

Trabalho de Conclusão de Curso

Curso de Graduação em ENGENHARIA AMBIENTAL

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO SUBSTRATO UTILIZADO NA QUALIDADE E QUANTIDADE DAS PARCELAS DE ÁGUA ESCOADA, PERCOLADA E ARMAZENADA EM TRÊS ESTRUTURAS EXPERIMENTAIS DE TELHADO VERDE EXTENSIVO.

Helena Albertino da Silva

Rio Claro (SP)

2014

HELENA ALBERTINO DA SILVA

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO SUBSTRATO
UTILIZADO NA QUALIDADE E QUANTIDADE DAS
PARCELAS DE ÁGUA ESCOADA, PERCOLADA E
ARMAZENADA EM TRÊS ESTRUTURAS
EXPERIMENTAIS DE TELHADO VERDE
EXTENSIVO.**

*Trabalho de Formatura apresentado ao Instituto de
Geociências e Ciências Exatas, Campus de Rio
Claro (SP), da Universidade Estadual Paulista Júlio
de Mesquita Filho, para obtenção do grau de
Engenheira Ambiental.*

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Braga Moruzzi

Rio Claro – SP

2014

HELENA ALBERTINO DA SILVA

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO SUBSTRATO
UTILIZADO NA QUALIDADE E QUANTIDADE DAS
PARCELAS DE ÁGUA ESCOADA, PERCOLADA E
ARMAZENADA EM TRÊS ESTRUTURAS
EXPERIMENTAIS DE TELHADO VERDE
EXTENSIVO.**

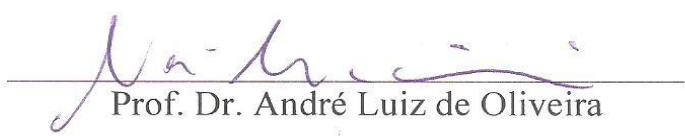
Trabalho de Formatura apresentado ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas -
Câmpus de Rio Claro, da Universidade
Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho,
para obtenção do grau de Engenheiro
Ambiental.

Comissão Examinadora



Prof. Dr. Rodrigo Braga Moruzzi

Prof. Dr. Clauciana Schmidt Bueno de Moraes

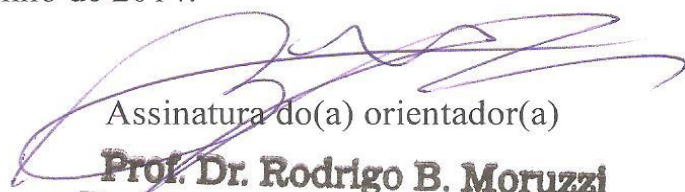


Prof. Dr. André Luiz de Oliveira

Rio Claro, 30 de Junho de 2014.



Assinatura do(a) aluno(a)



Assinatura do(a) orientador(a)

Prof. Dr. Rodrigo B. Moruzzi
Professor do Curso de Graduação
em Engenharia Ambiental

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Força Maior que me sustenta todos os dias de minha vida para que eu não desista de lutar nos obstáculos da vida. Obrigada Deus por tamanha fidelidade, por proporcionar-me amor, vontade, persistência, coragem, gratidão e sabedoria.

Agradeço imensamente aos Meus Pais José Mário e Rosana por todo o suporte e incentivo aos estudos para que fosse possível a minha formação acadêmica, sobretudo todos os ensinamentos de fé, força, luta, persistência e confiança, vocês são os maiores exemplos de vida que eu carrego em todos os momentos. Vocês são minha inspiração e minha fortaleza.

De forma carinhosa agradeço às Minhas Irmãs Ana Carolina e Elizana por tudo que elas representam em minha vida, mesmo de longe nosso laço fraternal é mais forte a cada dia, vocês são as melhores irmãs que alguém poderia ter, e eu tenho, Obrigada por tudo Zana e Carol! Juntas aprendemos a dividir tudo, a persistir nas tentativas, a lutar e vencer desafios.

