comportamento térmico e hidrológico dos telhados verdes em escala reduzida; Determinar experimentalmente o hidrograma de projeto dos telhados; Simular e validar esses hidrogramas de projeto através dos resultados experimentais; Calibrar o número de escoamento (CN) para os telhados verdes analisados; e Determinar correlação linear entre redução de temperatura e chuva incidida em telhados verdes. O protótipo do experimento foi projetado em estrutura única de madeira suportando três telhados independentes com 1 m² de área cada um. As telhas especificadas para o experimento foram as de fibrocimento. Para cada telhado, foi previsto um sistema de coleta e armazenamento de água pluvial escoada, composto por calhas em PVC que conduzem a água para os reservatórios. A solução definida para o monitoramento visual do experimento foi a partir da utilização de três câmeras frontais conectadas a um sistema do tipo DVR, que armazena os dados em arquivos de vídeo, permitindo monitorar o experimento em tempo integral. O sistema de monitoramento da temperatura de superfície interna dos telhados foi projetado com a utilização de três sensores de temperatura do tipo termo resistência PT 1000, que possuem maior precisão que os sensores termopar tipo K, posicionados no centro de cada telhado e imediatamente abaixo das telhas de fibrocimento. Para o armazenamento dos dados de temperatura, previu-se o uso de um sistema de aquisição de dados (datalogger) montado com Arduino e cartão SD, gravando dados em intervalos de 5 em 5 minutos, compatível com os dados da estação climatológica utilizada, HOBO U30. O monitoramento térmico e hidrológico dos telhados verdes foi realizado durante os anos de 2017 e 2018. Nesses dois anos, houve períodos de inatividade do monitoramento devido a falhas no sistema de captação de imagens, as quais foram utilizadas para as medições de volume escoado. Os hidrogramas de projeto dos telhados verdes foram determinados experimentalmente. O desempenho do TV I foi ligeiramente superior ao desempenho do TV II quanto ao retardo do escoamento superficial. Em relação, a eficiência na capacidade de retenção hídrica entre as estruturas verdes, ficou evidente que o TV I,

montado sobre fundos de garrafas PET, apresenta melhor capacidade de absorção de água em relação ao TV II. A calibração do CN dos telhados verdes foi realizada pela comparação dos hidrogramas observados aos simulados. Os hidrogramas simulados foram determinados via Método da Curva Número - CN desenvolvido em 1956 pelo *United States Department of Agriculture Soil Conservation Service* (USDA SCS). A correlação linear entre os totais de chuva por evento e as redução de temperatura, demonstraram que a primeira variável é capaz de explicar até 76% da segunda, sugerindo que a redução de temperatura pode ser estimada via dados de chuva, que são mais baratos de serem monitorados, que dados de temperatura. A redução de temperatura é importante para uso dos telhados verdes numa região de clima equatorial, tal qual é a Amazônia. Essa redução de temperatura pode ser usada como justificativa econômica para a implantação de telhados verdes, já que esta chegou a 10°C, sendo interessante para a redução de consumo de energia elétrica através dos condicionadores de ar, que são constantes nas residências e prédios da região. Nesse contexto, é possível afirmar que o telhado verde contribui significativamente para a redução da vazão de pico de cheias; e de temperaturas, e que o uso de materiais recicláveis na construção de telhados verdes mostra-se uma alternativa viável.

Palavras-chave: Hidrologia; Telhado-verde; Eficiência Térmica; Eficiência Hidrológica.

Abstract

Inadequate urban planning has produced major environmental impacts in urban areas such as urban floods and urban heat islands. A new approach to protect the urban environment brought the idea of Low Impact Urban Development (LID), which uses rainwater control devices, such as cisterns, permeable pavements and green roofs. Thus, the main objective of this research is to evaluate the thermal performance, in the attenuation of the thermal load, and hydrological, in the retention of rainwater; and the relationship between temperature reduction and rainfall on extensive green roofs in the Amazon region from a small-scale experiment. The specific objectives were: Monitoring the thermal and hydrological behaviour of green roofs on a small scale; Determine experimentally the design hydrograph of the roofs; Simulate and validate these design hydrographs through the experimental results; Calibrate the Curve Number (CN) for the analysed green roofs; and Determine linear correlation between temperature reduction and rainfall on green roofs. The prototype of the experiment was designed in a unique wooden structure supporting three independent roofs with an area of 1 m² each. The tiles specified for the experiment were those made of fiber cement. For each roof, a drainage rainwater collection and storage system were provided, consisting of PVC gutters that carry the water to the reservoirs. The solution defined for the visual monitoring of the experiment was based on the use of three frontal cameras connected to a DVR type system, which stores the data in video files, allowing to monitor the experiment full time. The internal surface temperature monitoring system for roofs was designed with the use of three temperature sensors of the PT 1000 thermo resistance type, which are more accurate than the type K thermocouple sensors, positioned in the center of each roof and immediately below the tiles of fiber cement. For the storage of temperature data, the use of a data acquisition system (datalogger) with Arduino and SD card was foreseen, recording data at intervals of 5 in 5 minutes, compatible with the data of the weather station used, HOBO U30. The thermal and hydrological monitoring of the green roofs was carried out during the years 2017 and 2018. During these two years, there were periods of monitoring inactivity due to failures in the image capture system, which were used for measurements of runoff volume. The design hydrographs of the green roofs were determined experimentally. The performance of TV I was slightly higher than the performance of TV II in terms of delayed runoff. In relation to the efficiency in the water retention capacity between the green structures, it was evident that TV I, mounted on bottoms of PET bottles, has a better water absorption capacity compared to TV II. The calibration of the CN of the green roofs was performed by comparing the observed hydrographs to the simulated ones. The simulated hydrograms were determined using the

Curve Number Method - CN developed in 1956 by the United States Department of Agriculture Soil Conservation Service (USDA SCS). The linear correlation between rainfall totals per event and temperature reductions, demonstrated that the first variable is able to explain up to 76% of the second, suggesting that the temperature reduction can be estimated via rainfall data, which are cheaper than monitored, what temperature data. The reduction in temperature is important for the use of green roofs in an equatorial climate region, such as the Amazon. This temperature reduction can be used as an economic justification for the implantation of green roofs, since it reached 10°C, being interesting for the reduction of electric energy consumption through air conditioners, present in the homes and buildings of the region. In this context, it is possible to state that the green roof contributes significantly to the reduction of peak flood flow; and temperatures, and that the use of recyclable materials in the construction of green roofs proves to be a viable alternative.

Keywords: Hydrology; Green roof; Thermal efficiency; Hydrological Efficiency.

Lista de Figuras

Figura 1: Tipos de aspectos construtivos para telhados verdes.....	18
Figura 2: Telhado verde em camadas.....	19
Figura 3: Transferência de calor em telhados verdes.....	28
Figura 4: Exemplo de aplicação da Quota Ambiental.....	30
Figura 5: Localização do Telhado Verde Experimental.....	36
Figura 6: Precipitação acumulada mensal para o ano de 2019.	37
Figura 7: Desenho Esquemático do Telhado Verde Experimental.	38
Figura 8: Manta impermeabilizante asfáltica.	39
Figura 9: Camada de drenagem elaborada com PET.	39
Figura 10: Camada de drenagem alveolar leve.	40
Figura 11: Camada filtrante manta geotêxtil.....	40
Figura 12: Camada de Substrato Biomix.	40
Figura 13: Camada com grama Esmeralda.	41
Figura 14: Vista frontal do experimento.	41
Figura 15 Sensores de temperatura e datalogger instalados.....	42
Figura 16: Quadro metodológico.	44
Figura 17: Percentuais médios da retenção hídrica nos telhados verdes nos meses de menor incidência pluvial – 2º semestre de 2017.	45
Figura 18: Percentuais médios da retenção hídrica nos telhados verdes nos meses de maior incidência pluvial – 1º semestre de 2018.	46
Figura 19: Hidrograma do evento 01 do período menos chuvoso – 20/09/2017.	47
Figura 20: Vazões de Pico do período menos chuvoso.....	50
Figura 21: Vazões de Pico de todos os eventos monitorados	51
Figura 22: Redução da vazão de pico no período menos chuvoso.....	51
Figura 23: Redução da vazão de pico no período mais chuvoso.	52
Figura 24: Hidrogramas observados para TV01 e TV02 e simulado via SCS para cada evento	56
Figura 25: Variação da temperatura superficial entre o telhado controle e o telhado verde I (TV I) nos dias de maior (a) e menor (b) incidência solar.	57
Figura 26: Variação da temperatura superficial entre o telhado controle e o telhado verde II (TV II) nos dias de maior (a) e menor (b) incidência solar.....	58
Figura 27: Relação entre Temperatura e Chuva.....	59

Figura 28: Relação entre Chuva e Redução de Temperatura. 60

Lista de Tabelas

Tabela 1: Características quanto ao tipo de telhado verde.	19
Tabela 2: Características quanto ao tipo de vegetal em coberturas verdes.	22
Tabela 3: Relação da AMC e do volume precipitado com a retenção.	48
Tabela 4: Retenção pluvial por condição de umidade antecedente do solo (AMC).	49
Tabela 5: Média de retenção pluvial por intensidade e AMC.	50
Tabela 6: Valores dos CN calibrados, coeficientes de Nash-Sutcliffe em função da umidade antecedente e totais pluviométricos por evento.	53
Tabela 7: Estatísticas do CN, valores médios dos coeficientes de Nash-Sutcliffe para cada tipo de telhado verde em função da umidade antecedente do solo.	53

Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	Motivação.....	14
1.2	Objetivos.....	15
1.2.1	Geral.....	15
1.2.2	Específicos.....	15
1.2.3	Organização da obra.....	15
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	17
2.1	TELHADO VERDE.....	17
2.1.1	Características e benefícios do telhado verde.....	17
2.1.2	Tipos de telhado verde.....	17
2.1.3	Composição geral do telhado verde.....	19
2.1.3.1	Camada de vegetação.....	19
2.1.3.2	Plantas cultivadas em telhados verdes e suas características.....	21
2.1.3.3	Camada de substrato.....	23
2.1.3.4	Camada filtrante.....	24
2.1.3.5	Camada de drenagem.....	24
2.1.3.6	Camada de impermeabilização.....	24
2.1.4	Eficiência Hidrológica.....	25
2.1.5	Eficiência térmica.....	27
2.1.6	Políticas públicas para telhados verdes.....	28
2.2	MODELOS HIDROLÓGICOS.....	31
2.2.1	MODELOS EMPÍRICOS.....	33
2.2.1.1	Método Racional.....	33
2.2.1.2	Método da Curva Número - CN (SCS).....	34
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	36
3.1	LOCALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO.....	36

3.2	ELABORAÇÃO E MONTAGEM DO EXPERIMENTO.....	38
3.3	MONITORAMENTO	42
3.4	ANÁLISE DOS DADOS MONITORADOS.....	42
3.4.1	Térmicos.....	42
3.4.2	Hidrológicos	42
3.4.3	Desempenho Térmico x Desempenho Hidrológico.....	43
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1	Eficiência hidrológica.....	45
4.2	Calibração do CN	52
4.3	Eficiência térmica.....	56
4.4	Correlação entre redução de temperatura e chuva total incidida nos telhados verdes .	59
5	CONCLUSÃO.....	61
	APÊNDICE A	71
	APÊNDICE B	82
	ANEXO A.....	101

1 INTRODUÇÃO

Historicamente a relação entre cidade e água estabeleceu-se desde os primeiros assentamentos humanos. As técnicas de controle das águas foram imprescindíveis para o processo de sedentarização das sociedades e para a conformação do espaço urbano (Ximenes e Brandão, 2014). A transformação da paisagem natural ocorrida a partir da ocupação urbana de bacias hidrográficas, seguida do adensamento dos centros urbanos, resultou no aumento das áreas impermeáveis. Neste processo de urbanização, os modelos de desenvolvimento progressistas têm sido associados a impactos ambientais mais significativos, dada a natureza mais radical de suas intervenções (Choay, 1997). Atualmente, observa-se em todo o país que estes modelos de urbanização aliados a um inexpressível planejamento ambiental, têm ocasionado impactos, que não podem ser desprezados: enchentes, ilhas de calor urbano, falta de água para abastecimento nos centros urbanos (Ohnuma Jr et al., 2014).

Esta impermeabilização proveniente da urbanização desordenada interfere diretamente no ciclo hidrológico, modificando o comportamento do escoamento superficial direto, da infiltração de água no solo e o desabastecimento das águas subterrâneas, além de diminuir a evapotranspiração (Gonçalves et al., 2009). De acordo com Justino, Paula e Paiva (2012) o acréscimo de 54% de área impermeável pode provocar um aumento na vazão de pico em até 59,40%. Tal fato justifica o aumento da ocorrência de inundações em centros urbanos, sendo necessário o uso de medidas e alternativas sustentáveis que ajudem a minimizar o impacto ambiental causado pela impermeabilização urbana.

A cidade de Belém, área de estudo desta pesquisa, protagonizou forte crescimento populacional desde a década de 1960, o que ocasionou a construção de um espaço urbano impermeabilizado e desordenado, modificando o ciclo hidrológico urbano da cidade. Segundo Tavares (2009), Belém não tem um sistema de drenagem eficiente, o que intensifica os alagamentos durante os eventos de chuva intensos, principalmente quando associados à maré alta. Um primeiro passo no sentido de reabilitar os sistemas hidrológicos afetados pela urbanização é a avaliação das soluções e tecnologias necessárias para diminuir estes impactos. A maneira mais evidente de alcançar este objetivo é de assegurar às bacias uma condição mais próxima às suas características naturais, prioritariamente a partir da redução da quantidade de superfície impermeável (Carter e Rasmussen, 2007).

Diante desses problemas provocados pela urbanização, uma nova abordagem de proteção ao ambiente urbano levanta a ideia do Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto

ou Low Impact Development – LID, tendo como princípio a conservação e preservação da cobertura vegetal urbana e a execução de projetos de engenharia que respeitem as peculiaridades locais naturais, assegurando a conservação qualitativa e quantitativa de processos hidrológicos (Souza et al. 2012). Assim, o mecanismo LID destaca como dispositivos de controle de águas pluviais a construção de cisternas, pavimentos permeáveis e telhados verdes (TVs). Karteris et al. (2016), Razzaghmanesh et al. (2016), Huang et al. (2016) destacam entre os sistemas disponíveis no campo da construção civil sustentável e bioclimática, o Telhado Verde (TV), e o apresentam como uma técnica de controle do escoamento superficial e isolamento térmico, objetivando reduzir as ilhas de calor no ambiente urbano.

Os telhados verdes, conhecidos também como ecotelhados, coberturas vivas e telhados vegetados, são estruturas horizontais com vegetação enraizada em camada de solo e localizadas nas coberturas de edifícios. São geralmente classificados como intensivos ou extensivos. Os intensivos são compostos por camada de solo com mais de 20 cm de espessura e os extensivos com camada de solo com espessuras menores do que 20 cm, possuindo menor custo de manutenção e menor demanda de irrigação (Boucher, 2006). Nas últimas décadas os telhados verdes têm sido estudados por suas diversas contribuições. Desde seus detalhes construtivos, tipos de vegetação, sua inserção nos meios urbanos e rurais, sua influência na eficiência energética e conforto ambiental, até seu desempenho como estrutura de controle do escoamento pluvial (Berardi et al., 2014). Neste contexto, o objetivo principal desta pesquisa é avaliar o desempenho térmico, na atenuação da carga térmica, e hidrológico, na retenção de água pluvial; e a relação entre redução de temperatura e o volume de chuva incidida sobre telhados verdes extensivos na região amazônica a partir de um experimento em escala reduzida.

1.1 Motivação

Pesquisas desenvolvidas em diversos bioclimas (Carson et al., 2013; Nawaz et al 2015; Viola et al., 2017; Sims et al., 2016; Wong e Jim, 2014) comprovam o bom desempenho hidrológico dos telhados verdes, que vem se afirmando como ferramenta de controle do escoamento superficial de águas pluviais em áreas urbanas. Considerando que a permeabilidade do solo e a vegetação estão diretamente relacionadas com a melhoria da drenagem e com a atenuação das alterações climáticas, buscou-se avaliar o potencial dos

telhados verdes nestas duas dimensões: térmica e hidrológica, inclusive relacionando-as. A carência de estudos na Amazônia serviu de motivação para elaboração de uma avaliação experimental térmica e hidrológica. No último caso, associada à proposição de um modelo hidrológico para calibração do CN (numero de escoamento) dos telhados verdes analisados.

1.2 Objetivos

1.2.1 Geral

Avaliar os desempenhos térmico e hidrológico de telhados verdes extensivos em clima Amazônico.

1.2.2 Específicos

- Monitorar o comportamento térmico e hidrológico dos telhados verdes em escala reduzida;
- Determinar experimentalmente o hidrograma de projeto dos telhados;
- Simular e validar esses hidrogramas de projeto através dos resultados experimentais;
- Calibrar o número de escoamento (CN) para os telhados verdes analisados;
- Determinar correlação linear entre redução de temperatura e volume de chuva incidida sobre telhados verdes;

1.2.3 Organização da obra

A obra está organizada em 5 capítulos, dois apêndices e um anexo. O primeiro capítulo é introdutório e contextualiza a pesquisa e seus objetivos. O segundo capítulo compreende a revisão da literatura nas áreas que permeiam o tema da pesquisa: telhados verdes, hidrologia, eficiência térmica e modelagem hidrológica. O terceiro capítulo trata dos materiais e da metodologia utilizados, descreve a montagem e monitoramento do experimento, assim como o tratamento dos dados. No quarto capítulo são apresentados e discutidos os resultados da pesquisa, primeiramente, a eficiência hidrológica seguida da calibração do CN para os telhados estudados; depois a eficiência térmica seguida da correção entre redução de temperatura e chuva total incidida nos telhados. O quinto capítulo é o fechamento da pesquisa com suas conclusões e trabalhos futuros. O apêndice A é o artigo “Thermal and hydrological performance of green roofs in Amazon Climate, Brazil” publicado na revista britânica “Engineering Sustainability” com dados parciais da pesquisa exigido pelo

programa antes do exame de qualificação. O apêndice B são os hidrogramas de projeto dos telhados.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 TELHADO VERDE

2.1.1 Características e benefícios do telhado verde

A Alemanha já desenvolvia técnicas de construção em telhados verdes na década de 60. Com a crise do petróleo na década de 70, houve o crescimento do discurso de desenvolvimento sustentável e com isso vários países como Áustria, Suíça, Estados Unidos, Noruega, Hungria, Suécia, Reino Unido e Itália passaram a adotar as coberturas verdes em suas construções para assegurar o bem-estar da sociedade e mitigar os problemas ambientais urbanos (Rangel et al., 2015).

Essas coberturas verdes são métodos construtivos sustentáveis, que têm como característica principal o cultivo de plantas sobre edificações de telhados convencionais. No ambiente urbano, o telhado verde representa uma solução sustentável para minimizar os volumes de chuva-vazão entregues aos sistemas de drenagem e esgoto (Hakimdavar et al., 2014). O telhado verde também ajuda na redução da temperatura interna das edificações, reduz os efeitos das “ilhas de calor” nos centros urbanos e absorve partículas degradadoras suspensas no ar (D’avila et al., 2010; Whittinghill et al., 2014). Outros benefícios que podem ser obtidos pelo uso de telhados verdes é o combate à poluição visual, eficiência energética dos edifícios e aumento da biodiversidade e valorização do imóvel (Virk et al., 2015).

Não obstante os múltiplos benefícios apresentados pelo telhado verde, é possível verificar alguns aspectos desfavoráveis, tais como: a necessidade de manutenção para conservar a boa aparência e a saúde da vegetação; a necessidade de mão de obra especializada; e o alto investimento inicial para a execução do sistema. Apesar destes fatores tornarem a implantação de telhados verdes economicamente inviável em curto prazo, ainda assim, a relação custo-benefício é compensatória a longo prazo, conforme afirmam Clark et al. (2008) e Chan e Chow (2013).

2.1.2 Tipos de telhado verde

Reda et al. (2012), Santos et al. (2013) e Bacovis e Nagalli (2013) descrevem os telhados verdes em três tipos de estruturas: os intensivos, semi-intensivos e extensivos (Figura 1). Segundo Tassi et al. (2014) e Moruzzi et al. (2014), os telhados verdes diferem em virtude do tipo de vegetação, espessura do substrato e periodicidade de manutenção.



Figura 1: Tipos de aspectos construtivos para telhados verdes.

Fonte: Adaptado de McIntyre et al. (2010)

Os telhados “intensivos” são chamados dessa maneira por necessidades intensas de manutenção como: fertilizantes e irrigação, apresentam estrutura mais pesada devido à espessura do substrato, suportam maior diversidade de espécies vegetais, abrigando plantas de médio e grande porte, possuem maior custo de implantação, possibilidade de simular ambientes naturais e serem visualmente mais atrativos. Quanto ao telhado semi-intensivo, este tem características compreendidas entre os telhados intensivo e extensivo. Comparado com o tipo extensivo, possui custo mais elevado, manutenção periódica, estrutura de maior peso e possui um substrato mais espesso que o extensivo (Tabela 1). O tipo de cultivo, em comparação ao tipo extensivo, abriga maior diversidade de plantas como: gramíneas, pequenos arbustos e plantas herbáceas. Os extensivos são telhados com estruturas leves, que precisam de pouca ou nenhuma manutenção, ou seja, são autossustentáveis, comportam plantas resistentes a situações climáticas severas e tem baixa profundidade de substrato (Tabela 1). Esses telhados são mais acessíveis devido aos seus custos mais baixos, sua estrutura pode ser leve mesmo quando saturado, assim como há possibilidade de aplicação em coberturas inclinadas e pouca necessidade de conhecimento técnico por parte do operador.

Tabela 1: Características quanto ao tipo de telhado verde.

	Telhado verde extensivo	Telhado verde Semi-intensivo	Telhado verde intensivo
Manutenção	Baixa	Média	Alta
Irrigação	Sem irrigação	Periódica	Regular
Tipos de plantas	Musgos, herbáceas e Gramíneas	Gramíneas-herbáceas e arbustos	Árvores, arbustos e canteiros
Profundidade do Substrato	6 – 20 cm	12 – 25 cm	15 – 40 cm
Peso Específico	60 - 150 kg/m ²	120 - 200 kg/m ²	180 - 500 kg/m ²
Custo	Baixo	Médio	Alto

Fonte: (Ansel e Scharr, 2018)

2.1.3 Composição geral do telhado verde

O telhado verde é dividido em cinco camadas (Figura 2): camada de cobertura vegetal; camada de substrato, que retém parte da água pluvial, onde as plantas são fixadas; camada filtrante, que tem a função de filtrar a água que passa do substrato para a camada de drenagem; camada de drenagem, que retém parte da água da chuva no sistema; e por fim, a camada de impermeabilização, que evita que qualquer tipo de infiltração passe para o interior das edificações (Castro e Goldenfum, 2010; Carbone et al., 2014).

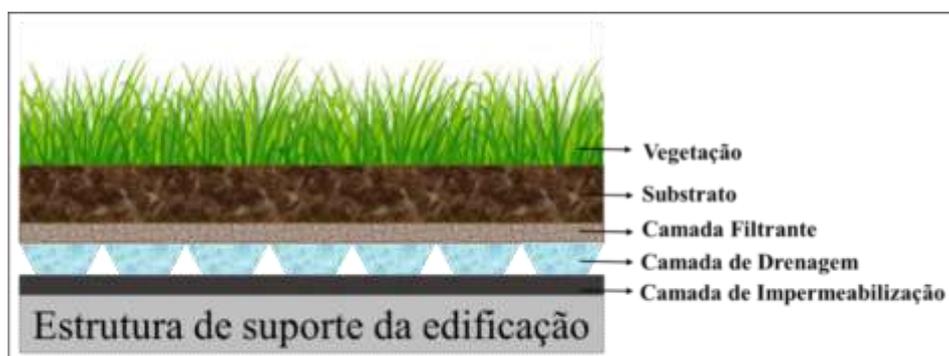


Figura 2: Telhado verde em camadas.

2.1.3.1 Camada de vegetação

O sucesso na eficiência e o melhor desempenho ambiental dos telhados verdes dependem de uma boa seleção de espécies vegetais. Dentro dos critérios de seleção, a camada vegetal do telhado verde precisa sobreviver às condições climáticas locais e, além disso, a espessura do substrato e sua boa capacidade em armazenar e reter a água na camada de

drenagem são de fundamental importância para a sobrevivência de espécies vegetais (Minke, 2004; Locatelli et al., 2014).

O estudo realizado por Jimenez et al. (2014) em telhados verdes extensivos e semi-intensivos na cidade do México, mostra que o tipo de vegetação a ser adotada deve seguir alguns critérios, tal qual a capacidade de sobrevivência da espécie vegetal, como é o caso das plantas suculentas, que se mostraram mais aptas a sobreviver em telhados verdes. Por exemplo, a espécie de planta *Sedum* (*Sedum spathifolium*, *Sedum ternatum*, e *Sedum oreganum*), tem sido extensamente utilizada nos Estados Unidos e Canadá. A escolha dessas espécies em telhados verdes extensivos está gradativamente se incorporando por serem plantas extremamente resistentes e por formarem raízes relativamente rasas com grande capacidade de armazenar água e suportar com sucesso climas de frio e calor extremo (Macivor e Lundholm, 2011).

No mediterrâneo, em regiões de clima temperado, duas espécies de plantas foram estudadas: *S. vulgaris* e *L. ovatus*. A herbácea *S. vulgaris* atinge de 10 a 100 cm de altura, suas partes aéreas sofrem murchamento ao final do verão. Já a *L. ovatus* é uma grama perene, atingindo de 8 a 80 cm de altura. São espécies com grande potencial em sequestro de Carbono e Nitrogênio no sistema substrato-planta, bem como possuem maior eficiência no processo de evapotranspiração (Mechelen et al., 2014; Ondoño et al., 2016).

No Brasil, Laar et al. (2001) identificaram seis espécies de plantas tropicais que melhor se adaptaram na construção de telhados verdes extensivos em cidades de clima tropical, a saber: *Pilea microphylla*, *Pedilanthus tithymaloides*, *Portulaca grandiflora*, *Tradescantia pallida*, *Liriope muscar* e *Tradescantia spathacea*. Na análise, os autores tomaram como critérios os seguintes aspectos: alta resistência às condições climáticas locais, tamanho e desenvolvimento das raízes, tempo de crescimento vegetal e plantas com grande superfície foliar, visando melhorar a retenção de água, viabilizando maior sombreamento do substrato, logo, diminuindo a temperatura do ambiente através da evapotranspiração e o impacto das chuvas intensas, protegendo o substrato contra a erosão.

No município de Itirapina, no estado de São Paulo, Beatrice e Vecchia (2011) cultivaram três espécies de plantas *Paspalum notatum* Flüggé (grama-batatais), *Arachis repens* Handro (grama-amendoim) e *Ophiopogon japonicus* Ker Gawl (grama-preta), sob três tratamentos de profundidades de substrato, 0,050; 0,075 e 0,100 m. As espécies cultivadas em solos de 0,100 m apresentaram resultados satisfatórios quanto à cobertura do solo, crescimento vertical e sobrevivência. A espécie *Arachis repens* Handro (grama-amendoim) foi a que apresentou maior sensibilidade à profundidade e ao estresse hídrico durante outono e

inverno, já o crescimento vertical foi satisfatório para todas as espécies analisadas, a menor altura alcançada foi da espécie *Ophiopogon japonicus* Ker Gawl (grama-preta).

Na Amazônia, no Parque de Ciência e Tecnologia do Guamá, Campus Universitário da Universidade Federal do Pará, foi implantado um telhado do tipo extensivo. O sistema recebeu substrato orgânico em módulos com dimensões 0,70 x 0,35 x 0,09 cm (comprimento, largura e altura) e tapetes de grama esmeralda (*Zoysia japonica* Steud), propícia ao clima de Belém. Esta espécie foi favorecida pela alta umidade relativa do ar, e mesmo nos meses de baixo índice pluviométrico a grama esmeralda apresentou excelente resistência ao clima e boa capacidade de regeneração (Marinho, 2013).

2.1.3.2 Plantas cultivadas em telhados verdes e suas características

A Grama São Carlos (*Axonopus compressus*), pertencente à família *Poaceae*, é uma planta herbácea com hábito de crescimento horizontal e sua taxa de crescimento varia de acordo com a temperatura. Quanto maior a temperatura, maior será seu crescimento e, conseqüentemente, maior a necessidade de corte (Costa et al., 2010). Outra espécie muito utilizada em coberturas verdes é a grama Batatais (*Paspalum notatum* Flüggé), planta herbácea perene pertencente à família *Poaceae* (*Gramineaceae*), que cresce por rizomas laterais subsuperficiais, possui folhas largas e extremamente pilosas. Apresenta coloração entre o verde claro e médio, sendo uma espécie adaptada a solos de baixa fertilidade, exigindo cortes frequentes devido ao seu rápido crescimento no verão, além de boa resistência ao pisoteio e ao déficit hídrico, sendo uma grama com sistema radicular de 15 cm, mostrando boa capacidade de recuperar e conservar solos degradados (Pereira, 2008; Branco et al., 2012).

A Grama Esmeralda (*Zoysia japonica* Steud) (Tabela 2) possui um crescimento horizontal capaz de brotar e recobrir o solo. Suas folhas possuem textura fina e média. Quanto ao clima, apresenta boa tolerância a estiagens, além de resistência à salinidade e boa tolerância a pisoteios (Gurgel, 2003). Outra espécie vegetal também utilizada em telhados verdes é a grama Amendoim (*Arachis pintoi*), que é uma leguminosa forrageira, tendo boa adaptação em áreas de altas precipitações. Uma característica de destaque dessa grama é a presença de suas flores amarelas durante a estação chuvosa, deixando o ambiente esteticamente mais agradável (Fisher et al., 1994, Lima et al., 2000).

Por fim, a grama preta (*Ophiopogon japonicus*) é uma herbácea perene com folhas lineares finas e escuras, sendo sensível a pisoteios. O seu crescimento é limitado, logo não

necessita de poda e é cultivada em solo fértil e bem drenado. Na Tabela 2 são mostradas as características mais importantes das gramas citadas para telhado verde.

Tabela 2: Características quanto ao tipo de vegetal em coberturas verdes.

Espécie	Origem	Altura	Ciclo de vida	Clima	Luminosidade	Fonte
Grama São Carlos (Axonopus compressus) 	América do Sul	15 a 30 cm	Perene	Desenvolve-se em regiões tropicais de clima quente com temperaturas na faixa de 27 e 35°C	Pleno sol e meia sombra	(COSTA et al., 2010)
Grama Batatais (Paspalum notatum Flügge) 	Brasil	15 a 30 cm	Perene	Desenvolve-se em climas quente e temperado com temperaturas na faixa de 5 a 35 °C	Pleno sol	(FREITAS et al., 2002; PEREIRA, 2008; PERUCHI, 2009; BEATRICE, 2011; BRANCO et al., 2012)
Grama Esmeralda (Zoysia japônica Steud) 	Japão	10 a 15 cm	Perene	Desenvolve-se em regiões tropicais de clima quente com temperaturas na faixa de 27 e 35°C	Pleno sol	(GURGEL, 2003;)
Grama Amendoim (Arachis pintoi) 	Brasil	20 a 50 cm	Perene	Desenvolve-se em regiões de climas quente e úmido com temperaturas na faixa de 25 a 35°C	Pleno sol e meia sombra	(FISHER, 1994, LIMA et al., 2003; LUDWIG et al., 2010)
Grama Brilhantina (Pilea microphylla) 	América Tropical	20 a 30 cm	Perene	Desenvolve-se em regiões Equatoriais, Subtropicais e Tropicais e clima quente e úmido	Pleno sol e meia sombra	(RODRIGUES et al., 2007; MOREIRA, 2011; Laar et al., 2001).
Grama Preta (Ophiopogon japonicus) 	Japão e China	20 a 30 cm	Perene	Desenvolve-se se desenvolver em regiões tropicais de clima quente com temperaturas na faixa de 27 e 35°C	Pleno sol e meia sombra	(LORENZI; SOUZA, 2008)

Quanto a Grama Brilhantina (*Pilea microphylla*) é uma planta herbácea perene, cujo comprimento está compreendido entre 9 e 18 cm. Apresenta boa capacidade de adaptação em solos pobres, sua folhagem tem coloração verde-clara, de tamanhos pequenos, ramagem densa, não necessitando de poda e apresentando boa capacidade em armazenar água (Laar et al., 2001).

2.1.3.3 *Camada de substrato*

O substrato é constituído por uma camada de solo, que dá sustentação às raízes das plantas, além de ter papel fundamental na absorção e retenção de água durante os eventos de chuva. O substrato também fornece água e nutrientes necessários para a manutenção da estrutura vegetal (Tassi et al., 2015). Esta camada do telhado verde constitui-se de três fases distintas: fase sólida, que garante a manutenção mecânica do sistema radicular e sua estabilidade; fase líquida, que garante o abastecimento de água e nutrientes às plantas; e a fase gasosa, que garante a troca de oxigênio e gás carbônico entre as raízes e a atmosfera, visando o crescimento saudável do vegetal. O substrato também funciona como uma camada filtrante de nitratos e de outras partículas poluentes presente na água da chuva, as quais podem ser arrastadas para o interior de rios e mares (Lemaire, 1995; Nagase e Dunnett, 2011).

Ao ser projetada, a camada de substrato deve apresentar alta capacidade de retenção de água e boas condições de condutividade. Quando o substrato encontra-se perto do seu estado de saturação hídrica, torna-se incapaz de atenuar o escoamento. Outro aspecto relevante é a condutividade térmica do substrato, pois quanto maior a sua umidade menor será sua condutividade térmica, essa redução térmica pode ser melhorada ao incluir uma camada de vegetação densa. Dessa forma, o comportamento do telhado verde depende fortemente de suas propriedades hidráulicas e térmicas (Sandoval et al., 2015).

O composto do substrato pode ser obtido por aditivos orgânicos ou minerais como turfa, húmus, areia, serragem ou barro. Esses aditivos apresentam bom potencial para retardar o escoamento superficial da chuva, podem melhorar a estabilidade estrutural do substrato e aumentam a capacidade de troca catiônica, reduzindo a lixiviação dos elementos, como potássio, cálcio e magnésio (Nagase e Dunnett, 2011; Vijayaraghavan e Joshi, 2015). Outra característica importante do substrato é em relação a sua espessura ou profundidade, visto que os resultados analisados por Calil et al. (2014) mostraram que a relação entre precipitação e escoamento superficial em telhados verdes é fortemente determinada pela profundidade da camada de substrato. Portanto, quanto mais profundo o substrato, maior será sua capacidade em reter água e menor será o escoamento superficial.

2.1.3.4 *Camada filtrante*

A camada filtrante encontra-se entre a camada de substrato e a camada de drenagem. É a camada responsável pela separação do substrato e pelo restante dos demais elementos adjacentes da cobertura verde. Ela impede o carregamento das partículas do solo/substrato como grãos de areia e silte, deixando passar apenas a água para o interior do elemento drenante, evitando a obstrução do sistema. As camadas de filtro mais utilizadas constituem-se de material conhecido como geotêxtil, feito de poliéster ou polipropileno. Esse material é resistente à degradação química e biológica, possui alta permeabilidade, elevada resistência mecânica e alta durabilidade (Chenani et al., 2015).

2.1.3.5 *Camada de drenagem*

A camada de drenagem do telhado verde tem como principal função: reter e drenar lentamente a água da chuva, garantindo o bom equilíbrio de aeração do substrato e das raízes do sistema do telhado verde. Essa camada de drenagem é composta por módulos pré-fabricados de plástico (placas, formas de plástico alveoladas ou recipientes com diversas capacidades hídricas), que também podem ser construídas basicamente dos seguintes itens: materiais granulares, argila expandida, minerais porosos e materiais reciclados de cerâmica (Pérez et al., 2012). Autores como Bianchini e Hewage (2012), afirmam, no entanto, que os materiais utilizados na fabricação de camadas de drenagens precisam ser substituídos por produtos mais sustentáveis, devido ao processo de fabricação dos polímeros, que liberam grandes quantidades de substâncias tóxicas.

Na busca pela sustentabilidade de telhados verdes alguns autores como: Pérez et al. (2012) e Rincón et al. (2014) corroboram uma importante visão a respeito do reaproveitamento de materiais recicláveis na construção de camadas de drenagem. Desse modo, pode ser verificado um menor custo na montagem do telhado verde, além de proporcionar uma solução sustentável para o problema dos resíduos.

2.1.3.6 *Camada de impermeabilização*

A camada de impermeabilização é indispensável na construção de telhados verdes, pois garante a estanqueidade do telhado convencional, impede o desenvolvimento das raízes e impede a passagem de vapores e umidade para o interior das edificações (Peck e Kuhn, 2003). O material mais utilizado para esse fim são os sistemas de impermeabilização flexíveis

(mantas asfálticas, mantas elastoméricas, geomembranas de Perfil de Policloreto de Vinila - PVC e geomembranas tipo manta de polietileno de alta densidade - PEAD).

