

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

Geovane Reis

**DETERMINAÇÃO DO PARÂMETRO CN (CURVA NÚMERO) PARA
DIFERENTES TIPOS DE TELHADOS VERDES EXTENSIVOS**

Santa Maria, RS
2022

Geovane Reis

**DETERMINAÇÃO DO PARÂMETRO CN (CURVA NÚMERO) PARA DIFERENTES
TIPOS DE TELHADOS EXTENSIVOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção de grau de Engenheiro Sanitarista e Ambiental.

Orientadora: Prof.^a Dra. Rutineia Tassi

Santa Maria, RS
2022

Geovane Reis

DETERMINAÇÃO DO PARÂMETRO CN (CURVA NÚMERO) PARA DIFERENTES TIPOS DE TELHADOS EXTENSIVOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção de grau de Engenheiro Sanitarista e Ambiental.

Aprovado em 26 de agosto de 2022.

**Prof^a. Dra. Rutineia Tassi (UFSM)
(Presidenta/Orientadora)**

Prof^a Dr. Cristiano Gabriel Persch (UFSM)

Mestranda, Eng^a Fabiana Campos Pimentel (UFSM)

Santa Maria, RS
2022

RESUMO

DETERMINAÇÃO DO PARÂMETRO CN (CURVA NÚMERO) PARA DIFERENTES TIPOS DE TELHADOS EXTENSIVOS

AUTOR: Geovane Reis

ORIENTADORA: PROF^a Dra. Rutineia Tassi

No processo de urbanização, as áreas naturais vão sendo substituídas por superfícies impermeáveis ocasionando alterações no ciclo hidrológico natural gerando um aumento do escoamento superficial, responsável por enchentes e inundações. Dentre as alternativas para mitigar essa problemática, destaca-se a atuação dos telhados verdes. A literatura elenca diversos benefícios da implantação dessas estruturas, tais como: melhoramento estético, diminuição das ilhas de calor, filtrador de poluentes, redução no consumo energético nas edificações e, principalmente, capacidade de retenção no escoamento pluvial. Entender o comportamento dos telhados verdes na redução do escoamento é elemento importante para sua implantação em larga escala. Sua capacidade de atuar no controle quantitativo, pode ser traduzida em termos do parâmetro CN (Curva Número), ou seja, esse parâmetro correlaciona o escoamento e a precipitação. No presente trabalho foram reunidos dados obtidos de 4 diferentes estudos que avaliaram distintos sistemas construtivos de telhados verdes (galocha, hexagonal, tradicional com McDrain) no processo de retenção e escoamento. Para cada tipo, foram avaliados a retenção, o coeficiente de escoamento (CE) e o parâmetro CN. Com base nas investigações, encontrou-se um CN médio para o sistema galocha 84,6, para o sistema hexagonal, CN=85,3 e para o sistema McDrain um CN=88,7. Quanto ao coeficiente de escoamento e a retenção, avaliou-se que o sistema de galocha e o sistema hexagonal apresentaram valores semelhantes e mais eficientes de CE e retenção com 0,52 e 48%, e 0,51 e 49%, respectivamente. Em contrapartida no sistema McDrain encontrou-se resultados menos eficientes com um CE de 0,57 e retenção de 43%. Os resultados fornecem parâmetros para subsidiar a implantação dessas estruturas incorporadas aos projetos de manejo de águas pluviais para telhados verdes.

Palavras-Chave: Coberturas verdes; Controle de escoamento superficial; Sistema construtivo.

ABSTRACT

CN PARAMETER DETERMINATION (CURVE NUMBER) FOR DIFFERENT TYPES OF EXTENSIVE ROOF

AUTHOR: Geovane Reis
ADVISOR: Rutineia Tassi

In the urbanization process, permeable areas are being replaced by impermeable surfaces, causing changes in the natural hydrological cycle. Impervious surfaces generate an increase in surface runoff, responsible for floods. Among the alternatives to mitigate this problem, the role of green roofs stands out. The literature lists several benefits of the implementation of these structures, such as: aesthetic improvement, reduction of heat islands, filtering of pollutants, reduction in energy consumption in buildings and, mainly, retention capacity in rainwater runoff. Understanding the behavior of green roofs in reducing runoff is an important element for their large-scale implementation. Its ability to act in quantitative control can be translated in terms of the parameter CN (Curve Number), this parameter correlates runoff and precipitation. In the present work, data obtained from 4 different studies were gathered that evaluated different constructive systems of green roofs in the retention and flow process. For each type, retention, flow coefficient and CN parameter were evaluated. Based on the investigations, an average CN for the galocha system was found to be 84.6 for the hexagonal system, CN=85.3 and for the McDrain system, CN=88.7. As for the flow coefficient and retention, it was evaluated that the galocha system and the hexagonal system presented similar values and more efficient of CE and retention with 0.52 and 48%, and 0.51 and 49%, respectively. On the other hand, in the McDrain system, less efficient results were found with an CE of 0.57 and retention of 43% was found. The results provide parameters to support the implementation of these structures incorporated into rainwater management projects for green roofs.

Keywords: Green Roofs; Runoff Control; Constructive system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Efeitos causados no ciclo hidrológico devido a urbanização	14
Figura 2 - Hidrograma que representa um ambiente antes e após a urbanização .	14
Figura 3 - Representação das camadas de um telhado verde	18
Figura 4 - Exemplar de Sedum rupestre	19
Figura 5 - Atuação do telhado verde no controle quantitativo do escoamento	24
Figura 6 - Localização dos módulos experimentais.....	34
Figura 7 - Esquema ilustrativo do módulo de EVA: a) vista superior; b) vista lateral do corte; c) vista superior com vegetação.....	36
Figura 8 - Esquema ilustrativo da vista superior e vista lateral do corte do módulo: a) hexagonal; b) alveolar simples; c) alveolar grelhado; d) de EVA; e) reciclado.....	37
Figura 9 - Esquema ilustrativo do módulo EVA: a) vista superior; b) vista lateral do corte; c) vista superior com vegetação.....	37
Figura 10 - Esquema ilustrativo do módulo hexagonal: a) vista superior; b) vista lateral do corte; c) vista superior com vegetação	37
Figura 11 - Representação dos módulos experimentais.	38
Figura 12 - Esquema ilustrativo do módulo retangular com vegetação, substrato, geotêxtil, camada de drenagem e camada de impermeabilização.....	41
Figura 13 - Processo de construção dos telhados verdes: A – estrutura do telhado; B – impermeabilização e camada de drenagem; C – geocomposto; D – colocação do substrato; E – plantio das mudas; F – vegetação no início do monitoramento.....	40
Figura 14 – Parâmetro CN calculado para dos diferentes sistemas construtivos.....	43
Figura 15 – Coeficiente de Escoamento dos diferentes sistemas construtivos.....	45
Figura 16- CN, CE e Retenção de cada sistema construtivo em paralelo as estações do ano.....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais características de cada módulo do telhado verde.....	34
Tabela 2 - Valores de CN, coeficiente de escoamento e retenção para diferentes volumes de chuva.....	47

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVOS	12
1.1.1 Objetivo Geral	12
1.1.2 Objetivos Específicos	12
2 REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1 IMPACTOS DA URBANIZAÇÃO NO CICLO HIDROLÓGICO	13
2.2 ASPECTOS GERAIS DOS TELHADOS VERDES	16
2.2.1 Composição dos Telhados Verdes	18
2.2.1.1 Vegetação	18
2.2.1.2 Substrato	20
2.2.1.3 Geomembranas	20
2.2.1.4 Camada de drenagem	20
2.2.1.5 Camada protetora e de Impermeabilização	21
2.2.2 Benefícios dos telhados verdes	22
2.3 CONTROLE QUANTITATIVO DO ESCOAMENTO PLUVIAL EM TELHADOS VERDES	23
2.4 DETERMINAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO EFETIVA	27
2.4.1 Horton	27
2.4.2 Green-Ampt	29
2.4.3 Método da Curva Número (CN)	30
2.4.4 Método CN aplicado a telhados verdes	31
3 METODOLOGIA	33
3.1 LOCAL DE ESTUDO	33
3.2 DESCRIÇÃO DOS ESTUDOS	35
3.2.1 Estudo Persch (2012)	35
3.2.2 Estudo de Pessoa (2016)	37
3.2.3 Estudo Arboit (2017)	39
3.2.4 Estudo Persch (2019)	40
3.3 ANÁLISE E TRATAMENTO DOS DADOS	42

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
4.1 ANÁLISE DOS SISTEMAS CONSTRUTIVOS	44
4.2 ANÁLISE INDIVIDUAL DE CADA SISTEMA CONSTRUTIVO.....	49
4.2.1 Sistema Construtivo Galocha	50
4.2.2 Sistema construtivo hexagonal.....	50
4.2.3 Sistema construtivo McDrain	51
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	52
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53

1 INTRODUÇÃO

O aumento das aglomerações populacionais formando áreas urbanas acarretaram mudanças na dinâmica natural do ciclo hidrológico, alterando a qualidade e a quantidade das águas (ECKART *et al.*, 2017; FENG *et al.*, 2018; O'DRISCOLL *et al.*, 2010). Há diversos fatores que afetam a dinâmica do ciclo hidrológico no ambiente urbano, destacando-se: a supressão da vegetação, a impermeabilização do solo, alterações na declividade dos relevos, uso e manejo irracional do solo, poluição, entre outros (FENG *et al.*, 2018; LI *et al.*, 2018). Esses efeitos modificam o escoamento superficial e subsuperficial, desencadeando a ocorrência de enchentes, inundações e aumento da erosão e o assoreamento dos rios (O'DRISCOLL *et al.*, 2010). Dessa forma, é necessário que haja um eficaz planejamento para garantir uma sustentável ocupação e uso do solo, principalmente em áreas densamente urbanizadas (ECKART *et al.*, 2017; FLETCHER *et al.*, 2015; FLETCHER *et al.*, 2013; LI *et al.*, 2018).

Soluções Baseadas na Natureza (SBNs) incorporam conceitos de desenvolvimento urbano de baixo impacto, introduzindo alternativas de controle do escoamento pluvial já na fonte, promovendo uma gestão adequada das águas pluviais (FLETCHER *et al.*, 2015) tanto nos aspectos quantitativos quanto qualitativos do escoamento superficial, sendo representados pelos sistemas de biorretenções trincheiras de infiltração, pavimentos permeáveis, entre outros (BUFFAM *et al.*, 2016; GWENZI; NYAMADZAWO, 2014; PERSCH, 2019;). Os telhados verdes destacam-se entre as opções com elevado valor hidrológico agregado, sendo estes uma forma inovadora de melhorar a qualidade da vida urbana, além de proporcionar outros múltiplos benefícios. No aspecto quantitativo, os telhados verdes retêm o escoamento pluvial (CARPENTER, 2016; CARTER, 2006; STOVIN *et al.*, 2015 ZANGH *et al.*, 2015), através do armazenando a água da chuva em sua estrutura, atuando de forma macro na redução da ocorrência de enchentes inundações (GWENZI; NYAMADZAWO, 2014; MENTENS *et al.*, 2006).

Para a avaliação dos efeitos dos telhados verdes no escoamento superficial, diferentes metodologias podem ser empregadas. A mais comum, é avaliar a relação entre o volume de escoamento superficial produzido e o volume total de precipitação (coeficiente de escoamento superficial) (BERNDTSSON, 2010; FASSMAN-BECK *et al.*, 2016; LI *et al.*, 2018). Outras parametrizações como, por exemplo, a metodologia da curva número (CN) proposta pelo NRCS (1986) também pode ser adaptada e

ajustada aos telhados verdes, de forma a permitir a determinação do parâmetro CN para diferentes eventos e sistemas construtivos (FASSMAN-BECK *et al.*, 2016).

A determinação do parâmetro CN permite avaliar a capacidade de retenção de telhados verdes com características semelhantes em diferentes condições de precipitação (FASSMAN-BECK *et al.*, 2016). Além disso, é uma das metodologias que possui entradas ambientais prontamente disponíveis e bem documentadas, sendo um procedimento já estabelecido e largamente aceito e empregado (DURAN- BARROSO *et al.*, 2016).