Aos meus amigos, agradeço por todo esse tempo que passamos juntos durante esses anos de Unesp, sem vocês aqui eu nada seria. Agradeço em especial às amigas, Xoxó, Paty, Nine, Ju, Rê, Isa e Tati, agradeço por cada momento especial que passamos juntas. Amo vocês!

Agradeço às minhas companheiras de república Xoxó, Ana, Dedinho, Chapeuzinho, Sheeva, Dri e Paty. Nossa convivência me fez crescer, espero que em todo este tempo, algo eu tenha passado a vocês, pois eu aprendi muito com vocês. Agradeço pela harmonia e por todos os momentos que passamos juntas. Meu coração será sempre Rep Fervo e da Brisa também. Obrigada por tudo meninas!

Agradeço às Técnicas de Laboratório Carol e Sueli por todos os acompanhamentos nos laboratórios em momentos que eu precisei e tive total auxílio de vocês. Obrigada!

Agradeço imensamente ao meu Orientador Rodrigo Braga Moruzzi pela confiança durante esses anos. Muito obrigada pela oportunidade de aprendizado e participação em atividades de extensão e iniciação científica. Todas elas me fizeram crescer neste ambiente acadêmico que se passa de tudo, e que nós alunos chegamos sem direção, mas que quando queremos temos o privilégio de ser orientados por grandes doutores. Muito Obrigada!

Agradeço ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo auxílio financeiro durante todos os meses de desenvolvimento do projeto.

RESUMO

Avaliou-se o comportamento hidrológico dos telhados verdes com diferentes substratos baseando-se na quantidade e na qualidade das parcelas percoladas, escoadas e armazenadas em três estruturas experimentais de telhado verde com inclinação fixa de 10%. Para montagem dos módulos de telhado verde extensivo (Módulo I, Módulo II e Módulo III) foram utilizados três diferentes substratos comerciais: o Tropstrato HT para o Módulo I, um substrato à base de casca de pinus, turfa, vermiculita expandida. No Módulo II foi utilizado solo comercial, mais conhecido como terra vegetal, que é um substrato com baixo teor de matéria orgânica, porém esterilizado, atóxico, inodoro. Enquanto que, no Módulo III, foi utilizada uma mistura de dois substratos, Vivatto + Terra Vegetal, o Vivatto é um substrato adubado com alto teor de matéria orgânica, basicamente composto de vermiculita, casca de pinus e moinha de carvão. Na sequência, foi realizado o plantio de ramos da planta *Callisias Repens*, mais conhecida como “dinheiro em penca”. O crescimento da vegetação foi acompanhado por meio de registros fotográficos. Foram realizadas 15 ensaios de simulação de chuvas com durações de 5, 10, 20, 30 e 60 minutos. O monitoramento das precipitações simuladas foi realizado por meio de transdutores de pressão “Levellogger”. Foram confeccionados os hidrogramas para a análise do comportamento hidrológico nos três módulos de telhado verde. Os Módulos I e III tiveram rápido crescimento da cobertura vegetal, estando a área superficial do módulo de telhado verde (módulo de TV) totalmente preenchida quando da realização das simulações de chuva, já o Módulo II não obteve crescimento suficiente ao ponto de ter sua área de superfície totalmente coberta, apresentando espaços de solo exposto, o que evidentemente propiciou menor interceptação e menor percolação da água no módulo de TV. Para todas as precipitações investigadas verificou-se que os módulos apresentaram parceladas percoladas (variando de 36 a 80% para o Módulo I e de 40 a 90% para o Módulo III) e armazenada (variando de 20 a 64% para o Módulo I e de 11 a 60% para o Módulo III). Para o Módulo II os resultados foram de 20 a 42% referente ao volume percolado e de 16 a 28% referente ao volume armazenado. Os valores do Coeficiente de Escoamento Superficial (C) variaram de 0,36 a 0,89, a capacidade de armazenamento variou de 8 a 90 mm/m² e o valor de CN variou de 75 a 97. Os valores de pH da parcela percolada foi de 7,1 a 7,5, entrada de pH de 6,4. A cor aparente variou de 190 a 5000 uC (entrada utilizada como referência para branco) e a turbidez 22 a 550 uT (entrada de 1uT).