A manta asfáltica é uma manta impermeabilizante indicada para aplicação sobre telhados, platibandas, lajes inclinadas e lajes planas expostas de pequenas dimensões, até 50 m², possui vantagem por ser facilmente moldada e instalada, pois apresenta menor peso e espessura. Quanto às mantas elastoméricas, são altamente resistentes ao acúmulo de água e funcionam como isolante térmico, pois tem grande resistência ao ozônio, radiação infravermelha e ultravioleta. Essas mantas, quando bem instaladas, resistem em média de 25 a 30 anos. Geomembranas Plásticas ou Poliméricas (PVC e PEAD) são materiais poliméricos de baixa condutividade hidráulica e espessura pequena (PVC de 1,0 e 2,0 mm, e o PEAD de 0,8 mm e 2,5 mm). Tem como função controlar a percolação e o fluxo de líquidos e, em alguns casos, de gases. São aplicadas em lagoas de tratamento de efluentes, reservatórios de água, base e cobertura de aterros sanitários e industriais, revestimento de coberturas verdes, entre outras. Apresentam alta resistência à tração, boa resistência química aos raios UV e temperatura, excelente flexibilidade e fácil instalação (Lodi et al, 2009).

2.1.4 Eficiência Hidrológica

A retenção da água da chuva por telhados verdes, segundo Getter e Rowe (2006), depende de fatores como a profundidade do substrato, a composição e o tipo de espécies de plantas, bem como fatores climáticos, tais como, intensidade e duração das chuvas. Liu (2003) verificou que o telhado verde ajuda a diminuir a erosão do solo ao retardar o escoamento superficial de intensidade de 2,8 mm/h para 0,5 mm/h. Bacovis e Nagalli (2013) avaliaram o desempenho hidrológico de um telhado verde extensivo em comparação às coberturas convencionais (telhas de fibrocimento, de cerâmica, aço galvanizado e lajes impermeáveis). Os protótipos foram submetidos a testes hidrológicos com simulações de chuva de 43,6 mm com tempo de duração de 16 minutos. Os resultados mostraram que a capacidade de retenção de água pluvial pelo telhado verde varia em função da condição de saturação do mesmo, com evidente atenuação dos picos de cheias.

Karteris et al. (2016) avaliaram os benefícios do telhado verde em grande escala na segunda maior cidade da Grécia, Thessaloniki, utilizando a modelagem ambiental, por meio de dados de sensoriamento remoto com imagens de alta resolução, e verificaram que 17% das áreas tem potencial para implantação de telhados verdes. Os resultados mostraram que a retenção de água pluvial pode chegar a 45%, além disso, a redução da temperatura e do consumo de energia dos edifícios foi correspondente a 5% e 16% respectivamente. Na

Dinamarca, os autores Locatelli et al. (2014) verificaram um retardo na vazão de pico de até 40 mm em telhados verdes. Eles utilizaram um modelo conceitual “chuva-vazão” determinístico e por meio de simulações de eventos individuais de chuva, em função do período de retorno, observaram uma redução do escoamento médio anual de 20% comparado ao telhado tradicional.

Fassman-Beck et al. (2013) avaliaram o desempenho hidrológico de quatro telhados verdes extensivos em Auckland, Nova Zelândia, região de clima subtropical. Resultados de até 56% de retenção acumulada foram medidos em substratos de 50 a 150 mm de espessura e camada de retenção sintética. Em Seul, Coreia do Sul, Lee et al. (2015) encontraram valores 42.8% a 60.8% de retenção da água a chuva em telhados extensivos de 200 mm de espessura e 13.8% a 34.4% em telhados extensivos de 150 mm de espessura. Utilizando a correlação de Spearman identificaram que os telhados verdes não retém eficientemente a água da chuva em precipitações pluviométricas intensas.

Santos et al. (2013) realizaram uma simulação do escoamento da água em dois telhados verdes, com o emprego do código computacional Hydrus-1D, para diferentes intensidades de precipitação. A partir da análise dos hidrogramas, os pesquisadores obtiveram resultados positivos e puderam concluir que os telhados verdes constituem importantes dispositivos no amortecimento do escoamento superficial oriundo dos telhados, para as condições climáticas da área investigada (Caruaru-PE). Tassi et al. (2014) conduziram um estudo de longo prazo sobre a eficiência de um telhado verde no controle quantitativo do escoamento pluvial, baseando-se em técnicas de monitoramento e modelagem. A contribuição da pesquisa, comparada aos estudos já desenvolvidos no Sul do Brasil, foi que o período de monitoramento de 17 meses permitiu captar a variabilidade climática das estações. Comparativamente ao telhado convencional foi possível reduzir em média 62% dos volumes escoados superficialmente com a utilização do telhado verde. Além disso, houve um retardo no início do escoamento superficial.

A equipe de Ohnuma Jr. et al. (2014) desenvolveu uma pesquisa em São Carlos-SP que consistiu em uma análise comparativa de reservação aplicada em telhados verdes. Foi verificada uma eficiência de até 56% no armazenamento obtido em comparação com um telhado do tipo convencional, com a consequente capacidade de retardar o escoamento superficial. Os pesquisadores destacaram a importância de aprofundar as pesquisas a partir de simulações do telhado verde em áreas maiores, com diferentes inclinações e análise de

experimento com aplicação para o aproveitamento da água da chuva proveniente da cobertura verde.

Watrin, Blanco e Gonçalves (2019) desenvolveram uma pesquisa experimental em que analisaram o desempenho hidrológico de dois tipos de telhado verde, com camadas de retenção diferenciadas. Ambos os telhados apresentaram bons índices de retenção de água pluvial, de 37% à 95%, que variaram de acordo com o volume de chuva e com a umidade antecedente do solo.

2.1.5 Eficiência térmica

O conforto térmico é influenciado por parâmetros que podem ser classificados em duas categorias: ambientais e individuais. Os parâmetros ambientais são definidos pelas condições climáticas: temperatura do ar, temperatura radiante média, umidade relativa e velocidade do ar. Os individuais consistem basicamente na energia do metabolismo, que depende da atividade desenvolvida e da vestimenta (Frota e Schiffer, 2001). Sob o aspecto dos fatores ambientais, o conforto térmico de ambientes construídos é determinado pela temperatura, pela umidade, pela velocidade do ar e pela temperatura das superfícies envoltórias. Neste contexto, a interferência da cobertura para o conforto ambiental está diretamente relacionada com a sua temperatura. Por ser uma superfície envoltória horizontal, com incidência solar praticamente em tempo integral, a cobertura é o principal responsável pelo ganho e transmissão de calor para os ambientes construídos (Vecchia, 2005). Portanto, para efeito do controle térmico, soluções que reduzam as transferências de calor pela cobertura devem ser valorizadas.

Vários estudos analisaram o desempenho térmico de coberturas vegetadas (telhados verdes) em diferentes regiões do mundo (Berardi et al., 2014). Nestes estudos podemos observar alguns fenômenos: o solo funciona como um isolante térmico, com amortecimento e atraso na transferência de calor; as folhas se comportam como um dispositivo de sombreamento sob o qual a convecção provoca a troca térmica de calor, além disso, a planta absorve parte da energia térmica para o seu processo de fotossíntese; as camadas de solo e a vegetação induzem o resfriamento por evaporação e evapotranspiração (Rosenzweig et al., 2005; Xie et al., 2005). A Figura 3 mostra detalhadamente os principais fenômenos térmicos que acontecem em um telhado verde.

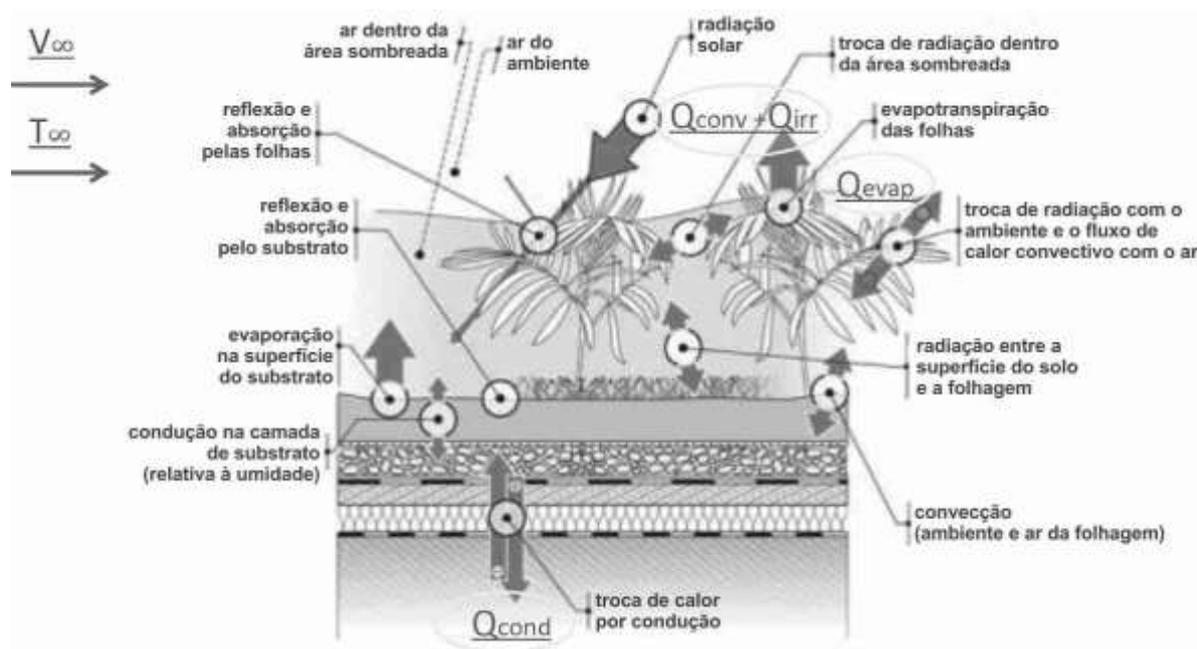


Figura 3: Transferência de calor em telhados verdes

Fonte: Adaptado de Berardi et al. (2014)

Em média, os telhados verdes refletem entre 20% e 30% da radiação solar e absorvem até 60% através da fotossíntese. Isto significa que menos de 20% do calor é transferido para o substrato. Segundo Minke (2004), o telhado verde pode absorver até 90% da energia solar dependendo das condições locais e do tipo de vegetação. Perussi e Vecchia (2017) observaram um atraso térmico entre a cobertura vegetal e os sistemas tradicionais de cobertura no Brasil de aproximadamente 4 horas, acompanhado de um amortecimento térmico de cerca de 8°C. Marinho (2013) identificou uma redução de até 23,44°C na superfície externa da laje e de até 2,53°C da temperatura do ar interior em dia de temperatura do ar exterior mais elevada. Watrin, Blanco e Gonçalves (2019), identificaram um amortecimento térmico de até 8,7°C acompanhado de um atraso térmico de duas horas. Como o telhado verde exerce a função de isolante térmico, seu potencial para reduzir a temperatura ambiente está diretamente relacionado à resistência térmica da cobertura. Se o telhado verde estiver sobre uma cobertura com estrutura de bom isolamento térmico (material, espessura) ele poderá ter pouca ou nenhuma contribuição na redução da temperatura do ambiente interno.

2.1.6 Políticas públicas para telhados verdes

Diante de tantos benefícios ambientais, econômicos e estéticos proporcionados pelo telhado verde, alguns países têm encorajado construções de edifícios com tecnologia verde

(Zheng et al., 2010). O exemplo disso é a cidade de Tóquio, onde é exigido por meio de políticas públicas, que prédios privados com área construída acima de 1000 m² e prédios públicos a partir de 250 m², tenham telhados verdes em pelo menos 20% da área superficial da cobertura (Brenneisen, 2002). Em países como Alemanha, Austrália, Suíça, Canadá, Áustria, Grã-Bretanha, Hungria, Holanda e Suécia, os proprietários recebem descontos nas contas de água ou luz como incentivo na construção de telhados verdes (Berardi et al., 2014).

Na conferência da ONU, Rio+20, o conselho Brasileiro de Construção Sustentável – CBCS apresentou a “Plataforma Global de Avaliação do Ciclo de Vida Simplificado para Construção Sustentável”. Nesse encontro foi discutida a importância das políticas públicas em virtude dos benefícios proporcionados pelo telhado verde ao meio ambiente. Desse modo, os municípios brasileiros têm como agenda estimular, por meio de leis de incentivo como o “IPTU Ecológico ou Verde”, a concessão de desconto no imposto para imóveis que estejam recobertos por estruturas verdes (Ribeiro e Castro, 2014).

Partindo desse princípio, o chamado “IPTU verde” já tem mobilizado vários municípios no Brasil a adotarem medidas sustentáveis que estimulem a proteção, preservação e recuperação do meio ambiente como, por exemplo, no incentivo a construções com materiais sustentáveis, instalações de telhados verdes, construções de calçadas ecológicas, sistema de reuso de água etc.

Alguns municípios já promovem o IPTU verde, são eles: São Vicente (SP), Seropédica (RJ), Camboriú (SC), Salvador (BA) e Goiânia (GO). O IPTU verde é um instrumento inserido no contexto de benefícios fiscais de suma importância para que se tenha uma gestão municipal que possa efetivar o desenvolvimento sustentável. Porém, é notável que muito ainda precise ser feito, pois se compararmos as cidades que já adotaram as construções sustentáveis ao resto do Brasil é perceptível a necessidade de mais incentivos que estimulem o comportamento do contribuinte para a proteção ambiental das cidades (Dantas, 2014).

Outro instrumento regulamentado pela prefeitura de São Paulo em 2016 foi a Quota Ambiental (QA), que surgiu como um novo parâmetro urbanístico de uso e ocupação do solo. Ela foi idealizada como alternativa para reversão dos problemas ambientais presentes na capital, dentre eles a drenagem urbana ineficiente e as ilhas de calor. A QA consiste num conjunto de regras de uso e ocupação do solo, compartilhando a responsabilidade da melhoria da qualidade ambiental para a escala de lote. Segundo o texto da lei, a função da quota ambiental e da taxa de permeabilidade mínima é “promover a qualificação ambiental, em especial a melhoria da retenção e infiltração da água nos lotes, a melhoria do microclima e a

ampliação da vegetação” (Lei nº 16.402, de 22 de março de 2016, pg.1). Atualmente as regras incidem em novas construções e reformas (CBCS, 2016).

Art. 74. A quota ambiental (QA) corresponde a um conjunto de regras de ocupação dos lotes objetivando qualificá-los ambientalmente, tendo como referência uma medida da eficácia ambiental para cada lote, expressa por um índice que agrega os indicadores Cobertura Vegetal (V) e Drenagem (D). (Lei nº 16.402, de 22 de março de 2016, pg.5)

O diferencial proposto pela quota ambiental é que o cálculo é influenciado por áreas vegetadas de todos os pavimentos e não apenas do pavimento térreo, incluindo-se áreas vegetadas verticais e inclinadas (paredes e telhados verdes) e pelo uso de reservatórios de retenção (Figura 4). O cálculo é feito a partir da Equação 1:

$$QA = V^{\alpha} \times D^{\beta} \quad (1)$$

Onde:

V = indicador de cobertura vegetal, calculado a partir do Quadro 3B da Lei nº 16.402 (Anexo A);

D = indicador de drenagem, calculado a partir do Quadro 3B da Lei nº 16.402 (Anexo A);

α e β = fatores de ponderação definidos pela lei e apresentados no quadro 3A da Lei nº 16.402 (Anexo A).

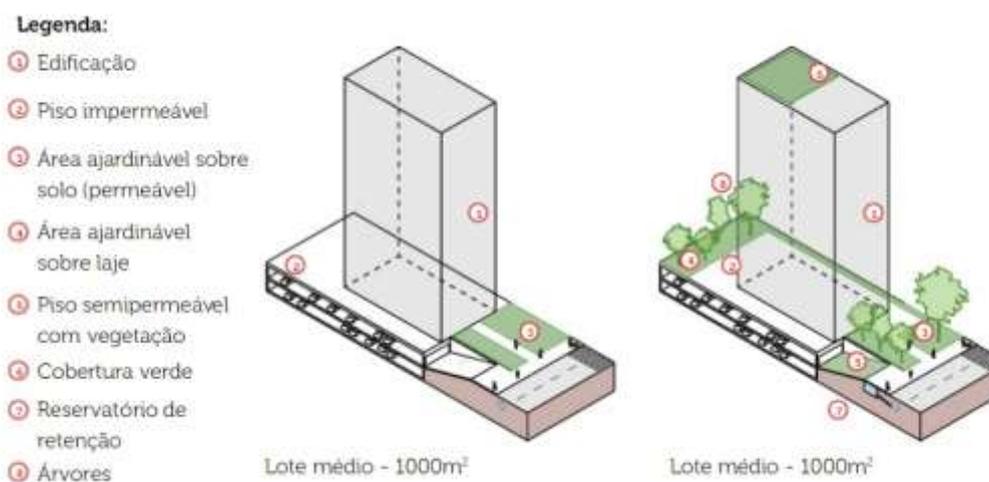


Figura 4: Exemplo de aplicação da Quota Ambiental.

Fonte: (Ecotelhado, 2018)

2.2 MODELOS HIDROLÓGICOS

A modelagem hidrológica é uma ferramenta de conhecimento científico que requer conhecimento de métodos matemáticos e dos processos físicos do ciclo hidrológico. Para Santos (2009) a modelagem hidrológica ajuda a compreender e representar o funcionamento das bacias hidrográficas e simular diferentes cenários e auxilia a tomar decisões a respeito da gestão dos recursos hídricos. De acordo com Filho et al. (2012), os modelos hidrológicos são capazes de reproduzir os fenômenos hídricos dentro de uma escala de tempo definida, estimando componentes de fluxo hidrológico, anteriormente desconhecidos ou não quantificados. Conforme Tucci (2012) o modelo hidrológico é uma ferramenta que permite equacionar, entender, representar processos, simular o comportamento de uma bacia hidrográfica e prever as consequências das diferentes ocorrências em relação aos valores observados.

No intuito de estimar o escoamento superficial e a capacidade de retenção de água em telhados verdes, vários trabalhos têm aplicado modelos hidrológicos como ferramentas de subsidio para compreender o impacto do telhado verde sobre o escoamento superficial em grandes centros urbanos. Dentre eles podem-se destacar diversas referências como e Mentens et al. (2006); Carter e Jackson (2007); Santos et al. (2013); Calil et al. (2014); Neto e Tassi (2014); Tassi et al. (2015) e Silva et al. (2015).

Em pesquisa realizada por Mentens et al. (2006) foi proposto um modelo de balanço hídrico, em que os autores não consideram apenas características climáticas, mais também a orientação e a inclinação do telhado. Os resultados iniciais indicaram que a taxa de evaporação é fortemente determinada pela orientação e inclinação do telhado verde. Isso demonstra a necessidade de considerar essas variáveis como essenciais ao modelo de balanço hídrico.

Carter e Jackson (2007) com uso da modelagem hidrológica analisaram o impacto do telhado verde em diferentes escalas de bacia hidrográfica em Athens nos Estados Unidos. A bacia foi modelada pelo software StormNet Builder, que utiliza o modelo Storm Water Management Model - SWMM, como mecanismo de análise. A infiltração e a propagação do escoamento foram realizadas pelo método do CN-SCS e da onda cinemática, devido sua simplicidade e a necessidade de poucos dados de entrada. A análise espacial na bacia demonstrou que, com a implantação dos telhados verdes, a vazão de pico poderia ser reduzida em até 26%, principalmente para eventos de chuva de pouca intensidade.

Santos et al. (2013) realizaram uma simulação do escoamento da água para diferentes intensidades de precipitação em dois telhados verdes, comportando dois tipos diferentes de

vegetação (cacto e grama). Utilizaram o software Hydrus-1D, visando verificar o desempenho desse sistema construtivo na redução do escoamento superficial. O coeficiente de determinação (R^2) obtido com a simulação da chuva de maior intensidade em ambos os telhados foi de 0,95 para o telhado com grama e 0,92 para o telhado com cacto. Para chuvas de menor intensidade, o coeficiente variou de 0,74 a 0,77 respectivamente para o telhado de grama e cacto, deixando evidente a influência dos tipos de vegetação e da espessura do substrato no desempenho hidrológico dos telhados verdes.

Calil et al. (2014) verificaram a redução do escoamento superficial em áreas urbanas quando o telhado verde é utilizado em grande escala, na cidade de Arroio Esperança, em Santa Maria-RS. Por meio de simulações e do uso do método racional, a vazão de pico foi estimada. Os resultados mostram uma redução de 35,4% no escoamento superficial da microbacia urbana. O coeficiente médio de deflúvio da bacia com telhado verde passou de 0,53 para 0,35 e a espessura de 20 cm de solo utilizado na simulação como substrato do telhado verde, pôde reter até 58,61 mm de água da precipitação pluviométrica.

Neto e Tassi (2014) estudaram a resposta hidrológica de telhados verdes em pequena escala por meio da modelagem hidrológica de telhados verdes a partir do emprego de um modelo de onda cinemática pelo método da Curva-Número do SCS. As simulações hidrológicas ocorreram em um quarteirão de uma bacia hidrográfica urbana, em que onze eventos de chuva foram contabilizados, considerando as edificações com e sem telhados verdes, no intuito de avaliar a redução do escoamento pluvial. Os resultados obtidos mostram que a redução do escoamento pluvial foi em até 75% em escala de lote, porém para eventos chuvosos de grande volume, esta efetividade diminuiu sensivelmente.

Tassi et al. (2015) ao analisarem o controle do escoamento pluvial pelo hidrograma unitário sintético do SCS (HU-SCS), obtiveram um coeficiente de Nash-Sutcliffe de (0,67) para onda cinemática (OC) e HU-SCS. Mediante o resultado não satisfatório, foi desenvolvido um modelo de propagação baseado na metodologia do HU-SCS, chamado de hidrograma unitário sintético de TV modular (HUS-TVM), sugerindo-se alterações em alguns dos seus parâmetros. O HUS-TVM produziu resultados satisfatórios, pois o coeficiente de Nash-Sutcliffe melhorou (0,86). As reduções de volume e vazão de pico na bacia de menor escala foram de 48 e 57%, respectivamente.

Silva et al. (2015) investigaram a capacidade de retenção de água em um telhado verde sob as condições climáticas do semiárido pernambucano. Para determinar essa capacidade, foi aplicado um modelo de balanço hídrico para telhado verde, que consiste em ($P = Q_{saída} + \Delta V$). Em que a entrada no sistema é a precipitação (P) e as saídas são: O escoamento ($Q_{saída}$)

e variação de volume de água armazenada no substrato (ΔV). O telhado verde analisado pelo modelo de balanço hídrico apresentou boa capacidade de retenção, chegando ao valor 98% de retenção do volume precipitado no telhado.

Tassi et al. (2014) usaram um modelo matemático de balanço hídrico simplificado, que teve como objetivo identificar os volumes máximos armazenados na cobertura verde em cada um dos eventos de chuva e verificaram sua eficiência no controle quantitativo do escoamento pluvial. O modelo de balanço de volumes foi calibrado para uma série diária de dados de 6 anos totalizando 269 eventos simulados, obtendo um coeficiente de determinação de 84%. O modelo obteve uma boa eficiência no controle do escoamento superficial, pois para esses eventos foi possível uma redução média dos volumes escoados de aproximadamente 75%; e a capacidade média de armazenamento de água no telhado verde foi de 12,1 mm/m², resultando em um volume de água retido de aproximadamente 73 litros.

2.2.1 MODELOS EMPÍRICOS

2.2.1.1 Método Racional

O Método Racional parte do princípio básico de que a duração da precipitação máxima é igual ao tempo de concentração da bacia em estudo, é um método bastante utilizado pela simplicidade e necessidade de poucos parâmetros no dimensionamento de pequenos sistemas de drenagens pluviais (Garotti e Barbassa, 2010). No Brasil é bastante aplicado em projetos de sistemas de drenagem urbana, mas é preciso cautela no uso do método devido suas limitações, visto que a imprecisão do método será maior quanto maior for a área da bacia, sua aplicação é recomendada para áreas inferiores a 200 hectares. O método não considera o efeito do armazenamento ou retenção temporária nas superfícies, considera o coeficiente de escoamento superficial constante, supõe que a vazão calculada tem a mesma frequência da precipitação que a gerou (Porto, 1987). A vazão de pico pode ser obtida pela (Equação 2)

$$Q_p = \frac{C.I.A}{360} \quad (2)$$

Em que:

Q_p = Vazão de Pico (m³/s);

C = Coeficiente de escoamento superficial (-);

I = Intensidade média da chuva (mm/h);

A = Área de drenagem da bacia (ha);

360 = ajuste de unidade para valores de intensidade em mm/h.

O parâmetro mais importante do método racional é o coeficiente de escoamento superficial (C), que reflete as características da chuva, o grau de impermeabilização, declividade do terreno e umidade antecedentes da bacia (Porto, 1987). O cálculo do coeficiente C em um telhado verde é dado pela relação entre o escoamento superficial e a precipitação total incidente, ou seja, é a quantidade de água gerada pelo sistema telhado verde em eventos chuvosos, os valores de C variam entre 0 e 1, sendo que quanto mais próximo de zero mais eficiente a retenção das águas pluviais no sistema de telhado verde, e quanto mais próximo de um, menos eficiente é essa retenção (Blume et al., 2007).

2.2.1.2 Método da Curva Número - CN (SCS)

Método da Curva Número - CN (SCS) foi desenvolvido em 1956 pelo United States Department of Agriculture Soil Conservation Service (USDA SCS), atual Natural Resources Conservation Service (NRCS) (SCS, 1972). O método simula a transformação da chuva em escoamento superficial também conhecido como precipitação efetiva (Equação 3), definida como parte da precipitação que se transforma em escoamento superficial (Q), sendo assim o escoamento é resultado da precipitação menos as perdas hidrológicas ou iniciais (infiltração, armazenamento por interceptação, retenções por depressões do terreno, evaporação e evapotranspiração) (Ponce e Hawkins, 1996).

$$Q = \frac{(P - 0,2.S)^2}{P + 0,8.S} \quad (3)$$

Em que:

P (mm) = precipitação total;

S (-) = indica o potencial de infiltração ou a retenção potencial máxima do solo.

A Equação 3 só é válida para $P > 0,2.S$, caracterizando a formação de escoamento superficial (Q), caso contrário, se $P = 0,2.S$, $Q = 0$, ou seja, o escoamento superficial é nulo. Isto porque, $0,2.S$ consiste nas perdas principalmente por interceptação, infiltração e retenção superficial. Para se determinar o valor de S , foi utilizada a Equação 4, que relaciona o parâmetro S com um fator CN, que é um fator referente ao uso do solo.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (4)$$

Ponce e Hawkins (1996) sugerem que a fixação da taxa de perdas iniciais de 20% da retenção potencial máxima, pode não ser um valor adequado e que deve ser tratado como um valor regional e climático. Vários autores como Mishra et al. (2004); Mishra et al. (2005); Baltas et al. (2007); Shi et al. (2009) e Yuan et al. (2013) realizaram estudos a respeito do refinamento das perdas iniciais e concluíram que os valores entre 0 a 0,5 são factíveis para diferentes bacias hidrográficas no mundo.

No Método do SCS, o parâmetro que caracteriza o tipo de solo com sua capacidade de drenagem é o CN (Curva-Número). O valor de CN (Equação 4) varia em uma escala de 1 a 100 e é adimensional, quanto mais o solo é impermeável maior será o valor de CN e menor será a retenção da chuva (S) (Melesse; Shih, 2002; Tassi et al., 2014). Segundo Cunha et al. (2014), os cálculos de escoamento superficial a partir de CNs obtidos pelas tabelas do SCS tendem a superestimar o volume escoado, principalmente para eventos de maior magnitude. Por isso alguns pesquisadores como Carter e Rasmussen (2007) estimaram o valor do CN de um telhado verde na Geórgia em 88. Getter e Rowe (2006) calcularam o CN em (84, 87, 89, e 90) para diferentes inclinações (2%, 7%, 15% e 25%) em telhados verdes nos EUA. Lorenzini Neto et al. (2013) calibraram o valor de CN para telhado verde no sul do Brasil em 83. Todos estes números estimados por diferentes autores em diferentes localidades são menores do que o CN do telhado convencional de 98 tabelado pelo SCS. Dessa forma, os autores sugerem que o parâmetro CN deve ser estimado de acordo com as características do telhado verde.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 LOCALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO

O telhado verde experimental foi construído nas dependências do Campus Universitário da UFPA, localizado às adjacências do prédio de Grupo de Estudos e Alternativas Energéticas – GEDAE. O campus universitário da UFPA (Figura 5) encontra-se na cidade de Belém e está situado às margens do rio Guamá a aproximadamente 120 km do Oceano Atlântico.

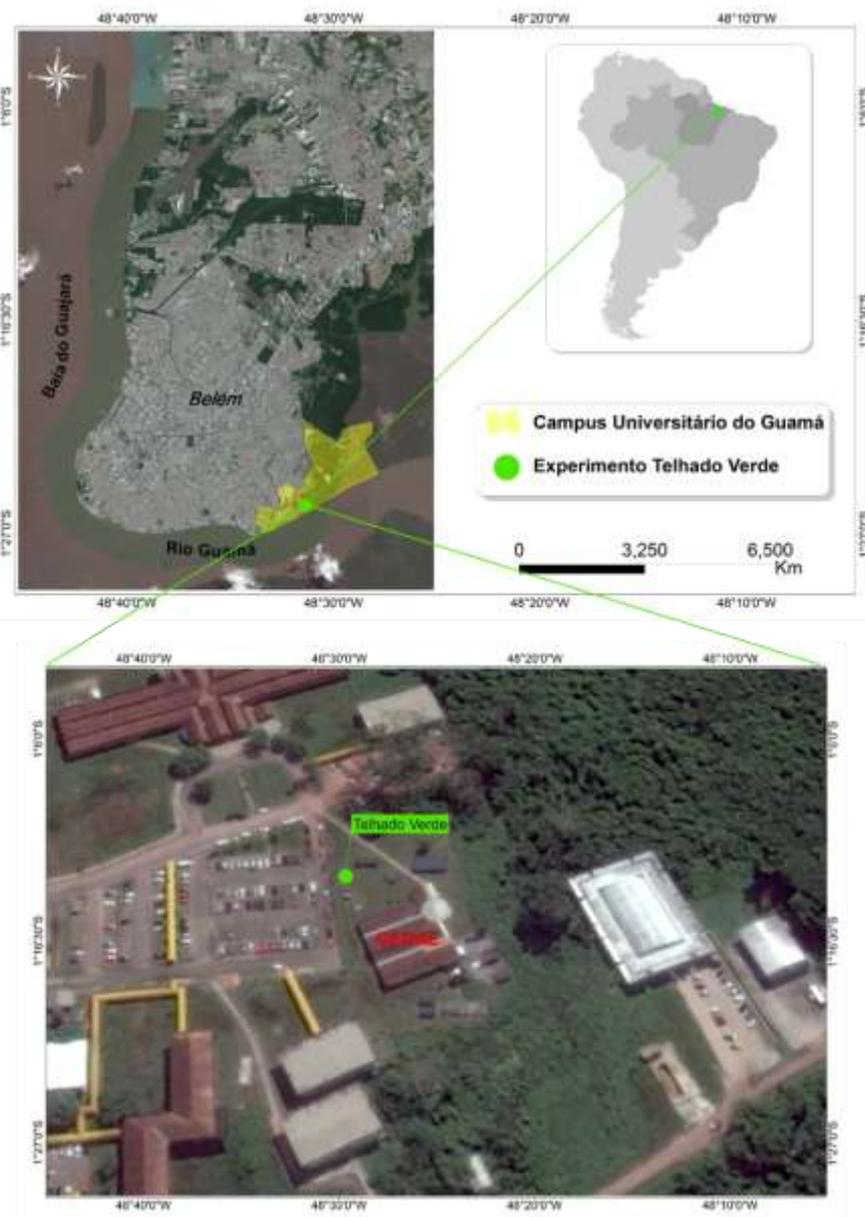


Figura 5: Localização do Telhado Verde Experimental.

Segundo a classificação de Köppen (Alvares et al., 2013), o clima da cidade de Belém é do tipo *Am*, caracterizado pelo elevado índice pluviométrico anual e por apresentar pequeno

período seco. As chuvas são distribuídas em duas épocas distintas (Figura 6). O período chuvoso tem início em novembro/dezembro, estende-se até maio/junho, enquanto que, o período de menor precipitação ocorre durante os demais meses do ano. Os meses de abril e outubro são meses de transição entre um regime e outro (Silva Júnior et al., 2013).

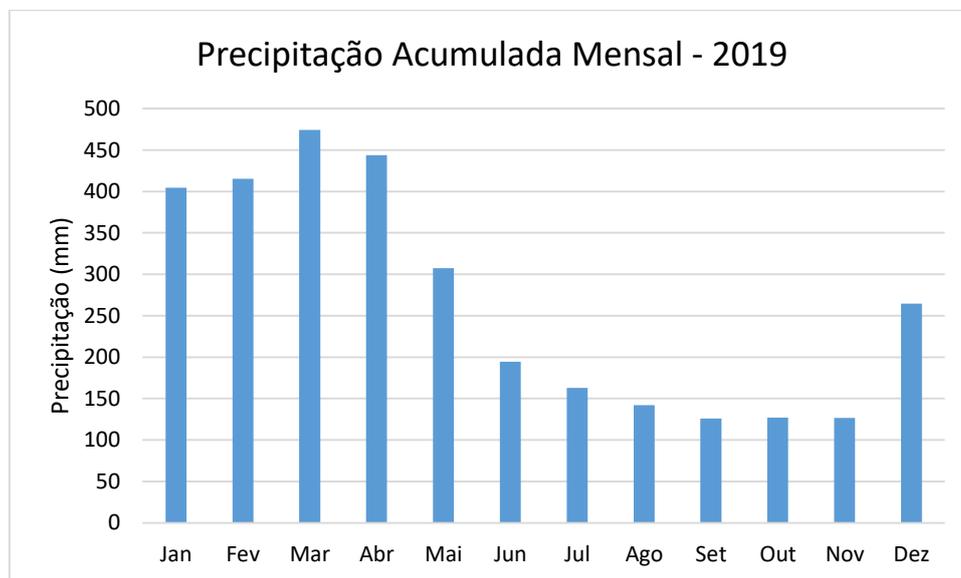


Figura 6: Precipitação acumulada mensal para o ano de 2019.

Fonte: INMET (2020).

O estudo de uso do solo realizado por (Luz et al., 2014), em bacias hidrográficas da Região Metropolitana de Belém – RMB mostra predominâncias de 70% da área para edificações e vias pavimentadas, 1% para rios e lagos e menos de 30% para coberturas vegetais. Essa ausência da cobertura vegetal prejudica a capacidade de interceptação, infiltração, evapotranspiração, aumentando o escoamento da água na forma concentrada, gerando o aumento da magnitude e da frequência das enchentes urbanas na RMB (Botelho, 2011).

Embora as baixadas sejam formas naturais integrantes do sítio urbano da cidade de Belém, elas são sujeitas às inundações decorrentes dos efeitos das marés, que podem alcançar até 4 m nas marés de sizígia e que ocorrem nos meses de março/abril todos os anos. Portanto, essas formas naturais associadas às predominâncias de áreas pavimentadas e edificadas aumentam consideravelmente a ocorrência de enchentes na cidade de Belém.

3.2 ELABORAÇÃO E MONTAGEM DO EXPERIMENTO

O protótipo do experimento foi projetado em estrutura única de madeira suportando três telhados independentes com 1 m² de área cada um (Figura 7). As telhas especificadas para o experimento foram as de fibrocimento, por aceitarem uma inclinação ($i = 5^\circ$) menor do que as tradicionais telhas cerâmicas, ao mesmo tempo em que apresentam baixa inércia térmica e baixa refletância (Abreu et al., 2011), uma das piores condições de cobertura térmica.

Para cada trecho de telhado foi previsto um sistema de coleta e armazenamento de água pluvial escoada, composto por calhas em PVC que conduzem a água para os reservatórios (bombonas plásticas translúcidas e graduadas) com capacidade para armazenar 50 litros cada um. A solução definida para o monitoramento visual do experimento foi a partir da utilização de três câmeras frontais conectadas a um sistema do tipo DVR, que armazena os dados em arquivos de vídeo, permitindo monitorar o experimento em tempo integral.

O sistema de monitoramento da temperatura de superfície interna dos telhados foi projetado com a utilização de três sensores de temperatura do tipo termo resistência PT 1000, que possuem maior precisão que os sensores termopar tipo K, posicionados no centro de cada telhado e imediatamente abaixo das telhas de fibrocimento. Para o armazenamento dos dados de temperatura, previu-se o uso de um sistema de aquisição de dados (datalogger) montado com Arduino e cartão SD, gravando dados em intervalos de 5 em 5 minutos, compatível com os dados da estação climatológica utilizada, HOBO U30.