Diante do exposto, o presente trabalho visa reunir um conjunto de dados monitorados de diferentes tipos de telhados verdes, avaliando-se sistematicamente a retenção, o coeficiente de escoamento e o parâmetro CN, de forma a fornecer subsídios para elaboração e incorporação dessa SBN em projetos de manejo de águas pluviais principalmente em ambientes urbanos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar o desempenho hidrológico de diferentes sistemas construtivos de telhados verdes.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Reunir um conjunto de dados de escoamento e precipitação para diferentes tipos de telhados verdes;
- Determinar a capacidade de armazenamento (retenção) de cada sistema construtivo frente a eventos de precipitação de diferentes magnitudes;
- Avaliar o coeficiente de escoamento e o parâmetro CN para os diferentes sistemas construtivos;
- Determinar o comportamento quantitativo dos parâmetros CN, CE e retenção dos diferentes sistemas construtivos quanto as estações do ano.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

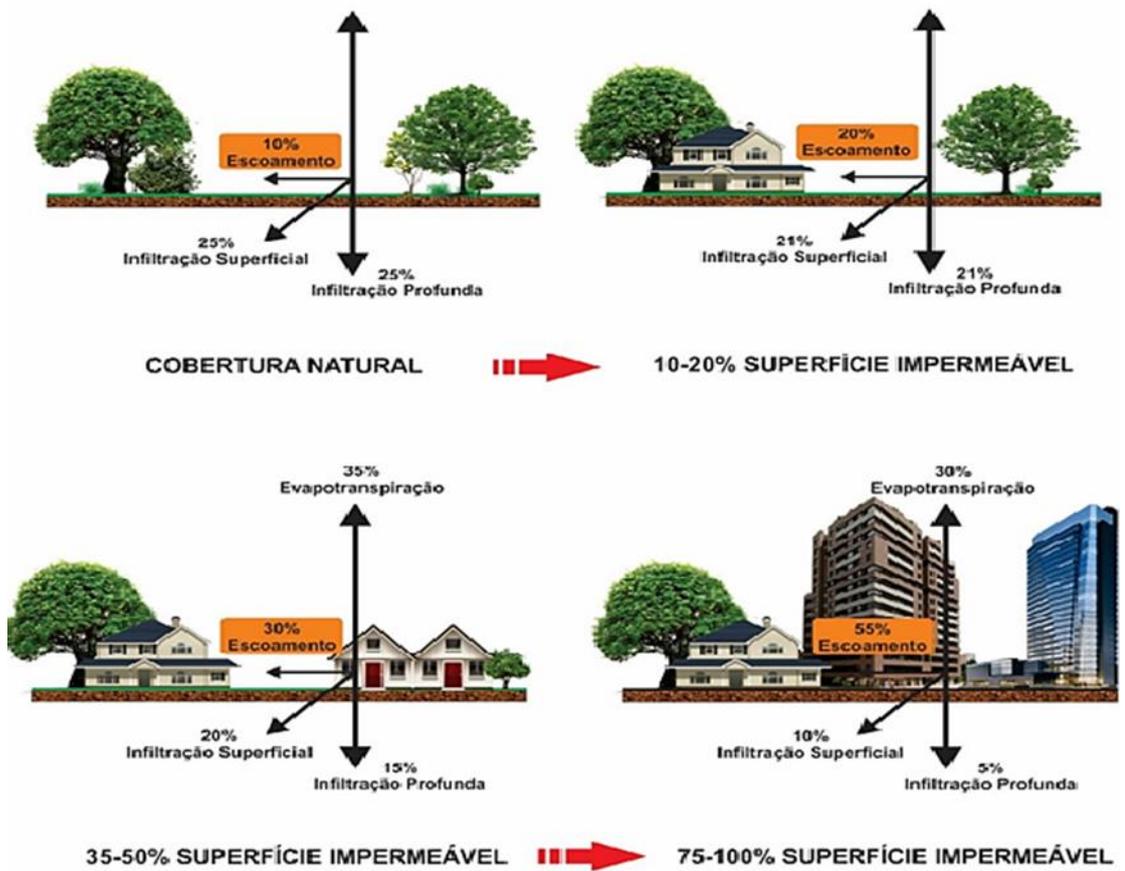
2.1 IMPACTOS DA URBANIZAÇÃO NO CICLO HIDROLÓGICO

Com o crescimento acelerado da população e a alteração da economia baseada prioritariamente no atendimento a demanda de serviços e indústria, intensificou-se o processo de urbanização. Essa dinâmica, aliada ao pequeno desenvolvimento da infraestrutura urbana, gerou impactos negativos sobre o meio natural, principalmente relacionado ao uso e ocupação do solo (ECKART *et al.*, 2017; FENG *et al.*, 2018). O ambiente natural foi gradativamente alterado, sendo substituído por superfícies impermeáveis, com alteração da topografia, declividade, vegetação (ECKART *et al.*, 2017; LI *et al.*, 2018; PERSCH, 2019).

O incremento da impermeabilização é o principal agente responsável pelas mudanças hidrológicas associadas à urbanização, exercendo diversas alterações sobre o ciclo hidrológico (ECKART *et al.*, 2017; LI *et al.*, 2018; VIJAYARAGHAVAN, 2016). Como resultado, tem-se a redução da capacidade de infiltração, diminuição dos escoamentos subsuperficiais e aumento significativo das taxas de escoamento superficial, favorecendo a geração de inundações, aumento de temperatura e formação de ilhas de calor (FLETCHER *et al.*, 2015; LI *et al.*, 2018; KHAN, 2005; SHUSTER *et al.*, 2005).

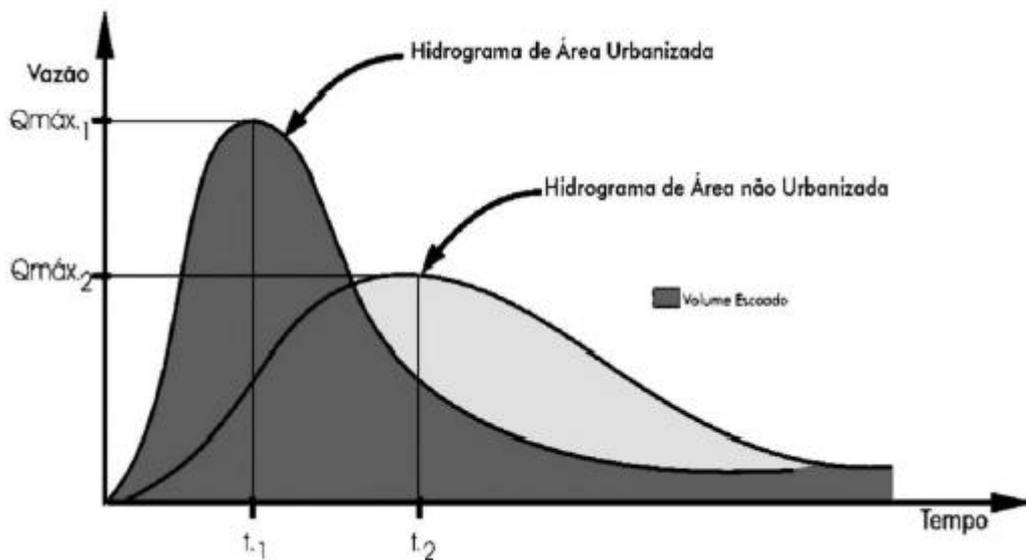
De forma ilustrativa, a Figura 1 representa um ambiente gradativamente antropizado ao longo do tempo, expondo as mudanças no ciclo hidrológico, com reflexo na alteração dos hidrogramas antes e após a urbanização (Figura 2).

Figura 1 - Impactos no ciclo hidrológico decorrentes da urbanização.



Fonte: Adaptado de California Coastal Commission, 2005.

Figura 2 – Hidrograma que representa um ambiente antes e após a urbanização.



Fonte: Tucci (2008).

Através das figuras acima, percebe-se que o pico de vazão máximo ocorre em um pequeno intervalo de tempo para áreas urbanizadas enquanto que, para áreas não urbanizadas, o pico de vazão ocorre em um intervalo de tempo maior. Isso ocorre, pois em áreas não urbanizadas tem-se uma infiltração e retenção maiores da precipitação, favorecendo a diminuição de escoamento e vazão máxima.

Khan (2005) estudou o incremento da impermeabilização e do escoamento superficial em função do processo de urbanização na cidade do Texas, Estados Unidos. O autor constatou que as superfícies de concreto e asfalto impermeável aumentaram em 114% no período de 2000 a 2003, em contrapartida a diminuição da vegetação em 8% tendo como resultado um aumento das taxas de escoamento de 15%.

Além das alterações do volume de escoamento superficial, há também a ocorrência da diminuição da evapotranspiração nas áreas urbanizadas, devido à retirada da cobertura vegetal (STOVIN *et al.*, 2015; ECKART *et al.*, 2017).

Dunnett-Barroso (2006) em seu estudo sugere que a ocupação do solo natural substituída por uma cobertura impermeabilizada influencia os volumes totais precipitados sobre as bacias hidrográficas, em função da alteração do microclima local. Tal fato ocorre devido às regiões urbanas serem mais secas e liberarem mais calor do que as áreas rurais, alterando a convecção e a circulação de massas de ar, provocando a incidência de precipitações induzidas.

É necessário buscar estratégias para minimizar os problemas decorrentes da urbanização, além de garantir uma gestão racional das águas pluviais urbanas para possibilitar o desenvolvimento social, econômico e ambiental. A forma atualmente discutida, e que gradativamente vem ganhando espaço sob a ótica de promover um ambiente urbano sustentável, é a ideologia do Desenvolvimento de Baixo Impacto – (DBI) (TASSI *et al.*, 2014), por meio da utilização de Soluções Baseadas na Natureza (SBNs).

Em outros países, o DBI se apresenta com a denominação de LID - Low Impact Development (EUA e Canadá), WSUD - Water Sensitive Urban Design (Austrália) e SuDS - Sustainable Drainage Systems (Grã-Bretanha) (FLETCHER *et al.*, 2015). Independente da denominação, os conceitos são análogos, e se resumem em estratégias estruturais e não-estruturais. Seus princípios contemplam a preservação e aproveitamento das características do ambiente natural, conservação do solo e a

minimização da impermeabilização, proporcionando uma reintegração do ciclo hidrológico natural em regiões urbanizadas (LI *et al.*, 2018; O'DRISCOLL *et al.*, 2010).

Com relação ao aspecto quantitativo das águas pluviais, a abordagem DBI tem por objetivo o controle do escoamento superficial na fonte, com a utilização de técnicas que proporcionem a retenção, infiltração e evapotranspiração (ECKART *et al.*, 2017; LI *et al.*, 2018; ZHU; 2017). Essas práticas, também denominadas de SBN's, incluem telhados verdes, biorretenções, trincheiras de infiltração, pavimentos permeáveis, jardins de chuva, entre outros.

De acordo com Fletcher *et al.*, (2013), há práticas e graus de aplicabilidade na gestão da qualidade e quantidade da água pluvial, sendo possível dividir essas soluções em duas categorias: infiltração e retenção. Os sistemas de infiltração usam técnicas que possibilitam a infiltração da água no solo, atuando no controle de pico e volume do escoamento superficial, no controle da poluição difusa e na recarga das águas subterrâneas, sendo representados pelos pavimentos permeáveis, trincheiras de infiltração, biorretenções, entre outros (FLETCHER *et al.*, 2013).

Já as técnicas baseadas na retenção, caracterizam-se em reter a água da chuva para reduzir a vazão. São representadas, principalmente, pelos telhados verdes, tanques e bacias de armazenamento da água da chuva (PERSCH, 2012; PERSCH, 2019; TASSI *et al.*, 2006). Esses dispositivos retêm as águas pluviais, para posterior utilização pela própria vegetação (no caso de telhados verdes), ou para reuso na edificação para fins menos nobres.

Todas as técnicas elencadas atuam de forma a reintegrar as componentes naturais do ciclo hidrológico ao ambiente urbano. Dentre todas, e objeto do presente estudo, merece destaque a aplicação de estruturas de telhado verde (coberturas verdes, tetos verdes), em função dos inúmeros benefícios que proporcionam para a edificação onde estão inseridos e seu entorno. Devido a isso, a seção que segue apresenta as particularidades inerentes aos telhados verdes.

2.2 ASPECTOS GERAIS DOS TELHADOS VERDES

Telhados verdes são sistemas construtivos implantados nas coberturas das edificações, composto por multicamadas de diversos tipos de materiais, com a finalidade de criar um ambiente um meio de cultura adequado capaz de abrigar uma superfície vegetada (TASSI *et al.*, 2014; PERSCH 2019).

As características físicas dos telhados verdes estão atreladas ao local de implantação, e vinculadas às condições arquitetônicas e estruturais das edificações. A literatura apresenta a distinção entre 3 classes de telhados verdes: extensivos, semi-intensivos e intensivos (VIJAYARAGHAVAN, 2016).

Na categoria de telhados verdes intensivos, a profundidade do substrato se concentra entre 25 cm a 90 cm, aproximadamente, permitindo a utilização de plantas de maior porte como arbustos e pequenas árvores. Dependendo da concepção utilizada, podem destinar-se a fins desportivos, recreativos e de lazer, e, muitas vezes, são indistinguíveis de jardins naturais em sua aparência (VIJAYARAGHAVAN, 2016). Os telhados intensivos geralmente necessitam de um sistema de irrigação e a água retida na drenagem pode ser usada para irrigar as plantas cultivadas. Devido a níveis maiores de manutenção (capina, irrigação e fertilização) os custos para manter essa categoria de cobertura vegetal é maior em relação às demais categorias de telhado verde (CURRIE, 2010; VILLAREAL, 2005; VIJAYARAGHAVAN, 2016).

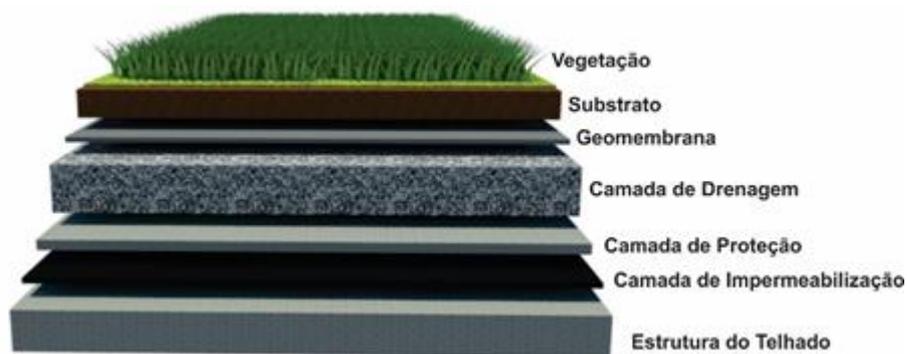
Os telhados verdes semi-intensivos apresentam um substrato com profundidade intermediária as categorias anteriores, entre 15 e 25 cm, favorecendo o desenvolvimento de uma vegetação pouco robusta. As plantações semi-intensivas são representadas pelas ervas, plantas com flores e pequenos arbustos (GRACESON *et al.*, 2013).

Os sistemas extensivos são coberturas leves, com um substrato de pouca profundidade (cerca de 5 a 15 cm), conseqüentemente, têm baixo custo de implantação, mínimo incremento de carga e pouca necessidade de manutenção (VIJAYARAGHAVAN, 2016). Essa tipologia comporta tipos limitados de vegetação, menos robustas, de boa adaptabilidade e mais tolerantes ao estresse hídrico (Ex., musgos, suculentas, ervas, gramíneas). A acessibilidade do telhado se restringe à manutenção, podendo ser implantados em uma grande variedade de locais sem a necessidade de intervenção significativa, como estruturas planas ou inclinadas pré-existentes (CURRIE, 2010). Em função dessas características, os telhados extensivos são os mais usados em todo o mundo.

2.2.1 Composição dos Telhados Verdes

A composição dos telhados verdes para as diferentes categorias é análoga e ilustrativamente está apresentada na Figura 3. Tipicamente, são formados pelos seguintes elementos: camada vegetação, substrato (meio de cultura), geomembranas, camada de drenagem, camada protetora, camada impermeabilizante e estrutura do telhado (BERNDTSSON, 2010; HYDROTECH, 2014). De modo geral, o desempenho e eficiência hidrológica está intimamente relacionado com a tipificação e variação das componentes da estrutura (GRACESON *et al.*, 2013).