Palavras-chave: telhado verde, simulação de chuvas, comportamento hidrológico, avaliação qualitativa-quantitativa.

ABSTRACT

It was evaluated the hydrological behavior of green roofs with different substrates based on the quantity and quality of percolated plots, drained and stored in three experimental green roof structures with fixed slope of 10%. For installation of extensive green roof modules were used three different commercial substrates: Module I, a substrate based on pine bark, peat, expanded vermiculite - *HT Tropstrato*; Module II, a substrate based on topsoil – *Terra Vegetal*, which is a substrate with low organic matter content, but sterile, non-toxic and odourless; Module III, a mixture of a substrate based on pine bark, expanded vermiculite and charcoal with the same substrate from the module II. After that, was performed the plantation of *Callisias repens* plants, which had its growth photographed. There were fifteen trials of rainfall simulations with durations of 5, 10, 20, 30 and 60 minutes with an interval of two days for each trial. The control of rainfall simulation was performed by means of pressure transducers *Levelogger*. Hydrographs for the analysis of hydrological behavior were made for the three green roof modules. Modules I and III showed a fast growth vegetation, which had the module surface area fully covered when at the moment of the trials. Module II didn't show enough growth to the point of having a fully covered surface area, with exposed soil areas, which evidently showed lower interception and lower percolation of water in the TV module. For all investigated precipitation was found that the modules had percolated water depth (from 36 to 80% for Module I and 40 to 90% for Module III) and drained water depth (ranging from 20 to 64% for Module I and 11- 60% for the module III). On the other hand, the Module II results from 20 to 42% and 16 - 28% related to volume stored. Values of Runoff Coefficient (C) ranged from 0.36 to 0.89, the storage capacity ranged from 8 to 90 mm / m² and the value of CN ranged 75 - 97. Values of pH plot percolated was 7.1 to 7.5, entry pH 6.4. The apparent color ranged 190-5000 uC (input used as a reference for white) and the turbidity of 22-550 NTU (entry 1UT).