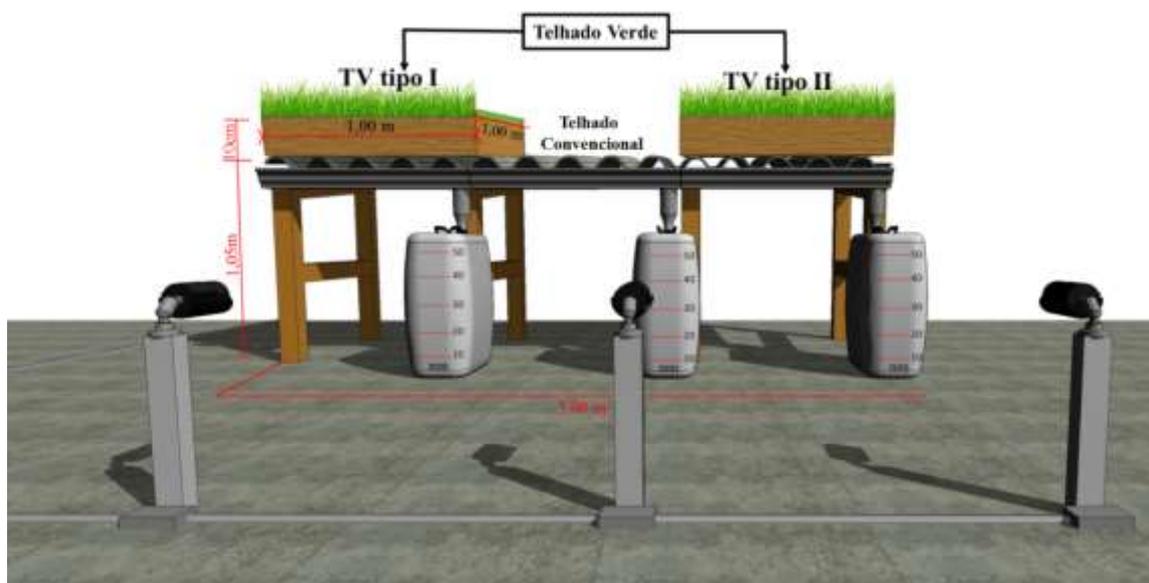


Figura 7: Desenho Esquemático do Telhado Verde Experimental.

Os telhados verdes receberam tratamento impermeabilizante sobre as telhas de fibrocimento com aplicação de manta asfáltica aluminizada autoadesiva (Figura 8), por ser um material de fácil aplicação e alta durabilidade. O telhado verde tipo I recebeu uma camada de drenagem montada a partir de fundos de garrafas PET arranjadas lado a lado (Figura 9), o quantitativo necessário para 1 m² de telhado foi de 100 fundos de garrafas, com altura de 4 cm e com capacidade de armazenar até 21 litros de água por metro quadrado. O telhado verde tipo II recebeu uma camada de drenagem composta de módulos pré-fabricados, denominados camada de drenagem Alveolar Leve, que segundo o fabricante armazenam até 35 litros de água por metro quadrado (Figura 10). A função deste tipo de camada drenante é realizar a drenagem controlada, a retenção de água para as raízes da vegetação e evitar o contato direto da vegetação com lajes ou telhas.



Figura 8: Manta impermeabilizante asfáltica.



Figura 9: Camada de drenagem elaborada com PET.



Figura 10: Camada de drenagem alveolar leve.

Sobre a camada de drenagem foi colocada a camada filtrante, também conhecida como Manta Geotêxtil ou Manta de Bidim (Figura 11). Acima da camada filtrante, foi sobreposta uma camada de 6 cm de substrato comercial Biomix (Figura 12). Trata-se de um substrato que concentra macros e micros nutrientes essenciais à vida vegetal, em sua composição apresentam-se: turfa, casca de pinos, vermiculita, resíduo orgânico classe A, serragem e esterco compostado. Optou-se pelo uso do substrato comercial pelo controle e padronização da composição.



Figura 11: Camada filtrante manta geotêxtil.



Figura 12: Camada de Substrato Biomix.



Figura 13: Camada com grama Esmeralda.

A Grama Esmeralda (*Zoysia japonica Steud*) foi a grama escolhida na implantação do protótipo telhado verde, pois para proposta de um telhado extensivo, essa grama mostra-se melhor adaptada ao clima tropical, requer pouca irrigação, é resistente a doenças e ervas daninhas. Forma uma grama densa (Figura 13), apresentando ótima relação custo-benefício e baixo custo com manutenção. Por fim, o protótipo foi elaborado como projetado e implantado com inclinação do escoamento voltada para direção Norte. (Figuras 14 e 15).



Figura 14: Vista frontal do experimento.

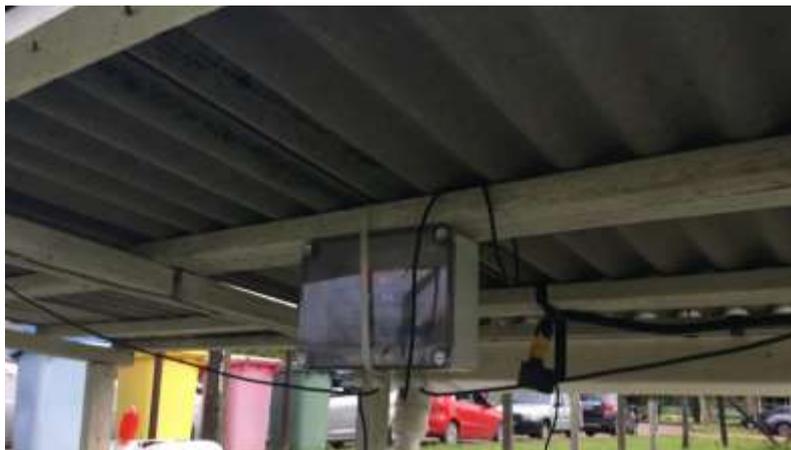


Figura 15 Sensores de temperatura e datalogger instalados

3.3 MONITORAMENTO

O experimento foi monitorado 24 horas por dia no período de setembro de 2017 a julho de 2018 por um sistema de câmeras filmadoras conectadas a um aparelho DVR e por um sistema de sensores térmicos conectados a um datalogger. Considerando que em cada evento de precipitação é gerado um escoamento, os dados foram aferidos por evento. O escoamento excedente medido foi o resultado da chuva total incidente, excetuando-se a parcela da chuva retida no sistema do telhado verde: água interceptada pela grama, água armazenada pelo substrato e água armazenada pela camada de drenagem. Assim, o escoamento excedente foi conduzido e armazenado em reservatórios (bombonas translúcidas), onde a altura da lâmina d'água foi verificada visualmente.

3.4 ANÁLISE DOS DADOS MONITORADOS

3.4.1 Térmicos

Foram selecionados os dias de maior e de menor incidência solar para o período monitorado, observando o impacto da incidência solar global na temperatura das superfícies. Tanto os dados da estação climatológica quanto os dados aferidos no experimento foram utilizados na mesma escala em que foram medidos. Variáveis de temperatura ambiente externa, temperatura da superfície do telhado e chuva foram comparadas.

3.4.2 Hidrológicos

A partir das leituras das alturas das lâminas de água do sistema de coleta/armazenamento do experimento, num intervalo de cinco minutos, foram calculados os escoamentos em litro por minuto. A análise comparativa dos hidrogramas dos telhados (verde

x fibrocimento) permitiu determinar o desempenho hidrológico nos aspectos de redução e de retardamento do escoamento superficial.

Para verificar a eficiência do telhado verde, é imperativo considerar a influência da umidade antecedente do solo (AMC). Neste trabalho foi utilizada a classificação AMC do método do SCS-CN (Service, 1972), que avalia o volume de chuva para 5 dias que antecedem o evento chuvoso monitorado, dividindo a condição de umidade antecedente do solo em três diferentes classes AMC (I, II e III):

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

A AMC também foi considerada para a calibração do CN (número de escoamento) determinado através do método do SCS discutido previamente. Nesse caso, como critério de eficiência da calibração do CN foi utilizado o coeficiente de Nash-Sutcliffe (R^2 - Equação 5), o qual é calculado entre as vazões observadas e simuladas.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{si})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - \bar{Q})^2} \quad (5)$$

Sendo Q_{oi} , e Q_{si} vazões observadas e simuladas no tempo i ; \bar{Q} a vazão média observada; e n o número total de observações.

3.4.3 Desempenho Térmico x Desempenho Hidrológico

Dados de redução de temperatura e chuva total incidida sobre os telhados verdes foram plotados e correlacionados, buscando uma relação linear entre essas duas variáveis. Essa informação é de suma importância, pois medir chuvas totais é mais barato e menos dificultoso que monitorar as temperaturas internas ao telhado verde. Assim, podem-se estimar dados de

temperatura superficial apenas com dados de chuva, os quais no método CN (CSC) são dados de entrada para simulação do volume escoado nos telhados verdes. Esses telhados tiveram seus CN calibrados através dos dados experimentais de chuva e volume escoado. Os dados de chuva são mais abundantes quando comparados os dados de temperatura, ou seja, assim, reduções de temperatura podem ser estimadas através de medidas de chuva. Essa redução de temperatura aumentaria o conforto térmico das edificações, inclusive, proporcionando, redução do consumo de energia para climatização de ambientes, climatização essa, quase que constante na região amazônica.

Na Figura 16 estão os procedimentos metodológicos da pesquisa.

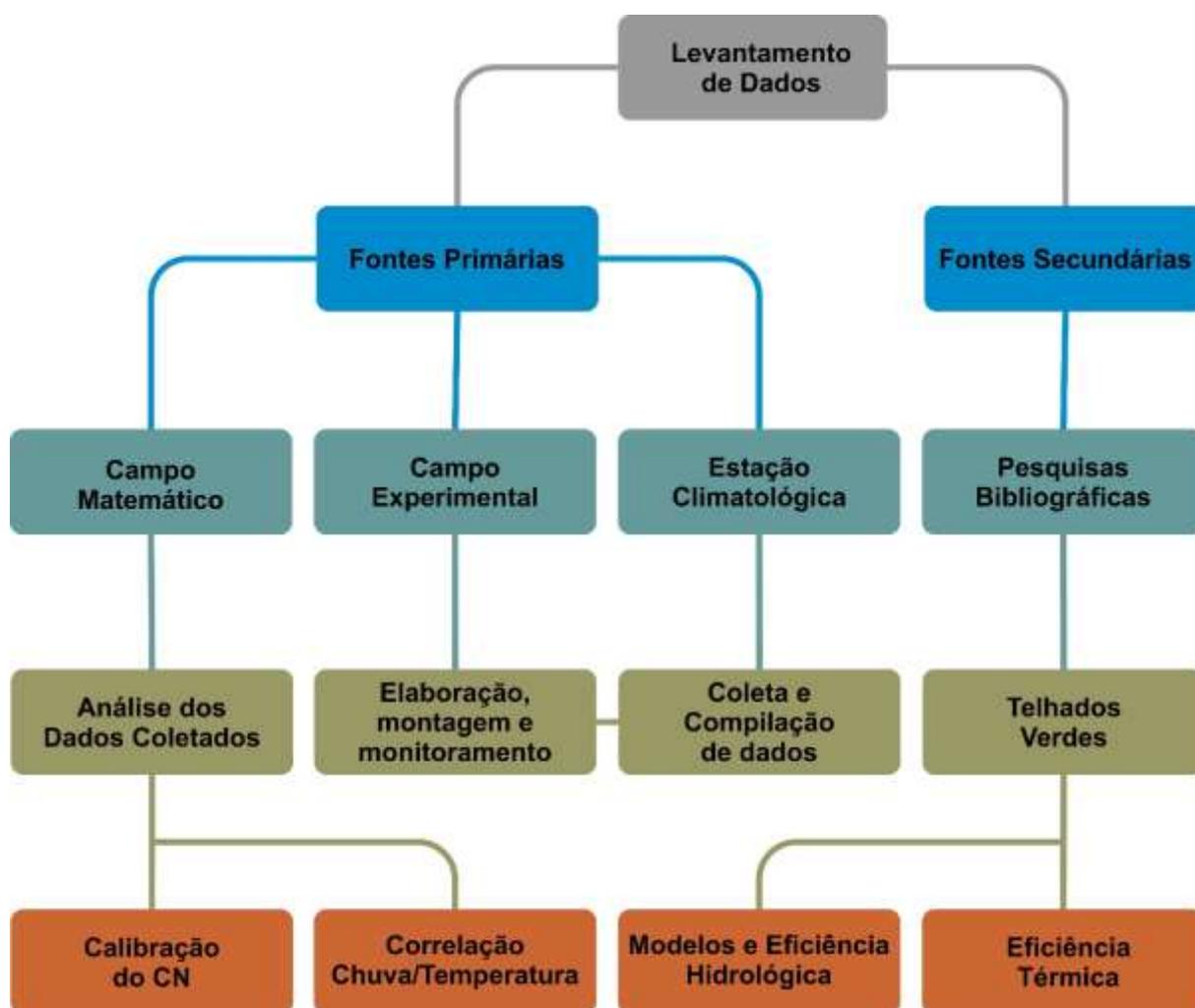


Figura 16: Quadro metodológico.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Eficiência hidrológica

Os dados hidrológicos foram coletados no período de 20/09/2017 à 16/06/2018. Trinta e cinco eventos de chuva foram analisados neste período (Apêndice A). Os totais de chuva precipitados nos eventos válidos variaram de 2,6 a 73,6 mm, enquanto os escoamentos superficiais dos telhados verdes variaram de 0 a 3,4 L/min. A retenção de água pluvial nos telhados verdes variou de 95% a 13% totalizando 56% de retenção média tanto no *Telhado Verde I* e quanto no *Telhado Verde II*.

Analisando isoladamente os meses de menor incidência de chuva (2º semestre de 2017), a retenção de água pluvial nos telhados verdes variou de 95% a 37,5% totalizando 75% de retenção média (Figura 17). Este resultado foi compatível com os valores medidos por Carter e Rasmussen (2006), de 90% a 50% e média de 78%. Nos meses mais chuvosos houve uma redução na retenção média total (Figura 18), que baixou de 75% para 51%, como esperado em consequência das condições climáticas, frequência e intensidade de chuvas e, principalmente, umidade antecedente do solo.

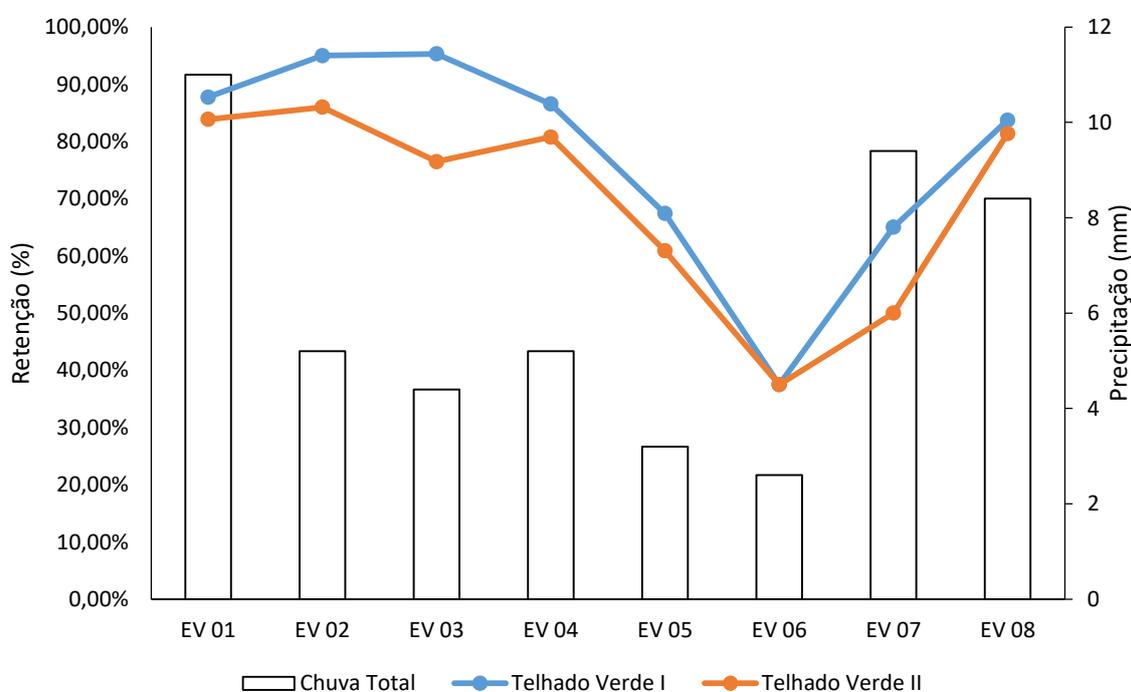


Figura 17: Percentuais médios da retenção hídrica nos telhados verdes nos meses de menor incidência pluvial – 2º semestre de 2017.

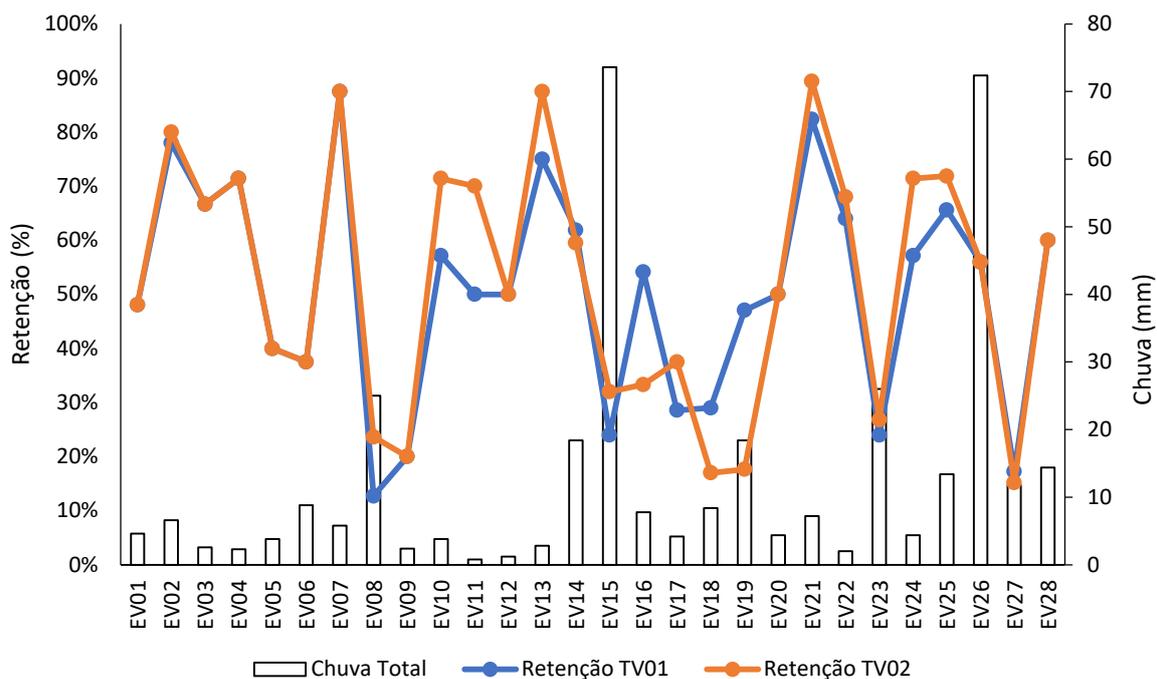


Figura 18: Percentuais médios da retenção hídrica nos telhados verdes nos meses de maior incidência pluvial – 1º semestre de 2018.

Na Figura 19 é apresentado o hidrograma do evento 01 do período menos chuvoso (dia 20/09/2017). A chuva precipitada foi de 11 mm com duração de 25 minutos e quatro dias sem evento de chuva antecedente. Os efeitos de atraso e de atenuação do escoamento ocasionados pela implantação do telhado verde podem ser constatados no gráfico e são similares aos descritos por Stovin et al. (2012). O atraso foi de aproximadamente 15 minutos, com redução média da vazão de pico de 85%. Segundo Carson et al. (2013) a atenuação do escoamento decresce na medida em que o volume de precipitação aumenta. Entretanto, não se pode ignorar a condição inicial de saturação do telhado (Tassi et al., 2014; Stovin et al., 2012;), que sofre influência direta dos eventos de chuvas antecedentes. Observando os valores medidos no evento 01 do período menos chuvoso, foi identificado que este apresentou o maior valor de volume de precipitação dentre os eventos monitorados e um dos maiores valores de atenuação de escoamento, perfazendo uma retenção total de 87,74% no TV I e de 83,87% no TV II (Figura 19).

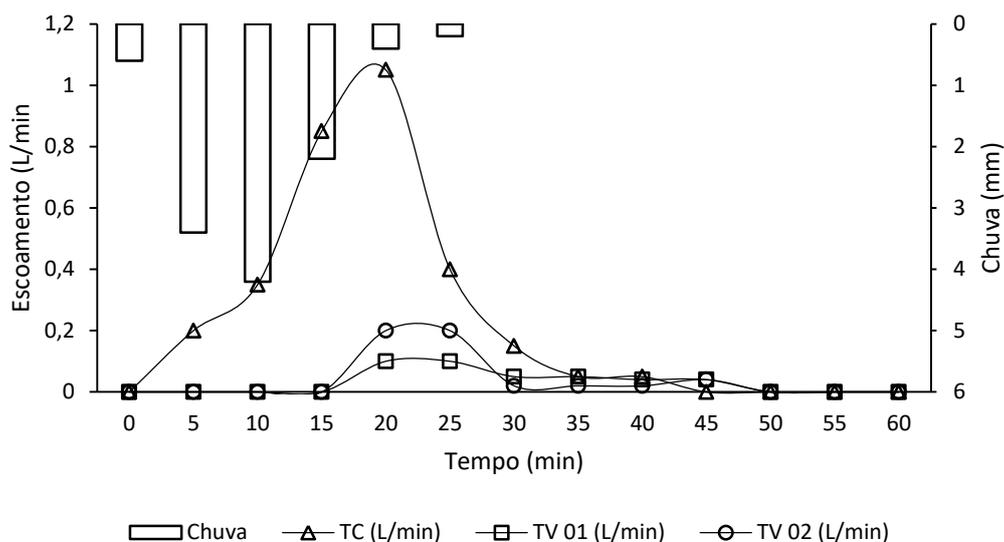


Figura 19: Hidrograma do evento 01 do período menos chuvoso – 20/09/2017.

Os eventos do período menos chuvoso que obtiveram o maior volume de chuva precipitado nos cinco dias antecedentes (Tabela 3), eventos 05 e 06 de classe AMC 3, apresentaram menor porcentagem de retenção que o evento 01 de classe AMC 1, o de menor volume de chuva antecedente. Ao avaliar o volume de chuva precipitado nos eventos e o volume das chuvas dos cinco dias que antecederam os eventos, pode-se inferir que, para esta amostra, a umidade antecedente do solo (AMC) apresentou maior impacto na capacidade de retenção dos telhados verdes do que o volume precipitado. Entretanto, a amostra não incluiu eventos extremos, que segundo Carter e Rasmussen (2006) têm forte influência na redução da capacidade de retenção dos telhados verdes.

Analisando os eventos extremos do período mais chuvoso, pode-se confirmar o impacto da intensidade da chuva na redução da capacidade de retenção dos telhados verdes. A Figura 20 apresenta o hidrograma do evento 15 do período mais chuvoso (dia 07/05/2018), em que o volume de chuva total foi de 73,6 mm. Apesar da capacidade dos reservatórios (bombonas) não ter sido suficiente para armazenar todo o escoamento do evento, pode-se notar uma significativa redução da retenção pluvial desde o início do evento. A retenção para os eventos extremos foi calculada quando a bombona do telhado controle atingiu seu nível máximo. Para este evento a retenção foi de 24% no TV I e de 32% no TV II (Tabela 3). Ainda a partir da análise do gráfico, houve um pequeno atraso na vazão de pico, de cerca de cinco minutos.

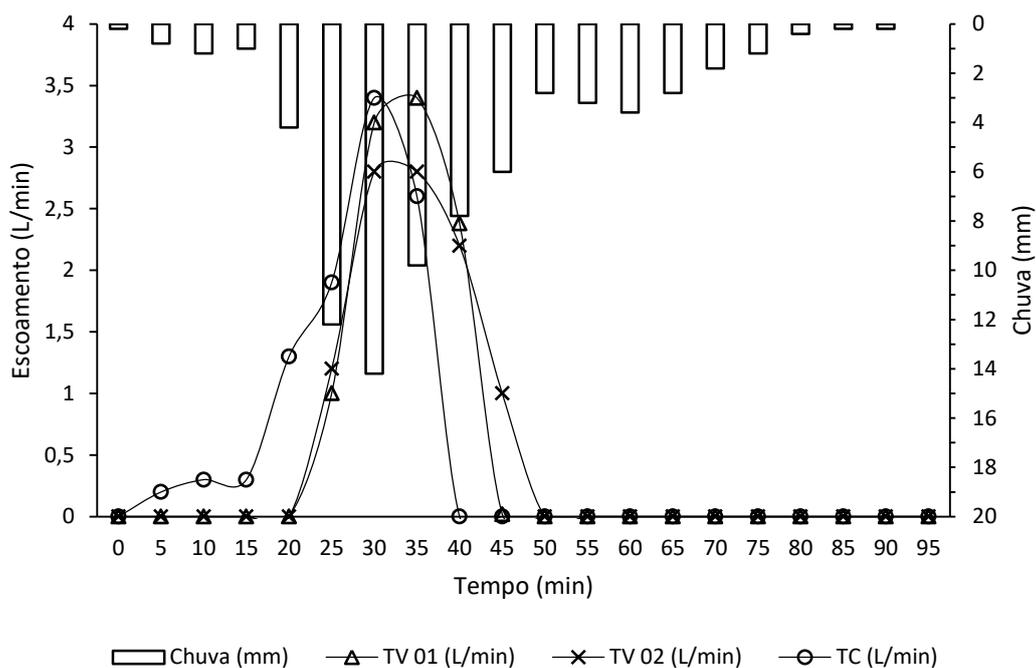


Figura 20: Hidrograma do evento 15 do período mais chuvoso – 07/05/2018.

Tabela 3: Relação da AMC e do volume precipitado com a retenção.

Evento	Data	AMC	Volume de chuva total (mm)	Retenção TV I	Retenção TV II
2°SEM-EV 01	20/09/2017	1	11	87,74%	83,87%
2°SEM-EV 02	24/09/2017	1	5,2	95,00%	86,00%
2°SEM-EV 03	25/09/2017	2	4,4	95,29%	76,47%
2°SEM-EV 04	27/09/2017	1	5,2	86,54%	80,77%
2°SEM-EV 05	05/10/2017	3	3,2	67,39%	60,87%
2°SEM-EV 06	08/10/2017	3	2,6	37,50%	37,50%
2°SEM-EV 07	11/10/2017	1	9,4	65,00%	50,00%
2°SEM-EV 08	03/11/2017	1	8,4	83,72%	81,40%
1°SEM-EV 01	20/02/2018	3	4,6	48,09%	48,09%
1°SEM-EV 02	03/03/2018	3	6,6	78,00%	80,00%
1°SEM-EV 03	05/03/2018	3	2,6	66,67%	66,67%
1°SEM-EV 04	08/03/2018	2	2,3	71,43%	71,43%
1°SEM-EV 05	08/03/2018	2	3,8	40,00%	40,00%
1°SEM-EV 06	14/03/2018	2	8,8	37,50%	37,50%
1°SEM-EV 07	20/03/2018	1	5,8	87,50%	87,50%
1°SEM-EV 08	20/03/2018	1	25	12,73%	23,64%
1°SEM-EV 09	23/03/2018	1	2,4	20,00%	20,00%
1°SEM-EV 10	02/05/2018	2	3,8	57,14%	71,43%
1°SEM-EV 11	03/05/2018	1	0,8	50,00%	70,00%
1°SEM-EV 12	03/05/2018	1	1,2	50,00%	50,00%
1°SEM-EV 13	04/05/2018	1	2,8	75,00%	87,50%
1°SEM-EV 14	06/05/2018	1	18,4	61,90%	59,52%

Evento	Data	AMC	Volume de chuva total (mm)	Retenção TV I	Retenção TV II
1°SEM-EV 15	07/05/2018	2	73,6	24,00%	32,00%
1°SEM-EV 16	10/05/2018	3	7,8	54,17%	33,33%
1°SEM-EV 17	11/05/2018	3	4,2	28,57%	37,50%
1°SEM-EV 18	12/05/2018	3	8,4	29,00%	17,00%
1°SEM-EV 19	13/05/2018	3	18,4	47,06%	17,65%
1°SEM-EV 20	14/05/2018	3	4,4	50,00%	50,00%
1°SEM-EV 21	19/05/2018	1	7,2	82,35%	89,41%
1°SEM-EV 22	22/05/2018	1	2	64,00%	68,00%
1°SEM-EV 23	26/05/2018	1	26	24,00%	26,80%
1°SEM-EV 24	30/05/2018	3	4,4	57,14%	71,43%
1°SEM-EV 25	02/06/2018	3	13,4	65,63%	71,88%
1°SEM-EV 26	04/06/2018	2	72,4	56,00%	56,00%
1°SEM-EV 27	05/06/2018	3	11,8	17,24%	15,17%
1°SEM-EV 28	16/06/2018	1	14,4	60,00%	60,00%

A partir da classificação dos eventos por condição de umidade antecedente do solo (AMC), pode-se analisar quantitativamente a influência da AMC na capacidade de retenção dos telhados estudados (Tabela 4). Tanto no TV I quanto no TV II a retenção média reduziu de acordo com o aumento da umidade antecedente do solo, 63 %, 54% e 50% para AMC I, II e III respectivamente no TV I e 64 %, 55% e 47% para AMC I, II e III respectivamente no TV II. Os valores das medianas estão próximos aos valores das médias calculadas, o que reforça a consistência destes dados não estarem distorcidos por valores extremamente altos ou baixos. Os valores de desvio padrão podem ser considerados baixos se comparados à faixa de variação (0 a 100%) possível para os valores de retenção.

Tabela 4: Retenção pluvial por condição de umidade antecedente do solo (AMC).

	Média TV I	Média Tv II	Mediana Tv I	Mediana Tv II	DP TV I	DP TV II
AMC I	63%	64%	65%	69%	25.81%	25.76%
AMC II	54%	55%	56%	56%	22.42%	17.65%
AMC III	50%	47%	50%	38%	18.62%	23.42%

A Tabela 5 demonstra simultaneamente a influência da umidade antecedente do solo (AMC) e da intensidade das chuvas na retenção pluvial dos telhados verdes. Apenas os eventos de chuva moderada geraram valores nas três classes de AMC e para esta intensidade de chuva corroboram a forte influência da umidade antecedente do solo na retenção pluvial. Os eventos de chuva de intensidade fraca não foram afetados pela umidade antecedente do solo, apresentando valores maiores de retenção na classe AMC II (71%) do que na classe

AMC I (49%). Nos eventos com chuva de intensidade forte, a umidade antecedente do solo demonstrou ter influência, contudo menor do que nos eventos de chuva moderada, com uma redução de 11% da média da AMC I para AMC III contra uma redução de 29% nos eventos de chuva moderada.

Tabela 5: Média de retenção pluvial por intensidade e AMC.

Intensidade/AMC	AMC I	AMC II	AMC III
Chuva fraca	49%	71%	-
Chuva moderada	80%	60%	51%
Chuva forte	48%	-	39%
Chuva violenta	-	40%	-

A Figura 21 compara a vazão de pico dos telhados verdes extensivos com o telhado de fibrocimento no período menos chuvoso, que apresentou uma vazão de pico média de 0,54 L/min. Para este mesmo período, o telhado verde tipo I registrou uma redução na vazão de pico média de 81,33%, correspondendo a uma média de 0,08 L/min, enquanto o telhado verde tipo II registrou uma redução de 73,33% e uma vazão de pico média de 0,11 L/min.

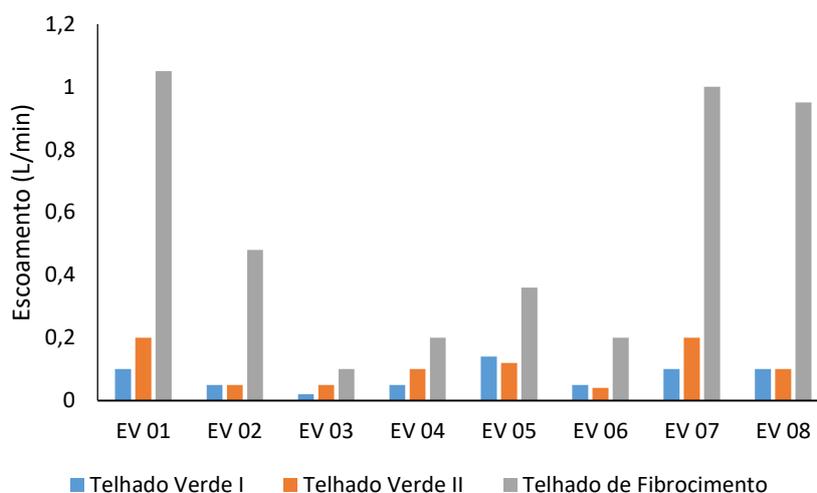


Figura 21: Vazões de Pico do período menos chuvoso.

No período mais chuvoso (Figura 22), a vazão de pico média do telhado de fibrocimento aumentou para 0,83 L/min. A redução da vazão de pico neste período foi menor em ambos os telhados verdes. No TV I a redução da vazão de pico média foi de 55,23% com uma vazão de pico média de 0,48 L/min; e no TV II a redução da vazão de pico média foi de 59,60% com uma vazão de pico média de 0,45 L/min.

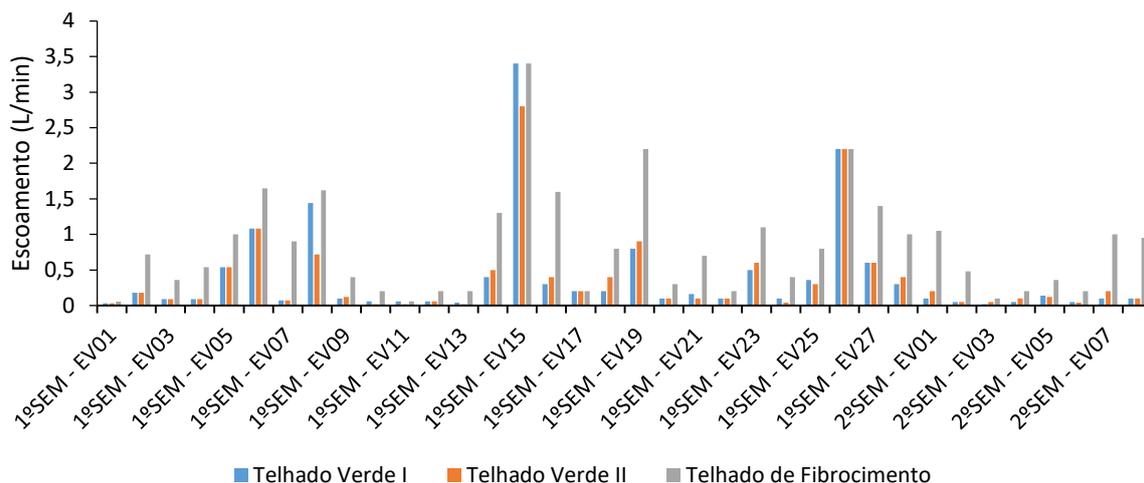


Figura 22: Vazões de Pico de todos os eventos monitorados

A redução da vazão de pico (Figuras 23 e 24) é uma das mais importantes características dos telhados verdes investigadas na literatura de referência: Stovin (2010) aferiu uma redução de pico média de 57% na primavera de Sheffield, Reino Unido, enquanto que Fioretti et al. (2010) mediram uma redução da vazão de pico de 89% em 25 eventos distribuídos ao longo de um ano em Gênova, Itália.

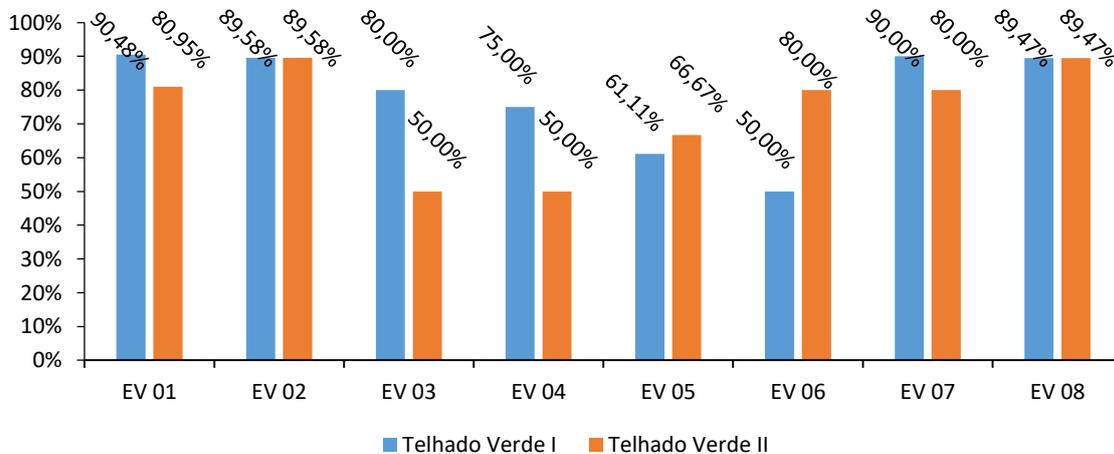


Figura 20: Redução da vazão de pico no período menos chuvoso.