Figura 3 - Representação das camadas de um telhado verde.



Fonte: Persch (2019).

2.2.1.1 Vegetação

Constitui a camada superior de um telhado verde, e está relacionada a sua parte estética. Por isso, a escolha do tipo de vegetação é importante para uma boa afeição do telhado verde na edificação (BEECHAM, 2014). De acordo com Vijayaraghavan (2016), as plantas adicionam vida ao sistema de telhado verde. Mais especificamente, o sucesso de qualquer telhado verde depende de quão saudáveis são as plantas. As plantas diminuem o escoamento, melhoram a qualidade do ar e o desempenho térmico (BERNDTSSON, 2010).

Para a escolha da vegetação em um telhado verde, é necessário levar em consideração o tipo de telhado verde (extensivo, intensivo) e seu grau de adaptação ao clima local. Temperaturas extremas, sazonalidade, volume, tipo de precipitações e manutenção disponível são parâmetros importantes para a escolha da espécie vegetal a ser instaurada no telhado verde. O princípio básico consiste em optar por espécies

cujo desenvolvimento ocorra de forma sadia e com o mínimo de intervenção (VIJAYARAGHAVAN, 2016).

A literatura elenca uma grande diversidade de plantas que podem ser aplicadas em telhados verdes. Para a região sul do Brasil, por exemplo, as espécies mais indicadas são: Rosinha do Jardim (*Aptenia cordifolia*), Grama-amendoim (*Arachis repens*), Rabo de Gato (*Acalypha reptans*), Kalanchoe (*Kalanchoë blossfeldiana*), Echeveria (*Echeveria pulvinata*), Gravatinha (*Chlorophytum comosum*), Cebolinha-de-jardim (*Bulbine frutescens*), Capim-chorão (*Eragrostis curvula*), Falso-íris (*Neomarica caerulea*) entre outras espécies (PERSCH, 2012; ARBOIT, 2017; JOBIM, 2013; LIBERALESSO, 2018; PESSOA, 2016; PERSCH, 2019).

No âmbito científico, as espécies de vegetação do tipo suculenta foram as mais estudadas e aplicadas em telhados verdes (TASSI *et al.*, 2014), sendo as mais populares e com eficiência comprovada, com destaque para o *Sedum rupestre* (Figura 4). Essa espécie tem raízes curtas que crescem rapidamente e detém a capacidade de limitar a transpiração (STOVIN *et al.*, 2015). Brevis *et al.*, (2006) destacam o potencial dessa espécie de sobreviverem a períodos prolongados sem água. Estes autores relataram que a espécie *Sedum spp.* sobreviveu e manteve o metabolismo fotossintético ativo mesmo depois de 4 meses sem água, uma vez que as suculentas podem armazenar água em folhas ou caules, o que permite sobreviver a condições de seca.

Figura 4 - Exemplar de *Sedum rupestre*.



Fonte: Persch (2019).

2.1.1.2 Substrato

Camada formada por solo e compostos, de modo a criar um ambiente ou meio de cultura capaz de propiciar um meio de fixação e desenvolvimento para as plantas, fornecendo água e nutrientes para atender as necessidades físicas, químicas biológicas para o crescimento vegetal. De acordo com Vijayaraghavan (2016) é importante que o substrato tenha baixas densidades de massa seca e úmida, fornecendo durabilidade e leveza a camada. A profundidade do substrato conceitua a categoria de telhado, além de ser fator determinante para escolher o tipo de vegetação (VIJAYARAGHAVAN, 2016).

Graceson *et al.*, (2013) lista diversos benefícios proporcionados pelo substrato, destacando-se a redução do escoamento. Ainda, de acordo com o autor, a profundidade também é um fator determinante na capacidade de retenção do telhado verde.

Liberalesso (2018) descreve que o substrato é composto por três componentes principais: solo, matéria orgânica e um agregado que tem alta porosidade e baixa densidade. A composição do substrato deve fornecer condições benéficas para o crescimento das plantas, devendo conter minerais, matéria orgânica e pH favoráveis para este desenvolvimento. O'Driscoll *et al.*, (2010) salienta ainda que o solo do substrato não deve ser muito argiloso, devido a elevada absorção de água, deixando o solo constantemente úmido dificultando o enraizamento das plantas e criando condições anaeróbicas.

2.1.1.3 Geomembranas

São constituídas por geotêxtil (constituído por poliéster ou polipropileno). As geomembranas tem como funções evitar o carreamento de partículas grosseiras para camadas inferiores e separar a camada de drenagem do substrato para garantir uma boa permeabilidade, além de atuar como uma barreira contra o acesso invasivo de raízes moles e curtas da vegetação (VIJAYARAGHAVAN, 2016). Esse material é resistente a alterações químicas e biológicas, além de ser durável.

2.1.1.4 Camada de drenagem

A camada de drenagem tem a função de drenar o excesso de precipitação que não é absorvida ou retida pelo substrato. A vegetação do telhado verde precisa de um substrato arejado e sem muita umidade para um bom desempenho

(VIJAYARAGHAVAN, 2016). Dessa forma, a camada de drenagem deve estar conectada a dispositivos de saída com vazão condizente para não gerar acúmulos de água na camada.

De acordo com Vijayaraghavan (2016) existem três categorias de matérias para serem empregados nas camadas de drenagem: painéis modulares, materiais granulares e membranas drenantes. Painéis modulares de drenagem têm origem comercial, e são feitos com plástico de alta resistência com compartimentos que armazenam água e eliminam o excesso. Esses módulos são indicados para instalações em grande escala, e podem se adequar a superfícies planas. Já os materiais granulares são compostos por agregados de argila, cascalho grosso e lascas de pedra, apresentando elevada porosidade e capacidade de armazenar água. As membranas drenantes são formadas pela união de um filtro geotêxtil com um núcleo drenante de pequena espessura. Eles têm a capacidade de resistirem a ataques químicos e biológicos e manter a umidade no local.

2.1.1.5 Camada protetora e de Impermeabilização

A camada protetora tem a função de proteger fisicamente a camada de impermeabilização contra interferências mecânicas, invasão de raízes, e demais intempéries (VIJAYARAGHAVAN, 2016).

A camada de Impermeabilização tem a função de evitar o contato da água com a estrutura do telhado, ou seja, protegendo-o contra a umidade externa (VIJAYARAGHAVAN, 2016). Ainda, o tipo de telhado verde, juntamente com o custo, a disponibilidade e a expectativa de vida, decidem a natureza da impermeabilização.

Existe uma diversidade de materiais que podem ser usados para a camada de impermeabilização (membranas asfálticas, termoplásticas, elastoméricas, betume, polímeros), além de resinas e bases. As membranas impermeáveis devem ser resistentes e adequadamente protegidas contra mudanças de temperatura e danos mecânicos para garantir a manutenção da integridade do tecido inferior. É necessário ter o máximo de cuidado para garantir a confiabilidade da camada, pois os reparos são difíceis e dispendiosos para o caso do surgimento de futuras patologias (VIJAYARAGHAVAN, 2016).

2.2.2 Benefícios dos telhados verdes

A implantação de telhados verdes em ambientes urbanizados trazem diversos benefícios no âmbito público e privado, econômico e social, local e global, apresentando-se como uma boa ferramenta para atingir múltiplos objetivos ecológicos, cuja amplitude dos efeitos não se limita apenas ao edifício onde está instalado (ECKART *et al.*, 2017).

A oportunidade de implantação torna-se promissora uma vez que às áreas correspondentes às coberturas representarem cerca de 40-50% das áreas impermeáveis, oportunizando espaços em locais onde não há áreas disponíveis para novas infraestruturas (MENTENS *et al.*, 2006).

Diversos benefícios advêm da implantação de telhados verdes, dos quais merecem maior destaque: regulação térmica urbana (diminuição das ilhas de calor) e também nas edificações (regulação da temperatura interna), efeitos sobre a qualidade do ar, promoção da estética (paisagismo) e recreação, desenvolvimento da biodiversidade urbana no âmbito de fauna e flora, benefícios acústicos e energéticos, promoção da saúde e bem-estar, gerenciamento qualitativo e quantitativo das águas pluviais (BERARDI *et al.*, 2014; GARCIA, 2015).

Os telhados verdes têm o potencial de fornecer isolamento acústico devido a sua grande massa, baixa rigidez e efeito de amortecimento. Através da superfície de absorção, reduz a pressão sonora em aeroportos, sistemas industriais e centros urbanos. De acordo com Piovesan (2013), que investigou dois sistemas modulares de telhados verdes extensivos quando ao desempenho sonoro, foi observado um grande coeficiente de absorção, sugerindo os telhados verdes como alternativa para o controle de ruído.

O benefício térmico proporcionado pela presença de telhado verde, também acarreta uma economia de energia elétrica, uma vez que dispensa ou reduz a utilização de aparelhos de ar condicionado, por exemplo. Mello *et al.*, (2010) constataram em seu estudo uma redução de 40% no consumo de energia elétrica, devido à implantação do telhado verde, em comparação a uma estrutura composta apenas por concreto.

Em relação aos benefícios qualitativos dos telhados verdes, é possível aferir que ocorre uma ação sobre a qualidade da água escoada e do ar. No escoamento, há

uma redução da poluição das águas urbanas, absorvendo e filtrando possíveis poluentes (BUFFAN *et al.*, 2016). Berndtsson (2010) afirma que a qualidade de escoamento de um telhado verde irá depender da composição e estrutura do substrato, além do tipo de vegetação e a camada de drenagem. Além disso, fatores como a idade do telhado, a frequência de manutenção são fatores que podem influenciar na qualidade da água do escoamento. Quanto a qualidade do ar, a vegetação absorve os poluentes atmosféricos. Um estudo feito por Yang *et al.*, (2008) na cidade de Chicago conclui que em uma área de 19,8 hectares de telhados verdes removeu-se 1675 Kg de poluentes, ou seja, uma remoção de 85Kg de poluente por hectare. Ele destaca também a alta remoção de gás ozônio (52%), dióxido de nitrogênio (27%) e dióxido de enxofre (7%). O autor inferiu ainda que se todos os telhados de Chicago fossem cobertos com telhados verdes intensivos a quantidade de poluentes removidos seria de 2046,89 toneladas ao ano.

Ainda, se o escoamento superficial gerado em um telhado verde for captado e armazenado em cisternas, a água da chuva pode ser utilizada para fins não potáveis, como irrigação do próprio telhado e jardins, além de descarga em bacias sanitárias, lavagens de pisos, entre outros, implicando em redução de custos com o pagamento de água tratada, controle do escoamento e preservação ambiental (JOBIM, 2013).

A partir dos benefícios diretos surgem ainda as qualificações indiretas, principalmente atreladas aos aspectos econômicos, sociais e ambientais.

Em vista os objetivos do presente trabalho e para fins de ênfase e organização, uma seção independente (Seção 2.3) será dedicada ao benefício do controle quantitativo do escoamento pluvial proporcionado pelos telhados verdes.

2.3 CONTROLE QUANTITATIVO DO ESCOAMENTO PLUVIAL EM TELHADOS VERDES

Dentre os diversos benefícios proporcionados pelos telhados verdes, alguns já detalhados na seção anterior, destaca-se a importante propriedade dos telhados verdes em reter o escoamento pluvial (STOVIN *et al.*, 2015). A retenção se define como sendo o volume de precipitação armazenada no substrato ou na camada de drenagem ocupando seus espaços vazios (FLECHER *et al.*, 2013). De acordo com Mentens *et al.* (2006) e Berndtsson (2010), o telhado verde se comporta como uma superfície permeável, pois ele armazena a água da chuva diminuindo o escoamento

superficial. Como consequência, ocorre diminuição da vazão de pico, o que estende um reflexo direto nos volumes à jusante das redes de drenagem.

Berndtsson (2010) e Stovin *et al.*, (2015) afirmam que o controle quantitativo do escoamento se inicia com a interceptação, onde uma parcela da precipitação fica retida nas folhas e estrutura da vegetação. Parte do volume de água que não é interceptada infiltra no substrato e na camada de drenagem, por constituírem camadas porosas. Quando é atingido a saturação do meio (substrato e camada de drenagem), o volume em excesso é eliminado pelo sistema de drenagem. Posteriormente à chuva, uma parcela de água que ficou retida nas camadas porosas evapora, e parte é utilizada pela vegetação nos processos fisiológicos, sendo liberada por transpiração.

A Figura 5 ilustra o processo de funcionamento de um telhado verde no controle quantitativo, onde uma parcela da chuva é interceptada pela vegetação, parte infiltra e fica armazenada no substrato retornando a atmosfera por evapotranspiração, e o volume excedente escoar por meio da camada de drenagem.

Figura 5 - Atuação do telhado verde no controle quantitativo do escoamento.



Fonte: Adaptado de Persch 2019.

Berndtsson (2010) elenca dois conjuntos de fatores que afetam o escoamento e a retenção em telhados verdes: suas características (espessura de solo, tipo de substrato, cobertura vegetal, tipo de vegetação e declividade) e as condições climáticas da região onde eles estão inseridos (duração do período de seca, climatologia regional, características dos eventos de chuva).

A vegetação usada no telhado verde também influencia na capacidade de retenção. Isso ocorre, pois cada vegetação apresenta características de interceptação e evapotranspiração distintas (BEECHAM, 2014). Tais variações ficam evidentes no

estudo de Arboit (2017) que avaliou a evapotranspiração com *Sedum rupestre* em condições de campo com clima temperado e encontrou uma taxa média de 2,6mm/dia. Feng *et al.*, (2018) avaliando a espécie *Sedum* e grama com utilização de lisímetro, chegaram a valores médios anuais de 2,52 e 2,69 mm/dia, respectivamente.

De acordo com Beecham (2014), no verão as plantas intensificam o processo de fotossíntese e, dessa forma, favorecem o aumento da evapotranspiração aumentando a capacidade de armazenamento do substrato, provocando decréscimos no escoamento superficial. Tal fato ficou evidente nos estudos de Tassi *et al.*, (2014) que constatou valores em torno de 50% para o inverno e 30% para as demais estações. Mentens *et al.*, (2006) encontraram para um telhado com substrato de 10cm de espessura, um escoamento de 80% no inverno e 52% no verão.