Keywords: green roof, stormwater simulation, hydrological behavior, qualitative and quantitative evaluation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Hidrogramas representativos de entrada e saída.	16
Figura 2 - Ilustração dos antigos Jardins da Babilônia de 500 a.c. Fonte: http://ecobriefing.wordpress.com/2009/06/14/telhado-verde-das-babilnias-aos-dias-atuais/ ..	17
Figura 3 - Telhado verde no Palácio Capanema, Rio de Janeiro. Fonte: http://ambientalistasemrede.org/o-telhado-verde-de-le-corbusier/ ..	18
Figura 4 – Delimitação da área da Unesp de Rio Claro e Deplan.	26
Figura 5 - Detalhe da bomba d'água e tubulação com manômetro e registro.	29
Figura 6 - Mosaico das Etapas I, II, III e IV. Adequação e montagem dos módulos de TV....	30
Figura 7 - Perfil do módulo de TV construído. Modificado de Tassi <i>et al.</i> (2014).....	30
Figura 8 - Simulador de chuva com 8 micro aspersores e 2 Tubos de PVC de $\frac{3}{4}$	31
Figura 9 - Simulador de chuva novo com 9 micro aspersores e 3 Tubos de PVC de $\frac{3}{4}$	31
Figura 10 - Simulador de chuva definitivo com 9 micro aspersores e 3 Tubos de PVC de $\frac{3}{4}$	31
Figura 11 - Micro aspersor tipo M50.	31
Figura 12 - Palitos posicionados equidistantes de 0,225 m (a). Béqueres dispostos em suas respectivas posições (b). Simulação de Chuva para o teste CUC (c).	33
Figura 13 - Transdutor <i>Levellogger</i> e base com cabo de entrada USB para obtenção de dados.	34
Figura 14: Ilustração de recipiente semelhante ao recipiente de coleta utilizado para os ensaios.	38
Figura 15 - Equação Volume em função do nível de água.	39
Figura 16 - Gráfico de Calibração do Recipiente Industrial.	39
Figura 17 - Módulo I, 1º dia.	41
Figura 18 - Módulo II, 1º dia.	41
Figura 19 - Módulo III, 1º dia.	41
Figura 20 - Módulo I, 45º dia.	41
Figura 21 - Módulo II, 45º dia.	41
Figura 22 - Módulo III, 45º dia.	41
Figura 23 - Módulo I, 60º dia.	41
Figura 24 - Módulo II, 60º dia.	41
Figura 25 - Módulo III, 60º dia.	41
Figura 26 - Módulo I, 65º dia.	41
Figura 27 - Módulo II, 65º dia.	41
Figura 28 - Módulo III, 65º dia.	41
Figura 29: Hidrograma Ilustrativo para representar o Tempo de Retardo, Tempo de Pico e a Vazão de Pico.	42
Figura 30 - Hidrogramas para ensaio de 5 minutos e vazão de entrada constante de 5,26 L/min para o Módulo I.	43
Figura 31 - Hidrogramas para ensaio de 5 minutos e vazão de entrada constante de 5,26 L/min para o Módulo II.	43
Figura 32 - Hidrogramas para ensaio de 5 minutos e vazão de entrada constante de 5,26 L/min para o Módulo III.	43
Figura 33 - Hidrogramas para ensaio de 10 minutos e vazão de entrada constante de 5,26 L/min para o Módulo I.	44
Figura 34 - Hidrogramas para ensaio de 10 minutos e vazão de entrada constante de 5,26 L/min para o Módulo II.	44
Figura 35 - Hidrogramas para ensaio de 10 minutos e vazão de entrada constante de 5,26 L/min para o Módulo III.	45

Figura 36 - Hidrogramas para ensaio de 20 minutos e vazão de entrada constante de 5,26 L/min para o Módulo I.	46
Figura 37 - Hidrogramas para ensaio de 20 minutos e vazão de entrada constante de 5,26 L/min para o Módulo II.	46
Figura 38 - Hidrogramas para ensaio de 20 minutos e vazão de entrada constante de 5,26 L/min para o Módulo III.	46
Figura 39 - Hidrogramas para ensaio de 30 minutos e vazão de entrada constante de 5,26 L/min para o Módulo I.	47
Figura 40 - Hidrogramas para ensaio de 30 minutos e vazão de entrada constante de 5,26 L/min para o Módulo II.	47
Figura 41 - Hidrogramas para ensaio de 30 minutos e vazão de entrada constante de 5,26 L/min para o Módulo III.	48
Figura 42 - Hidrogramas para ensaio de 60 minutos e vazão de entrada constante de 5,26 L/min para o Módulo I.	49
Figura 43 - Hidrogramas para ensaio de 60 minutos e vazão de entrada constante de 5,26 L/min para o Módulo II.	49
Figura 44 - Hidrogramas para ensaio de 30 minutos e vazão de entrada constante de 5,26 L/min para o Módulo III.	49
Figura 45 - Números de deflúvio (CN) em função da inclinação. Gráfico modificado de Getter <i>et al.</i> (2007).	53
Figura 46 - Gráfico comparativo entre Lâmina Percolada e Escoadas e Umidade Antecedente.	54
Figura 47 - Gráfico comparativo entre Lâmina Percolada e Escoadas e Umidade Antecedente.	55
Figura 48 - Gráfico comparativo entre Lâmina Percolada e Escoadas e Umidade Antecedente.	55
Figura 49 - Gráfico comparativo entre as Lâminas Escoadas, Armazenadas e Percolada.	56
Figura 50 - Gráfico comparativo das parcelas escoadas, armazenadas e percoladas.	57
Figura 51 - Gráfico comparativo das parcelas escoadas, armazenadas e percoladas.	57
Figura 52 - Gráfico comparativo das parcelas escoadas, armazenadas e percoladas.	57
Figura 53 - Gráfico comparativo das parcelas escoadas, armazenadas e percoladas.	58
Figura 54 - Gráfico comparativo das parcelas escoadas, armazenadas e percoladas.	58
Figura 55 - Gráfico comparativo das lâminas percoladas para os parâmetros cor aparente, turbidez e pH.	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados obtidos no rótulo dos substratos das fornecedoras Technes, Genebom e Vida Verde. * dados fornecidos pelo fabricante.	28
Tabela 2 - Ensaio realizado para calibração do Simulador de Chuva.	37
Tabela 3 - Estimativa do Tempo de Retorno para diferentes durações de chuva.....	37
Tabela 4 - Relação da umidade antecedente com os coeficientes de escoamento, armazenamento de água no substrato e Curva Número (CN).	51
Tabela 5 - Umidade Posterior e Antecedente.	54
Tabela 6 - Resultados compilados de todos os ensaios realizados nos três módulos investigados, bem como os parâmetros calculados com base nas parcelas de águas escoadas, percoladas e armazenadas nos módulos de TV.	61