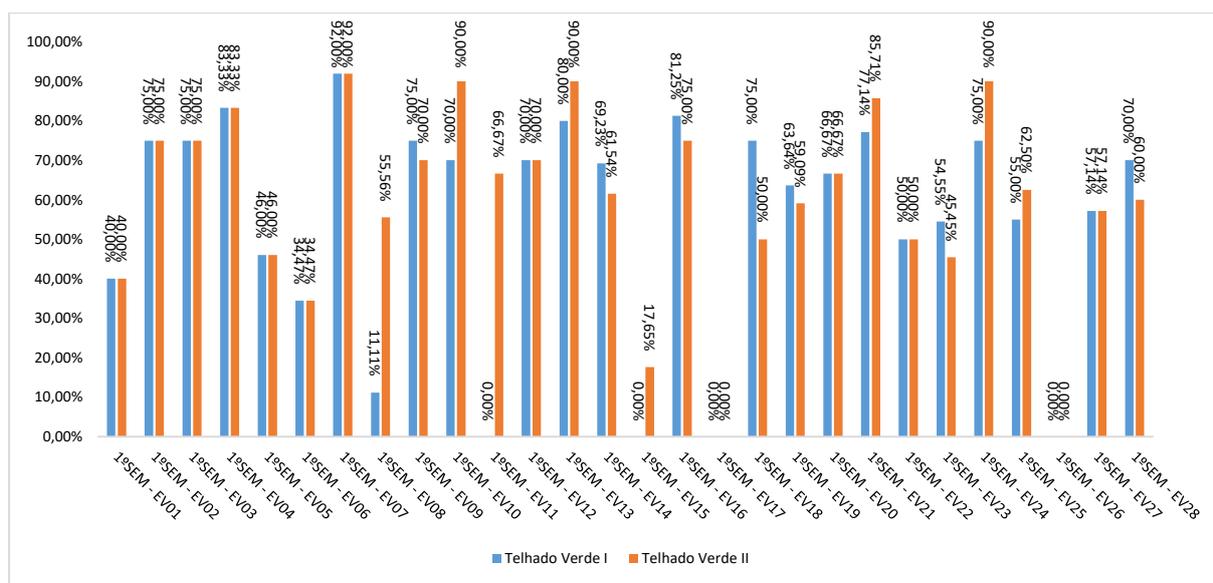


Figura 21: Redução da vazão de pico no período mais chuvoso.

Apesar da diminuição da redução da vazão de pico média no período chuvoso, TV I = 55,26% e TV II = 59,60% (Figura 24), ter sido menor que a do período não chuvoso, TV I = 81,33% e TV II = 73,33% (Figura 23), ainda assim estes resultados foram significativos e consonantes com os encontrados na literatura (Stovin, 2010). Observou-se também que o desempenho do TV I foi melhor do que o do TV II no período não chuvoso e que esse resultado se inverteu no período chuvoso. Inversão similar ocorreu com os valores de retenção que foram de TV I = 77% e TV II = 70% no período de menor incidência de chuvas e de TV I = 51% e TV II = 52% no período de maior incidência de chuvas. Esta inversão pode ter sido ocasionada pelo tamanho da amostra, que no período mais chuvoso foi maior, e confirma os dados técnicos de capacidade de retenção maior da camada utilizada no TV II de 35L/m² contra os 25L/m² da camada utilizada no TV I.

4.2 Calibração do CN

A calibração do CN foi elaborada através da simulação de hidrogramas de projeto através do método do SCS (Soil Conservation Service), apresentado anteriormente. Esses hidrogramas foram comparados aos hidrogramas observados. Nesse caso, a umidade antecedente do solo foi considerada e os eventos são apresentados na Tabela 4 juntamente com os valores de CN calibrados, coeficientes de Nash-Sutcliffe para os dois telhados verdes considerados e os totais pluviométricos.

Tabela 6: Valores dos CN calibrados, coeficientes de Nash-Sutcliffe em função da umidade antecedente e totais pluviométricos por evento

Evento	AMC	CN calibrado	Nash TV01	Nash TV02	Totais Pluviométricos
01	3	79	0,76	0,76	2,6
02	2	71	1,00	1,00	2,3
03	2	83	0,72	0,72	2,4
04	2	85	0,79	0,79	1,4
05	1	72	0,73	0,68	14,4
06	3	83	0,76	0,7	3,2
07	2	84	0,73	0,73	1,4

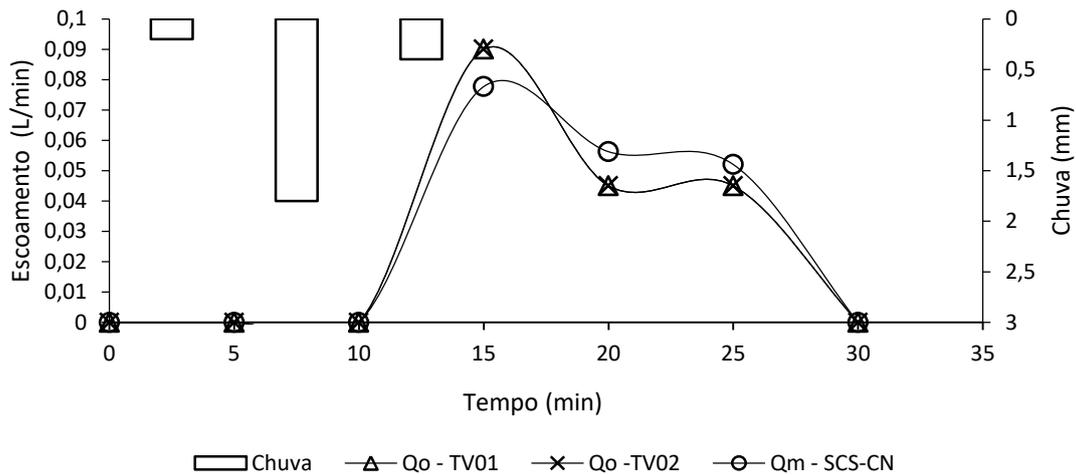
A Tabela 5 apresenta estatísticas do CN e valores médios do coeficiente de Nash-Sutcliffe para cada tipo de telhado verde analisado em função da umidade antecedente do solo.

Tabela 7: Estatísticas do CN, valores médios dos coeficientes de Nash-Sutcliffe para cada tipo de telhado verde em função da umidade antecedente do solo.

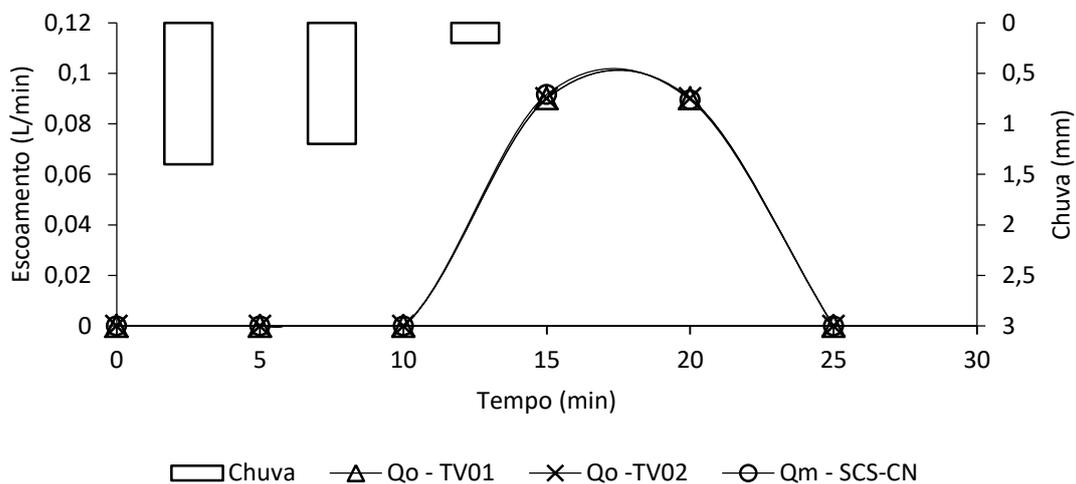
	CN médio	Nash médio TV01	Nash médio TV02	Mediana do CN	Desvio Padrão do CN
Média AMC I	-	-	-	-	-
Média AMC II	81	0,81	0,81	83	6,55
Média AMC III	81	0,76	0,73	81	2,83
Média geral	81	0,78	0,77	83	5,83

Analisando-se a Tabela 4, percebe-se que a calibração do CN para os telhados verdes analisados em função da umidade antecedente do solo foi satisfatória, pois os valores dos coeficientes de Nash-Sutcliffe foram superiores a 0,7, exceto para o evento 05, que no caso do TV02 teve um valor igual a 0,68. Entretanto, o maior valor dos totais pluviométricos dos são eventos analisados é igual a 14,4. Essa limitação foi causada pelo volume dos reservatórios (bombonas) utilizados para o acúmulo do volume escoado, ou seja, para chuvas com maiores totais pluviométricos não se conseguia medir os volumes escoados, pois os reservatórios (bombonas) transbordavam. Apesar dessa limitação, pode-se constatar através da análise dos dados da Tabela 5, que o CN dos telhados verdes analisados pode ser considerado igual a 81.

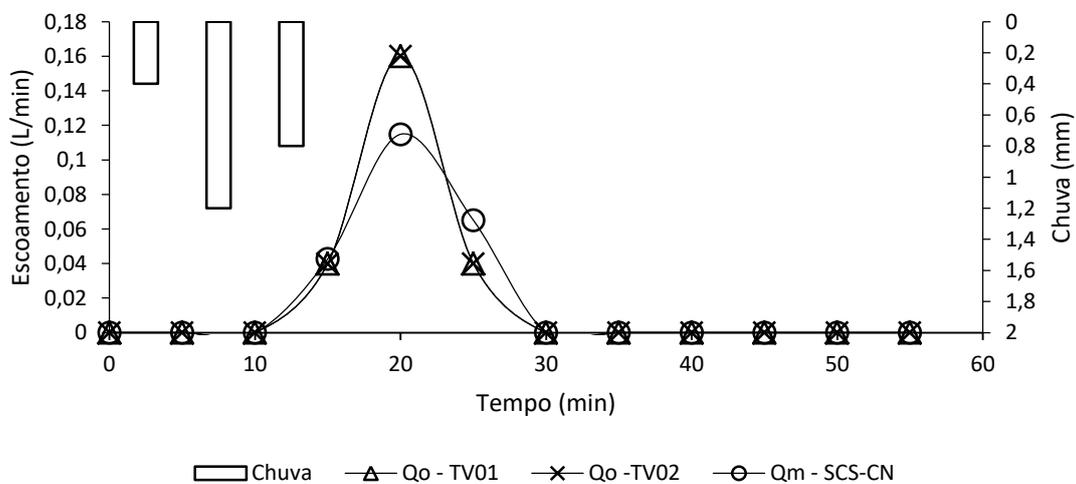
Na Figura 25 são mostrados os hidrogramas observados e simulados relativos aos eventos das Tabelas 4.



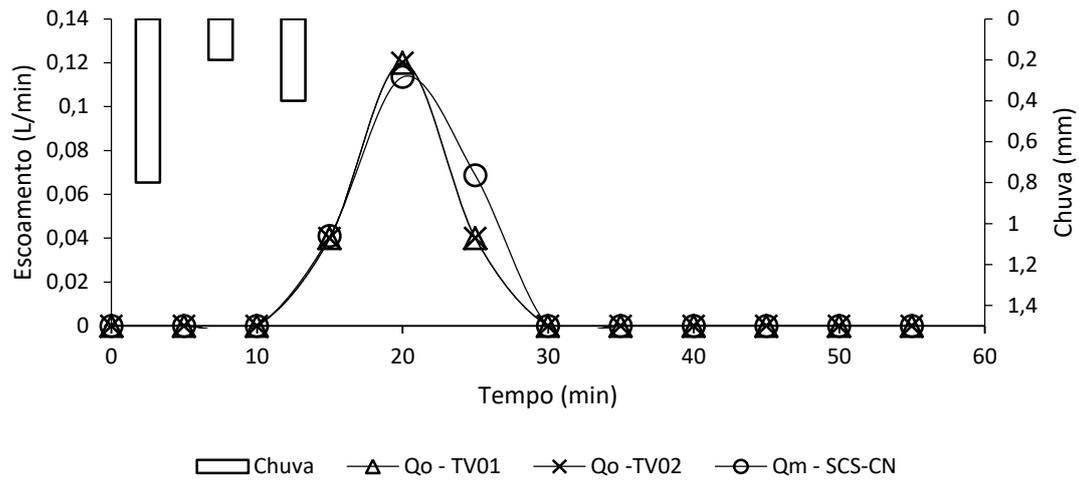
(a) Evento 01



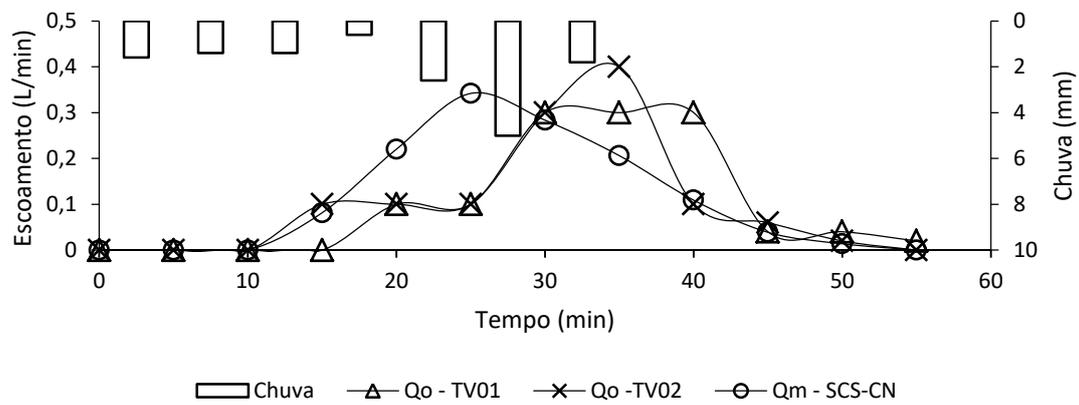
(b) Evento 02



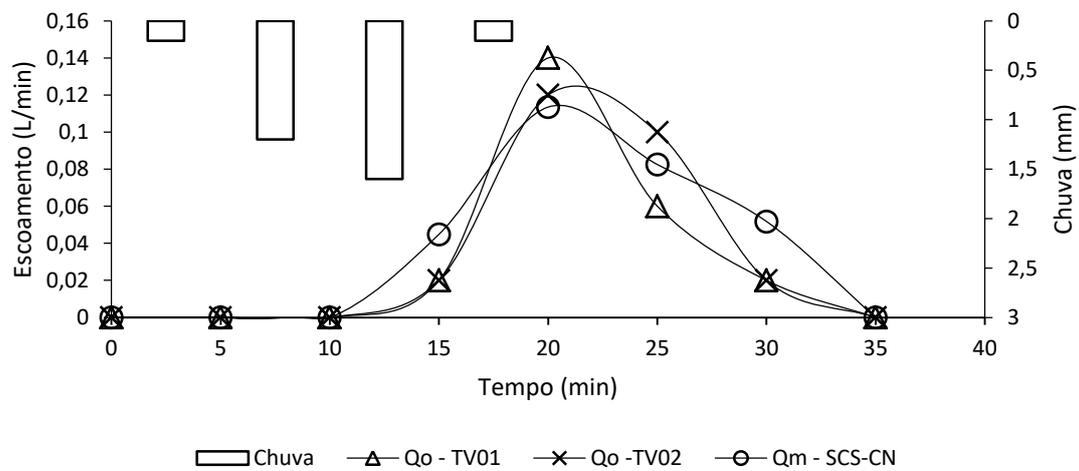
(c) Evento 03



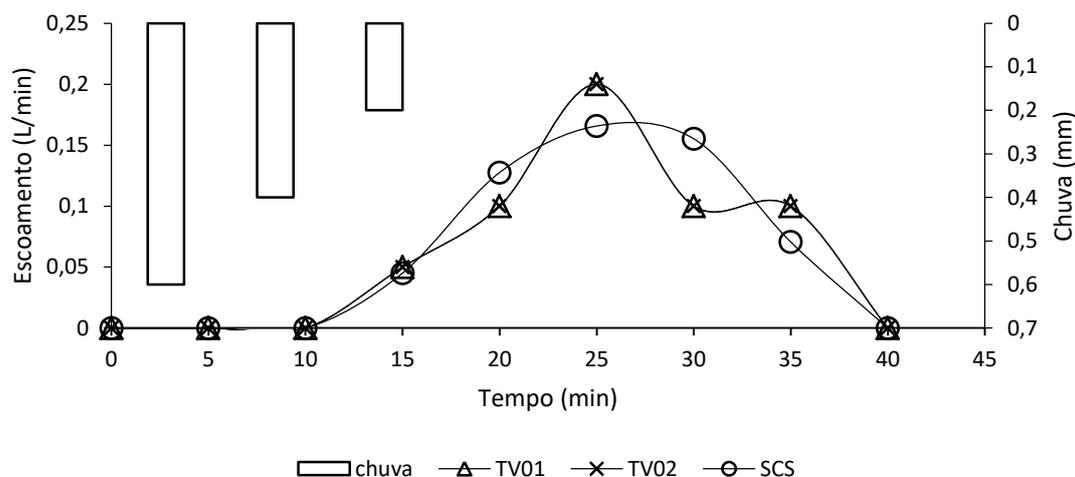
(d) Evento 04



(e) Evento 05



(f) Evento 06



(f) Evento 07

Figura 22: Hidrogramas observados para TV01 e TV02 e simulado via SCS para cada evento

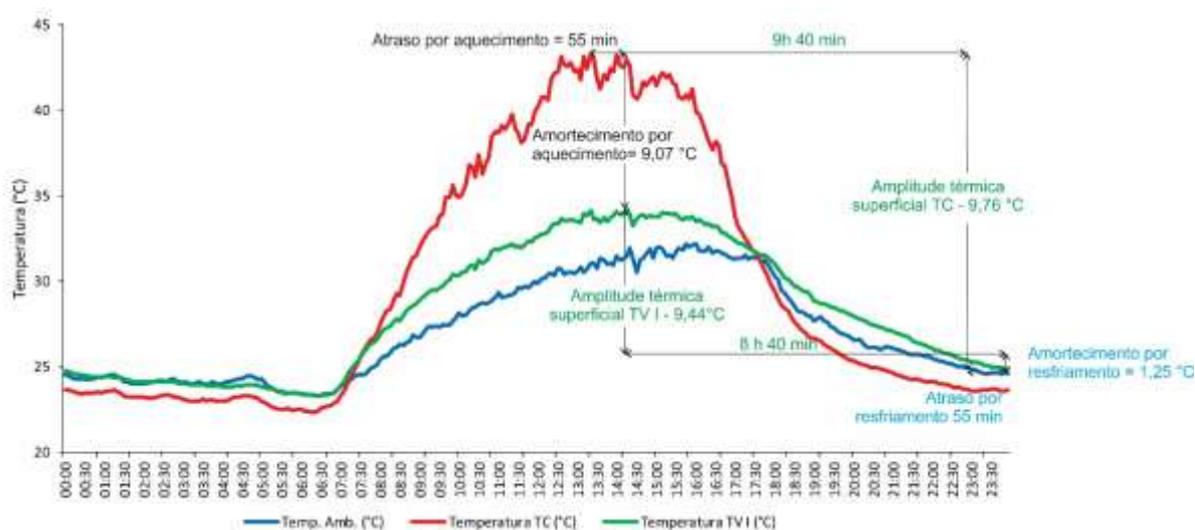
Analisando-se a Figura 25, pode-se observar que, com a exceção dos hidrogramas do evento 05 (Figura 25-e), os hidrogramas dos outros eventos foram simulados satisfatoriamente. O evento 05 foi o que produziu maior quantidade de chuva e por isso trabalhos futuros devem aumentar os reservatórios dos volumes escoados para que a metodologia seja mais testada para eventos com maiores totais pluviométricos.

4.3 Eficiência térmica

Nesse caso, foram utilizados dados brutos (intervalos de 5 em 5 minutos) do dia de maior índice de incidência solar (31/07/2018) do período monitorado (01/03/2018 à 28/02/2019) e o dia de menor índice de incidência solar (10/04/2018) do mesmo período. O período supracitado difere do período de monitoramento hidrológico, pois os equipamentos para monitoramento térmico, só foram instalados em março de 2018. As variáveis climáticas aferidas da estação climatológica foram temperatura ambiente e precipitação. Nas Figuras 26, 27 e 28 são apresentadas as curvas de variação de temperatura ambiente, visando comparação com as temperaturas proporcionadas pelos telhados analisados.

A Figura 26 detalha as amplitudes térmicas da superfície inferior do telhado verde I (TVI) e do telhado de fibrocimento (TC). O pico máximo de temperatura do TC foi de

43,32°C no dia de maior incidência solar (Figura 26a) e de 36,8°C no dia de menor incidência solar (Figura 26b). O amortecimento entre os picos máximos de temperatura do TC em relação ao TV I foi de 9,07°C no dia de maior incidência solar e de 7,12°C no dia de menor incidência solar, condizentes com a redução de 7,3°C de temperatura superficial comprovada por Qin et al. (2012) e de até 7°C na pesquisa de Fioretti et al. (2010). A proteção oferecida pela vegetação dificultou o esfriamento da superfície do telhado durante o período noturno, registrando um amortecimento por resfriamento de 1,25°C no dia de maior incidência solar e de 0,13°C no dia de menor incidência solar.



(a)

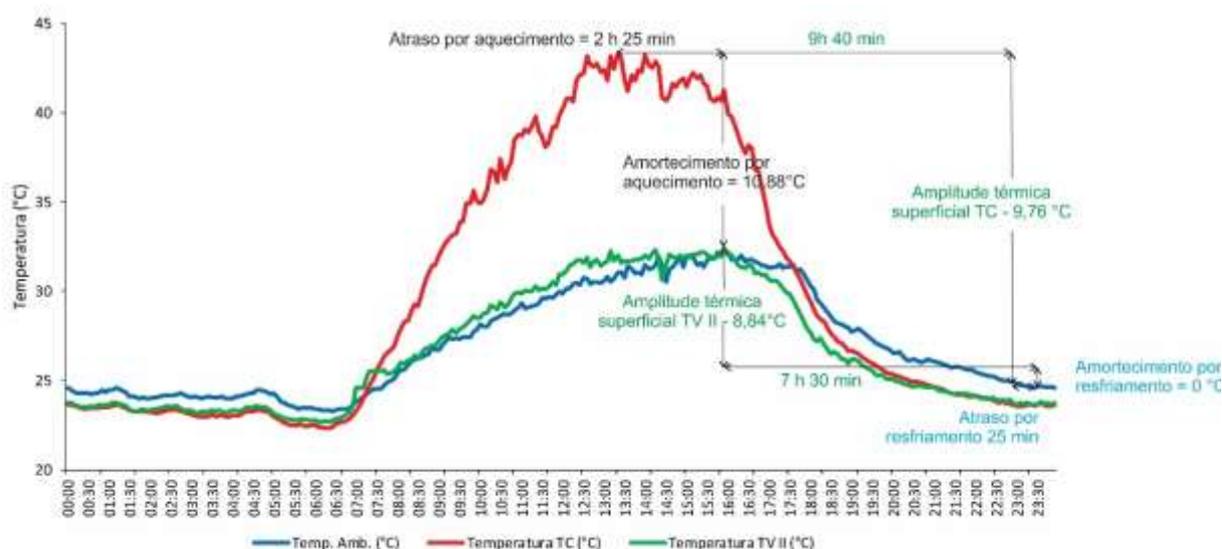


(b)

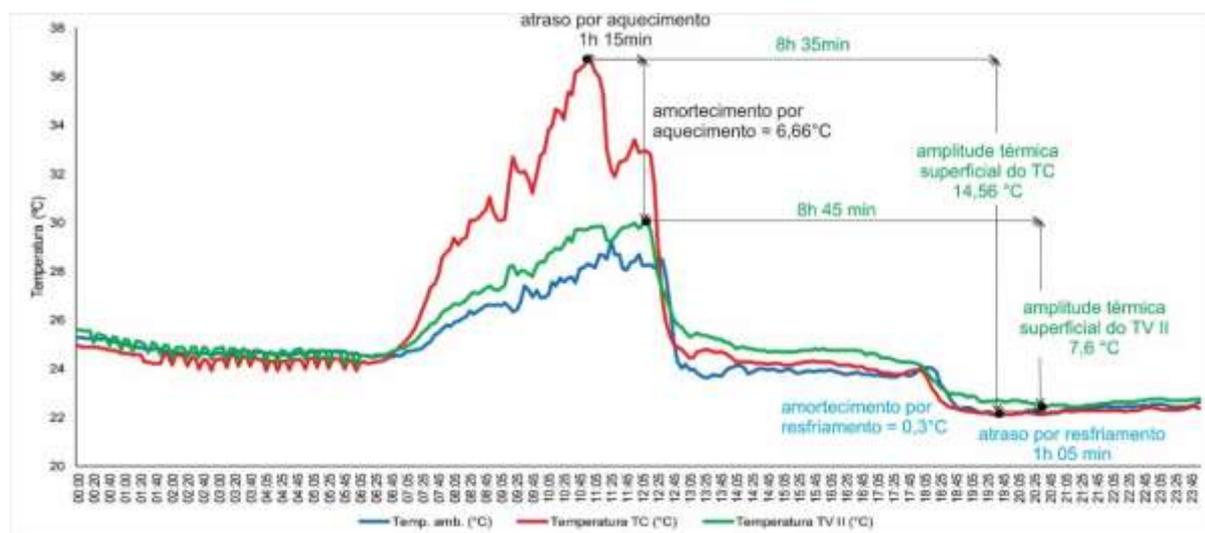
Figura 23: Variação da temperatura superficial entre o telhado controle e o telhado verde I (TV I) nos dias de maior (a) e menor (b) incidência solar.

O resultado demonstra a inércia térmica do telhado verde durante o dia, reduzindo significativamente a transmissão de carga térmica para a telha de fibrocimento e durante a noite apresentando um discreto retardo da perda do calor armazenado no telhado.

Desempenho similar foi verificado no TV II (Figura 27), tendo um amortecimento por aquecimento de $10,88^{\circ}\text{C}$ no dia de maior incidência solar e de $6,66^{\circ}\text{C}$ no dia de menor incidência solar. Na literatura, vários estudos comprovam a proteção desempenhada pelo telhado verde contra altas temperaturas, reduzindo a transmissão de calor para as coberturas. Jaffal et al. (2012) descrevem uma redução da temperatura da cobertura entre 9 e 19°C no verão em La Rochelle, França. Marinho (2013) descreve uma redução da temperatura externa da laje em até 23°C em Belém, Pará, resultado similar ao de Vecchia (2005).



(a)



(b)

Figura 27: Variação da temperatura superficial entre o telhado controle e o telhado verde II (TV II) nos dias de maior (a) e menor (b) incidência solar.

A influência da chuva na temperatura de superfície dos telhados pode ser observada na Figura 28. No dia de menor incidência solar, a redução de radiação causada pela nebulosidade

anterior ao início efetivo da chuva impulsionou uma redução da temperatura do telhado de fibrocimento (8°C) mais significativa do que o evento de chuva em si, no final da chuva a redução de temperatura foi de mais $2,7^{\circ}\text{C}$ no telhado de fibrocimento, com uma redução total de $10,7^{\circ}\text{C}$. Ao final do evento de chuva, a temperatura do telhado praticamente se igualou à temperatura ambiente de 22°C (Figura 28). No dia de maior incidência solar não ocorreu precipitação.

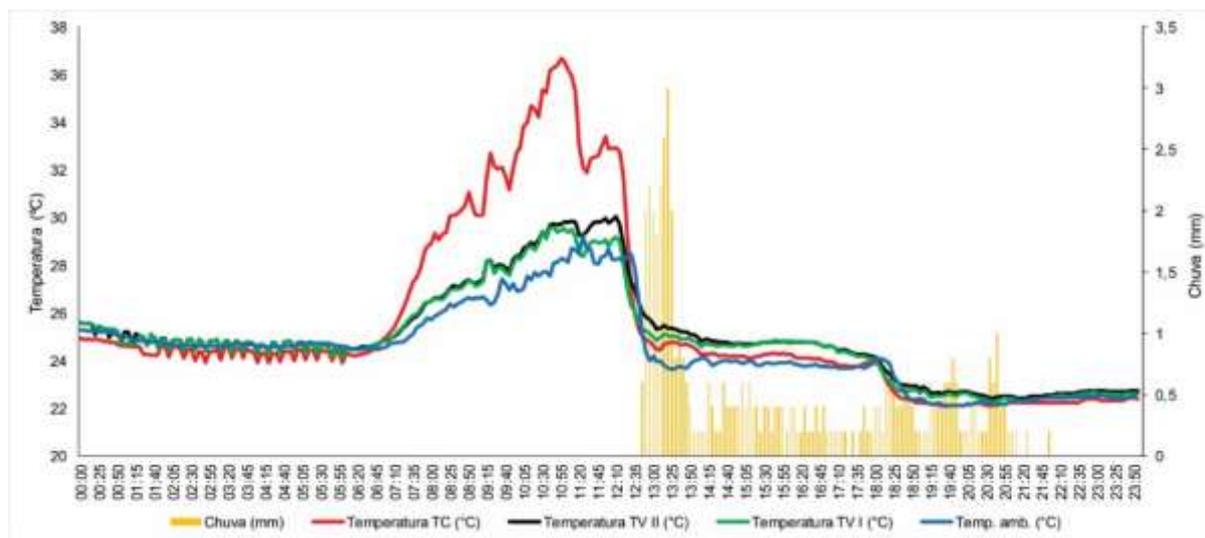


Figura 24: Relação entre Temperatura e Chuva.

Em relação à temperatura ambiente, percebe-se que no dia de maior incidência de radiação solar, ao longo de todo o período diurno essa temperatura mantém-se inferior às temperaturas dos TVs e do TC. Durante o período noturno a temperatura do TC tende a se igualar à temperatura ambiente, enquanto as temperaturas dos telhados verdes mantêm-se ligeiramente superiores à temperatura ambiente. No dia de menor incidência de radiação solar, no período diurno, as temperaturas ambientes novamente se mantiveram mais baixas que as dos três telhados, contudo no período noturno as temperaturas dos três telhados tenderam a se igualar à temperatura ambiente. Tanto o ganho, quanto a perda de calor do telhado de fibrocimento é maior que a do telhado verde. Estes dados comprovam a capacidade de inércia térmica dos telhados verdes como exposto por Castleton et. al (2010), Qin et al. (2012) e Berardi et al. (2014).

4.4 Correlação entre redução de temperatura e chuva total incidida nos telhados verdes

A Figura 25 mostra a correlação obtida entre redução de temperatura e chuvas totais ocorridas no período de 01/03/2018 a 30/06/2018.

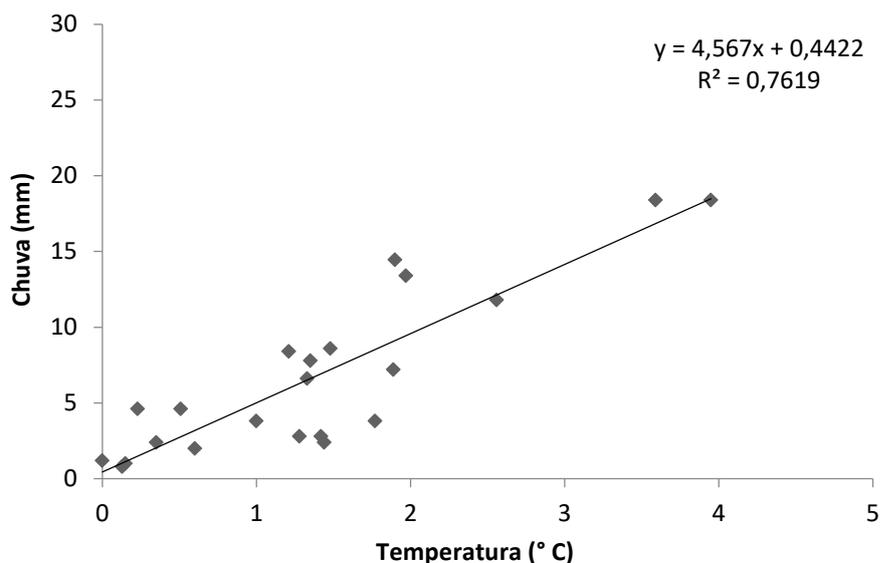


Figura 25: Relação entre Chuva e Redução de Temperatura.

Analisando-se a Figura 29, observa-se que as chuvas estão correlacionadas com as reduções de temperatura, com $R^2 = 0,7619$. Em outras palavras, as chuvas são capazes de explicar 76% das reduções de temperaturas. Trata-se de um resultado importante, pois através da equação resultante da regressão linear pode-se aferir a redução de temperatura apenas com os dados de chuva. Essa importância está atrelada aos custos de medição de temperatura, os quais são mais caros que o monitoramento das chuvas, os quais podem ser fornecidos pela ANA (Agência Nacional de Águas) e INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). Por exemplo, no presente trabalho, foram usadas termo resistências PT 1000 para medição de temperaturas internas aos telhados, os quais possuem certo custo. Assim, esses resultados sugerem que as estimativas de redução de temperatura, através de telhados verdes podem ser determinadas através de dados de chuvas, que são mais baratos de serem medidos. Entretanto, esses resultados limitam-se aos telhados verdes analisados no presente trabalho.

5 CONCLUSÃO

O monitoramento térmico e hidrológico dos telhados verdes foi realizado durante os anos de 2017 e 2018. Nesses dois anos, houve períodos de inatividade do monitoramento devido a falhas no sistema de captação de imagens, as quais foram utilizadas para as medições de volume escoado. Os hidrogramas de projeto dos telhados verdes foram determinados experimentalmente. Em relação, a eficiência na capacidade de retenção hídrica entre as estruturas verdes, o TV I apresenta melhor capacidade de absorção de água em relação ao TV II no período de menor incidência pluvial, resultado que se mostrou oposto no período de maior incidência pluvial, período no qual o TV II apresenta melhor capacidade de absorção de água do que o TV I. Este resultado foi creditado à diferença no tamanho da amostra de eventos do período de menor incidência pluvial (8 eventos) em comparação com a amostra de eventos do período de maior incidência pluvial (28 eventos), caracterizando-se uma amostra mais significativa e confiável. O resultado comparativo da capacidade de retenção hídrica dos telhados verdes do período mais chuvoso é mais condizente com a capacidade de retenção das camadas drenantes especificadas e testadas de 25 L/m² no TV I e de 35L/m² no TV II. Confirmando que a diferença na capacidade de retenção entre os telhados verdes está diretamente relacionada com a estrutura drenante adotada em cada telhado verde extensivo.

A calibração do CN dos telhados verdes só foi possível para eventos de chuvas de baixa e média intensidade. Essa limitação foi devido aos reservatórios (bombonas) utilizados possuírem volumes limitados a 50 litros para medição dos volumes escoados, limitando a calibração dos CN, que foi realizada pela comparação dos hidrogramas observados aos simulados. A correlação linear entre os totais de chuva por evento e as redução de temperatura, demonstraram que a primeira variável é capaz de explicar até 76% da segunda, sugerindo que a redução de temperatura pode ser estimada via dados de chuva, que são mais baratos de serem monitorados, que os dados de temperatura. Essa constatação é importante para uso dos telhados verdes numa região de clima equatorial, tal qual é a Amazônia. Essa redução de temperatura pode ser usada como justificativa econômica para a implantação de telhados verdes, já que essa redução de temperatura na superfície do telhado chegou a 10°C, sendo interessante para a redução de consumo de energia elétrica através dos condicionadores de ar constantes nas residências e prédios da região.

Nesse contexto, é possível afirmar que o telhado verde contribui significativamente para a redução da vazão de pico de cheias e de temperaturas, e que o uso de materiais recicláveis na construção de telhados verdes mostra-se uma alternativa viável. No entanto, o trabalho não discute os custos de manutenção de telhados verdes, principalmente, durante

períodos de estiagem, quando a irrigação é necessária, e isso significa que o consumo de água deve ser dimensionado para que os telhados não se tornem insustentáveis do ponto de vista ambiental. A água é necessária para manter o telhado “verdadeiramente” verde e em boas condições, para que os mesmos desempenhem seus objetivos de redução de pico de cheia e temperatura. Sendo esse, um bom tópico para trabalhos futuros. Também é necessário o redimensionamento dos reservatórios dos escoamentos superficiais, pois os volumes dos reservatórios precisam ser aumentados para que se possam armazenar os volumes escoados de chuvas com maiores totais pluviométricos, não limitando a calibração do CN.

REFERÊNCIAS

ABREU, P. G. DE; ABREU, V. M. N.; COLDEBELLA, A.; LOPES, L. DOS S.; CONCEIÇÃO, V. DA; TOMAZELLI, I. L. Análise termográfica da temperatura superficial de telhas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 11, p. 1193–1198, 2011.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

ANSEL, W.; SCHARR, C. 5th International Green Roof Congress 2018. **IGRA - International Green Roof Association**, 2018.

BACOVIS, T. M.; NAGALLI, A. Avaliação do desempenho hidrológico de protótipo de telhado verde extensivo. **Revista Acadêmica: Ciências Agrárias e Ambientais**, v. 11, n. 1, p. 35–42, 2013.

BALTAS, E. A.; DERVOS, N. A.; MIMIKOU, M. A. Technical note: Determination of the SCS initial abstraction ratio in an experimental watershed in Greece. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, n. 6, p. 1825–1829, 2007.

BEATRICE, C. C.; VECCHIA, F. Avaliação do potencial de uso de três espécies vegetais como cobertura leve de telhados em edificações. **Revista de Ciências Ambientais**, v. 5, n. 1, p. 5–24, 2011.

BERARDI, U.; GHAFARIANHOSEINI, A.; GHAFARIANHOSEINI, A. State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. **Applied Energy**, v. 115, p. 411–428, 2014.