As propriedades físicas do substrato, juntamente com sua umidade antes da precipitação, determinam a capacidade de armazenamento. Berndtsson (2010) destaca que o escoamento somente ocorre após os poros estiverem preenchidos com água, indicando que o solo está saturado, ou seja, que atingiu a capacidade de campo.

A capacidade de campo está intimamente relacionada às características físicas do substrato. Quando um solo é composto de partículas de tamanho pequeno e tiver um maior volume de vazios é possível armazenar maior quantidade de água nesse volume específico. No entanto, segundo Stovin *et al.*, (2015) um meio muito poroso detêm menos água, pois tem uma capacidade máxima de retenção de umidade mais baixa. Villarreal (2005) observou percentuais de volume em torno de 40 e 50% para a capacidade de campo e com 15% para o ponto de murcha para um substrato com 30mm, coberto com areia e vegetação *Sedum*.

Graceson *et al.*, (2013) avaliou a contribuição de diferentes composições (telha e tijolos esmagados finos e grosseiros) e profundidades (75 e 150mm) de substrato na retenção de água em telhados verdes. Os resultados mostraram que os espaços de poros e a distribuição entre partículas foram fatores determinantes da capacidade de retenção de água, onde compostos com maior proporção de partículas menores tiveram a capacidade de retenção aumentada. Com o aumento da profundidade elevou-se a retenção em 20%, indicando uma maior influência quando comparado ao desempenho atribuído a composição do substrato.

As características do substrato dos telhados verdes sofrem alterações no decorrer do tempo. De acordo com Berndtsson (2010), tais alterações são físicas e químicas. Ele destaca ainda, o carreamento de partículas, com alteração da

porosidade devido ação das raízes da vegetação e dissolução de compostos, além do aumento da matéria orgânica. É possível perceber essas alterações no estudo de Getter e Rowe (2006) que em um período de 5 anos percebeu que o teor de matéria orgânica e o espaço de poros dobraram (de 2% a 4% e de 41% a 82%, respectivamente).

Bengtsson (2004) constatou que a declividade de telhados verdes não apresenta relevância significativa na distribuição do escoamento, e o autor afirma ainda que a percolação vertical domina o processo de precipitação-escoamento.

Em termos de influências climáticas, o volume e a intensidade da chuva são os fatores meteorológicos mais significativos na capacidade de retenção de telhados verdes (ZHANG *et al.*, 2015).

Nesse contexto, Simmons *et al.*, (2008) avaliando vários telhados para diferentes volumes de chuva, encontraram que pequenos eventos (<10mm) foram totalmente retidos nas estruturas. Para eventos de chuva de 28 mm a retenção ficou em 43 a 8% e para a precipitação de 49 mm a faixa de retenção variou de 44 a 13%. Zhang *et al.*, (2015) encontraram retenções de 85 a 90% para chuvas de 30mm (4 dias) e 40mm (3 dias).

Quanto à intensidade dos eventos chuvosos, Berndtsson (2010) afirma que os telhados tem melhor eficiência na retenção para baixas intensidades podendo chegar a 100% de retenção. No entanto, para chuvas com uma precipitação intensa as taxas de retenção diminuem. Tal fato ficou evidente no estudo de Carter (2006) que encontrou uma relação entre a intensidade das chuvas e a porcentagem de chuva retida no telhado verde: para chuvas pequenas (<25,4 mm), 88% do volume é retido; para chuvas médias (25,4-76,2 mm) mais de 54% é retido e para tempestades grandes (>76,2 mm), 48% é retido pela estrutura. É possível perceber que à medida que a intensidade da chuva aumenta, a capacidade de retenção do telhado verde diminui devido o telhado não ter tempo suficiente para perder umidade para o ambiente (BERNDTSSON, 2010). Villarreal e Bengtsson (2005), constataram que para uma intensidade de 78 mm/h, a retenção do telhado verde foi de 10% e o escoamento superficial de 90% para uma inclinação de 14% evidenciando a diminuição da retenção do telhado verde em relação ao aumento da precipitação.

Em relação às variações climáticas entre as estações do ano, é possível identificar diferenças nas taxas de retenção dos telhados verdes, onde no inverno esses valores são menores, em relação ao verão (BEECHAM, 2014).

Tal fato ficou evidente no estudo de Bengtsson (2005) que constatou que as taxas de redução do escoamento superficial variam sazonalmente. Segundo os autores, em meses frios, tal taxa é de 34% e para meses quentes 67%. Além disso, eles mostraram que as condições climáticas afetavam a capacidade de retenção do telhado verde estudado: para condições secas, foram necessárias 6 a 12 mm de chuva para iniciar o escoamento; para condições úmidas, a resposta foi quase direta.

2.4 DETERMINAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO EFETIVA

Uma vez conhecido e detalhado como ocorre o processo de controle quantitativo do escoamento pelos telhados verdes, é interessante analisar o seu papel quando aplicado em maiores áreas, a exemplo de bacias hidrográficas.

Na prática, ao estudar a dinâmica do escoamento em uma região ou bacia hidrográfica, procura-se mensurar a proporção de um determinado evento de precipitação que infiltra e a parcela que efetivamente se converte em escoamento (precipitação efetiva).

Para isso, a partir de uma série de precipitação, determina-se os volumes infiltrados e a diferença (chuva – infiltrado) se converte, automaticamente, em escoamento.

No caso dos telhados verdes, metodologias clássicas podem ser utilizadas para explicar o comportamento dos mesmos frente a diferentes eventos chuvosos, a partir de calibrações. Entre as diversas metodologias (modelos) possíveis para estimativa de infiltração e/ou escoamento, são muito comuns os métodos de: Horton, Green-Ampt e o Método da Curva Número (CN).

2.4.1 Horton

É uma equação baseada no ajustamento de três parâmetros, e permite determinar a taxa de infiltração ao longo do tempo. Segundo Tucci (1993) a equação foi desenvolvida a partir de experimentos de campo por Horton (1939) para o caso de um solo submetido a uma precipitação com intensidade sempre superior à capacidade de infiltração do solo. Uma relação empírica representa o decaimento da infiltração ao longo do tempo, descrita pela Equação (1):

$$I_t = I_b + (I_i - I_b)e^{-kt} \quad (1)$$

Sendo:

t : tempo decorrido desde a saturação superficial do solo (min);

I_t : taxa de infiltração no tempo t (mmh^{-1});

l_i : taxa de infiltração inicial (mmh^{-1});

l_b : taxa mínima de infiltração (mmh^{-1});

K : condutividade hidráulica saturada (h^{-1})

O ajuste da Equação de Horton é obtido pela determinação dos parâmetros l_i , l_b e k , a partir dos dados observados. O parâmetro l_b representa a condutividade hidráulica saturada aparente do solo (inclui a resistência proporcionada pelo ar aprisionado nos poros do solo natural). O parâmetro l_i é a taxa de infiltração no momento que é atingida a saturação superficial e começa a haver escoamento superficial. O parâmetro k é feito através do ajuste da equação acima nos pontos $I \times t$ medidos em campo.

De acordo com Tucci (1993) a dificuldade em utilizar a equação para prever a parcela que vai infiltrar de uma futura precipitação reside no fato de que os ajustes prévios dos parâmetros são dependentes das umidades de solo vigentes nos ensaios de campo, além de variarem ao longo da infiltração.

Para se obter uma aceitável estimativa dos parâmetros, devem ser estabelecidas relações experimentais consistentes com a umidade superior do solo (aproximadamente 50cm). Horton desenvolveu uma equação para a taxa de infiltração inicial que leva em consideração a capacidade de infiltração correspondente à umidade limite do ponto de murcha da vegetação, uma constante de solo, umidade inicial, umidade higroscópica, e umidade correspondente a capacidade de campo. Dessa forma Horton compara a intensidade de precipitação com a capacidade de infiltração. Se $P < l_i$, a taxa de infiltração é a própria P . Para $P \geq l_i$ a infiltração segue a equação 2.

A integral no tempo da taxa de infiltração dada pela equação de Horton (equação 1), permite a obtenção do volume total de infiltração:

$$I = \frac{(l_i - l_b)}{K} (1 - e^{-kt}) + l_b \cdot t \quad (2)$$

Uma vez determinado o volume infiltrado (Equação 2), a precipitação efetiva é dada pela diferença entre a precipitação e a infiltração (Equação 3).

$$P_{ef} = P - I \quad (3)$$

2.4.2 Green-Ampt

Lima (2010) destaca que o modelo de infiltração de Green-Ampt (1911) é muito utilizado, ainda hoje, em estudos hidrológicos. Dentre os modelos teóricos, é um dos mais bem embasado fisicamente.

Essa equação é derivada da equação de Darcy, e foi desenvolvida para estimar a infiltração de água em solos homogêneos submetidos a uma carga hidráulica constante. Esse método exprime a infiltração em função de parâmetros físicos do solo e não do tempo de ocorrência do processo como outros métodos. O método se baseia nas seguintes premissas:

- durante o processo de infiltração existe uma carga hidráulica (H_0) constante na superfície do solo;
- solo com perfil homogêneo e profundidade infinita;
- existência de uma frente de umedecimento, acima da qual o solo se encontra saturado, e que o potencial matricial (ψ_f) nesta frente permanece igual ao valor do potencial matricial antes da infiltração;
- a água penetra no solo abruptamente, resultando na formação de duas regiões: a primeira em que solo se encontra saturado (θ_s) e a segunda com umidade correspondente àquela que possuía antes do início da infiltração (θ_i).

A Equação 4 é utilizada para determinar a taxa de infiltração ao longo do tempo pelo método de Green-Ampt:

$$I = K \frac{\Psi_0 - \Psi_f}{L} \quad (4)$$

Sendo:

I : taxa de infiltração (mm/h);

K' : condutividade hidráulica saturada aparente do solo (mmh^{-1});

Ψ_f : potencial matricial depois da infiltração (mm);

Ψ_0 : potencial matricial antes da infiltração (mm);

L: profundidade da frente de umidade (mm);

Segundo Tucci (1983), dentre os modelos disponíveis para estimar a infiltração da água no solo, o de Green-Ampt é um dos mais usados devido à obtenção razoavelmente fácil de seus parâmetros de entrada, e por estar fundamentado no processo físico da infiltração.

2.4.3 Método da Curva Número (CN)

O método da Curva Número foi desenvolvido pelo United States Department of Agriculture – Soil Conservation Service (USDA-SCS) na década de 1950, atualmente conhecida como Natural Resources Conservation Service (USDA, 1986).

O método considera que, a partir de um determinado uso e ocupação, tipo de solo e condições de umidade antecedente, é possível determinar o volume de escoamento superficial que será gerado a partir de uma precipitação.

De acordo com Durán-Barroso *et al.*, (2016) o principal parâmetro do método da Curva Número (CN), foi desenvolvido a partir de um estudo empírico de escoamento em 12 bacias hidrográficas e parcelas de encostas localizadas no sudoeste dos Estados Unidos.

Atualmente, é uma metodologia largamente utilizada e seu uso generalizado baseia-se na sua simplicidade e aplicabilidade, juntamente com o fato de que ele combina os fatores mais relevantes que afetam o escoamento superficial em um único parâmetro. Além disso, é uma das metodologias que possui entradas ambientais prontamente disponíveis e bem documentadas, sendo um procedimento já estabelecido e largamente aceito (DURAN - BARROSO *et al.*, 2016). A metodologia se apresenta resumida na Equação 5:

$$P_{ef} = \frac{(P - Ia)^2}{P - Ia - S} \quad (5)$$

Sendo:

P_{ef} = Precipitação efetiva (mm);

P : Precipitação total de um determinado evento (mm);

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

Ia : Abstrações iniciais, incluindo perdas por armazenamento na superfície, interceptação e outros (mm).

De acordo com Carter (2006) as perdas iniciais estimadas no método original representavam em média cerca de 20% da capacidade máxima, ou seja, $I_a=0.2S$. Portanto, reescrevendo a Equação 5 tem se:

$$P_{ef} = \frac{(P-0,2S)^2}{(P+0,8S)} \quad (6)$$

A metodologia se faz válida para $P>0,2S$. Quando $P<0,2S$ o valor da precipitação efetiva é nulo. A Equação 7 representa a capacidade máxima de infiltração de água no solo (saturação) e CN é o número da curva, que define o complexo hidrológico solo-vegetação, e os valores numéricos são coeficientes para ajuste de unidades.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (7)$$

Os valores de CN são obtidos em tabela padrão do SCS para cada uso e cobertura, tipo de solo (grupo hidrológico) e classe de umidade antecedente. As tabelas foram desenvolvidas para as condições de uso e cobertura do solo dos EUA, em conjunto com quatro grupos de solos classificados de acordo com a taxa de infiltração, textura e estrutura, assumindo valores entre 0 a 100 (TASSI *et al.*, 2006).

De forma análoga à aplicação da metodologia do CN em áreas extensas (bacias hidrográficas), a mesma pode ser adotada para explicar e entender a dinâmica do escoamento em estruturas de telhados verdes. Alguns estudos já aplicaram essa metodologia, com destaque para FASSMAN-BECK *et al.*, (2016) e CARTER (2006). A próxima sessão procura descrever a metodologia da Curva Número adaptada para telhados verdes.

2.4.4 Método CN aplicado a telhados verdes

Para alguns usos, ocupações e condições específicas do solo, nem sempre se tem um valor prontamente tabelado e disponível de CN, sendo necessário inferir indiretamente esse valor. Da mesma forma, valores de CN para telhados verdes, ainda são timidamente documentados na literatura.

O Manual LID de Michigan sugere um CN igual a 65 para telhados verdes extensivos se o evento de precipitação projetado for até três vezes a capacidade de

armazenamento de umidade do meio de cultivo. Já o Manual de Projeto de Águas Pluviais de Maryland atribui CNs de 94 a 77, de acordo com as profundidades do substrato do telhado de 50 a 200 cm.