BIANCHINI, F.; HEWAGE, K. How “green” are the green roofs? Lifecycle analysis of green roof materials. **Building and Environment**, v. 48, n. 1, p. 57–65, 2012.

BLUME, T.; ZEHE, E.; BRONSTERT, A. Rainfall—runoff response, event-based runoff coefficients and hydrograph separation. **Hydrological Sciences Journal**, v. 52, n. 5, p. 843–862, 2007.

BOTELHO, R. G. M. Bacias Hidrográficas Urbanas. **Geomorfologia Urbana**, 2011.

BOUCHER, I. Les toits verts. **Mamr**, v. 1, 2006.

BOZORG CHENANI, S.; LEHVÄVIRTA, S.; HÄKKINEN, T. Life cycle assessment of layers of green roofs. **Journal of Cleaner Production**, v. 90, p. 153–162, 2015.

BRANCO, V. T. A.; SANTOS, D. DA S. DOS; MAZZOCATO, A. C.; FERREIRA, J. L. Caracterização morfológica de quatro espécies do gênero *Paspalum*. **II Congresso Brasileiro de Recursos Genéticos**, n. September, 2012.

BRENNEISEN, S. **Green roofs-How nature returns to the city**. International Conference on Urban Horticulture. **Anais...2002**

CALIL, V. S.; BERNARDI, E. C. S.; RIGHES, A. A. Impacto da utilização de

telhados verdes no escoamento superficial do Arroio Esperança em Santa Maria-RS. **Disciplinarum Scientia| Naturais e Tecnológicas**, v. 15, n. 1, p. 1–16, 2014.

CARBONE, M.; GAROFALO, G.; NIGRO, G.; PIRO, P. A conceptual model for predicting hydraulic behaviour of a green roof. **Procedia Engineering**, v. 70, p. 266–274, 2014.

CARSON, T. B.; MARASCO, D. E.; CULLIGAN, P. J.; MCGILLIS, W. R. Hydrological performance of extensive green roofs in New York City: observations and multi-year modeling of three full-scale systems. **Environmental Research Letters**, v. 8, n. 2, p. 024036, 2013.

CARTER, T. L.; RASMUSSEN, T. C. Hydrologic Behavior of Vegetated ROOFS1. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 42, n. 5, p. 1261, 2006.

CARTER, T.; JACKSON, C. R. Vegetated roofs for stormwater management at multiple spatial scales. **Landscape and Urban Planning**, v. 80, n. 1–2, p. 84–94, 2007.

CARTER, T. L.; RASMUSSEN, T. C. Hydrologic Behavior of Vegetated Roofs. **Journal of the American Water Resources Association**, p. 1261–1274, 2007.

CASTLETON, H. F.; STOVIN, V.; BECK, S. B. M.; DAVISON, J. B. Green roofs; Building energy savings and the potential for retrofit. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 10, p. 1582–1591, 2010.

CASTRO, A. S.; GOLDENFUM, J. A. A. Uso de telhados verdes no controle quantitativo do escoamento superficial urbano. **Revista Atitude**, v. 4, n. 7, p. 75–81, 2010.

CBCS, C. B. DE C. S. **Quota Ambiental, relatório técnico**. Disponível em: <<http://www.cbcs.org.br/website/comunicacao-tecnica/show.asp?ppsCode=05BBE209-D49F-DA47-7784-24D116785C2F>>. Acesso em: 20 jun. 2016.

CHAN, A. L. S.; CHOW, T. T. Energy and economic performance of green roof system under future climatic conditions in Hong Kong. **Energy and Buildings**, v. 64, p. 182–198, 2013.

CHOAY, F. **O Urbanismo. Utopias e realidades - uma antologia**. São Paulo: Perspeciva, 1997.

CLARK, C; ADRIAENS, P; TALBOT, F. B. Green roof valuation: a probabilistic economic analysis of environmental benefits. **Environmental science & technology**, v. 42, n. 6, 2008.

COSTA, N. V.; MARTINS, D.; RODELLA, R. A.; RODRIGUES, A. C. P.; CARDOSO, L. A. Efeito do trinexapac-ethyl na anatomia foliar de quatro espécies de grama. **Planta Daninha**, v. 28, n. 3, p. 551–560, 2010.

CUNHA, S. F.; SILVA, F. E. O. E; MOTA, T. U.; PINHEIRO, M. C. Avaliação da Precisão dos Métodos do SCS para Calculo da Precipitacao Efetiva e Hidrograma de Cheias. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, p. 837–848, 2015.

D'AVILA, M.R; PERALTA, Ê; S.; FRITSCHER, J. P. C. **Cobertura Vegetal:**

desenvolvimento e produção da tecnologia Telhado Vivo. Congresso internacional sustentabilidade e habitação de interesse social. **Anais...**2010

DANTAS, G. T. IPTU Verde e o Direito à Cidade Sustentável. **Revista do Programa de Pós-Graduação em Direito**, v. 24, n. 26, 2014.

ECOTELHADO. **Quota Ambiental.** Disponível em: <<https://ecotelhado.com/quota-ambiental-nova-lei-de-sao-paulo-incentiva-desenvolvimento-urbano-sustentavel/>>. Acesso em: 24 ago. 2018.

FASSMAN-BECK, E.; VOYDE, E.; SIMCOCK, R.; HONG, Y. S. 4 Living roofs in 3 locations: Does configuration affect runoff mitigation? **Journal of Hydrology**, v. 490, p. 11–20, 2013.

FIORETTI, R.; PALLA, A.; LANZA, L. G.; PRINCIPI, P. Green roof energy and water related performance in the Mediterranean climate. **Building and Environment**, v. 45, n. 8, p. 1890–1904, 2010.

FISHER, M.J.; CRUZ, P. Some ecophysiological aspects of *Arachis pintoi*. In: **Biology and agronomy of forage Arachis**. [s.l: s.n.]. p. 59–70.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de Conforto Térmico.** 5^a ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001.

GAROTTI, L. M.; BARBASSA, A. P. Estimativa de área impermeabilizada diretamente conectada e sua utilização como coeficiente de escoamento superficial. **Eng. Sanit. Ambient**, v. 15, n. 1, p. 19–28, 2010.

GETTER, K. L.; ROWE, D. B. The role of extensive green roofs in sustainable development. **HortScience**, v. 41, n. 5, p. 1276–1285, 2006.

GONÇALVES, M.; POLIDORO, M.; SILVA, D. F. **Análise dos índices de impermeabilização do solo utilizando Geoprocessamento: proposta de atualização do decreto nº. 402/1980 para projetos de drenagem no município de Londrina-PR.** II Seminário de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul. **Anais...**2009

GURGEL, R. A. G. **Principais espécies e variedades de grama.** SIMPÓSIO SOBRE GRAMADOS. **Anais...**2003

HAKIMDAVAR, R.; CULLIGAN, P. J.; FINAZZI, M.; BARONTINI, S.; RANZI, 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**, v. 73, p. 494–508, 2014.

HUANG, Y.; CHEN, C.; TSAI, Y. Reduction of temperatures and temperature fluctuations by hydroponic green roofs in a subtropical urban climate. **Energy and Buildings**, v. 129, 2016.

INMET. **Instituto Nacional de Meteorologia.** Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/>>. Acesso em: 6 jun. 2018.

JAFFAL, I.; OULDBOUKHITINE, S. E.; BELARBI, R. A comprehensive study of

the impact of green roofs on building energy performance. **Renewable Energy**, v. 43, p. 157–164, 2012.

JIMÉNEZ, E. I. T.; CASTREJÓN, A. F.; SÁNCHEZ, M. G. Criteria for Selection of Plant Species for its Deployment in Thermally Efficient Architectural Green Roofs in the Metropolitan Area of Mexico City: Methodological Guidelines. **Energy Procedia**, v. 57, p. 1798–1807, 2014.

JUSTINO, E. A.; PAULA, H. M.; PAIVA, E. C. R. Análise do efeito da impermeabilização dos solos urbanos na drenagem de água pluvial do município de Uberlândia-MG. **Espaço em Revista**, v. 13, n. 2, 2012.

KARTERIS, M.; THEODORIDOU, I.; MALLINIS, G.; TSIROS, E.; KARTERIS, A. Towards a green sustainable strategy for Mediterranean cities: Assessing the benefits of large-scale green roofs implementation in Thessaloniki, Northern Greece, using environmental modelling, GIS and very high spatial resolution remote sensing data. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 58, p. 510–525, 2016.

LAAR, M.; CRISTINA, G.; PAIVA, D. A.; LÚCIA, V.; AMIGO, A. DE; WILHELM, F. Estudo de aplicação de plantas em telhados vivos extensivos em cidades de clima tropical. **ENCAC - ELACAC 2001**, n. 1, p. 1–6, 2001.

LEE, J. Y.; LEE, M. J.; HAN, M. A pilot study to evaluate runoff quantity from green roofs. **Journal of Environmental Management**, v. 152, p. 171–176, 2015.

LEMAIRE, F. Physical, chemical and biological properties of growing medium. **Acta Horticulturae, Wageningen**, n. 396, p. 273–284, 1995.

LIMA, J. A. DE; PINTO, J. C.; EVANGELISTA, A. R.; SANTANA, R. A. V. Amendoim forrageiro (*Arachis pintoi*). p. 18, 2000.

LIU, K. **Engineering performance of rooftop gardens through field evaluation**. Proc. of the 18th International Convention of the Roof Consultants Institute. **Anais...2003**

LOCATELLI, L.; MARK, O.; MIKKELSEN, P. S.; ARNBJERG-NIELSEN, K.; BERGEN JENSEN, M.; BINNING, P. J. Modelling of green roof hydrological performance for urban drainage applications. **Journal of Hydrology**, v. 519, n. PD, p. 3237–3248, 2014.

LODI, P. C.; BUENO, B. S.; ZORNBERG, J. G. Avaliação da degradação de geomembranas de polietileno de alta densidade (PEAD) e de poli (Cloro de Vinila) (PVC) utilizando análise termogravimétrica. **Revista Iberoamericana de Polímeros**, v. 10, n. 2, p. 110–118, 2009.

LORENZINI NETO, F.; TASSI, R.; TASSINARI, L.; BASSO, R. Calibração e simulação hidrológica de um telhado verde utilizando o método da curva-número do SCS. **20º Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, p. 1–8, 2013.

LUZ, L. M. DA; RODRIGUES, J. E. C.; CRISTO, L. DE A.; SILVA, M. D. DA. Estudo Geoambiental em Bacias Urbanas em Belém-PA. **Boletim Amazônico de Geografia**, v. 1, n. 2, p. 145–160, 2014.

MACIVOR, J. S.; LUNDHOLM, J. Performance evaluation of native plants suited to

extensive green roof conditions in a maritime climate. **Ecological Engineering**, v. 37, n. 3, p. 407–417, 2011.

MARINHO, D. **Desempenho Termoenergético da Utilização de Telhado Vegetal em edificações no Clima Amazônico**. [s.l.] Universidade Federal do Pará, 2013.

MARINHO FILHO, G. M.; ANDRADE, R. D. S.; ZUKOWSKI JUNIOR, J. C.; MAGALHÃES FILHO, L. N. L. Modelos Hidrológicos: Conceitos e Aplicabilidade. **Revista de Ciências Ambientais**, v. 6, n. 2, p. 35–47, 2012.

MCINTYRE, L.; SNODGRASS, E. C. The green roof manual: a professional guide to design, installation, and maintenance. **Timber Press**, 2010.

MECHELEN, C. V.; DUTOIT, T.; HERMY, M. Mediterranean open habitat vegetation offers great potential for extensive green roof design. **Landscape and Urban Planning**, v. 121, p. 81–91, 2014.

MELESSE, A. M.; SHIH, S. F. Spatially distributed storm runoff depth estimation using Landsat images and GIS. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 37, n. 1, p. 173–183, 2002.

MENTENS, J.; RAES, D.; HERMY, M. Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? **Landscape and Urban Planning**, v. 77, n. 3, p. 217–226, 2006.

MINKE, G. **Techos verdes, Planificación, ejecución, consejos practicos**. [s.l.: s.n.].

MISHRA, S. K.; JAIN, M. K.; BHUNYA, P. K.; SINGH, V. P. Field applicability of the SCS-CN-based Mishra-Singh general model and its variants. **Water Resources Management**, v. 19, n. 1, p. 37–62, 2005.

MISHRA, S. K.; JAIN, M. K.; SINGH, V. P. Evaluation of the SCS-CN-based model incorporating antecedent moisture. **Water Resources Management**, v. 18, n. 6, p. 567–589, 2004.

MORUZZI, R. B.; MOURA, C. C. DE; BARBASSA, A. P. Avaliação do efeito da inclinação e umidade antecedente na qualidade e quantidade das parcelas escoadas, percoladas e armazenadas em telhado verde extensivo. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 3, 2014.

NAGASE, A.; DUNNETT, N. The relationship between percentage of organic matter in substrate and plant growth in extensive green roofs. **Landscape and Urban Planning**, v. 103, n. 2, p. 23–236, 2011.

NAWAZ, R.; MCDONALD, A.; POSTOYKO, S. Hydrological performance of a full-scale extensive green roof located in a temperate climate. **Ecological Engineering**, v. 82, p. 66–80, 2015.

NETO, F. L. Modelagem De Telhado Verde : Uma Análise Da Eficiência No Controle Do Escoamento. **Dissertação de Mestrado**, v. 1, p. 137, 2014.

OHNUMA JR, A. A.; ALMEIDA NETO, P. DE; MENDIONDO, E. M. Análise da

Retenção Hídrica em Telhados Verdes a Partir da Eficiência do Coeficiente de Escoamento. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. August, p. 41–52, 2014.

ONDOÑO, S.; MARTÍNEZ-SÁNCHEZ, J. J.; MORENO, J. L. The composition and depth of green roof substrates affect the growth of *Silene vulgaris* and *Lagurus ovatus* species and the C and N sequestration under two irrigation conditions. **Journal of environmental management**, v. 166, n. 330–340, 2016.

PECK, S.; KUHN, M. Design guidelines for green roofs. **Ontario Association of Architects**, 2003.

PEREIRA, A. R. **Como selecionar plantas para áreas degradadas e controle de erosão**. [s.l: s.n.].

PÉREZ, G.; VILA, A.; RINCÓN, L.; SOLÉ, C.; CABEZA, L. F. Use of rubber crumbs as drainage layer in green roofs as potential energy improvement material. **Applied Energy**, v. 97, p. 347–354, 2012.

PERUSSI, R.; VECCHIA, F. A. DA S. Análise do comportamento térmico de um sistema de cobertura verde utilizando plataformas de teste. **PARC - Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 7, p. 225–236, 2016.

PONCE, V.M.; HAWKINS, R. H. Runoff curve number: has it reached maturity? **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 1, p. 11–19, 1996.

PORTO, R. DE M. Uso do. **Revista DAE**, v. 47, n. 148, p. 37–39, 1987.

PORTO, R. M. Uso conjunto dos métodos racional e do “Soil Conservation Service” na determinação da vazão de projeto em bacias urbanas. **REVISTA DAE**, v. 47, n. 148, p. 37, 1987.

QIN, X.; WU, X.; CHIEW, Y.-M.; LI, Y. A green roof test bed for stormwater management and reduction of urban heat island effect in Singapore. **British Journal of Environment & Climate Change**, v. 2, n. 4, p. 410–420, 2012.

RANGEL, A. C. L. C; ARANHA, K. C; SILVA, M. C. B. C. Os telhados verdes nas políticas ambientais como medida indutora para a sustentabilidade. **Desenvolvimento Meio Ambiente**, v. 35, p. 397–409, 2015.

RAZZAGHMANESH, M.; BEECHAM, S.; SALEMI, T. The role of green roofs in mitigating Urban Heat Island effects in the metropolitan area of Adelaide, South Australia. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 15, p. 89–102, 2016.

REDA, A. L. L.; TANZILLO, A. A.; COSTA, G. B. **TELHADOS VERDES: Uma proposta econômica em busca do desenvolvimento urbano sustentável**. Congresso Brasileiro de Avaliação de Impacto. **Anais...2012**

RIBEIRO, M. F.; CASTRO, A. A. Políticas Públicas e os Novos Rumos para as Construções Verdes. **REVISTA CIENTÍFICA SENSUS-DIREITO**, v. 1, n. 8, p. 55–78, 2014.

RINCÓN, L.; COMA, J.; PÉREZ, G.; CASTELL, A.; BOER, D.; CABEZA, L. F.

Environmental performance of recycled rubber as drainage layer in extensive green roofs. A comparative Life Cycle Assessment. **Building and Environment**, v. 74, p. 22–30, 2014.

ROSENZWEIG, C.; SOLECKI, W. D.; PARSHALL, L.; CHOPPING, M.; POPE, G.; GOLDBERG, R. Characterizing the urban heat island in current and future climates in New Jersey. **Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards**, v. 6, n. 1, p. 51–62, 2005.

SANDOVAL, V. et al. Impact of the properties of a green roof substrate on its hydraulic and thermal behavior. **Energy Procedia**, v. 78, p. 1177–1182, 2015.

SANTOS, L. L. DOS. MODELOS HIDRÁULICOS-HIDROLÓGICOS: Conceitos e Aplicações. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 2, n. 3, p. 1–19, 2009.

SANTOS, P. T. DA S.; SANTOS, S. M. DOS; COUTINHO, A. P.; MOURA, G. S. S. DE; ANTONINO, A. C. D. Telhado verde: desempenho do sistema construtivo na redução do escoamento superficial. **Ambiente Construído**, v. 34, n. 12, p. 1967–1970, 2013.

SÃO PAULO. **LEI nº16.402, de 22 de março de 2016. Disciplina o parcelamento, o uso e a ocupação do solo no Município de São Paulo, de acordo com a Lei nº 16.050, de 31 de julho de 2014 – Plano Diretor Estratégico (PDE)**. [s.l: s.n.].

SERVICE, U. S. S. C. **SCS national engineering handbook, section 4: hydrology**. [s.l.] The Service, 1972.

SHI, Z. H.; CHEN, L. D.; FANG, N. F.; QIN, D. F.; CAI, C. F. Research on the SCS-CN initial abstraction ratio using rainfall-runoff event analysis in the Three Gorges Area, China. **Catena**, v. 77, n. 1, p. 1–7, 2009.

SILVA, T. F.; PAIVA, A. L. R. SANTOS, S. M. **Capacidade de Retenção de Água em um Telhado Verde: Estudo de Caso em Caruaru**. XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. **Anais...**2015

SILVA JUNIOR, J. DE A.; DA COSTA, A. C. L.; PEZZUTI, J. C. B.; DA COSTA, R. F. Variabilidade espacial do conforto térmico e a segregação social do espaço urbano na cidade de Belém, PA. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 4, p. 419–428, 2013.

SIMS, A. W. et al. Retention performance of green roofs in three different climate regions. **Journal of Hydrology**, v. 542, p. 115–124, 2016.

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

STOVIN, V. The potential of green roofs to manage urban stormwater. **Water and Environment Journal**, v. 24, n. 3, p. 192–199, 2010.

STOVIN, V.; VESUVIANO, G.; KASMIN, H. The hydrological performance of a green roof test bed under UK climatic conditions. **Journal of Hydrology**, v. 414–415, p. 148–161, 2012.

TASSI, R.; CAMARGO, L.; PICCILLI, D.; PERSCH, C. Telhado verde: uma

alternativa sustentável para a gestão das águas pluviais. **Ambiente Construído**, p. 139–154, 2014.

TASSI, R.; LORENZINI, F.; ALLASIA, D. G. Tool to address green roof widespread implementation effect in flood characteristics for water management planning. **IAHS-AISH Proceedings and Reports**, v. 370, n. June 2015, p. 217–222, 2015.

TAVARES, J. P. N. Enchentes repentinas na cidade de Belém-PA: condições climáticas associadas e impactos sociais no ano de 1987. **Caminhos de Geografia**, v. 9, n. 28, 2009.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia Ciência e Aplicação**. [s.l.: s.n.].

VECCHIA, F. Cobertura verde leve (CVL): ensaio experimental. **Encac - Elacac 2005**, n. Cvl, p. 2146–2155, 2005.

VIJAYARAGHAVAN, K.; JOSHI, U. M. Application of seaweed as substrate additive in green roofs: Enhancement of water retention and sorption capacity. **Landscape and Urban Planning**, v. 143, p. 25–32, 2015.

VIOLA, F.; HELLIES, M.; DEIDDA, R. Retention performance of green roofs in representative climates worldwide. **Journal of Hydrology**, v. 553, p. 763–772, 2017.

VIRK, G., JANSZ, A., MAVROGIANNI, A., MYLONA, A., STOCKER, J; DAVIES, M. Microclimatic effects of green and cool roofs in London and their impacts on energy use for a typical office building. **Energy and Buildings**, v. 88, p. 214–228, 2015.

WATRIN, V. DA R.; BLANCO, C. J. C.; GONÇALVES, E. D. Thermal and hydrological performance of extensive green roofs in Amazon climate, Brazil. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Engineering Sustainability**, p. 1–10, 2019.

WHITTINGHILL, L. J; ROWE, D. B; SCHUTZKI, R; CREGG, B. M. Quantifying carbon sequestration of various green roof and ornamental landscape systems. **Landscape and Urban Planning**, v. 123, p. 41–48, 2014.

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

XIE, H.; YTUARTE, S.; HUADE, G. Heat Island of San Antonio, Texas Detected by MODIS/Aqua Temperature Product. p. 1–7, 2005.

XIMENES, J. P.; BRANDÃO, A. J. D. DAS N. Urban drainage in the metropolitan region of Belém, Brazil: an urbanistic study. **Proceedings of the World Congress on Engineering 2014**, v. I, 2014.

YUAN, Y.; NIE, W.; MCCUTCHEON, S. C.; TAGUAS, E. V. Initial Abstraction and Curve Numbers in Semiarid Watersheds in Southeastern Arizona. **Hydrological Processes**, p. 1–29, 2013.

ZHENG, G.; JING, Y.; HUANG, H.; GAO, Y. Application of improved grey relational projection method to evaluate sustainable building envelope performance. **Applied Energy**, v. 87, n. 2, p. 710–720, 2010.

APÊNDICE A

Cite this article

Waltre VR, Branco CIC and Gonçalves ED
Thermal and hydrological performance of extensive green roofs in Amazon climate, Brazil
Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Engineering Sustainability,
<https://doi.org/10.1680/jems.18.00060>

Research Article

Paper 1800060
Received 04/12/2018; Accepted 21/06/2019

ICE Publishing: All rights reserved

Keywords: energy conservation/
environment/hydrology & water resources

Thermal and hydrological performance of extensive green roofs in Amazon climate, Brazil

Vanessa da Rosa Watrin MSc

PhD student, Civil Engineering Postgraduate Program, Federal University of Pará, Belém, Brazil (Orcid:0000-0002-1057-1398)

Claudio José Cavalcante Branco PhD

Associate Professor, Faculty of Sanitary and Environmental Engineering, Federal University of Pará, Belém, Brazil (corresponding author: branco@ufpa.br) (Orcid:0000-0001-8022-2647)

Edkeyse Dias Gonçalves MSc

Environmental Engineer, Civil Engineering Postgraduate Program, Federal University of Pará, Belém, Brazil (Orcid:0000-0002-3814-1795)

Improper urban planning has been proven to produce excessive environmental impacts in urban areas, such as urban flooding and urban heat islands. A new approach to protecting the urban environment brought forward the idea of low-impact urban development, which uses rainwater-control devices such as cisterns, permeable pavements and green roofs. This study aimed to evaluate the potential of green roofs in two important environmental dimensions: thermal and hydrological. An experimental study was conducted at the Federal University of Pará Guamá Campus, Belém, Brazil. Hydrological and thermal data from a green roof and a fibre-cement roof were collected and compared to analyse the performance of the roofs. The results showed extensive green roofs to be an effective tool for reducing rainfall run-off at the roof scale, particularly for small-storm events, as well as an efficient thermal roof insulation.

1. Introduction

The relationship between cities and water has been established since the earliest human settlements. Water-control techniques were essential for the sedentism process of societies and for the conformation of the urban space (Ximenes and Brandão, 2014). Occupation of urban river basins changed the natural landscape and increased the amount of impermeable areas. In the process of urbanisation, progressive urban development models have been associated with more significant environmental impacts (Chosy, 1997). These urban models have been shown to drive great environmental impacts in urban areas, such as urban flooding, urban heat islands and lack of water supply, among others (Ohnuma *et al.*, 2014). The increase in impermeable urban areas, resulting from unplanned urbanisation, has a direct effect on the hydrological cycle. It modifies the behaviour of surface run-off, soil water infiltration and groundwater depletion; it also decreases evapotranspiration (Gonçalves *et al.*, 2009). According to Justino *et al.* (2012), an addition of 54% in impermeable areas can cause an increase in peak flow up to 59-40%. This fact validates the increase of flood events in urban centres.

Belém in Brazil has had a strong population growth since the 1960s, which has led to the construction of impermeable and unsystematic urban space that modified the urban hydrological cycle of the city. According to Tavares (2009), Belém does not have an efficient drainage system, which intensifies flooding during extreme rain events, particularly when associated with high tide. A first step towards the rehabilitation of hydrological systems affected by urbanisation is to evaluate the solutions and technologies needed to reduce these impacts. The most evident

way to achieve this goal is to ensure that conditions of basins are closer to their natural characteristics, primarily by reducing the extent of impermeable surfaces (Carter and Rasmussen, 2007). This reinforces the importance of the use of sustainable measures and alternatives that help minimise the environmental impact caused by the excess of urban impermeable areas.

A new approach to protecting the urban environment brought forward the idea of low-impact urban development (Lid). Lid principles comprise the conservation and preservation of urban vegetation cover and the execution of engineering projects that respect local natural peculiarities and ensure the conservation of hydrological processes (Souza *et al.*, 2012). Lid uses rainwater-control devices such as cisterns, permeable pavements and green roofs. Karteris *et al.* (2016), Razzaghmanesh *et al.* (2016) and Huang *et al.* (2016) highlight green roof systems as a technology for surface run-off control as well as a thermal insulation solution, reducing ambient temperature and the heat island effect in the urban environment.

Green roofs, also known as vegetated roofs, are horizontal structures with vegetation cover placed on the top of buildings' roofs. They are generally classified as intensive or extensive. Intensive green roofs are composed of a substrate with a thickness greater than 20 cm; extensive roofs have a substrate thickness less than 20 cm, with lower maintenance costs and lower irrigation demand than intensive green roofs (Boucher, 2006). In the past decades, green roofs have been studied for their diverse characteristics: constructive details, vegetation types, insertion in urban and rural environments, influence on energy efficiency and

Offprint provided courtesy of www.icevirtuallibrary.com
Author copy for personal use, not for distribution

environmental comfort and performance as a rainfall-control structure (Berardi *et al.*, 2014).

Considering that soil permeability and vegetation are directly related to the improvement of rainwater drainage and to the attenuation of climate change negative effects, one aim was to evaluate the potential of green roofs in these two dimensions: thermal and hydrological. The lack of studies in the Amazon region served as a motivation for the elaboration of this experimental research. In this context, the main objective of this research was to evaluate the thermal (temperature attenuation) and hydrological performance (retention of rainwater) of extensive green roofs in the Amazon region.

2. Study area

The experimental green roof was built at Federal University of Pará (UFPA) Guamá Campus, located in the city of Belém and situated on the banks of Guamá River, approximately 120 km from the Atlantic Ocean (Figure 1). According to the classification of Köppen (Alvares *et al.*, 2013), the climate of the city of Belém is Am type, characterised by a high annual rainfall index and by a small dry period. The rains are distributed in two distinct periods: the rainy season starts in November/December and runs until May/June, while the period of low precipitation occurs during the other months of the year. The months of April and October are months of transition from one regime to another (Silva *et al.*, 2013).

The study of the land use conducted by da Luz *et al.* (2014), in hydrographic basins of the Metropolitan Region of Belém (MRB), shows a predominance of 70% of the area for buildings and roads, 1% for rivers and lakes and less than 30% for vegetation cover. This absence of vegetation cover impairs interception, infiltration and evapotranspiration, increasing the flow of water in concentrated form and increasing the extent and frequency of urban floods in the MRB (Botelho, 2011).

Although the lowlands are natural forms of the urban site of the city of Belém, they are subject to floods because of tides, which can reach up to 4 m in the tides of syzygy and occur in the months of March/April every year. Therefore, these natural forms associated with the predominance of paved and built areas considerably increase the occurrence of floods in the city of Belém.

3. Data

The experiment was monitored 24 h daily through a camcorder/digital video recorder (DVR) system and a thermal sensor/data logger system. Considering that each precipitation event generates a specific flow rate, measurements were done per event. The run-off measured was the result of the total rainfall excluding the rainwater retained in the green roof system (water intercepted by the grass, water stored by the substrate and water stored by the drainage layer) and evaporated/transpired water. The measurements were done from the heights of the water slides, and data were collected at 5 min intervals. After that, run-off was calculated in litres per second. The comparative analysis of the roof's hydrograms (green roof × fibre-cement roof (FCR)) was used to determine the hydrological performance in terms of run-off reduction and delay. For this analysis, 5 min interval temperature data were used. The selected climatic variables from the weather station were radiation, precipitation and ambient temperature.

4. Methodology

The prototype of the experiment was designed in a single wooden structure supporting three independent roof sections of 1 m² per plot (Figure 2). The tiles specified for the experiment were fibre cement, as they accept a lower roof slope than traditional ceramic tiles. At the same time, they present low thermal inertia and low reflectance (de Abreu *et al.*, 2011), one of the worst thermal cover conditions. A system for capturing and storing drained rainwater was provided for each roof plot. It consisted of a poly(vinyl chloride) gutter leading the rainwater to three translucent and graduated plastic bottles of 60 l storage capacity each. Visual



Figure 1. Location of the experimental green roof

Offprint provided courtesy of www.icevirtuallibrary.com
Author copy for personal use, not for distribution

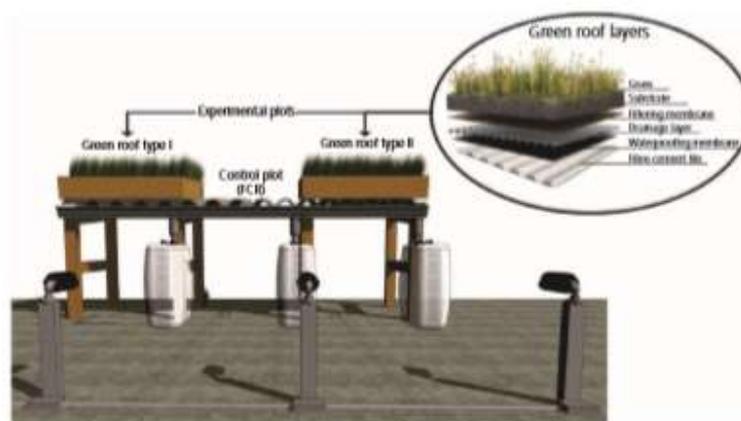


Figure 2. Schematic drawing of the experiment

monitoring of the experiment was carried out with three frontal cameras connected to a DVR system storing the data in video files, allowing the experiment to be monitored full time.

When the system reached its maximum capacity (60 l), the stored water was discharged and the video files were analysed. At 5 min video intervals, the rainwater data were visually measured from the heights of the water slides stored in the plastic bottles (Figure 3).

The roof-surface-temperature-monitoring system was designed using three PT 1000 temperature sensors, which are more accurate than the K-type sensors, positioned at the centre of each roof and immediately below the FCR tiles. For the storage of temperature data, a data-acquisition system (data logger) was used. This system was assembled with Arduino software and a secure digital (SD) card, recording data at 5 min intervals, compatible with the data from the weather station (Hobo U30).

The experimental plots of the roof received bituminous waterproofing over the fibre-cement tiles with the application of a self-adhesive aluminised bituminous membrane, a material of easy application and high durability. Green roof type I (GR I) received a drainage layer mounted from the bottoms of the polyethylene terephthalate bottles arranged side-by-side. The quantity needed for 1 m² of roof was 100 bottles, with 4 cm height and storage capacity of up to 21 l of water per square metre. GR II received a drainage layer composed of prefabricated modules which, according to the manufacturer, stored up to 35 l of water per square metre. The functions of this type of drainage layer are controlled drainage, retention of water in the roots of vegetation and disallowing direct contact of the vegetation with slabs or tiles.

A filtering membrane was placed over the drainage layer. A 5 cm layer of substrate was placed over the filter layer. Japanese lawn

grass (*Zoysia japonica*) was chosen for being well adapted to the tropical climate; it requires little irrigation, and it is resistant to diseases and weeds. It forms a dense grass, presenting excellent cost-benefit and low maintenance costs. Finally, the structure was implanted facing north. To verify the hydrological efficiency of the green roof, it is imperative to consider the influence of antecedent moisture condition (AMC). The Soil Conservation Service AMC classification was used. It evaluates the rainfall volume of the previous 5 d before the monitored rainfall event and divides the soil moisture condition into three different classes (I, II and III).

- AMC I: situation in which soils are dry. The accumulated precipitation of the previous 5 d is less than 12.7 mm.
- AMC II: average situation in which soils correspond to the moisture of field capacity. The cumulative precipitation of the previous 5 d is greater than 12.7 mm and less than 27.9 mm.
- AMC III: situation where considerable rainfall occurred in the previous 5 d and the soil is saturated. The accumulated precipitation of the previous 5 d is greater than 27.9 mm.

5. Discussion and analysis

5.1 Hydrological performance

The data were collected from 20 September to 3 November 2017. There were 28 rainfall events in this period, but only eight events produced valid data. Thirteen did not generate run-off on the green roofs because the rainfall events were less than 2 mm, and seven events were lost due to equipment failure or power outage. Rainfall volumes precipitated in valid events ranged from 2.6 to 11.0 mm, while the green roof run-off ranged from 0 to 0.2 l/min. Green roof storm-water retention ranged from 95.0 to 37.5%, with a mean retention of 75% (Figure 4). This result was similar to the values measured by Carter and Rasmussen (2007), with storm-water retention of 90–39% and a mean retention of 78%.

Offprint provided courtesy of www.icevirtuallibrary.com
 Author copy for personal use, not for distribution



Figure 3. Video monitoring process

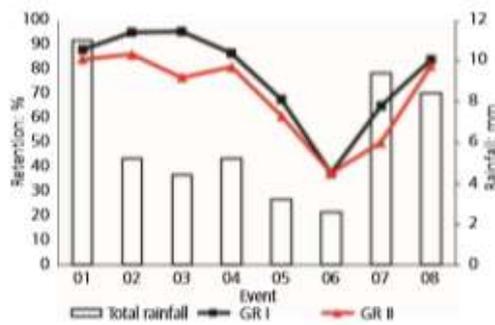


Figure 4. Green roof retention and rainfall height per event

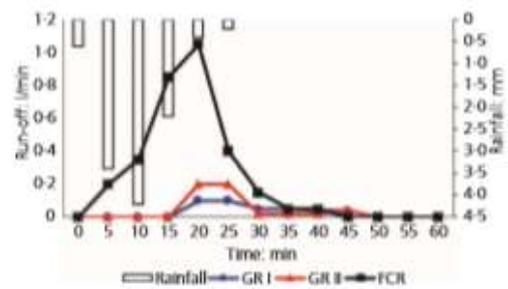


Figure 5. Event 01 hydrogram - 20 September 2017

Figure 5 shows the hydrogram for event 01 (20 September 2017), with 11 mm total rainfall, duration of 25 min and 4 d without any previous rain event. The effects of delay and attenuation of run-off caused by the installation of the green roof can be seen in the hydrogram and are similar to those described by Stovin *et al.*

(2012). The delay was approximately 15 min, with a mean peak flow reduction of 85%. According to Carson *et al.* (2013), the flow attenuation decreases as the volume of precipitation increases. However, the initial saturation condition of the roof cannot be ignored (Stovin *et al.*, 2012; Tassi *et al.*, 2015); it suffers direct influence of previous rain events. Observing the

Offprint provided courtesy of www.icevirtuallibrary.com
 Author copy for personal use, not for distribution

Table 1. Relation between AMC, rainfall and retention

Event	Date	Rainfall volume of previous 5 d: mm	AMC	Total rainfall: mm	Retention GR I: %	Retention GR II: %
01	20 September 2017	1.2	I	11.0	87.74	83.87
02	24 September 2017	11.4	I	5.2	95.00	86.00
03	25 September 2017	16.6	II	4.4	95.29	76.47
04	27 September 2017	9.6	I	5.2	86.54	80.77
05	5 October 2017	39.8	III	3.2	67.39	60.87
06	8 October 2017	37.8	III	2.6	37.50	37.50
07	11 October 2017	11.2	I	9.4	65.00	50.00
08	3 November 2017	11.8	I	8.4	83.72	81.40

values measured in event 01, it can be seen that it presented the highest value of precipitation volume among the monitored events and one of the highest values of run-off attenuation, resulting in a total retention of 87.74% in GR I and 83.87% in GR II (Figure 4).

AMC class III events presented the lowest storage capacity compared with AMC I and AMC II events, which showed similar results, excluding event 07, which was AMC class I and had a medium storage capacity (Table 1). If both parameters are evaluated, it can be inferred for this sample that AMC had a greater impact on the retention capacity of green roofs than

rainfall volume. However, the sample did not include extreme events, which, according to Carter and Rasmussen (2007), have a strong influence on the reduction in green roof retention capacity.

Figure 6 relates the peak flow of the extensive green roofs with the FCR, which had an average peak flow of 0.54 l/min. GR I registered a reduction of peak discharges of 74.3%, corresponding to an average of 0.08 l/min, while GR II registered a reduction of 73.3% and a peak flow average of 0.11 l/min. Reduction of peak discharges (Figure 7) is one of the most important characteristics of the green roofs investigated in reference literature: Stovin (2010) measured a 57% average rainfall reduction in spring in Sheffield, UK, while Fioretti *et al.* (2010) measured a peak flow reduction of 89% in 25 events distributed over a year in Genoa, Italy. Despite the discrepancy in the measured values, one should consider the influence of different methodologies and climatic conditions.

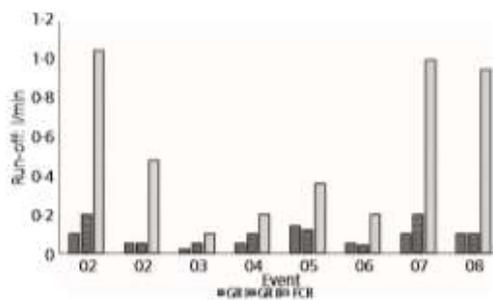


Figure 6. Peak discharges per event and plot of roofs

5.2 Thermal performance

For the thermal performance analysis, two extreme days were selected: the day with the highest solar incidence index (3 March 2018) within the monitored period (3 January–30 June 2018) and the day with the lowest solar incidence index (4 June 2018), in the same period. In Figures 8–11, the ambient temperature variation curves are presented, in comparison with the temperatures provided by the roofs analysed. Figure 8 details the thermal amplitudes of the lower surface of GR I and the FCR.

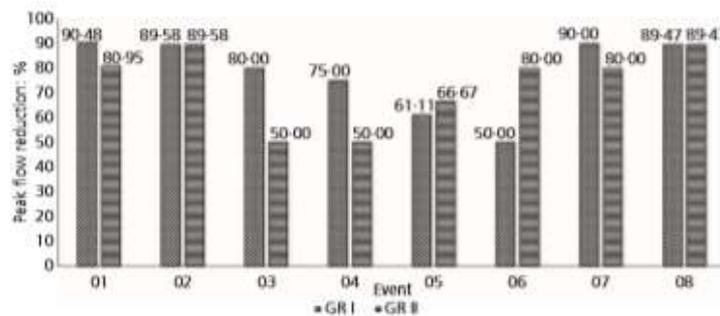


Figure 7. Reduction rate of peak discharges

Offprint provided courtesy of www.icevirtuallibrary.com
Author copy for personal use, not for distribution

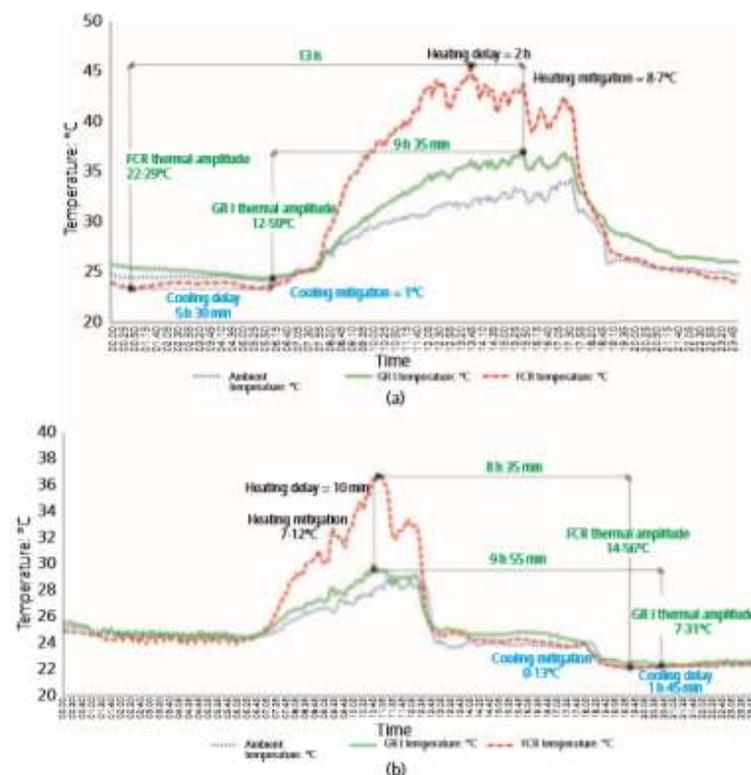


Figure 8. Experimental (GR I) and control (FCR) plot surface temperature day variation: (a) day of highest solar incidence; (b) day of lowest solar incidence

The FCR peak temperature was 45.6°C on the day of greatest solar incidence (Figure 8(a)) and 36.8°C on the day of smallest solar incidence (Figure 8(b)). The reduction of the peak temperature of GR I relative to that of the FCR was 8.7°C on the day of greatest solar incidence and 7.12°C on the day of smallest solar incidence. These results are similar to the findings of Qin *et al.* (2012) and Fioretti *et al.* (2010) of peak temperature reductions of 7.3 and 7°C, respectively. The protection provided by GR I made it a little difficult to cool the roof surface during night on the day of greatest solar incidence, registering a temperature variation of 1°C, and almost no effect on the day of least solar incidence, where the temperature variation was less than 1°C. GR II presented equivalent performance (Figure 9).

The results validate the green roof thermal inertia: reducing the heat transfer to the fibre-cement tile during the day (heating delay and reduction) and presenting a discrete cooling delay at night. In the literature, several studies have shown the insulating properties of green roofs, reducing the heat transfer to the roofs and

reducing the ambient temperature. Jaffal *et al.* (2012) describe a reduction in the coverage temperature between 9 and 19°C in summer at La Rochelle, France. Marinho (2013) describes a reduction in the external temperature of a roof dock up to 23°C in Belém, Pará, similar to the findings of Vecchia (2005).

The influence of rain on the roofs' surface temperature can be observed in Figure 10. On the day of highest solar incidence (Figure 10(a)), a short-term rainfall occurred at night. The control plot (FCR) underwent a temperature reduction of 1.5°C, while the experimental plots (GR) obtained a reduction of 0.5°C. On the day of lowest solar incidence (Figure 10(b)), the radiation reduction caused by the cloudiness prior to the effective beginning of rain drove a temperature reduction at the control plot (8°C) that was more significant than that caused by the rainfall event itself. When the rainfall ended, the FCR had an additional temperature reduction of 2.7°C, with a total reduction of 10.7°C. On the experimental plots, the temperature reduction before and after the rainfall event was 3.5°C, the reduction totalling 7°C. The

Offprint provided courtesy of www.icevirtualibrary.com
 Author copy for personal use, not for distribution

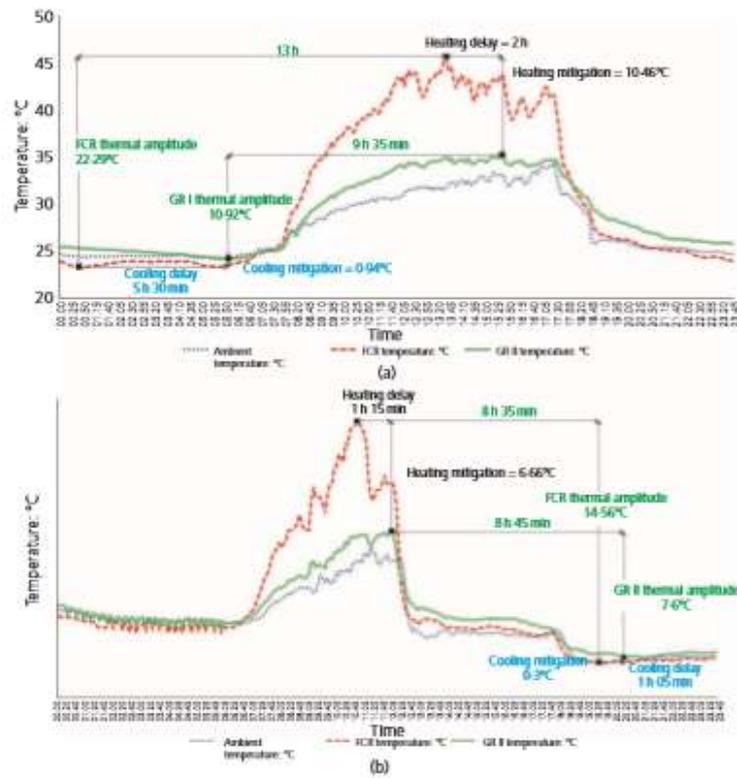


Figure 9. Experimental (GR II) and control (FCR) plot surface temperature day variation: (a) day of highest solar incidence; (b) day of lowest solar incidence

temperatures of all plots practically equalled the ambient temperature of 22°C at the end of the rain event (Figure 10(b)). Analysing Figure 10(b), it is noted that all temperatures decreased during the rainfall. This decrease in temperature was higher in the FCR, as the substrate and vegetation of the green roofs functioned as thermal insulation – that is, during the day with high temperatures, the green roofs reduced the internal heating of the houses. However, if temperatures decrease – for example, as in the case of rain or at night – green roofs make it difficult to transfer heat between the houses and the external environment; thus, in these cases, the temperatures of the unprotected roofs are lower. However, the absolute values of temperature depend on the external value of the temperature, if the amount of rainfall is more or less or if the night is colder or hotter.

The charts in Figure 11 show the relationship between solar radiation and surface temperature. The direct influence of the

radiation on the temperature of the roofs is evident. Both the heat gain and loss of the FCR are greater than those of the green roof. These data reinforce the thermal inertia properties of green roofs as pointed out by Custleton *et al.* (2010), Qin *et al.* (2012) and Berardi *et al.* (2014).

On the day of highest solar radiation, the ambient temperature remained lower than the temperatures of the FCR and the green roofs all throughout the daytime period (Figures 8–11). During night-time, the temperature of the FCR tends to be equal to the ambient temperature, while the temperatures of the green roofs remained slightly higher than the ambient temperature, by 1.6°C on average. On the day with the lowest solar radiation, the ambient temperatures again remained lower than those of the three roofs in the daytime period. However, in the night period, the temperatures of the three roofs corresponded to the ambient temperature, with a mean difference of 0–1.5°C.

Offprint provided courtesy of www.icevirtuallibrary.com
Author copy for personal use, not for distribution

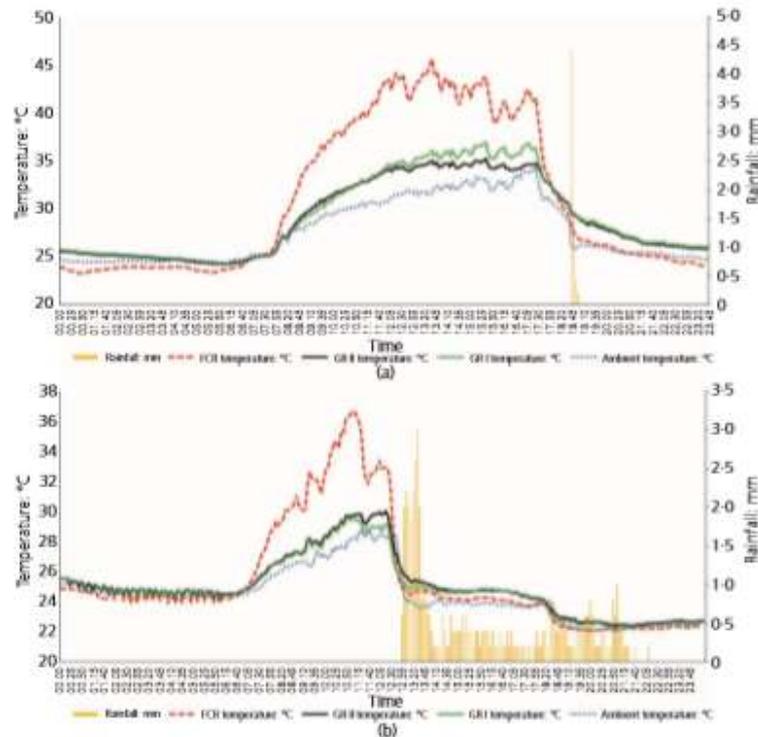


Figure 10. Temperature and rainfall relation: (a) day of highest solar incidence; (b) day of lowest solar incidence

6. Conclusions

The two experimental plots (green roofs) effectively reduced peak flow, with the peak discharge of the green roof measured to be 50–90% less than that of the control roof. On an event basis, run-off depth is directly influenced by rainfall depth. However, the results pointed out that AMC may have a greater impact on the retention capacity of green roofs than rainfall depth, as observed from the impact of the monitoring duration on the results.

Extensive green roofs in Belém, in an Amazon tropical climate, have the potential to retain and evapotranspire up to 75% of rainfall compared with a conventional roof, during the period of low precipitation and with the minimum depths for rainfall reduction. Testing depths greater than 50 mm should be considered, to reduce or eliminate irrigation requirements that can compromise run-off reduction.

The green roofs efficiently reduced the roof surface temperature, with the peak temperature reduction measured to be 10–46°C, which was 6–6°C less than that of the control roof. This result

validates the thermal inertia potential of the green roof: it reduces the heat transfer to the roof during the day (heating delay and reduction) and presents a discrete cooling delay at night. Although the reduction in temperature caused by the green roof is not enough to suppress the need for electrical cooling systems in an Amazon tropical climate, it may have a great impact in decreasing the level of energy consumption. The authors' evaluations suggest that the green roof has a great impact on temperature reduction and has the smallest effect on the modification of the drainage and infiltration system. However, it is necessary to continue evaluating the effects of green roofs on the reduction of temperature and peak flow.

However, this paper does not discuss the costs of maintaining green roofs, mainly during periods of drought, when irrigation is necessary, and this means that consumption of water must be dimensioned so that the roofs do not become unsustainable from the environmental point of view. Water is needed to keep green roofs in good condition and help them fulfil their cooling purpose. This is a good topic for future work. It is also necessary that the composition of green roofs with vegetation be adapted to different

Offprint provided courtesy of www.icevirtuallibrary.com
Author copy for personal use, not for distribution

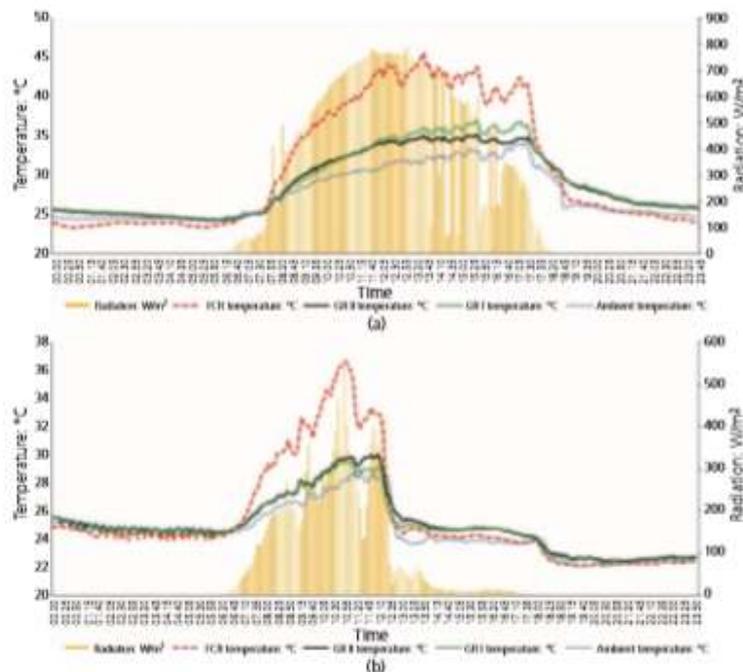


Figure 11. Temperature and radiation relation: (a) day of highest solar incidence, (b) day of lowest solar incidence

Amazonian climates. In terms of social and economic impacts, in any region, the adoption of green roofs will generate employment and income, as they need to be manufactured and maintained. This is another good topic for future work.

Acknowledgements

The second author would like to thank the National Council for Scientific and Technological Development (CNPq) for funding this study's research productivity grant (Process 303542/2018-7). The authors would like to thank the Office for Research (PROFESP) and the Foundation for Research Development (FADESP) of the Federal University of Pará for their support through grant number PAPQ 2018.

REFERENCES

- Alvares CA, Stappe JL, Sentelhas PC, De Moraes Gonçalves JL and Sparovek G (2013) Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift* 22: 711–728, <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.
- Borardi U, GhaffarianHoseini A and GhaffarianHoseini A (2014) State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. *Applied Energy* 115: 411–428, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.10.047>.
- Botelho RGM (2011) Hacia hidrográficas urbanas. In *Geomorfología Urbana* (Guerra AJT (ed.)), Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, Brazil, pp. 1193–1198 (in Portuguese).
- Boucher I (2006) *Les Toits Verts*. Ministre des Affaires Municipales et Régions Québec, Québec City, QC, Canada (in French).
- Carson TB, Marasco DE, Culligan PJ and McGillis WR (2013) Hydrological performance of extensive green roofs in New York City: observations and multi-year modeling of three full-scale systems. *Environmental Research Letters* 8(2), article 024036, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/2/024036>.
- Carter TL and Rasmussen TC (2007) Hydrologic behavior of vegetated roofs. *Journal of the American Water Resources Association* 42(5): 1261–1274, <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2006.0605299.x>.
- Cattleton HF, Stovin V, Beck SBM and Davison JB (2010) Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit. *Energy and Buildings* 42(10): 1582–1591, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.05.004>.
- Choay F (1997) *O Urbanismo: Utopias e Realidades – uma Antologia*. Perspectiva, São Paulo, Brazil (in Portuguese).
- da Luz LM, Rodrigues JEC, Cristo LD and da Silva MD (2014) Estado geomambiental em bacias urbanas em Belém-PA. *Boletim Amazonico de Geografia* 1: 145–160 (in Portuguese).
- de Abreu PG, Abreu VMN, Coldebella A et al. (2011) Análise termográfica da temperatura superficial de telhas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 15(11): 1193–1198, <https://doi.org/10.1590/S1415-43662011001100013> (in Portuguese).
- Floretti R, Palla A, Larza LG and Principi P (2010) Green roof energy and water related performance in the Mediterranean climate. *Building and Environment* 45: 1890–1904, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.03.001>.

Offprint provided courtesy of www.icevirtuallibrary.com
Author copy for personal use, not for distribution

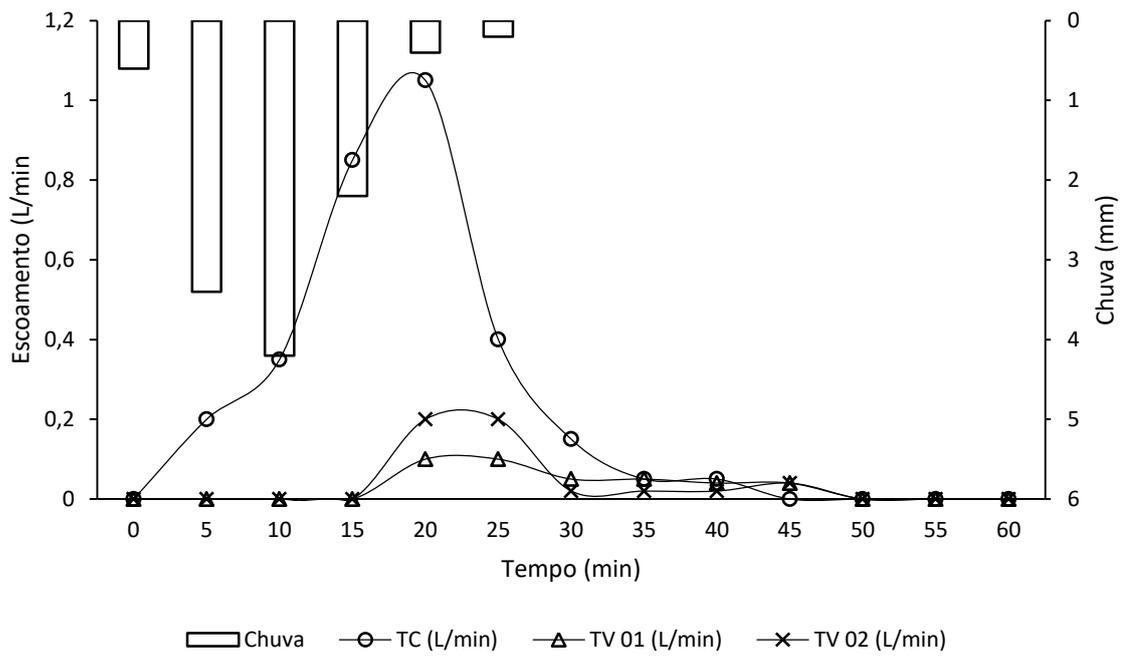
- Gonçalves M, Polidoro M and Silva DF (2009) Análise dos índices de impermeabilização do solo utilizando geoprocessamento: proposta de atualização do decreto n°. 402/1980 para projetos de drenagem no município de Londrina-PR. *Proceedings of II Seminário de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Paranaíba do Sul, Taubaté, Brazil*, pp. 569–576 (in Portuguese).
- Huang Y, Chen C and Tsai Y (2016) Reduction of temperatures and temperature fluctuations by hydroponic green roofs in a subtropical urban climate. *Energy and Buildings* 129: 174–185, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.023>.
- Jaffal I, Ouldoukhitine SE and Belarbi R (2012) A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance. *Renewable Energy* 43: 157–164, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.12.004>.
- Justino EA, Paula HM and Paiva ECR (2012) Análise do efeito da impermeabilização dos solos urbanos na drenagem de água pluvial do município de Uberlândia-MG. *Espço em Revista* 13(2): 16–38 (in Portuguese).
- Karteris M, Theodoridou I, Mallinis G, Tsironi E and Karteris A (2016) Towards a green sustainable strategy for Mediterranean cities: assessing the benefits of large-scale green roofs implementation in Thessaloniki, Northern Greece, using environmental modelling, GIS and very high spatial resolution remote sensing data. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 58: 510–525, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.098>.
- Marinho D (2013) *Desempenho Termoenérgico da Utilização de Telhado Vegetal em Edificações no Clima Amazônico*. Master's thesis, Universidade Federal do Pará, Belém, Brazil (in Portuguese).
- Ohnuma AA Jr, De Almeida Neto P and Mendonça EM (2014) Análise da retenção hídrica em telhados verdes a partir da eficiência do coeficiente de escoamento. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 19(2): 41–52, <https://doi.org/10.21168/rbrh.v19n2.p41-52> (in Portuguese).
- Qin X, Wu X, Chiew YM and Li Y (2012) A green roof test bed for stormwater management and reduction of urban heat island effect in Singapore. *British Journal of Environment and Climate Change* 2(4): 410–420, <https://doi.org/10.9734/BJECC/2012/2704>.
- Razzaghpour M, Beecham S and Salami T (2016) The role of green roofs in mitigating Urban Heat Island effects in the metropolitan area of Adelaide, South Australia. *Urban Forestry & Urban Greening* 15: 89–102, <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.11.013>.
- Silva JD Jr, da Costa ACL, Pezzoli JCB and da Costa RF (2013) Variabilidade espacial do conforto térmico e a segregação social do espaço urbano na cidade de Belém, PA. *Revista Brasileira de Meteorologia* 28(4): 419–428, <https://doi.org/10.1590/S0102-77862013000400008> (in Portuguese).
- Souza CF, Cruz MAS and Tucci CEM (2012) Desenvolvimento urbano de baixo impacto: planejamento e tecnologia verdes para a sustentabilidade das águas urbanas. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 17(2): 9–18, <https://doi.org/10.21168/rbrh.v17n2.p9-18> (in Portuguese).
- Stovin V (2010) The potential of green roofs to manage urban stormwater. *Water and Environment Journal* 24(3): 192–199, <https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2009.00174.x>.
- Stovin V, Vesuviano G and Kasmin H (2012) The hydrological performance of a green roof test bed under UK climatic conditions. *Journal of Hydrology* 414–415: 148–161, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.10.022>.
- Tassi R, Lorenzini F and Allasia DG (2015) Tool to address green roof widespread implementation effect in flood characteristics for water management planning. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences* 370: 217–222, <https://doi.org/10.5194/piahs-370-217-2015>.
- Tavares JPN (2009) Enchentes repentinas na cidade de Belém-PA: condições climáticas associadas e impactos sociais no ano de 1987. *Caminhos de Geografia* 9(28): 1–6 (in Portuguese).
- Vecchia F (2005) Cobertura verde leve (CVL): ensaio experimental. *Proceedings of ENCAC/ELACAC 2005, Campinas, Brazil*, pp. 2146–2155 (in Portuguese).
- Ximenes JP and Brasílio AJD (2014) Urban drainage in the metropolitan region of Belém, Brazil: an urbanistic study. *Proceedings of the World Congress on Engineering 2014, London, UK*, vol. 1, pp. 358–371.

How can you contribute?

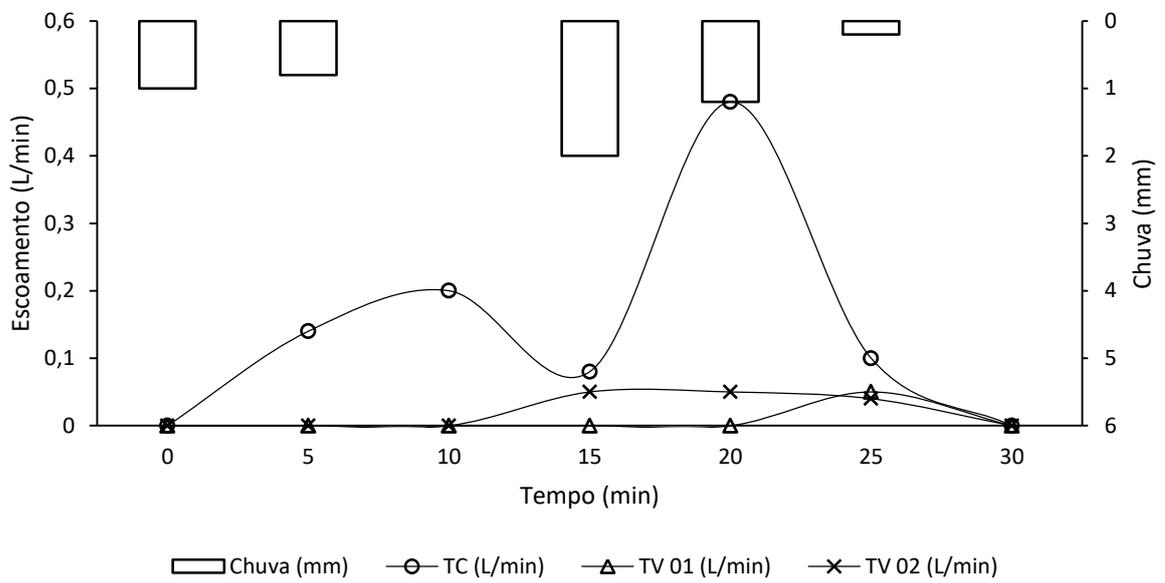
To discuss this paper, please email up to 500 words to the editor at journals@ice.org.uk. Your contribution will be forwarded to the author(s) for a reply and, if considered appropriate by the editorial board, it will be published as discussion in a future issue of the journal.

Proceedings journals rely entirely on contributions from the civil engineering profession (and allied disciplines). Information about how to submit your paper online is available at www.icevirtuallibrary.com/page/authors, where you will also find detailed author guidelines.

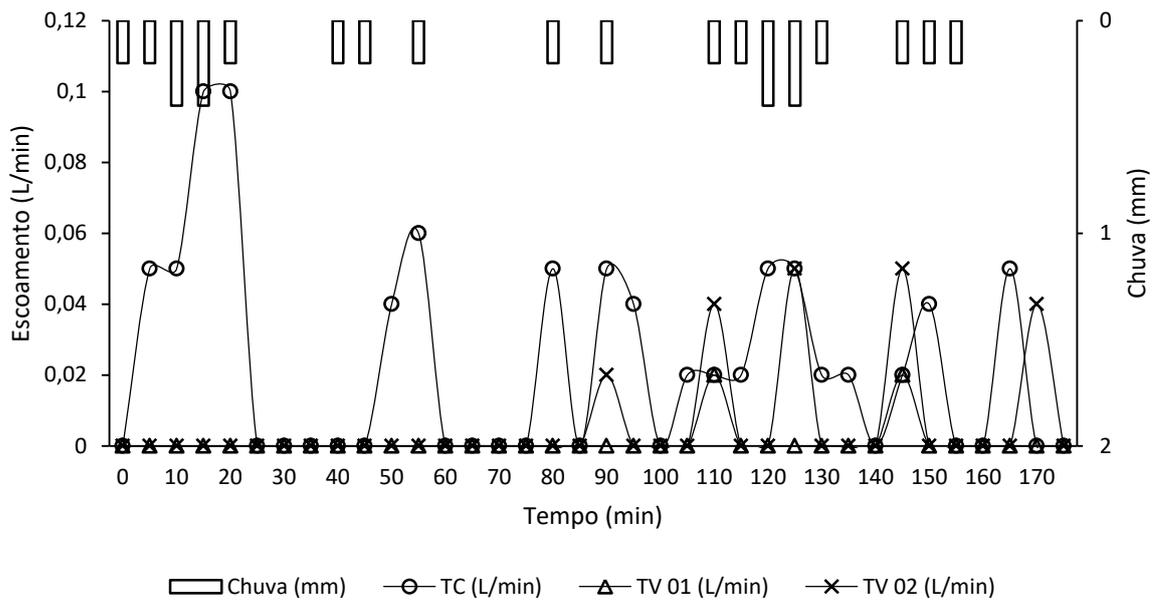
APÊNDICE B



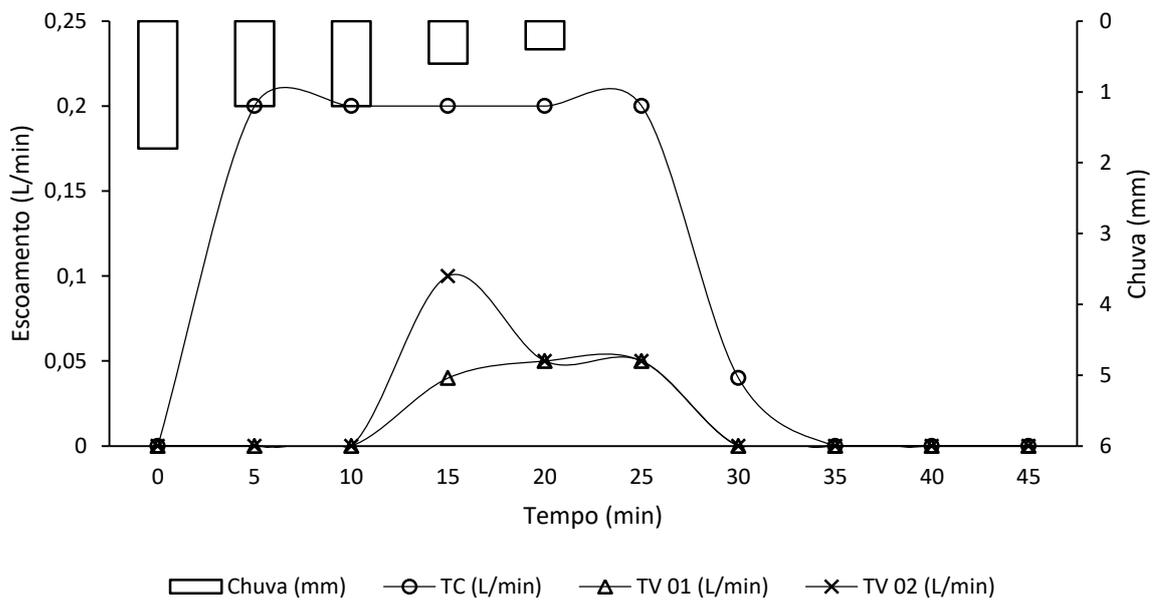
Hidrograma do evento 01 – 2º semestre 2017 – 20/09/2017



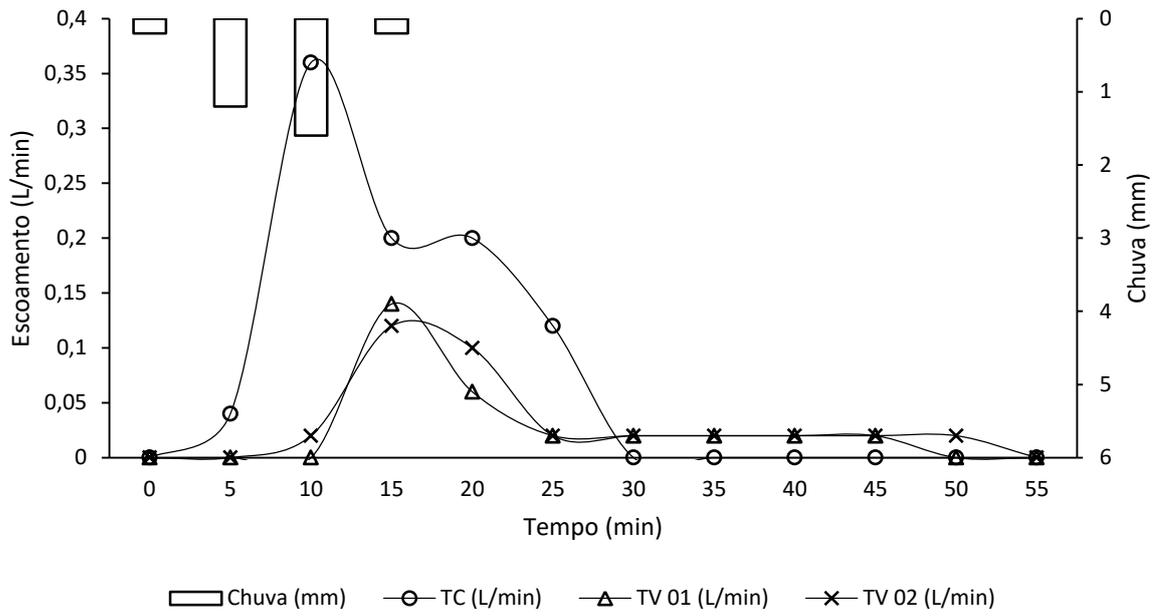
Hidrograma do evento 02 – 2º semestre 2017 – 24/09/2017



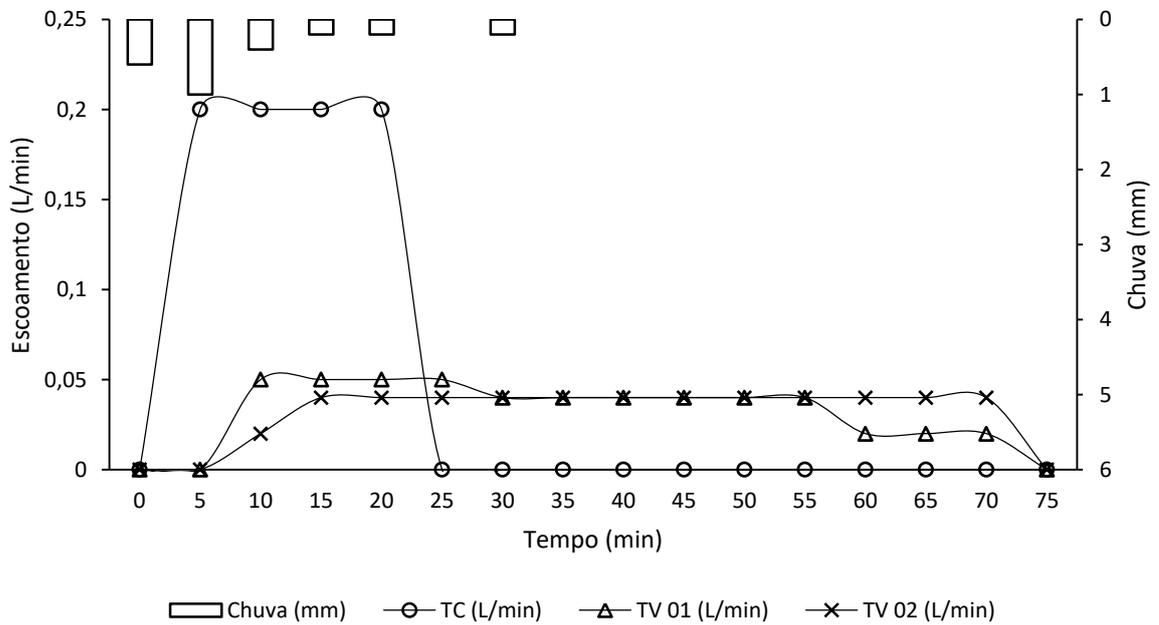
Hydrograph of event 03 – 2° semestre 2017 – 25/09/2017