Por outro lado, é possível determinar e calibrar o valor de CN dispondo de um conjunto de eventos de precipitação e vazão (precipitação efetiva). Para a condição específica de telhados verdes, o método CN permite alguns ajustes. Assumindo-se que as perdas por interceptação podem ser desprezadas, pois são muito pequenas (FASSMAN-BECK *et al.*, 2016), e rearranjando a Equação 5 em termos de S, obtém-se:

$$S = \frac{\left[\frac{(P^2 - P_{ef} \cdot P)}{P_{ef}} \right]}{0,8} \quad (8)$$

Com o valor de S e isolando a variável CN na Equação 7, obtém-se a Equação 9. Os valores descritos e fixados na equação são usados para correção de unidades no sistema internacional americano:

$$CN = \frac{25400}{254+S} \quad (9)$$

Da Equação (6), a variável de precipitação (P) corresponde a chuva ocorrida e monitorada em um dado evento. A variável de precipitação efetiva P_{ef} corresponde ao volume de água escoado a partir da cobertura dos telhados verdes, coletados e mensurados.

Fassman-Beck *et al.*, (2016) afirma que a determinação da CN deve ser usada preferencialmente em dados de precipitação de eventos relativamente maiores, ou seja, precipitações acima de 12,5 mm. Esse valor é variável, e depende das características intrínsecas a cada telhado verde. Os autores afirmam ainda que é necessário ter cuidado na aplicação das equações, pois elas advêm de um modelo hidrológico simplista desenvolvido para bacias hidrográficas naturais, e agora adaptadas para um sistema de engenharia distinto e complexo e com restrições hidráulicas.

Carter (2006) monitorou um telhado verde na Geórgia, durante 1 ano (31 eventos de chuva), constatou que para uma capacidade máxima de armazenamento do solo (S) de 4,27 cm se obtém um CN de 86.

Já em um estudo realizado por Fassman-Beck *et al.*, (2016) que avaliou 21 tipos de telhados verdes em configurações variadas de clima, constatou que o volume de escoamento é baixo para eventos com precipitação com baixo volume. Para eventos de chuva com precipitação superior, o volume de escoamento aumenta, em contrapartida, a diminuição da capacidade de retenção, acarretando um aumento no valor de CN. Os autores destacam ainda, a variação dos valores de CN para diferentes climas. Para um clima com temperatura quente e úmido e precipitação maior que 12,5mm encontrou-se um CN de 91. Em contrapartida, outra região climática com temperaturas quentes, verão seco caloroso e precipitações inferiores a 12,5mm foi encontrado um valor de 80 para o CN.

3 METODOLOGIA

Em atendimento aos objetivos propostos, foram reunidos um conjunto de dados monitorados (precipitação-escoamento) de 4 diferentes estudos realizados entre os anos de 2012 e 2019, que avaliaram o desempenho quantitativo de telhados verdes extensivos. Os estudos citados compreendem as seguintes pesquisas: Persch (2012), Pessoa (2016), Arboit (2017) e Persch (2019).

Cada um dos estudos ocorreu em diferentes períodos, onde cada qual contemplou o monitoramento de um telhado verde do tipo extensivo. Previamente, foi realizada uma análise detalhada de cada estudo extraíndo-se as informações referentes as características construtivas dos telhados verdes, e os dados de volume precipitado e o escoamento¹.

3.1 LOCAL DE ESTUDO

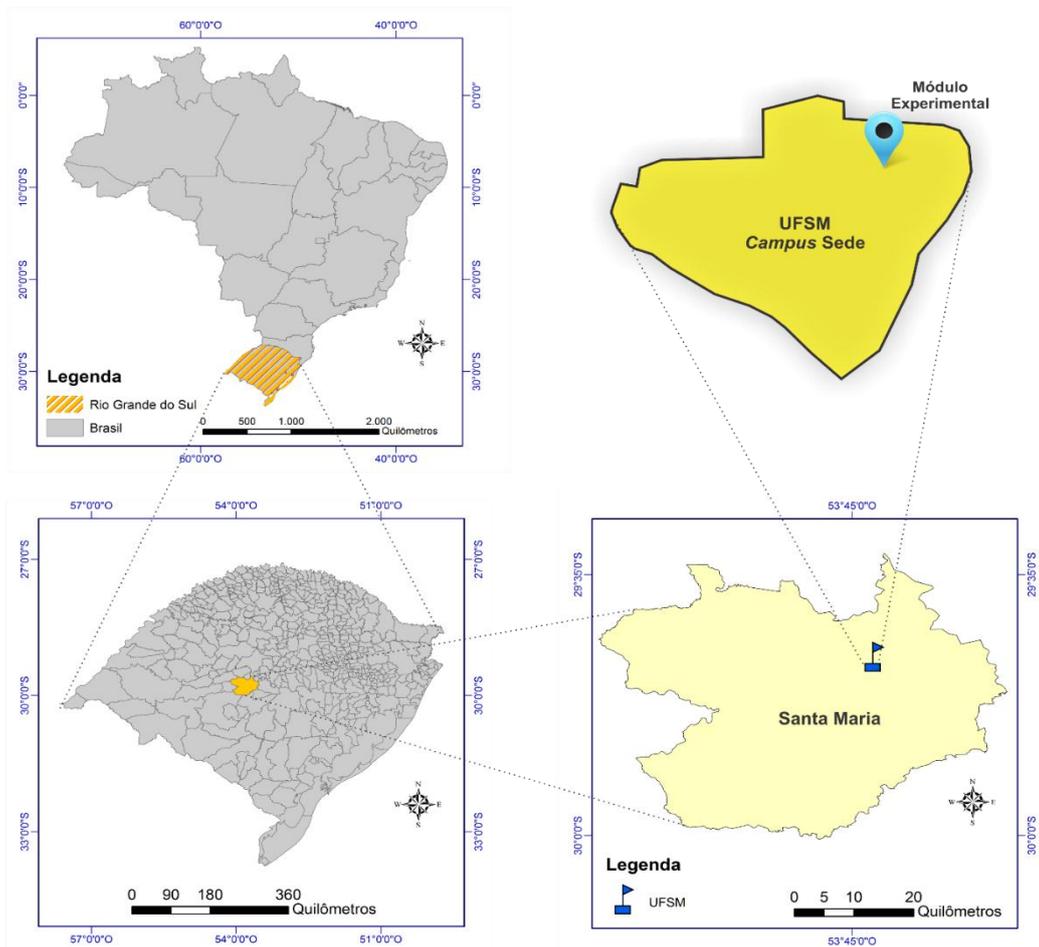
Todos os telhados verdes objeto de monitoramento e relatados nas publicações foram construídos e avaliados nas dependências da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Estado do Rio Grande do Sul, Brasil, situado sob as coordenadas

¹ A íntegra dos estudos e todo conjunto de dados referente aos monitoramentos foram gentilmente cedidos pelo grupo de pesquisas Ecotecnologias.

geográficas de latitude $29^{\circ} 42' 48''$ S e longitude $53^{\circ} 43' 07''$ O. O local corresponde a uma área específica para experimentos nas temáticas ambientais do Grupo Ecotecnologias.

A região onde está situada a área experimental possui clima dominante do tipo mesotérmico brando Cfa (temperado quente), caracterizando-se por apresentar invernos frios e com temperatura média do mês mais frio entre 13°C e 15°C e média das mínimas entre 8°C e 10°C . Os verões caracterizam-se por apresentarem temperaturas médias do mês mais quente superiores a 24°C e média das máximas variando entre 28°C e 32°C e as máximas absolutas oscilando em torno dos 39°C . As temperaturas médias anuais situam-se entre 16°C e 20°C . As precipitações são regulares durante todo o ano e as médias de acumulados anuais variam em torno de 1500 mm (LÖBLER; SCCOTI; WERLANG, 2015). A Figura 6 apresenta um mapa do local dos estudos.

Figura 6 - Localização dos módulos experimentais.



Fonte: Persch (2019).

3.2 DESCRIÇÃO DOS ESTUDOS

A Tabela 1 traz o resumo das principais características convenientes aos módulos experimentais contemplados em cada estudo. Na sequência, uma breve descrição de cada experimento é realizada.

Tabela 1 - Resumo dos aspectos mais relevantes de cada estudo.

Estudo	PERSCH (2012)	PESSOA (2016)	ARBOIT (2017)	PERSCH (2019)
Tipo do Telhado	Modular com Galocha	Hexagonal Modular com Galocha	Convencional	Convencional
Vegetação	Variado	<i>Sedum rupestre</i> <i>Plectranthus barbatus</i> <i>Sedum dendroideum</i>	<i>Sedum rupestre</i>	<i>Sedum rupestre</i>
Tipo do Substrato	Solo de Jardinagem	Solo de Jardinagem	Solo de Jardinagem	Solo de Jardinagem
Espessura do Substrato	40mm	20 a 40mm	80mm	80mm
Área do Telhado	6m ²	6.92 e 6.12m ²	0.202m ²	12 m ²
Dados validados	29	37 e 41	28	21
Camada de Drenagem	Galocha	Galocha e Hexagonal	McDrain 2L	McDrain 2L
Período Monitorado	janeiro/2010 a março/2011	fevereiro/2015 a abril/2016	julho/2016 a fevereiro/2017	novembro/2017 a novembro/2018

Fonte: Autor.

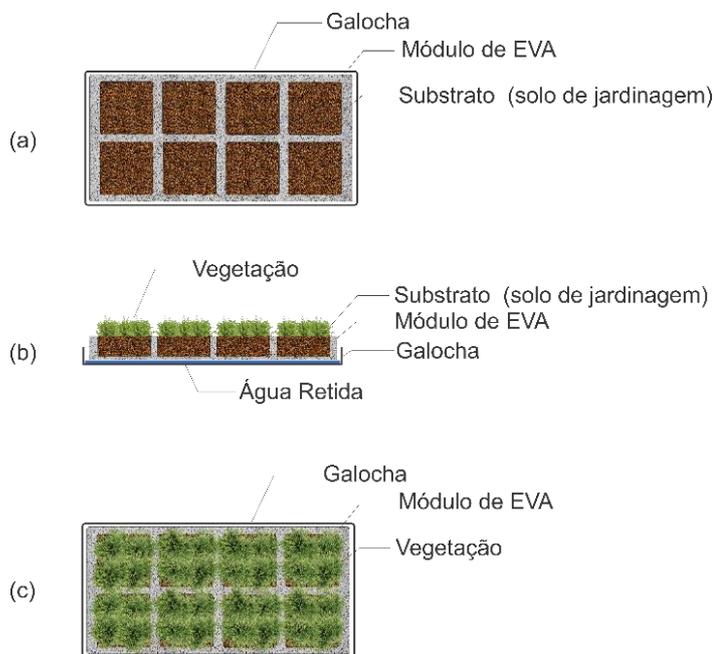
3.2.1 Estudo Persch (2012)

Esse estudo resumiu-se em avaliar o desempenho quantitativo de um telhado verde (TV) no controle de escoamento pluvial. A área do telhado compreendeu aproximadamente 6 m², formado por um conjunto de 24 módulos retangulares de EVA (espuma vinílica acetinada) reciclada moída e aglomerada com cimento Portland CP-V com adição de cinzas. Cada módulo possuía dimensões externas de 35 x 70 cm, com 9 cm de espessura. Os módulos foram acondicionados sobre galochas de PET reciclado com cerca de 3 cm de altura (Figura 7). A estrutura do telhado localizava-se a uma altura de 2m a partir do solo.

A cobertura vegetal compreendeu duas espécies, conhecidas popularmente por gazânia (*Gazania rigens*) e calanchôe (*Kalanchoe blossfeldiana*). Posteriormente, foram introduzidas quatro novas espécies conhecidas como falso boldo (*Plectranthus*

barbatus), gravatinha (*Chlorophytum comosum*), aspargo palito (*Asparagus densiflorus 'sprengeri'*) e *echeveria*. O período de monitoramento foi de aproximadamente 510 dias (janeiro/2010 a março/2011).

Figura 7 - Esquema ilustrativo do módulo de EVA: a) vista superior; b) vista lateral do corte; c) vista superior com vegetação.



Fonte: Autor.

Para monitorar a precipitação, o autor instalou um pluviômetro e um pluviógrafo, exatamente no centro da estrutura do telhado, que permitiram a determinação do volume total de chuva. A partir dos volumes registrados no pluviômetro e no pluviógrafo, foi calculado uma chuva média, compreendida entre a média aritmética entre as chuvas registradas. Essa metodologia foi adotada devido à proximidade entre os medidores, não caracterizando uma variação espacial significativa.

Para avaliar o desempenho dos telhados verdes, após cada evento de precipitação, foi coletado e mensurado o volume total escoado. Para isso, drenos foram instalados na extremidade inferior da estrutura de suporte, de forma que todo o escoamento excedente da precipitação fosse drenado para o seu interior. A partir dele, derivando para uma tubulação vertical, a água foi conduzida até um reservatório de 500L (previamente cubado) instalado embaixo do telhado. Após a precipitação, o nível

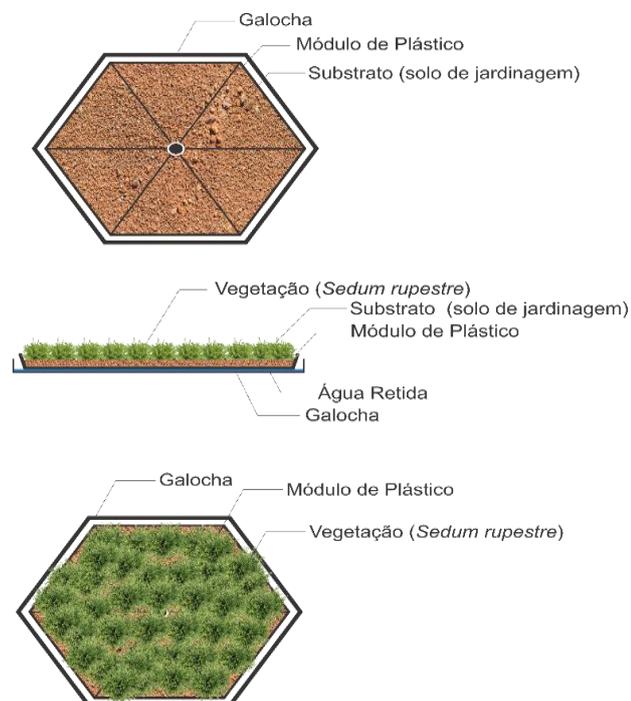
drenado era medido com utilização de régua e sensores de nível. Com as medições de cota, e a partir da relação entre cota X volume, o volume drenado era determinado. Durante o período de monitoramento, foram possíveis coletar e registrar um total de 29 eventos de precipitação e escoamento válidos para a obtenção de resultados.

3.2.2 Estudo de Pessoa (2016)

Esse estudo foi composto por dois telhados verdes extensivos de área 6,92 m² e 6,12 m², respectivamente. Ambos foram compostos por uma estrutura de suporte (em madeira de construção civil) e a base dos telhados impermeabilizados com lona plástica transparente.

Para as demais camadas, o telhado de 6,92m² foi implementado utilizando módulos hexagonais interconectados. Esses módulos têm origem comercial e foram confeccionados com plástico reciclado, com dimensões externas de 48 x 42 cm, 7 cm de altura e 2 mm de espessura. Cada módulo hexagonal apresenta seis subdivisões (células) internas triangulares, no qual o substrato é inserido (Figura 8). Para a cobertura vegetal, foi utilizada a espécie *Sedum rupestre*.

Figura 8 - Esquema ilustrativo do módulo hexagonal: a) vista superior; b) vista lateral do corte; c) vista superior com vegetação.

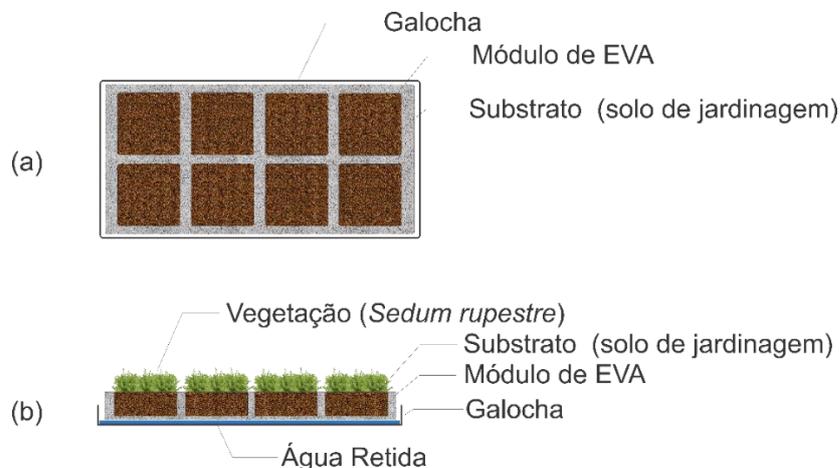


Fonte: Autor.

Já o telhado de 6,12m² foi formado por 24 módulos retangulares de EVA (espuma vinílica acetinada) reciclada moída e aglomerada com cimento Portland CP-V com adição de cinzas (Figura 9), à semelhança do telhado verde investigado por Persch (2012). Cada módulo possuía dimensões externas de 35 x 70 cm, com 9 cm de espessura. Os módulos são acondicionados sobre galochas de Pet reciclado com cerca de 3 cm de altura. A vegetação para esse tipo de sistema construtivo foi composta pelas espécies *Plectranthus barbatus* e a *Sedum dendroideum*.

O substrato empregado em ambos os telhados foi composto de solos de jardinagem, misturado ao solo existente nas mudas das plantas utilizadas na instalação. A profundidade variou entre 2 a 4 cm de espessura, respectivamente.

Figura 9 - Esquema ilustrativo do módulo EVA: a) vista superior; b) vista lateral do corte; c) vista superior com vegetação.



Fonte: Autor.

Para o monitoramento quantitativo, foram determinados os valores de precipitação e escoamento em cada um dos telhados verdes. A precipitação foi monitorada com utilização de pluviômetros do tipo Ville de Paris sem medidor interno no qual as leituras foram realizadas por uma proveta graduada de 10 mm.

Para o monitoramento do escoamento, instalou-se isoladamente em ambos os telhados drenos na extremidade inferior da estrutura de suporte. Por meio destes drenos, o volume excedente do escoamento era conduzido para um conduto vertical e então direcionado para dois reservatórios de polietileno de 500 L posicionado sob os telhados verdes (um reservatório para cada telhado). Após cada evento de chuva,

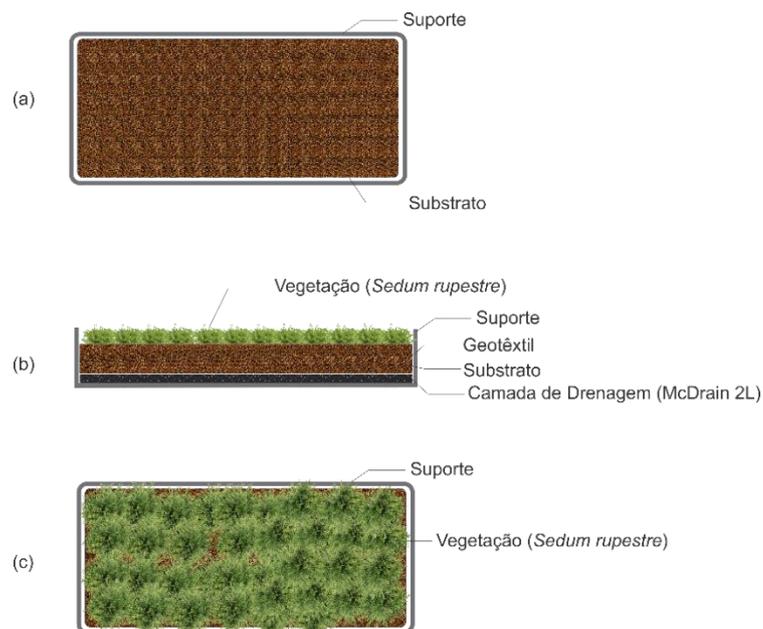
era medido o valor da altura de escoamento e, a partir da relação entre cota X volume, o volume total drenado era determinado. O monitoramento ocorreu entre fevereiro/2015 até abril/2016, totalizando, 406 dias e correspondendo a 41 eventos válidos para o sistema hexagonal e 37 para o sistema de galocha.

3.2.3 Estudo Arboit (2017)

O estudo de Arboit (2017) foi composto por 5 minitelhados verdes construídos sobre uma espécie de bandeja de dimensões 0,560 x 0,360 m, compreendendo uma área superficial de 0,202m².

Cada minitelhado foi composto pela estrutura (bandeja), camada de drenagem, substrato e vegetação. A camada de drenagem foi composta por uma membrana drenante conhecida comercialmente como MacDrain. O substrato utilizado tem uma espessura de 8 cm e foi composto de solo comum, vermiculita e condicionador de solo. A vegetação empregada foi o *Sedum rupestre*. A Figura 10 mostra um esquema ilustrativo dos módulos.

Figura 10 - Esquema ilustrativo do módulo retangular: a) vista superior; b) vista lateral do corte; c) vista superior com vegetação.



Fonte: Autor.

Para avaliar o desempenho quantitativo, as variáveis de precipitação e os volumes escoados foram determinados após cada evento de chuva. Para quantificar a precipitação, foi utilizado um pluviômetro do tipo Ville de Paris e as leituras eram realizadas utilizando-se uma proveta graduada de 0,1 mm com capacidade de 10 mm. O escoamento era conduzido por drenos até pequenos reservatórios (bombonas de 20L) localizados na parte inferior. Por meio de uma proveta de 1L especialmente graduada era medido o volume de escoamento. A Figura 11 representa os módulos experimentais.

Figura 11 - Representação dos módulos experimentais.



Fonte: Adaptado de Arboit (2017).

O período monitorado se deu em 07/2016 até 02/2017, totalizando 237 dias e correspondendo a 28 eventos validados.

3.2.4 Estudo Persch (2019)

Esse estudo se resumiu na avaliação do desempenho quantitativo de telhados verdes no controle de escoamento.

O telhado verde, com área total de 12m², foi composto pelos seguintes componentes: estrutura do telhado, impermeabilização, camada de drenagem, membrana geotêxtil, camada de substrato e a vegetação. Para a estrutura do telhado foi utilizado madeira de construção civil, construído de forma a formar uma espécie de

caixa com 15cm de altura. Para a camada de drenagem foi utilizado MacDrain e impermeabilização com plástico estufa 250 micras. A Figura 12 traz um esquema ilustrativo da seção transversal da estrutura.

Figura 12 - Esquema ilustrativo do módulo retangular com vegetação, substrato, geotêtil, camada de drenagem e camada de impermeabilização.



Fonte: Autor.

A espessura do substrato do telhado verde foi de 8 cm e substrato e composto por solo franco argiloso. A espécie de vegetação utilizada foi *Sedum rupestre*. As etapas construtivas e o telhado finalizado com vegetação, podem ser observadas na Figura 13.

Figura 13 - Processo de construção dos telhados verdes: A – estrutura do telhado; B – impermeabilização e camada de drenagem; C – geocomposto; D – colocação do substrato; E – plantio das mudas; F – vegetação no início do monitoramento.



Fonte: Adaptado de Persch (2018).

O monitoramento da precipitação foi realizado com um pluviógrafo posicionado sobre o telhado, cuja precisão de medida foi de 0,2mm e intervalo de leitura de 5 segundos. Também foi instalado um pluviômetro individual do tipo “São Izidro”, de forma a complementar o monitoramento e auxiliar na consistência dos dados. Os pluviômetros utilizados têm capacidade total de medição de 140mm e precisão de 1mm. Após cada evento de chuva, as leituras foram realizadas manualmente em todos os dispositivos.

Os dados de escoamento foram obtidos por meio de drenos localizados na extremidade inferior da estrutura de suporte, de forma que todo o escoamento excedente da precipitação fosse drenado para o seu interior. A partir dele, derivando para uma tubulação vertical, a água foi conduzida até um reservatório (500L) previamente cubado e instalados na parte inferior do telhado. Após cada evento de precipitação, o nível drenado para os reservatórios era medido com utilização de régua linimétrica com precisão de 0,5cm. A partir das leituras de nível, e da relação cota X volume, o volume total drenado foi determinado. O período de monitoramento deu se entre 11/2017 até 10/2018, totalizando 365 dias e compreendendo 21 eventos válidos.

3.3 ANÁLISE E TRATAMENTO DOS DADOS

Uma vez entendido a dinâmica de monitoramento e as características de cada sistema construtivo inerente a cada estudo, se reuniu o conjunto de dados de precipitação e escoamento. uma análise prévia foi realizada, de forma a detectar possíveis erros de aquisição e consistência. Dessa forma, foram descartados dados referentes a eventos onde: a) precipitação medida foi menor que o volume escoado; b) precipitação foi abaixo de 1mm em função da precisão dos pluviômetros; c) eventos com escoamento nulo; d) quando o volume de escoamento extravasou a capacidade volumétrica do reservatório.

Após a análise prévia, os dados de escoamento total foram convertidos em escoamento específico por unidade de área (L/m^2) para cada evento de chuva (Equação 10).

$$E = \frac{V_{esc}}{Area} \quad (10)$$

Sendo:

E : escoamento (L/m² ou mm);

V_{esc} : volume escoando (L);

$Area$: área do telhado verde (m²);

Uma vez consistidos os dados de escoamento para cada estudo, o Método CN adaptado para telhados verdes (seção 2.4.4) foi utilizado para determinar a capacidade máxima de armazenamento de água no solo (Equação 8) e, em seguida, determinou-se o valor de CN para cada um dos eventos nos diferentes estudos (Equação 9).

Os valores de CN foram determinados para cada tipo de telhado individualmente (inerente a cada estudo), e os dados obtidos foram organizados e avaliados por meio de estatística descritiva.

Juntamente, e para fins de comparação, para cada conjunto de dados foi determinado o coeficiente de escoamento (CE) (Equação 11), e a parcela de água armazenada em cada unidade (retenção). O coeficiente de escoamento relaciona o volume total escoado, com relação ao precipitado, sendo que os valores de CE variam numericamente entre 0 e 1, sendo que valores mais baixos indicam maior capacidade de retenção de água no telhado, gerando menos escoamento.

$$Ce = \frac{V_{esc}}{P_{rec}} \quad (11)$$

Sendo:

Ce : coeficiente de escoamento (adimensional);

V_{esc} : volume escoado (mm ou L/m²);

P_{rec} : precipitação (mm ou L/m²);

A capacidade de retenção dos telhados verdes, foi obtida por meio de um balanço hídrico simplificado considerando a diferença entre o volume total de chuva incidente em cada unidade de telhado verde e o volume escoado superficialmente, conforme Equação 12.

$$V_{Ret}(\%) = \left(\frac{V_{Chuva} - V_{Escoado}}{V_{Chuva}} \right) * 100 \quad (12)$$

Sendo:

V_{Ret} : volume de água armazenada no telhado (%);

V_{Chuva} : volume de chuva total incidente no telhado (mm);

V_{Esc} : volume escoado superficialmente (mm);

Assim como detalhado na seção 2.3, as características de precipitação influenciam no desempenho de telhados verdes. Dessa forma, para cada conjunto de eventos, os volumes de precipitação foram classificados como: baixos ($P \leq 20\text{mm}$); médios ($20\text{mm} < P \leq 40\text{mm}$) e altos ($P > 40\text{mm}$). A partir dessa classificação, já utilizada por outros autores, foi possível avaliar o comportamento dos telhados verdes frente a diferentes magnitudes de precipitação (HAKIMDAVAR *et al.*, 2014; PERSCH, 2019).