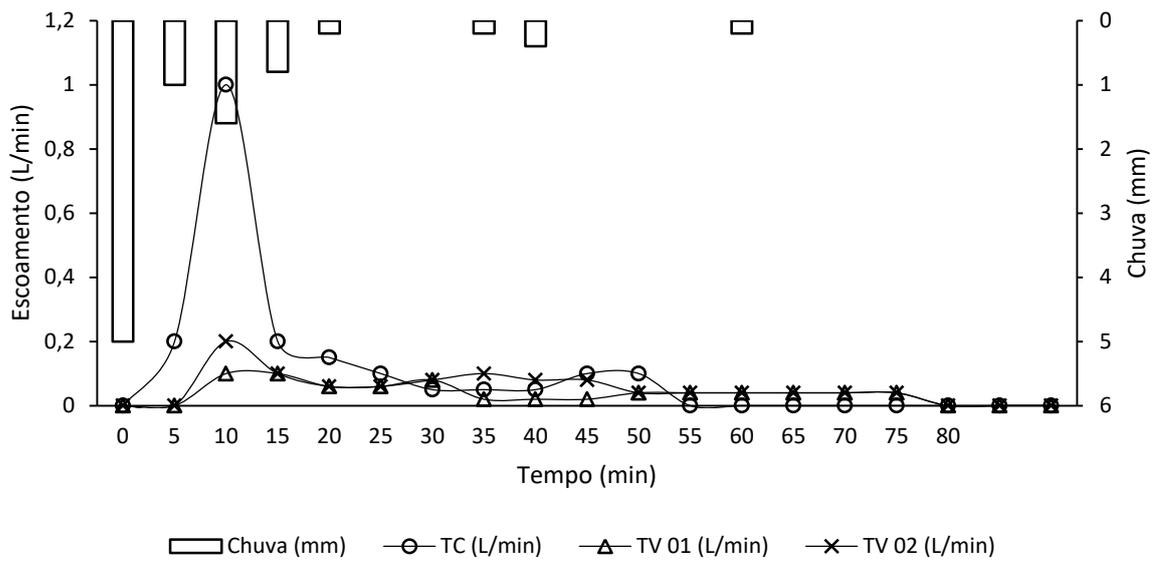
Hydrograph of event 04 – 2° semestre 2017 – 27/09/2017



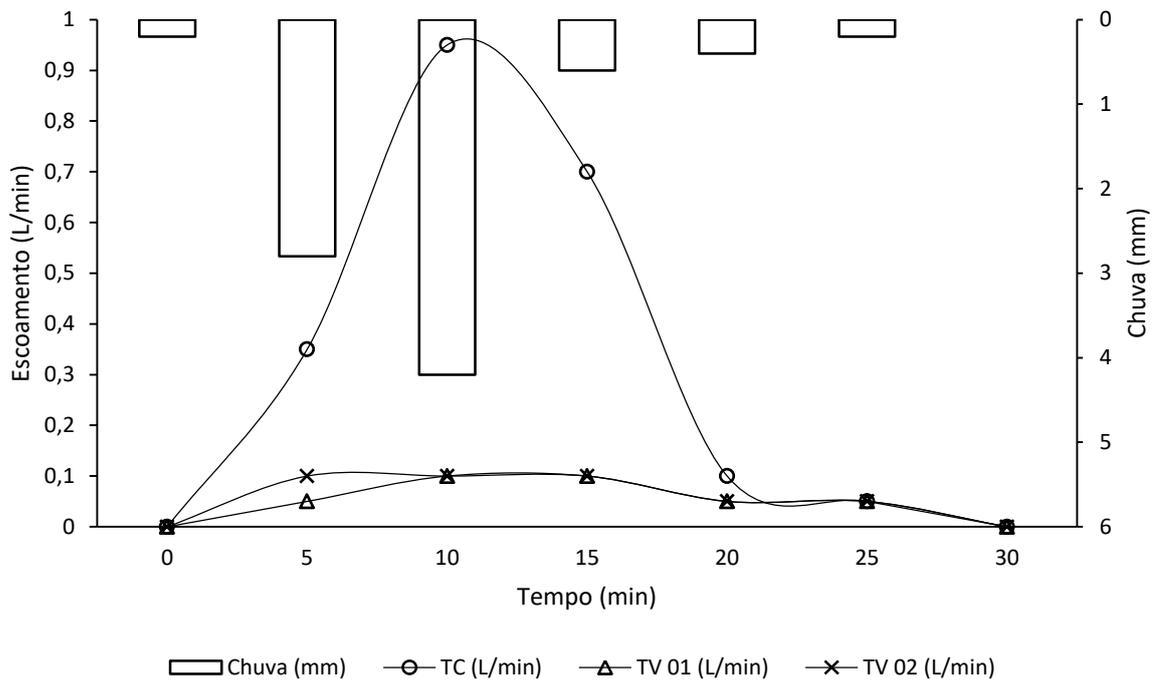
Hydrograph of event 05 – 2° semestre 2017 – 05/10/2017



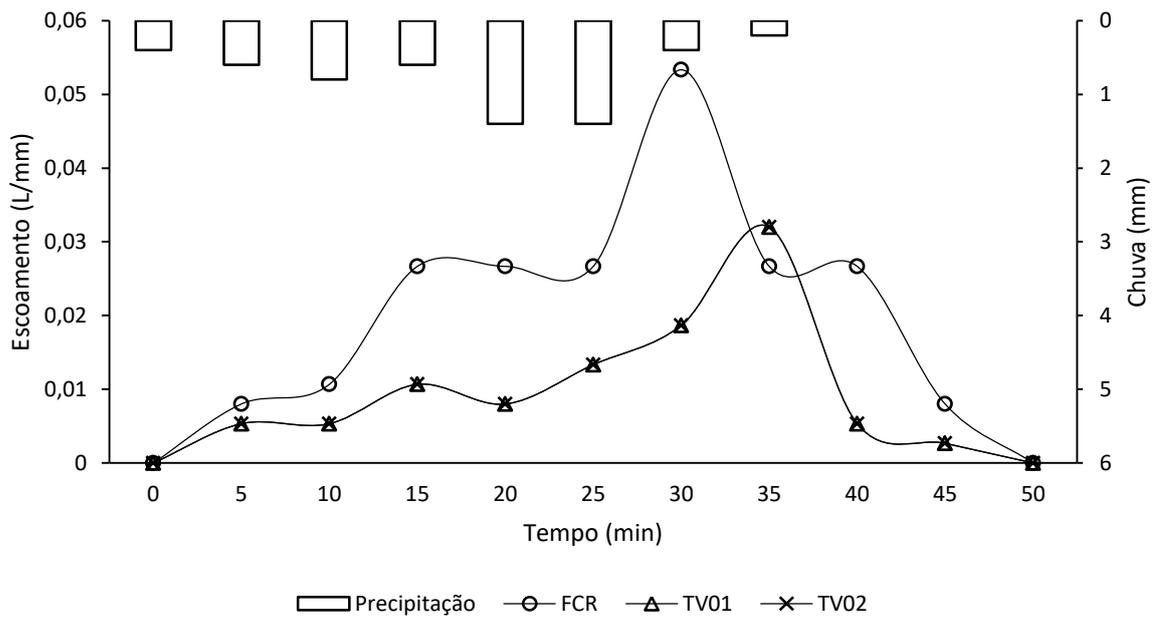
Hydrograph of event 06 – 2° semestre 2017 – 08/10/2017



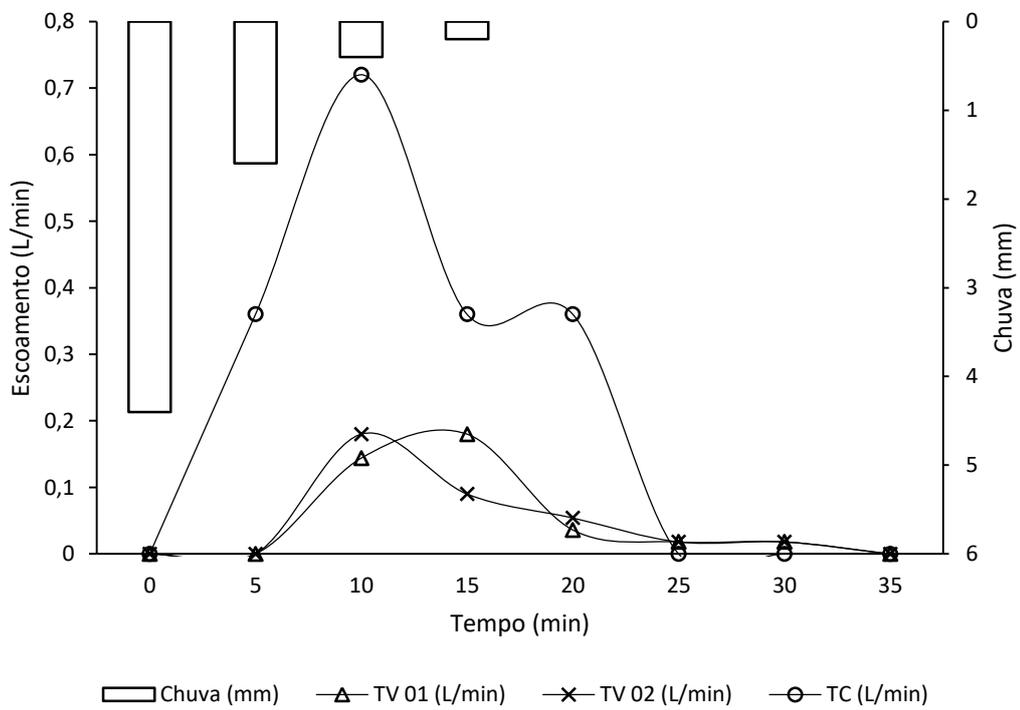
Hidrograma do evento 07 – 2º semestre 2017 – 11/10/2017



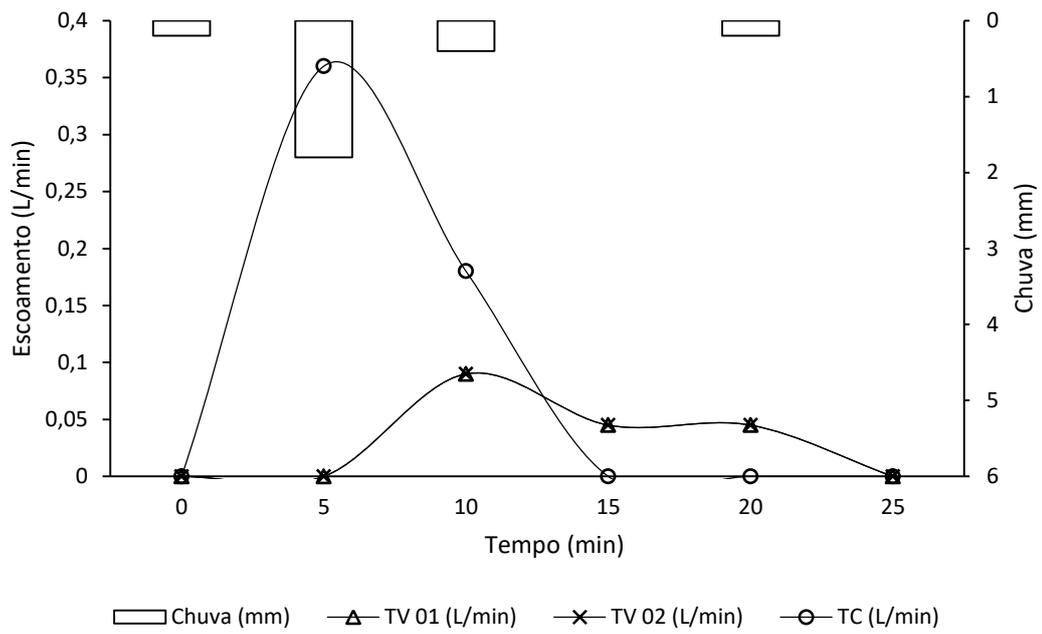
Hidrograma do evento 08 – 2º semestre 2017 – 03/11/2017



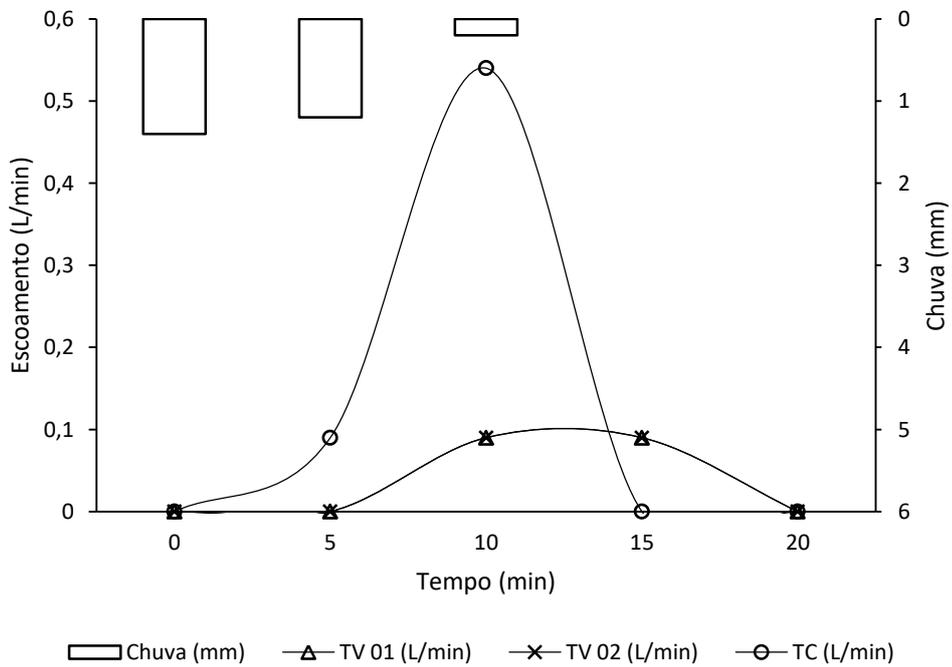
Hidrograma do evento 01 – 1º semestre 2018 – 20/02/2018



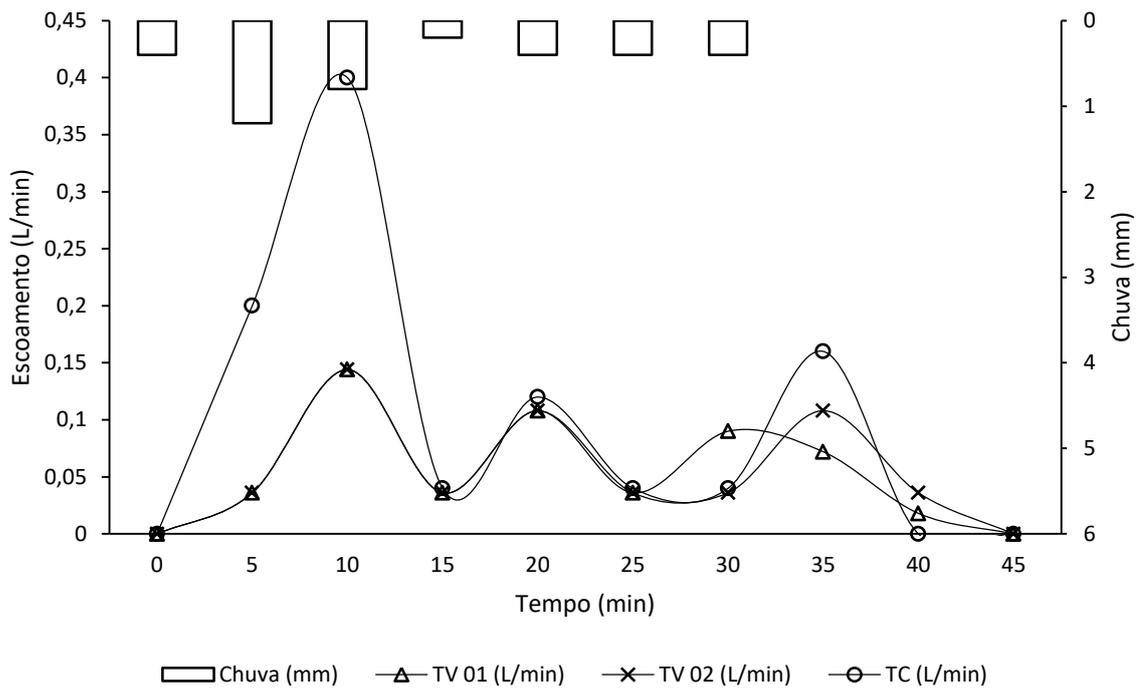
Hidrograma do evento 02 – 1º semestre 2018 – 03/03/2018



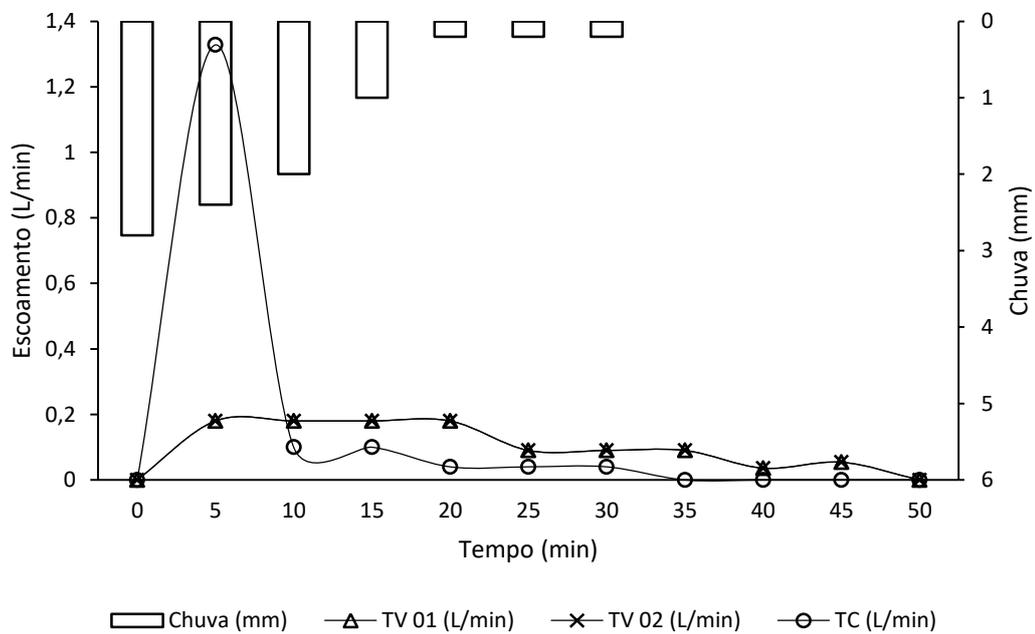
Hydrograph of event 03 – 1^o semester 2018 – 05/03/2018



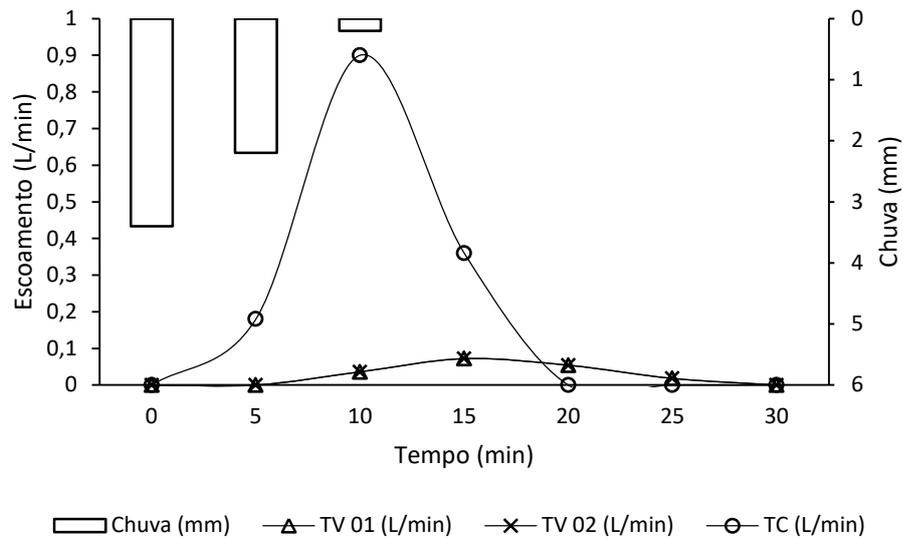
Hydrograph of event 04 – 1^o semester 2018 – 08/03/2018



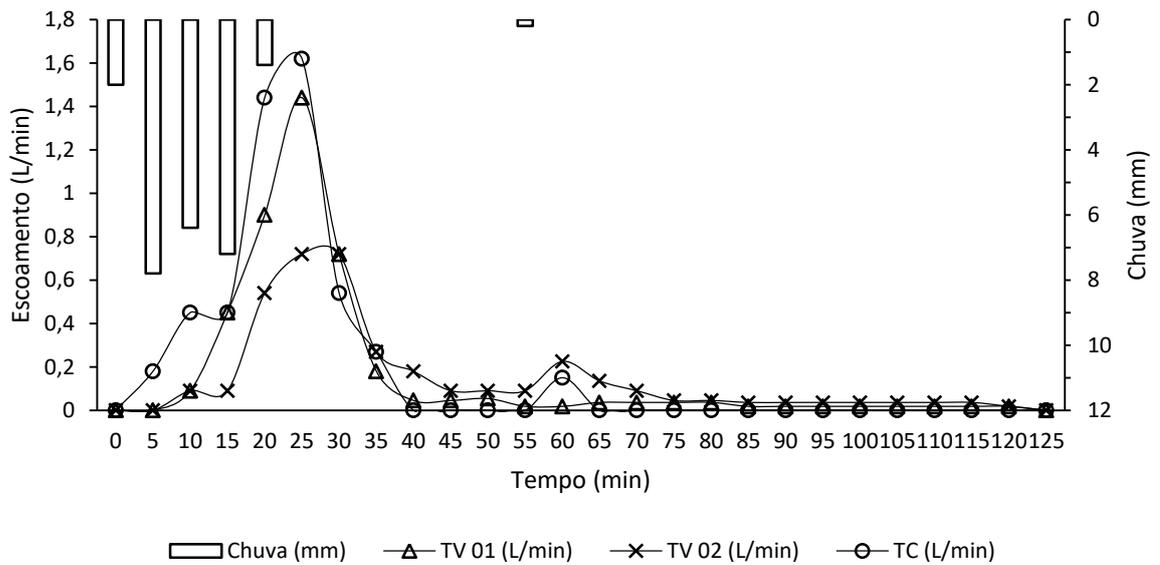
Hidrograma do evento 05 – 1º semestre 2018 – 08/03/2018



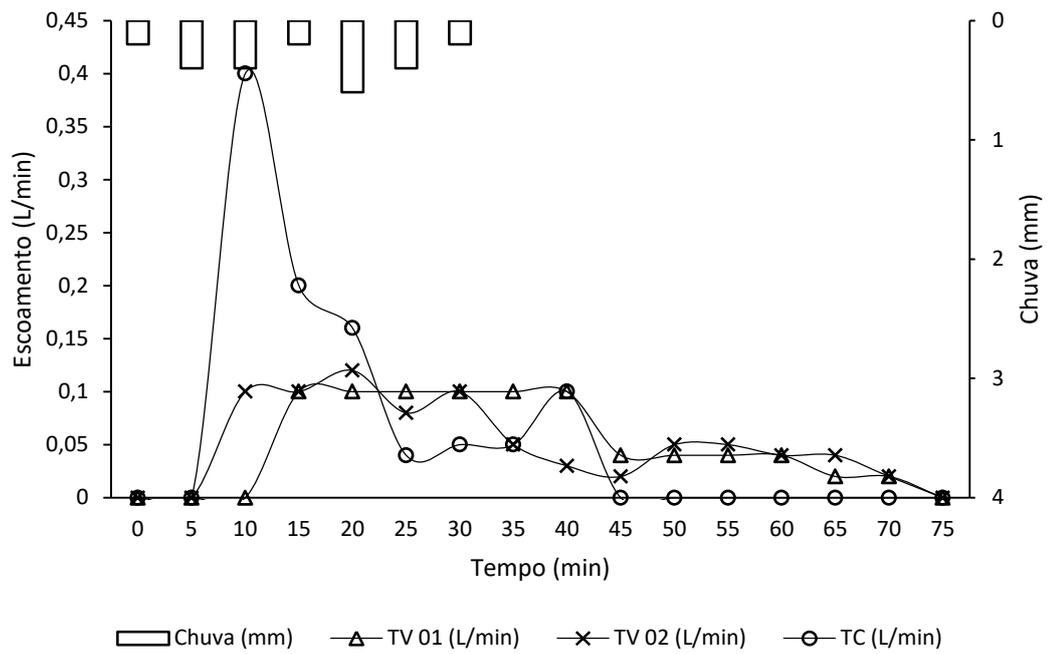
Hidrograma do evento 06 – 1º semestre 2018 – 14/03/2018



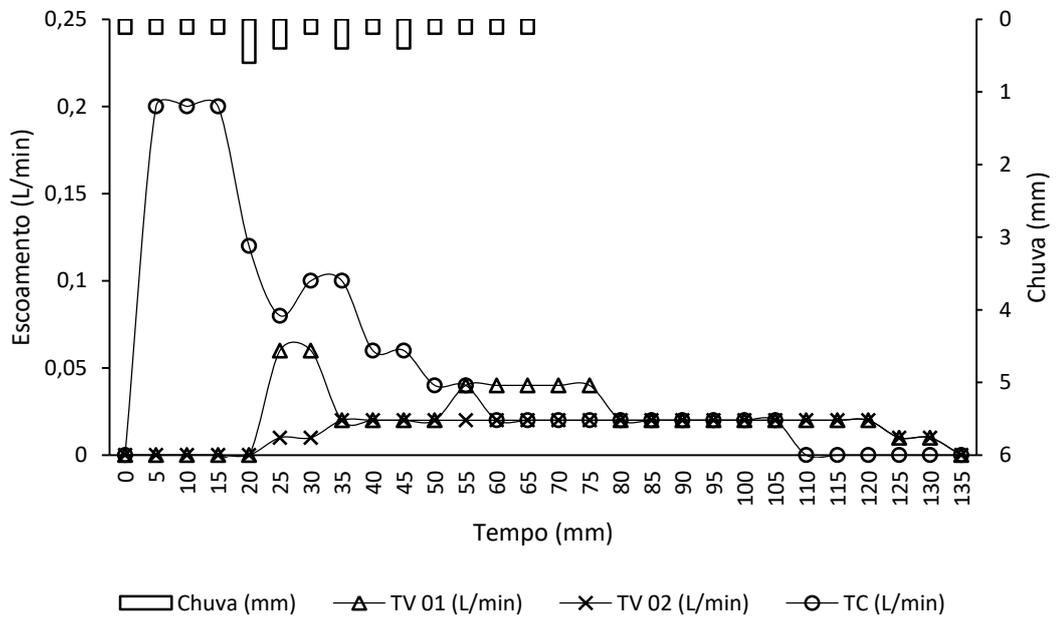
Hidrograma do evento 07 – 1º semestre 2018 – 20/03/2018



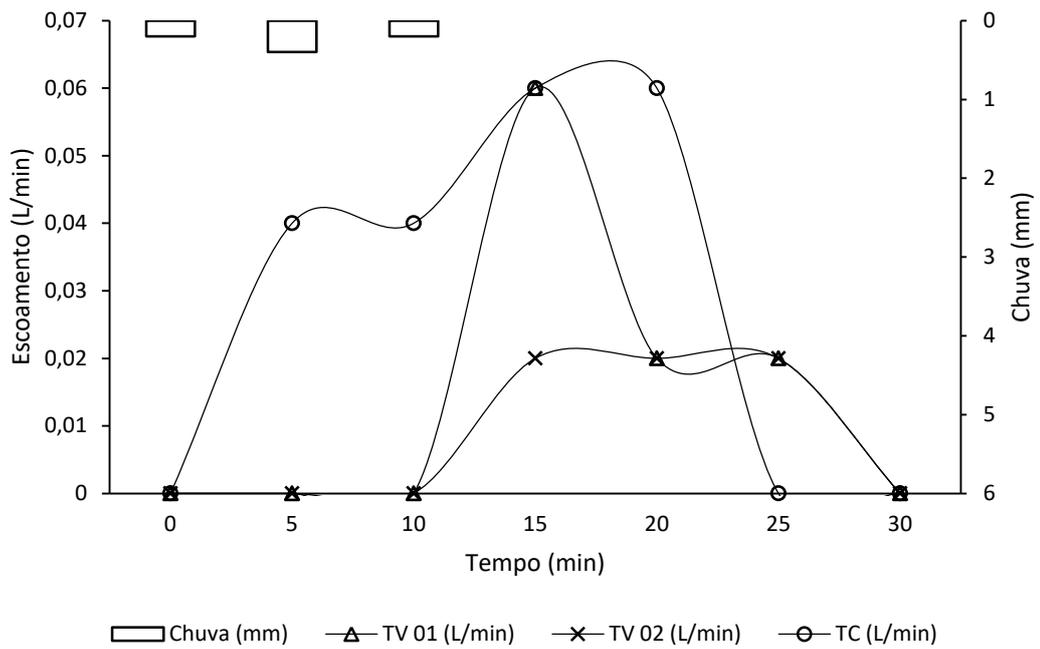
Hidrograma do evento 08 – 1º semestre 2018 – 20/03/2018



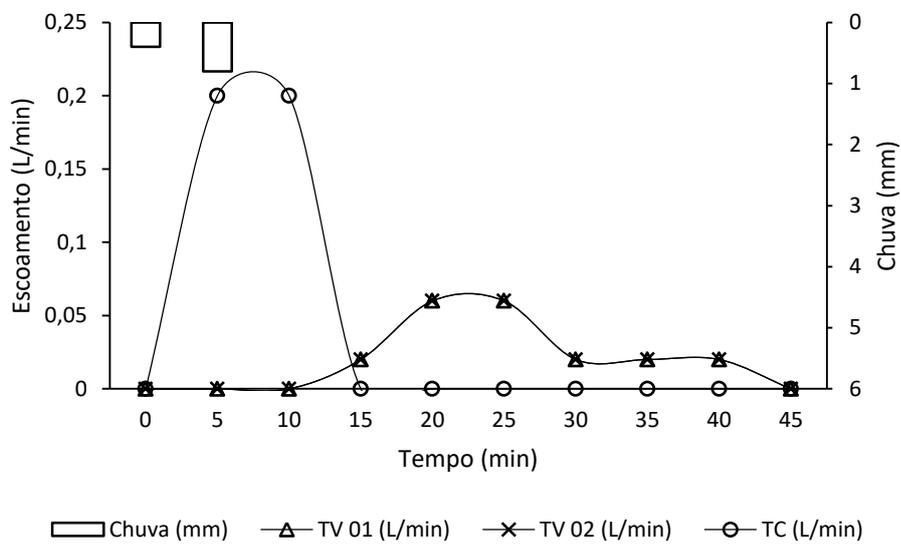
Hidrograma do evento 09 – 1º semestre 2018 – 20/03/2018



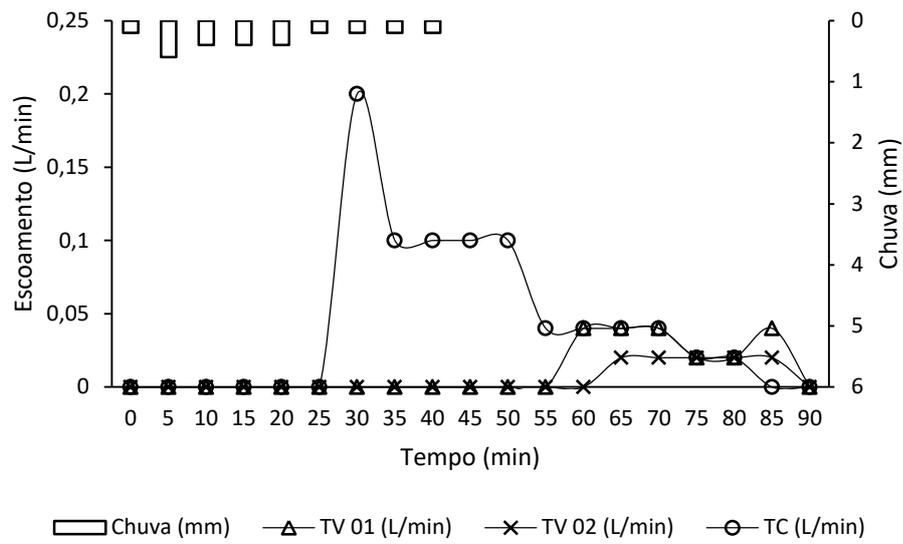
Hidrograma do evento 10 – 1º semestre 2018 – 02/05/2018



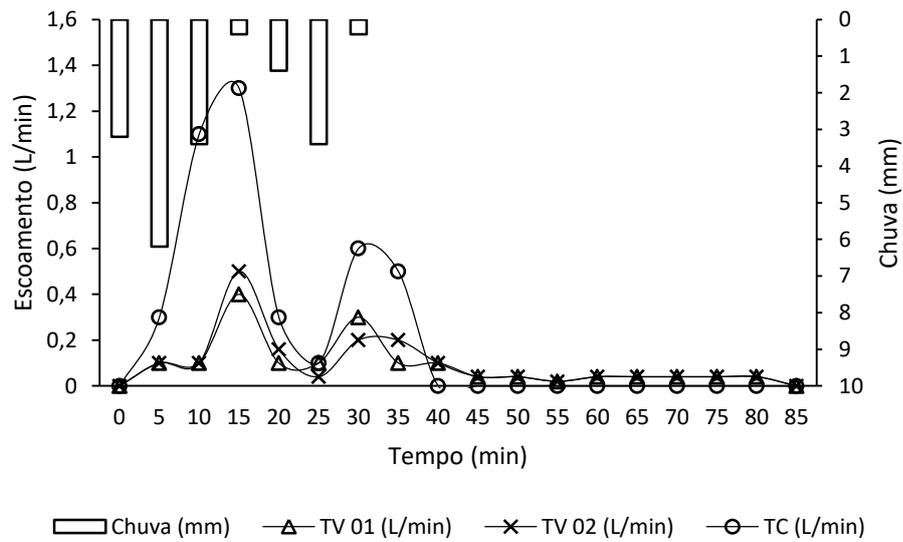
Hidrograma do evento 11 – 1º semestre 2018 – 03/05/2018



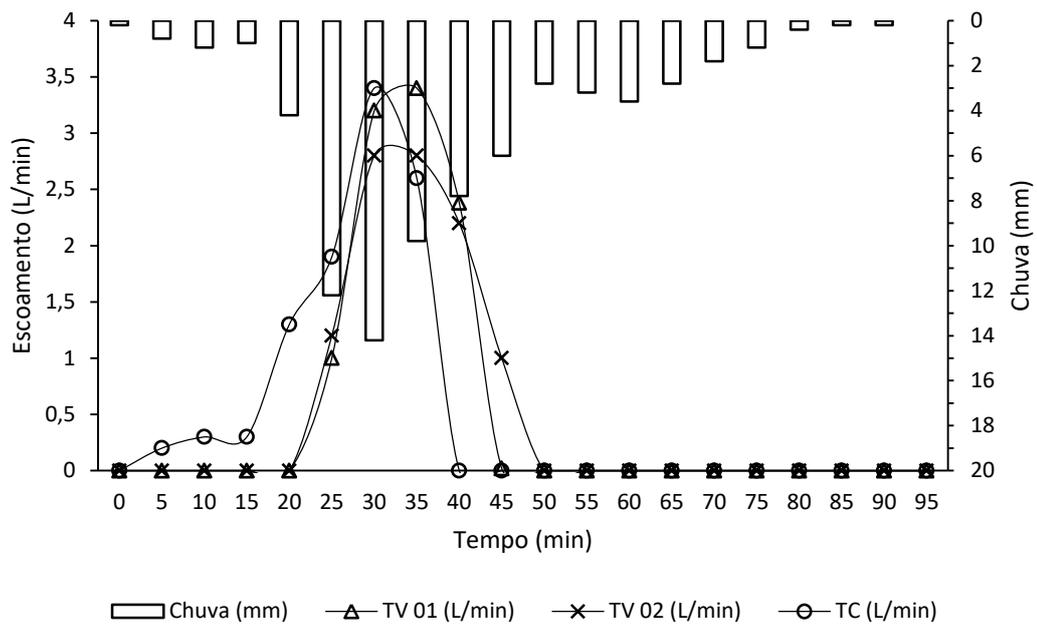
Hidrograma do evento 12 – 1º semestre 2018 – 03/05/2018



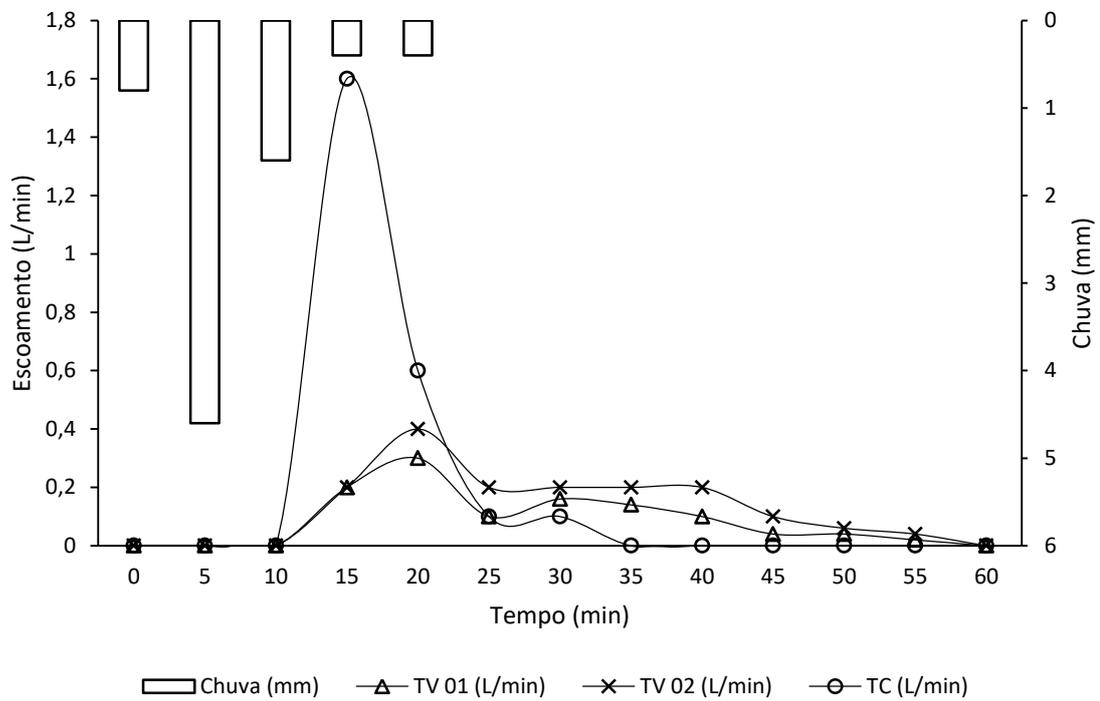
Hidrograma do evento 13 – 1º semestre 2018 – 04/05/2018



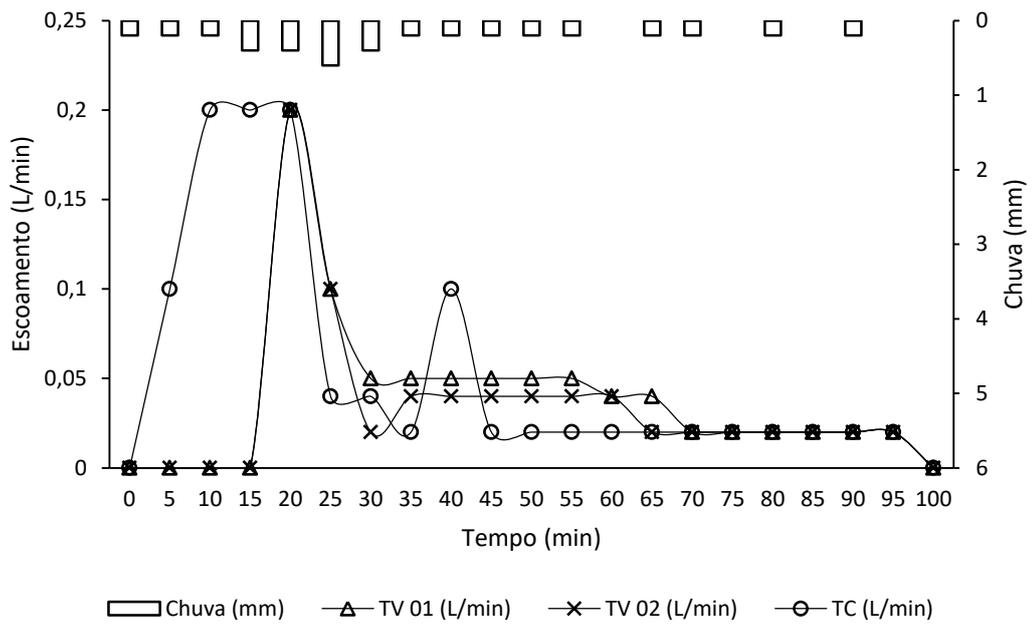
Hidrograma do evento 14 – 1º semestre 2018 – 06/05/2018



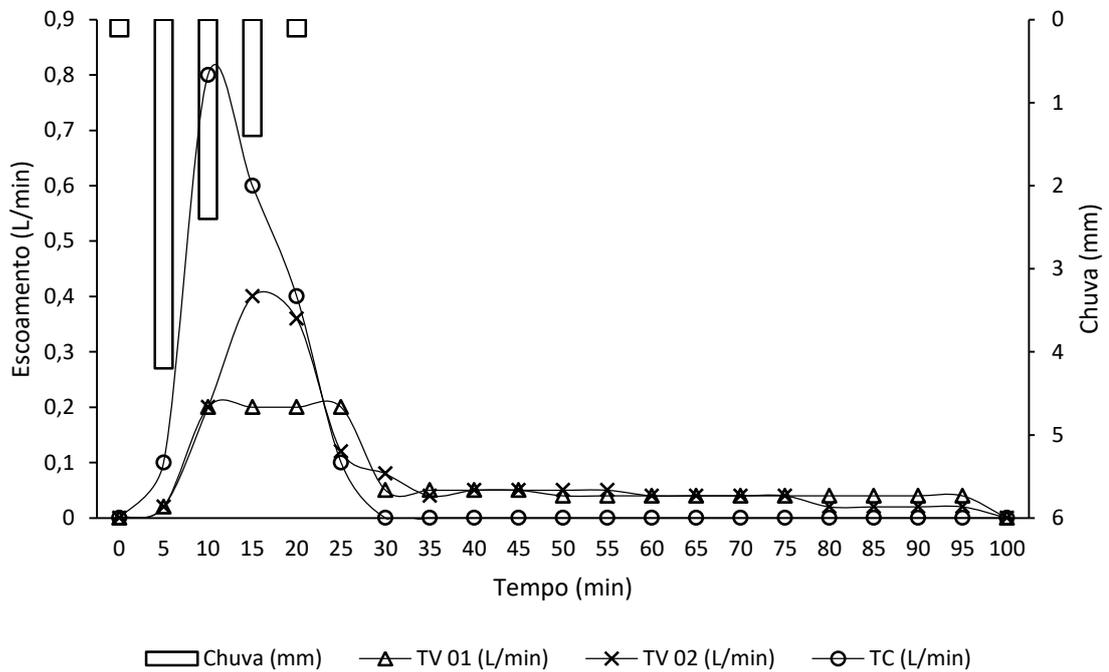
Hidrograma do evento 15 – 1º semestre 2018 – 07/05/2018



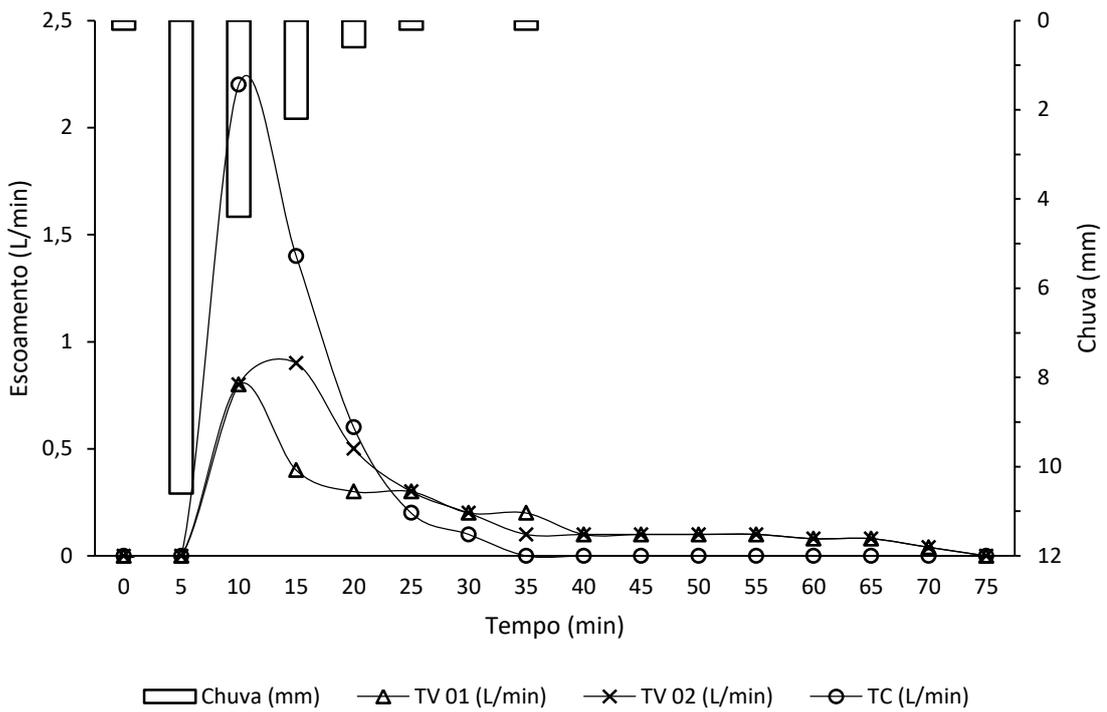
Hidrograma do evento 16 – 1º semestre 2018 – 10/05/2018



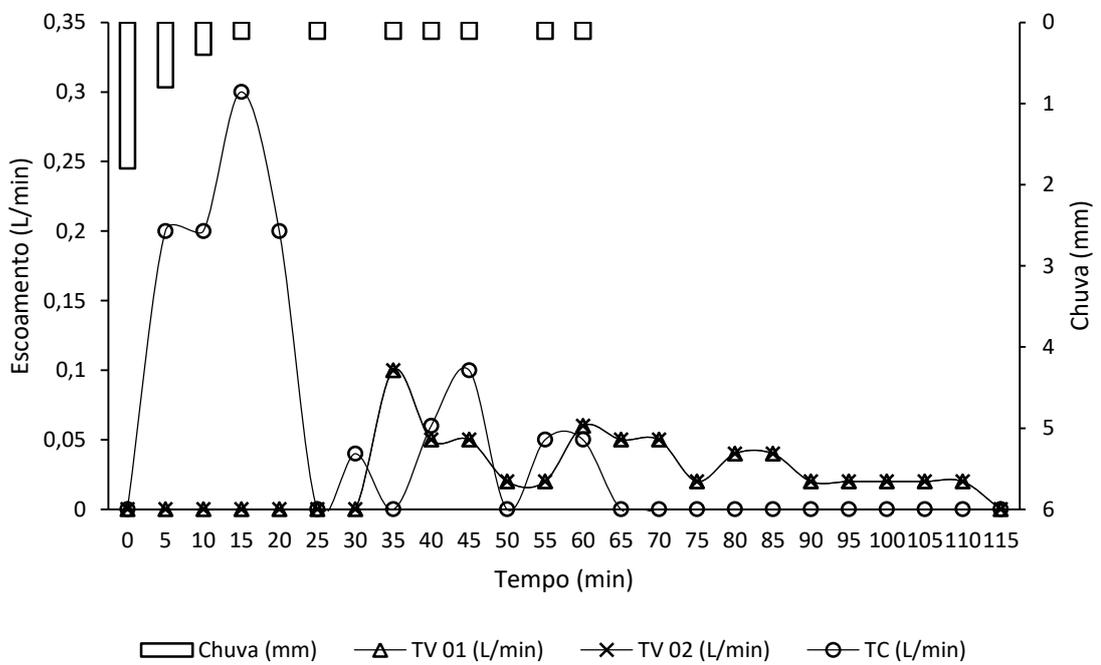
Hidrograma do evento 17 – 1º semestre 2018 – 11/05/2018



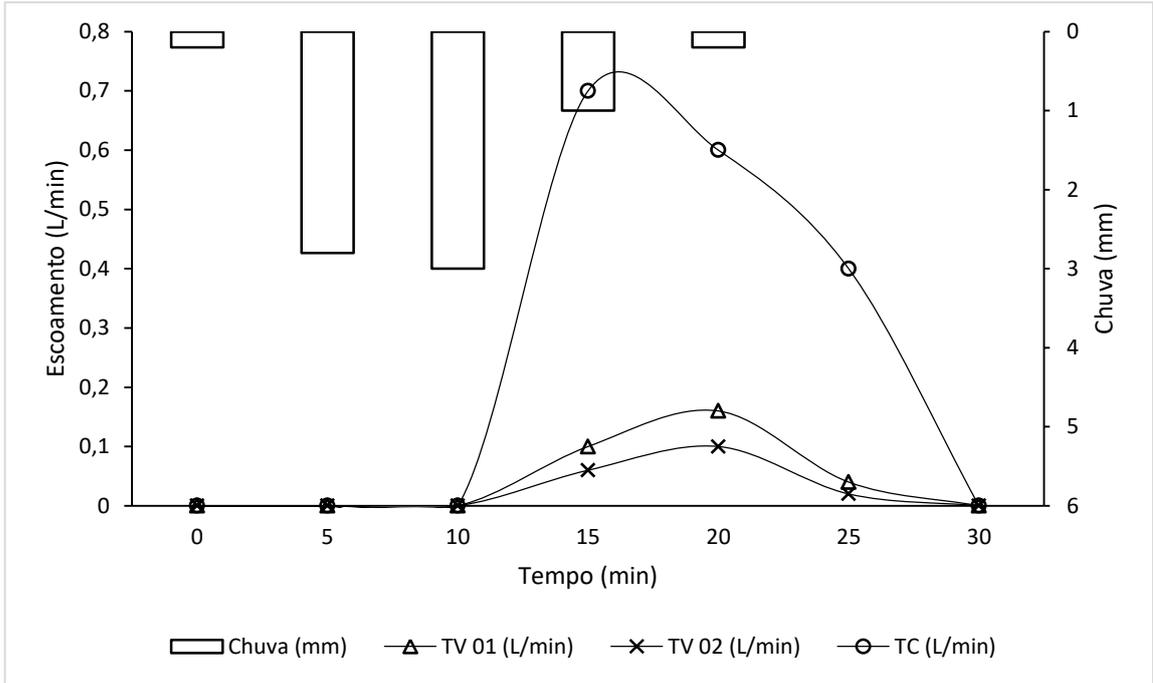
Hidrograma do evento 18 – 1º semestre 2018 – 12/05/2018



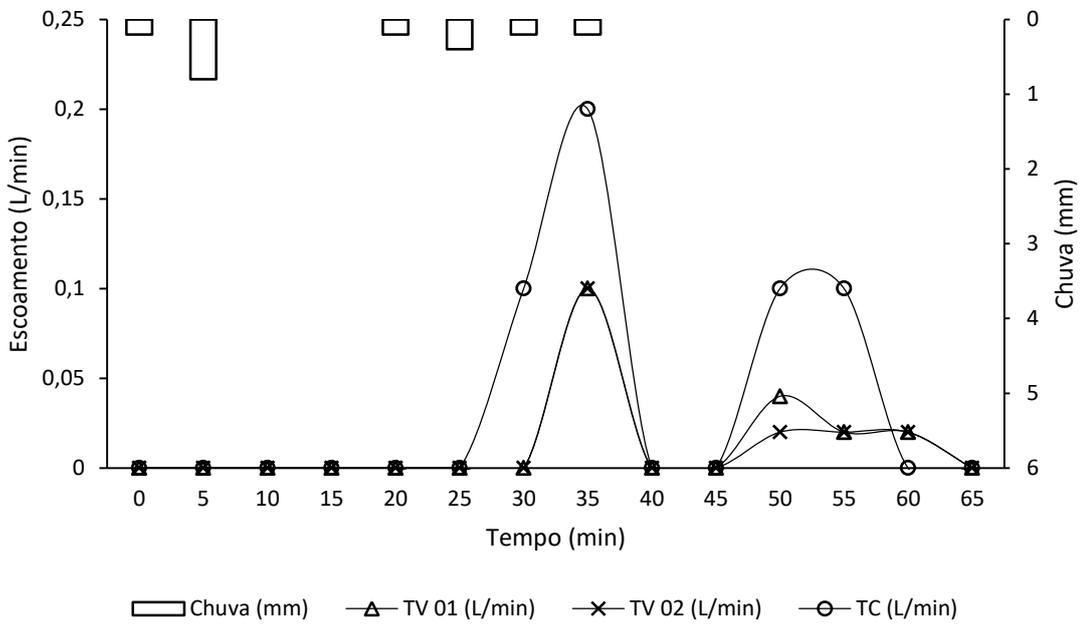
Hidrograma do evento 19 – 1º semestre 2018 – 13/05/2018



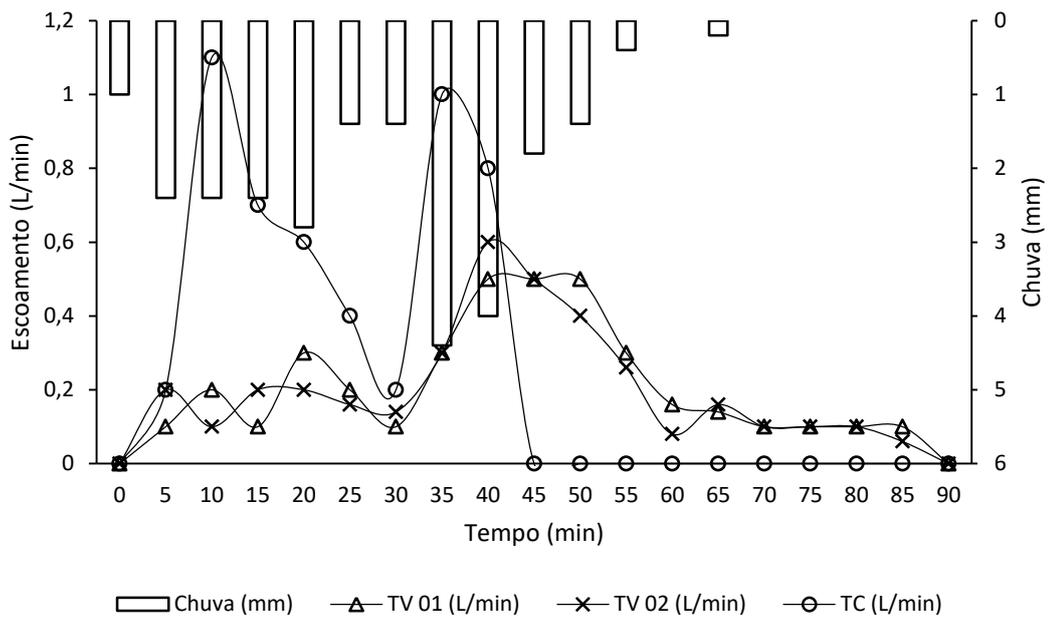
Hidrograma do evento 20 – 1º semestre 2018 – 14/05/2018



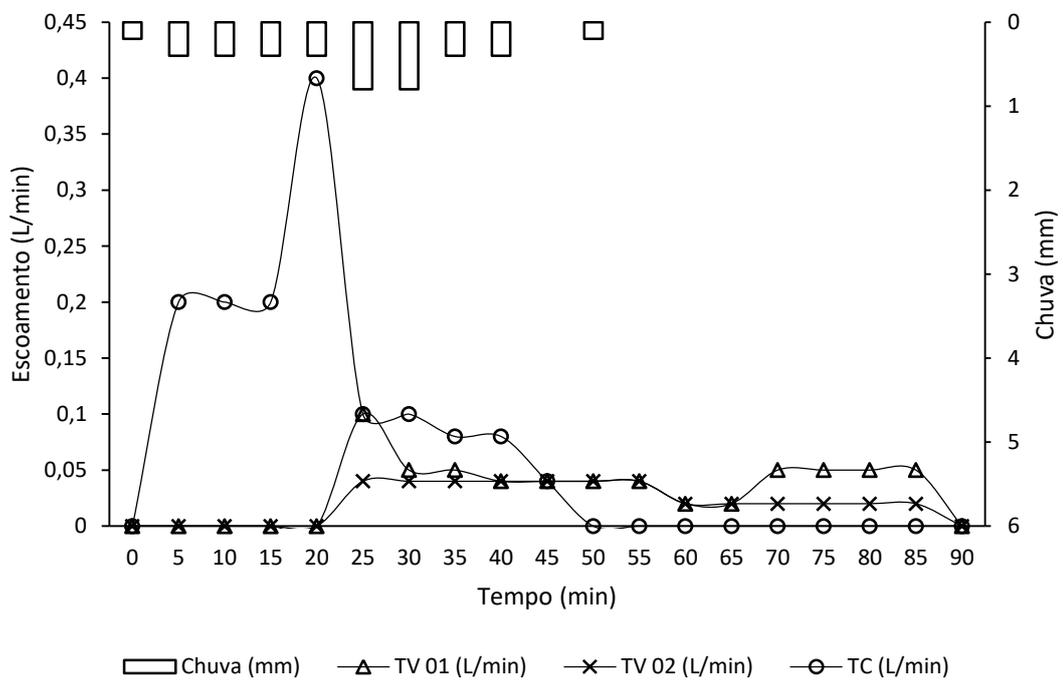
Hidrograma do evento 21 – 1º semestre 2018 – 19/05/2018



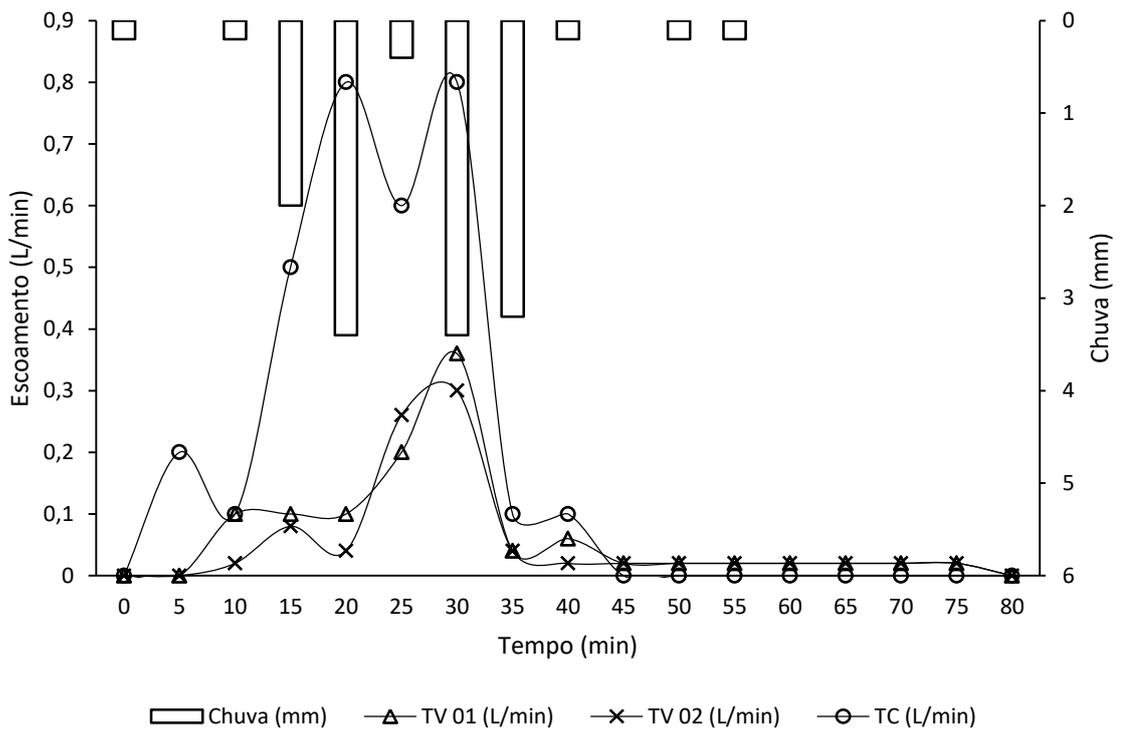
Hidrograma do evento 22 – 1º semestre 2018 – 22/05/2018



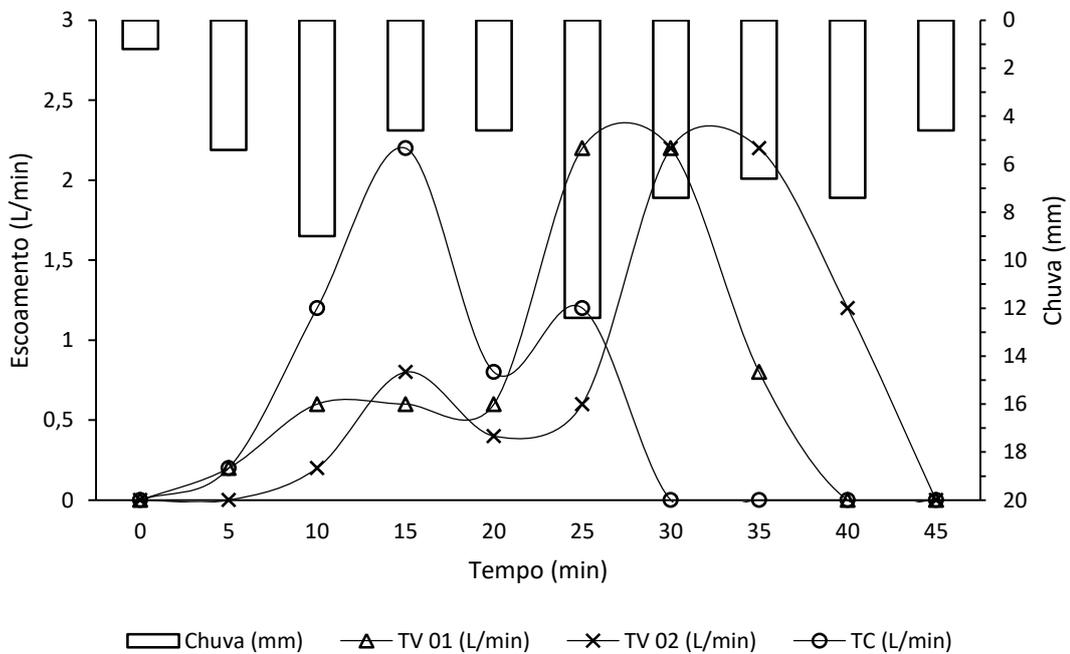
Hidrograma do evento 23 – 1º semestre 2018 – 26/05/2018



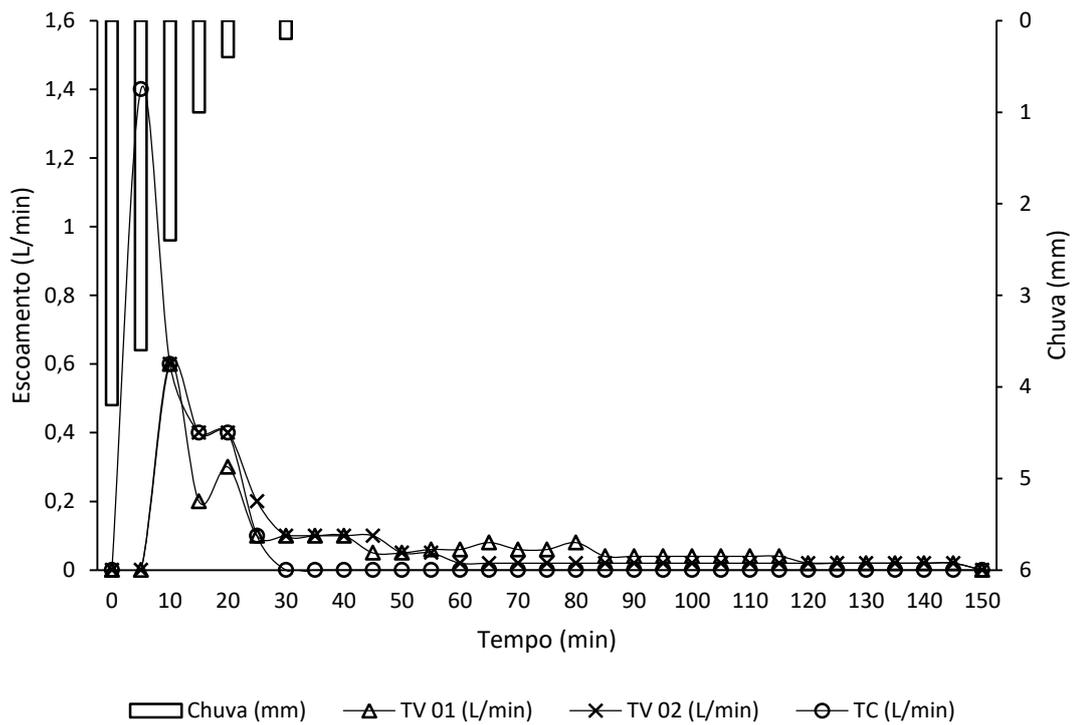
Hidrograma do evento 24 – 1º semestre 2018 – 30/05/2018



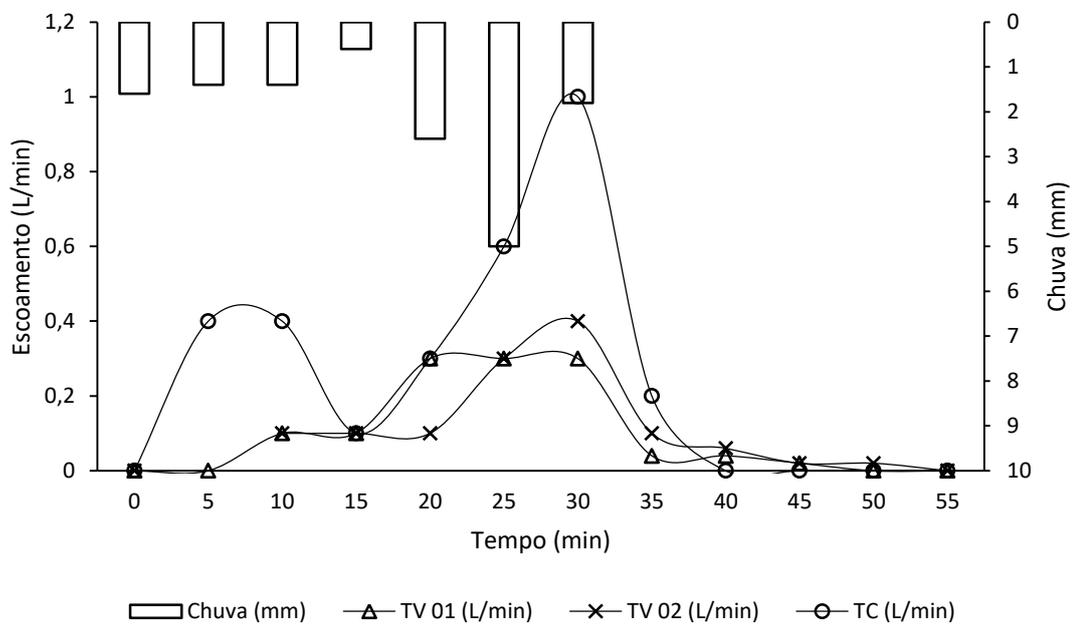
Hidrograma do evento 25 – 1º semestre 2018 – 02/06/2018



Hidrograma do evento 26 – 1º semestre 2018 – 04/06/2018



Hydrograph of event 27 – 1^o semester 2018 – 05/06/2018



Hydrograph of event 28 – 1^o semester 2018 – 16/06/2018

ANEXO A

Quadro 3B - Composição da pontuação da Quota Ambiental

ITEM I. CARACTERÍSTICAS DO LOTE	
Área total do lote - A (m ²)	inserir área
Perímetro de Qualificação Ambiental	ver mapa 3
Taxa de Permeabilidade - TP	ver quadro 3A
Fator alfa α	ver quadro 3A
Fator beta β	ver quadro 3A
QA mínimo obrigatório	ver quadro 3A

ITEM II. COBERTURA VEGETAL					
SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS E PAISAGÍSTICAS	PROJETO (1)	UNID.	FATOR FV (2)	TCA (5)	PONTUAÇÃO ATINGIDA (3)
A. Áreas ajardinadas					
A1. Área ajardinada sobre solo natural	medida do projeto	(m ²)	0,25	n/a	cálculo conforme (I)
A2. Área ajardinada sobre laje com espessura de solo maior que 40 cm	medida do projeto	(m ²)	0,20	n/a	cálculo conforme (I)
A3. Pavimento semi-permeável com vegetação sobre solo natural	medida do projeto	(m ²)	0,10	n/a	cálculo conforme (I)
B. Vegetação					
B1. Indivíduo arbóreo a ser plantado de porte pequeno (4)	medida do projeto	(unidade)	15	TCA	cálculo conforme (I.I)
B2. Indivíduo arbóreo a ser plantado de porte médio (4)	medida do projeto	(unidade)	35	TCA	cálculo conforme (I.I)
B3. Indivíduo arbóreo a ser plantado de porte grande (4)	medida do projeto	(unidade)	80	TCA	cálculo conforme (I.I)
B4. Palmeira a ser plantada (4)	medida do projeto	(unidade)	20	TCA	cálculo conforme (I.I)
B5. Indivíduo arbóreo existente com DAP entre 20 e 30 cm (7)	medida do projeto	(unidade)	80	n/a	cálculo conforme (I)
B6. Indivíduo arbóreo existente com DAP entre 30 e 40 cm (7)	medida do projeto	(unidade)	180	n/a	cálculo conforme (I)
B7. Indivíduo arbóreo existente com DAP maior que 40 cm (7)	medida do projeto	(unidade)	400	n/a	cálculo conforme (I)
B8. Palmeira existente (7)	medida do projeto	(unidade)	90	n/a	cálculo conforme (I)
B9. Maciço arbóreo existente (7)	medida do projeto	(m ³)	17	n/a	cálculo conforme (I)
C. Cobertura verde					
C1. Cob. Verde com espessura de substrato superior a 40 cm	medida do projeto	(m ²)	0,20	n/a	cálculo conforme (I)
C2. Cob. Verde com espessura de substrato inferior ou igual a 40 cm	medida do projeto	(m ²)	0,15	n/a	cálculo conforme (I)
D. Fachada / muro verde					
D1. Porção de fachada / muro verde	medida do projeto	(m ²)	0,10	n/a	cálculo conforme (I)
D2. Jardim Vertical	medida do projeto	(m ²)	0,15	n/a	cálculo conforme (I)
V PARCIAL					cálculo conforme (III)
V FINAL					cálculo conforme (III)

ITEM III. DRENAGEM				
SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS E PAISAGÍSTICAS	PROJETO (1)	UNID.	FATOR FD (8)	PONTUAÇÃO ATINGIDA (9)
A1*. Área ajardinada sobre solo	medida do projeto	(m ²)	0,22	cálculo conforme (IV)
A2*. Área ajardinada sobre laje com espessura de solo maior que 40 cm	medida do projeto	(m ²)	0,26	cálculo conforme (IV)
A3*. Pavimento semi-permeável com vegetação sobre solo natural	medida do projeto	(m ²)	0,60	cálculo conforme (IV)
C1*. Cob. Verde com espessura de substrato superior a 40 cm	medida do projeto	(m ²)	0,26	cálculo conforme (IV)
C2*. Cob. Verde com espessura de substrato inferior ou igual a 40 cm	medida do projeto	(m ²)	0,31	cálculo conforme (IV)
E. Pavimento poroso (10)	medida do projeto	(m ²)	0,1	cálculo conforme (IV)
F. Pavimento semi-permeável sem vegetação	medida do projeto	(m ²)	0,78	cálculo conforme (IV)
G. Superfícies com pavimentos não permeáveis (11)	medida do projeto	(m ²)	0,82	cálculo conforme (IV)
D PARCIAL (12)				cálculo conforme (V)
Volume de reservação mínima obrigatório para controle de escoamento superficial	medida do projeto	(ℓ)	n/a	n/a
H. Volume de reservação proposto para controle de escoamento superficial	medida do projeto	(ℓ)	n/a	n/a
D FINAL				cálculo conforme (VII)
ITEM IV. PONTUAÇÃO FINAL - QA				cálculo conforme (VIII)

Quadro 3A - Quota Ambiental: Pontuação mínima, Taxa de Permeabilidade Mínima e fatores por perímetros de qualificação ambiental

Perímetro de Qualificação Ambiental	TAXA DE PERMEABILIDADE (a) (b)		PONTUAÇÃO QA MÍNIMO					FATORES	
	Lote ≤ 500 m ²	Lote > 500 m ²	Lote > 500 e ≤ 1000 m ²	Lote > 1000 e ≤ 2500 m ²	Lote > 2500 e ≤ 5000 m ²	Lote > 5000 e ≤ 10000 m ²	Lote > 10000 m ²	Cobertura Vegetal (alfa)	Drenagem (beta)
PA 1	0,15	0,25	0,45	0,60	0,70	0,80	1,00	0,5	0,5
PA 2	0,15	0,25	0,40	0,52	0,64	0,70	0,86	0,5	0,5
PA 3	0,15	0,25	0,37	0,48	0,60	0,65	0,78	0,5	0,5
PA 4	0,15	0,25	0,37	0,48	0,60	0,65	0,78	0,5	0,5
PA 5	0,15	0,25	0,29	0,37	0,46	0,50	0,57	0,4	0,6
PA 6	0,15	0,20	0,34	0,44	0,55	0,60	0,71	0,5	0,5
PA 7	0,15	0,20	0,31	0,41	0,51	0,55	0,64	0,3	0,7
PA 8	0,15	0,20	0,37	0,48	0,60	0,65	0,78	0,5	0,5
PA 9	0,10	0,15	0,37	0,48	0,60	0,65	0,78	0,5	0,5
PA 10	0,20	0,25	0,23	0,30	0,37	0,40	0,42	0,6	0,4
PA 11	0,20	0,30	0,26	0,34	0,42	0,45	0,49	0,6	0,4
PA 12	0,20	0,30	0,26	0,34	0,42	0,45	0,49	0,5	0,5
PA 13 (c)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

Notas:

NA = Não se Aplica

(a) Nos lotes inseridos em ZEPAM, ZPDSr, ZPDS, ZCOR, ZPR e ZER deverão ser aplicadas as seguintes taxas de permeabilidade mínima: 0,90, 0,70, 0,50, 0,30, 0,30 e 0,30, respectivamente, independente do tamanho do lote;

(b) Quando a somatória da taxa de permeabilidade do Quadro 3A com a taxa de ocupação do Quadro 3 for superior à 1,00 (um inteiro), a taxa de permeabilidade deverá ser respeitada e a taxa de ocupação reduzida proporcionalmente;

(c) O PA 13 corresponde às Macroáreas de Contenção Urbana e Uso Sustentável e de Preservação dos Ecossistemas Naturais, nas quais não se aplicam as exigências da Quota Ambiental.