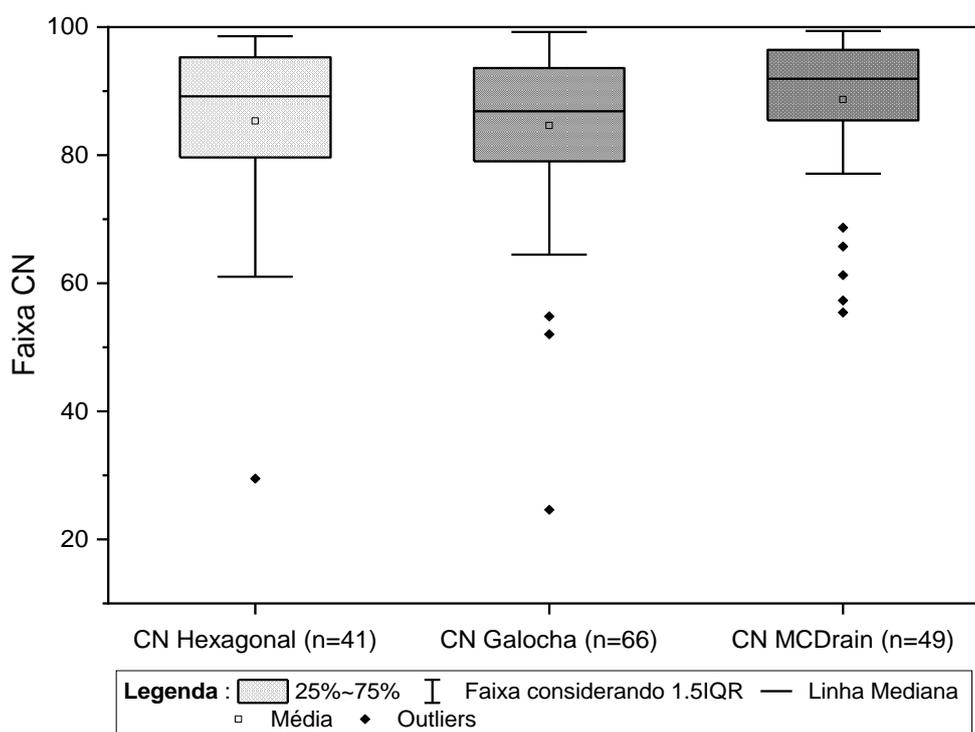
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados os resultados relacionados ao desempenho hidrológico dos telhados verdes levando em consideração os diferentes sistemas construtivos: galocha, hexagonal e McDrain. Serão analisados e discutidos o parâmetro CN, coeficiente de escoamento, desempenho da retenção e o respectivo comportamento para as diferentes estações climáticas do ano.

4.1 ANÁLISE DOS SISTEMAS CONSTRUTIVOS

A Figura 14, apresenta o valor do parâmetro CN calculado para dos diferentes sistemas construtivos.

Figura 14 – Parâmetro CN calculado para dos diferentes sistemas construtivos.



Fonte: Autor.

O CN médio para o sistema galocha foi de 84,6 (n=41 dados), com uma variação entre 61 e 98,6. Esse valor de CN foi muito próximo ao encontrado para o sistema hexagonal, cujo CN médio calculado foi de 85,3, variando entre 62 e 98. O sistema McDrain teve o maior valor de CN (88,7) e também o menor desvio padrão, variando entre 77,08 a 99,19. Os sistemas construtivos hexagonal e galocha obtiveram possivelmente melhores CNs comparados ao sistema McDrain, devido seu material de composição reter mais água (plástico reciclado – sistema hexagonal e cimento Portland + EVA – sistema de galocha), enquanto que a composição do McDrain é constituída para drenagem.

A duração do período sem precipitação antecedente a um novo evento é importante no processo de retenção de água. Quando um telhado verde está sujeito a um longo período sem incidência de precipitação, apresenta um tempo mais adequado para recuperar a capacidade de armazenamento de eventos futuros (ZHANG *et al.*, 2015). Dessa maneira, é possível explicar os outliers que estão presentes na Figura 14. Além disso, diferenças na intensidade da precipitação, volume

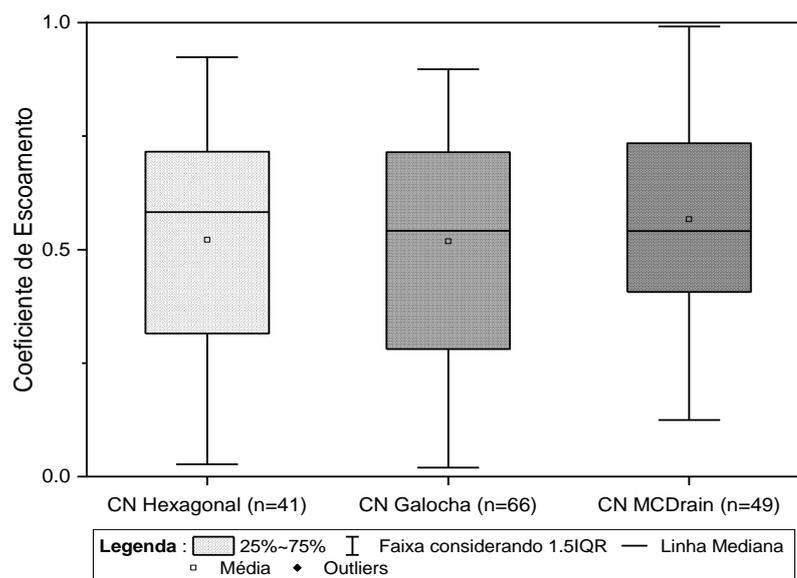
de precipitação do evento entre outras variáveis também influenciam na retenção de água pelo substrato.

Os valores de CN encontrados para os diferentes sistemas construtivos são ligeiramente inferiores aos relatados por Fassmann-Beck *et al.*, (2016), que relatou valores entre 90 a 92 para um sistema construtivo com 100 mm de espessura de substrato, para o clima Cfa. Para outra região climática, Cfb que apresenta chuvas regulares, sem estação seca e a temperatura média do mês mais quente não chega a 22°C, a autora relatou um CN de 87 para o telhado com 150 mm de substrato e CN de 84 para um telhado com 100 mm de espessura. Por outro lado, essa diferença nos valores pode ser dada devido a diferença da quantidade de dados, pois em seu estudo, Fassmann-Beck *et al.*, (2016), usou 156 eventos validados, proporcionando maior validação amostral dos dados utilizados.

Se compararmos os valores de CN calculados para telhados verdes com valores tabelados relacionados às superfícies, o sistema de galocha se aproxima de superfícies de espaços abertos com relva em mais de 75% da área, que apresentam solo do grupo hidrológico D com CN de 84, ou seja, solos com argilas expansivas. O sistema hexagonal se aproxima da superfície de paralelepípedos com solo do grupo Hidrológico B representando um CN de 85, ou seja, valores semelhantes a solos arenosos menos profundos e com boa permeabilidade. Já o sistema construtivo McDrain se aproxima da superfície de zonas cultivadas sem conservação do solo, que apresentam solo do grupo hidrológico C com CN de 88, ou seja, solo com argila pouco profundo e que apresenta valor baixo de infiltração. Dentre os sistemas construtivo estudados, o sistema de galocha apresentou o CN mais próximo para ser considerado um sistema não urbanizado, ou seja, apresenta boas condições hidrológicas (CARTER, 2006; FASSMAN-BECK *et al.*, 2016).

Quando tomado os valores do coeficiente de escoamento (Figura 15), percebe-se que o sistema galocha apresenta o menor desvio em relação aos demais sistemas construtivos, com CE médio de 0,52 com uma variação de 0,02 a 0,90. Para o sistema hexagonal encontrou-se um CE médio de 0,51 com uma variação de 0,03 até 0,92. Para o sistema construtivo McDrain encontrou-se um CE médio de 0,57 com variação de 0,12 até 0,99.

Figura 15 – Coeficiente de Escoamento dos diferentes sistemas construtivos.



Fonte: Autor.

Geralmente, o volume de precipitação é a variável importante e que determina o comportamento do escoamento e retenção dos telhados verdes (BENGTSSON, 2005; PERSCH, 2019; VILLAREAL, 2005; ZHANG *et al.*, 2015). Dessa forma, a Tabela 2 traz os valores de CN, coeficiente de escoamento e retenção para diferentes faixas de classificação tomando a magnitude dos eventos dos volumes de chuva.

Tabela 2 – Valores de CN, coeficiente de escoamento (CE) e retenção para diferentes volumes de chuva.

		Volume de Chuva (mm)		
		P≤20	20<P≤40	40<P
Hexagonal	CN	80.2	86.4	90.2
	CE	0.33	0.55	0.72
	% Retenção	57%	45%	28%
	N° eventos	13	18	10
Galocha	CN	84.7	84.4	85
	CE	0.42	0.48	0.64
	% Retenção	58%	51%	36%
	N° eventos	15	31	20
MCDrain	CN	92.6	86.65	85.3
	CE	0.51	0.58	0.63
	% Retenção	49%	42%	37%
	N° eventos	19	18	12

Fonte: Autor.

Pela análise da Tabela 2, percebe-se o desempenho de telhados verdes (independente do sistema construtivo), são influenciados pelo volume de precipitação. Observa-se que quanto maior o volume precipitado, maior o CE e CN, e conseqüentemente, menor a retenção. Como o substrato do telhado verde tem uma capacidade finita de armazenamento, eventos de maior volume produzem uma proporção maior de escoamento, quando comparado a um evento menor magnitude (BERNDTSSON, 2010; GETTER, 2006; PERSCH, 2019; STOVIN *et al.*, 2015). Isto ficou mais evidente no sistema construtivo hexagonal, onde para $P \leq 20$ mm, encontrou-se um CN médio e CE de 80,2 e 0,33, respectivamente. Esses valores foram aumentando à medida em que ocorreu o aumento do volume da precipitação, onde para $20 < P \leq 40$, CN= 86 e CE=0,55 e para $P > 40$, CN=90,2 e CE=0,72. O sistema de galocha apresentou para chuvas médias ($20 < P \leq 40$), um CN de 84,7 e CE de 0,48 e para chuvas com $P > 40$, obteve-se um CN de 85 e CE= 0,64 corroborando com a literatura esse efeito de volume de chuva. Percebe se também que, o sistema de galocha apresentou menor sensibilidade a magnitude da precipitação. Para o sistema MCDrain, encontrou-se um CN de 92,6 e CE= 0,51 para $P \leq 20$. À medida que houve o aumento do volume de precipitação, $20 < P \leq 40$, obteve-se um CN de 86,65 e CE= 0,58. Esse sistema apresentou resultados diferentes dos encontrados na literatura, pois à medida que o volume de chuva aumentou, o CN diminui. Tal fato pode ter ocorrido devido a presença de vários dados com baixos índices de volume de chuva, mas que geraram escoamento, pois ocorreram em dias consecutivos, devido ao aumento da umidade do solo nos eventos de chuva.

Tomando-se os valores de CN, coeficiente de escoamento e capacidade de retenção, é possível perceber que o sistema construtivo galocha tem um melhor desempenho na redução do escoamento superficial, pois apresentou o menor CE e CN, e maior capacidade de retenção dentre os sistemas construtivos comparados. Paralelamente, os resultados evidenciam a capacidade dos telhados verdes em atuar positivamente na dinâmica de escoamento, principalmente quando empregados em regiões urbanizadas (BERNDTSSON, 2010; LEE, 2015; MENTENS, 2006; PERSCH, 2019; VILLAREAL, 2005).

4.2 ANÁLISE INDIVIDUAL DE CADA SISTEMA CONSTRUTIVO

A Figura 16 apresenta de forma individual os resultados de cada sistema construtivo, evidenciados por cada um dos autores Persch (2012), Pessoa (2016) Arboit (2017) e Persch (2019). São apresentados os valores do parâmetro CN, coeficiente de escoamento e retenção médios. Em paralelo, uma análise contemplando as diferentes estações do ano foi realizada.

Figura 16 – CN, CE, e Retenção de cada sistema construtivo em paralelo as estações do ano.

		Estação				
		Primavera	Verão	Outono	Inverno	
Galocha	Persch (2012)	CN Médio	75.8	80.8	86.1	86.0
		N° eventos	8	5	7	9
		CE	0.35	0.43	0.53	0.57
		Retenção (%)	65%	57%	47%	43%
	Chuva (mm)					
			262.4	114.2	231.0	342.0
	Pessoa (2016)	CN Médio	86.0	89.0	86.9	85.2
		N° eventos	15	5	8	9
		CE	0.56	0.59	0.57	0.49
		Retenção (%)	44%	41%	43%	51%
Chuva (mm)						
		396.5	158.2	337.9	309.3	
Hexagonal	Pessoa (2016)	CN Médio	90.5	78.3	81.7	86.7
		N° eventos	16	9	8	8
		CE	0.59	0.4	0.52	0.51
		Retenção (%)	41%	60%	48%	49%
	Chuva (mm)					
			454.3	223.3	481.3	242.3
MCDrain	Persch (2019)	CN Médio	76.7	81.7	85.2	87.5
		N° eventos	2	8	6	5
		CE	0.37	0.45	0.43	0.51
		Retenção (%)	63%	55%	57%	49%
	Chuva (mm)					
			62	268.2	167.2	116.5
	Arboit (2017)	CN Médio	86.0	96.0	-	89.0
		N° eventos	4	17	0	7
		CE	0.6	0.67	0	0.66
		Retenção (%)	40%	33%	-	34%
Chuva (mm)						
		204.9	378.1	0.0	225.0	

Fonte: Autor.

4.2.1 Sistema Construtivo Galocha

Como indicado anteriormente, esse sistema construtivo foi avaliado por Persch (2012) e Pessoa (2016). A retenção média variou entre 16,0 mm/m² (PERSCH, 2012) e 12,5mm/m² (PESSOA, 2016). Isso representou um coeficiente de escoamento médio de 0,48 e 0,55, e retenção de 52% e 45%, respectivamente. Essa diferença de retenção pode ter ocorrido devido a diferença de quantidade de chuva ocorrida no período monitorado (volume e número de eventos monitorados), uma vez que, teve maior índice pluviométrico no estudo de Pessoa (2016).

Em relação ao parâmetro CN, encontrou-se um CN médio de 82,4 e 76,9, respectivamente nas investigações de Persch (2012) e Pessoa (2016). Assim como a diferença encontrada para o coeficiente de escoamento, os resultados possivelmente foram influenciados pelo volume de chuva e número de eventos monitorados.

Quando tomado os valores de retenção nas diferentes estações do ano, percebe-se que o melhor desempenho ocorreu na primavera para Persch (2012) e no Inverno para Pessoa (2016), com uma retenção média de 65% e 51%, respectivamente. Essa diferença possivelmente ocorreu devido a quantidade de eventos monitorados. De forma análoga, para Persch (2012) os valores de CN se mostram menores na primavera e mais expressivos no outono e inverno. Essa diferença entre as estações, possivelmente foi ocasionada pela quantidade de umidade no substrato, característica das estações úmidas potencializadas pelas baixas temperaturas e dias com baixa insolação (BEECHAM, 2014). Já para Pessoa (2016), os valores de CN e retenção foram menores no inverno (CN=85,20) e maiores no verão (CN=89,0), são possivelmente devido aos dados de chuva obtidos serem registrados em dias consecutivos de chuva, ou seja, com o substrato já saturado, favorecendo o elevado valor de CE e CN no verão.

4.2.2 Sistema construtivo hexagonal

Para o sistema construtivo hexagonal, o monitoramento de Pessoa (2016) indicou um CN médio de 84,0 e retenção média de 12,3mm/m², representando uma retenção de 49% e um CE= 0,51 para 41 eventos válidos.

Em relação as estações do ano, o verão apresentou a melhor performance em termos de retenção com 60%, representando um CN de 78,0. Em contrapartida, a primavera apresentou a menor retenção e CN (40% e 90,0 respectivamente). Tais

diferenças de valores ocorreram possivelmente devido ao volume de chuva precipitado (verão – 223mm e primavera – 454mm). Um volume maior de chuva indica mais umidade no substrato, diminuindo a capacidade de retenção e favorecendo o escoamento. Isso reflete tanto no CE, como no valor do parâmetro CN. Mentens *et al.*, (2006) encontraram para um telhado com substrato de 10cm de espessura, um escoamento de 80% no inverno e 52% no verão, indicando a variação da capacidade de retenção quanto as variações climáticas.

4.2.3 Sistema construtivo McDrain

O sistema McDrain teve uma retenção variando entre 8,4mm/m² (ARBOIT, 2017) e 15,8mm/m² (PERSCH, 2019). Isso representou uma retenção de 34% (CE=0,66) e 55% (CE=0,45), respectivamente. Essa diferença na retenção entre os telhados com as mesmas características construtivas, corresponde a diferentes volumes de chuvas observadas em cada estudo. Outra característica já relatada na literatura, é a influência do tamanho da área de drenagem, correspondentemente maior em Persch (2019). Áreas maiores apresentam maior capacidade de retenção por unidade de área (PERSCH *et al.*, 2021). Quanto ao CN médio, Arboit (2017) encontrou um valor de 93,0 e Persch (2019) o valor de 84,0. Ambos os valores estão em conformidade com a literatura, pois quanto maior a retenção menor o CN e o CE (CARTER, 2006; FASSMANN-BACK *et al.*, 2016).

Analisando essas variáveis quanto a estações climáticas, percebeu-se que o sistema McDrain obteve melhor eficiência na primavera, com uma retenção média variando de 63% (PERSCH, 2019) a 40% (ARBOIT, 2017). Valores análogos foram relatados por Beecham (2014), evidenciando melhor desempenho quanto a retenção nas estações quentes. Outro fator pode ser a maior biomassa, devido ao período de reprodução da vegetação que aumenta a necessidade por água restaurando a capacidade de retenção do substrato. Bengtsson (2005) também encontrou resultados semelhantes, onde em meses frios encontrou uma retenção de 12% e no verão, 67%. Em termos de CE, isso representou um valor de 0,37 e 0,67, respectivamente. Tais valores de CN encontrados para essa estação, possivelmente estão relacionados com o baixo volume de chuva do período.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho reuniu os dados monitorados de 4 estudos realizados entre 2012 e 2019 com diferentes sistemas construtivos de telhados verdes, avaliando sistematicamente o parâmetro CN, coeficiente de escoamento e capacidade de retenção.

Os dados evidenciaram as particularidades inerentes a cada sistema. A melhor eficiência hidrológica foi do sistema galocha, indicando uma retenção média de 48% e CN=84,6. Quando tomadas as estações do ano, o melhor desempenho ocorreu na primavera com CN=75,80 (PERSCH, 2012). Obviamente, esses resultados podem ter sido influenciados pela quantidade de eventos válidos (diferentes em cada estudo) e pelas distintas condições climatológicas nos diferentes períodos monitorados.

A influência de cada tipo de sistema construtivo na retenção das precipitações demonstra a importância de selecionar um sistema mais adequado para cada necessidade. É importante destacar que se pode encontrar resultados distintos em função dos mais diversos tipos de sistemas construtivos, mas todos constatarem os benefícios dos telhados verdes.

Através desse trabalho, recomenda-se o uso de telhados verdes, não apenas em âmbito local, mas também no âmbito público, com o objetivo de diminuir os impactos oriundos da atividade antrópica e urbanística.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARBOIT, Nathana Karina Swarowski. **Evapotranspiração da *Sedum rupestre* em telhados verdes extensivos**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal De Santa Maria, Santa Maria, 2017.
- BERARDI, U.; GHAFARIANHOSEINI, A. H.; GHAFARIANHOSEINI, A. State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. **Applied Energy**, v. 115, p. 411–428, 2014. Elsevier Ltd.
- BENGTSSON, L.; GRAHN, L.; OLSSON, J. **Hydrological function of a thin extensive green roof in southern Sweden**. *Nordic Hydrology*, v. 36, n. 3, p. 259–268, 2004.
- BERNDTSSON, J. C. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: *A review*. **Ecological Engineering**, Vol. 36, pp. 351-360, 2010
- BREVIS, P. A.; NESMITH, D. S.; WETZSTEIN, H. Y. Flower age affects fruit set and stigmatic receptivity in rabbiteye blueberry. **HortScience**, v. 41, n. 7, p. 1537–1540, 2006.
- BUFFAM, I.; MITCHELL, M. E.; DURTSCHKE, R. D. Environmental drivers of seasonal variation in green roof runoff water quality. **Ecological Engineering**, v. 91, p. 506–514, 2016.
- CALIFORNIA COASTAL COMMISSION, W. **How Urbanization Affects the Water Cycle**. CA WALUP Partnership, p. 1–4, 2005
- CARPENTER, C. M. G.; TODOROV, D.; DRISCOLL, C. T.; MONTESDEOCA, M. Water quantity and quality response of a green roof to storm events : Experimental and monitoring observations *. **Environmental Pollution**, p. 1–9, 2016. Elsevier Ltd.
- CARTER, T. L.; RASMUSSEN, T. C. Hydrologic Behavior of Vegetated Roofs. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 42, n. 5, p. 1261–1274, 2006.
- CURRIE, B. A.; BASS, B. Using Green Roofs to enhance Biodiversity in the City of Toronto. **Response**, n. April, p. 47, 2010.
- CZEMIEL BERNDTSSON, J. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. **Ecological Engineering**, v. 36, n. 4, p. 351–360, 2010.
- DURÁN-BARROSO, P.; GONZÁLEZ, J.; VALDÉS, J. B. Improvement of the integration of Soil Moisture Accounting into the NRCS-CN model. **Journal of Hydrology**, v. 542, p. 809–819, 2016.
- ECKART, K.; MCPHEE, Z.; BOLISSETTI, T. Performance and implementation of low impact development – A review. **Science of the Total Environment**, v. 607–608, p. 413–432, 2017.
- FASSMAN-BECK, E.; HUNT, W.; BERGHAGE, R.; et al. Curve number and runoff

coefficients for extensive living roofs. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 21, n. 3, 2016.

FENG, Y.; BURIAN, S. J.; PARDYJAK, E. R. Observation and estimation of evapotranspiration from an irrigated green roof in a rain-scarce environment. **Water (Switzerland)**, v. 10, n. 3, p. 13–21, 2018.

FLETCHER, T. D.; ANDRIEU, H.; HAMEL, P. Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: A state of the art. **Advances in Water Resources**, v. 51, p. 261–279, 2013.

FLETCHER, T. D.; SHUSTER, W.; HUNT, W. F.; et al. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. **Urban Water Journal**, v. 12, n. 7, p. 525–542, 2015.

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

GRACESON, A.; HARE, M.; MONAGHAN, J.; HALL, N. The water retention capabilities of growing media for green roofs. **Ecological Engineering**, v. 61, n. PA, p. 328–334, 2013.

Green, W.H.; Ampt, G.A. Studies on soil physics-1. The flow of air and water through soils. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v.4, n.1, p.1-24, 1911.

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.

HORTON, R.E 1939. Analysis of runoff-plot experiments with varying infiltration capacity. **Transactions American Geophysical Union, Washington**, p. 693 - 711.

HYDROTECH. Garden Roof Planning Guide. , p. 33, 2014.

JOBIM, Alan Lamberti. **Diferentes tipos de telhados verdes no controle quantitativo da água pluvial**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

KHAN, S. D. Urban development and flooding in Houston Texas, inferences from remote sensing data using neural network technique. **Environmental Geology**, v. 47, n. 8, p. 1120–1127, 2005.

BARBOSA, Mirian; LAMBERTS, Roberto; GUTHS, Saulo. Uso de barreiras de radiação para minimizar o erro no registro das temperaturas do ar em edificações. **Ambiente Construído**, v. 8, n. 4, p. 117–136, 2008.

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. Elsevier Ltd.

LIBERALESSO, Tiago. **Telhados Verdes Extensivos: Influência da composição**

do substrato na retenção hídrica e no desenvolvimento da vegetação.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

LI, C.; LIU, M.; HU, Y.; et al. Effects of urbanization on direct runoff characteristics in urban functional zones. **Science of the Total Environment**, v. 643, p. 301–311, 2018.

LIM, H. S.; LU, X. X. Sustainable urban stormwater management in the tropics: An evaluation of Singapore's ABC Waters Program. **Journal of Hydrology**, v. 538, p. 842–862, 2016.

LIMA, George Luiz. **Estimativa de Infiltração de água no solo utilizando o modelo de Green Ampt**. Dissertação (Mestrado em Agronomia e Medicina Veterinária) - Universidade Federal Do Mato Grosso, Cuiabá, 2010.

LÖBLER, C. A.; SCCOTI, A. A. V.; WERLANG, M. K. **Contribution to the delineation of Pampa and Atlantic Forest biomes in Santa Maria, RS**. Revista eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, v. 19, n. 2, p. 1250–1257, 2015.

LOPES, T.E.Q.A; TASSI, R.; ALLASIA, D.; PERSCH, C. G. Avaliação de diferentes sistemas construtivos de telhados verdes na retenção pluvial. **XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, p. 1- 9, 2021.

MELLO, Guilherme Bissoli Pereira De ; COSTA, Mário David Pinheiro ; ALBERTI, Maurício Sanches ; FREITAS FILHO, R. D. G. DE. Study on the establishment of a green roof on faculty of mechanical engineering. **Revista Ciências do Ambiente On-Line**, v. 6, n. 2, p. 39–43, 2010.

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.

MUÑOZ-ROBLES, C.; REID, N.; TIGHE, M.; BRIGGS, S. V.; WILSON, B. Soil hydrological and erosional responses in patches and inter-patches in vegetation states in semi-arid Australia. **Geoderma**, v. 160, n. 3–4, p. 524–534, 2011.

O'DRISCOLL, M.; CLINTON, S.; JEFFERSON, A.; MANDA, A.; MCMILLAN, S. Urbanization effects on watershed hydrology and in-stream processes in the southern United States. **Water (Switzerland)**, v. 2, n. 3, p. 605–648, 2010.

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

PERSCH, Cristiano Gabriel. **Efeito de escala em telhados verdes extensivos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.

PESSOA, Jonas. **Qualidade e Quantidade de águas pluviais escoadas a partir de telhados verdes extensivos em Santa Maria – RS**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

PIOVESAN, Tenile Rieger. **Caracterização acústica de dois sistemas modulares de telhados verdes brasileiros**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

RAZZAGHMANESH, M.; BEECHAM, S. The hydrological behaviour of extensive and intensive green roofs in a dry climate. **Science of the Total Environment**, v. 499, n. 1, p. 284–296, 2014.

SCS, 1964. **Estimation of direct runoff from storm rainfall**. In: *National Engineering Handbook*. Section 4 – Hydrology. Chapter 10. Hydraulic Engineer. 30 p.

SHUSTER, W. D.; BONTA, J.; THURSTON, H.; WARNEMUENDE, E.; SMITH, D. R. Impacts of impervious surface on watershed hydrology: A review. **Urban Water Journal**, v. 2, n. 4, p. 263–275, 2005.

SIMMONS, M. T.; GARDINER, B.; WINDHAGER, S.; TINSLEY, J. Green roofs are not created equal: The hydrologic and thermal performance of six different extensive green roofs and reflective and non-reflective roofs in a sub-tropical climate. **Urban Ecosystems**, v. 11, n. 4, p. 339–348, 2008.

STOVIN, V.; POË, S.; DE-VILLE, S.; BERRETTA, C. The influence of substrate and vegetation configuration on green roof hydrological performance. **Ecological Engineering**, v. 85, p. 159–172, 2015.

TASSI, R.; ALLASIA, D.; MELLER, A. Determinação do parâmetro CN para sub-bacias urbanas do arroio dilúvio-Porto Alegre/RS. **I Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste**, p. 1–13, 2006.

TASSI, R.; TASSINARI, L. C. DA S.; PICCILLI, D. G. A.; PERSCH, C. G. Telhado verde: uma alternativa sustentável para a gestão das águas pluviais. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 1, p. 139–154, 2014.

TUCCI, C. E. M.; BELTRAME, L. F. S. Escoamento Superficial. In: TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre, Editora da Universidade, 1993. p. 253-288.

USDA-NRCS. TR-55 - **Urban Hydrology for Small Watersheds**. Technical Release 55. 2° ed. USA: United States Department of Agriculture - Natural Resources Conservation Service, 1986.

VIJAYARAGHAVAN, K. Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 57, p. 740–752, 2016.

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

YANG, J.; YU, Q.; GONG, P. Quantifying air pollution removal by green roofs in

Chicago. **Atmospheric Environment**, v. 42, n. 31, p. 7266–7273, 2008.

ZHANG, Q.; MIAO, L.; WANG, X.; et al. The capacity of greening roof to reduce stormwater runoff and pollution. **Landscape and Urban Planning**, v. 144, p. 142–150, 2015. Elsevier B.V.

ZHU, Z.; CHEN, X. Evaluating the effects of low impact development practices on urban flooding under different rainfall intensities. **Water (Switzerland)**, v. 9, n. 7, 2017.