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	12
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1	O crescimento urbano desordenado e a impermeabilização do solo	14
2.2	Sistema de drenagem	14
2.3	Vazões de Pico e Hidrogramas	15
2.4	Soluções alternativas para minimização dos impactos	16
2.5	Histórico de Telhados Verdes	17
2.6	Tipos de Telhado verde.....	19
2.7	Estrutura de Telhado Verde	19
2.8	Benefícios do Telhado Verde	20
2.8.1	Retenção de águas pluviais: controla o escoamento pluvial.	20
2.8.2	Melhoria na qualidade da água:	21
2.8.3	Isolamento térmico e acústico:	21
2.8.4	Atenuação dos efeitos da ilha de calor:.....	21
2.8.5	Aumento de Áreas Verdes:	22
2.8.6	Criação de habitat:	22
2.8.7	Vida útil da cobertura	22
2.9	Substratos: composição e espessura da camada.	23
3.	OBJETIVOS.....	25
3.1	Objetivo geral:	25
3.2	Objetivos Específicos:	25
4.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	26
4.1	Escolha dos três diferentes substratos.....	27
4.1.1	Módulo I: Sistema de TV com Substrato Tropstrato HT:	27
4.1.2	<i>Módulo II: Sistema de TV com Terra Vegetal:</i>	27
4.1.3	<i>Módulo III: Sistema de TV com Substrato Vivatto + Terra vegetal:</i>	28
4.2	Adequação dos protótipos e plantio de mudas:.....	28
4.3	Adequação do Simulador de chuvas:.....	31
4.3.1	Coefficiente de uniformidade de Christiansen (CUC).....	31
4.3.2	Cálculo da Intensidade de Precipitação, CN (Curva Número) e coeficientes de escoamento superficial C_{exp} e C_{total} , e Vol.....	32
4.4	Ensaio nos módulos de TV e aquisição de dados através do Transdutor de pressão Levelogger.....	33
4.5	Análises das parcelas escoadas, percoladas e armazenadas no telhado verde com diferentes substratos.	35
4.6	Tratamento dos dados.	35
4.6.1	Primeira Etapa:	35
4.6.2	Segunda Etapa:	35
4.6.3	Terceira Etapa:	35
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	36
5.1	Configuração do simulador de chuvas.....	36
5.2	Calibração do Recipiente Industrial:.....	38
5.3	Registro fotográfico do crescimento da cobertura vegetal para cada módulo.	40
5.4	Ensaio nos módulos de TV: Hidrogramas de entrada e saída.	42
5.5	Estimativa dos Coeficientes de escoamento experimentais e Armazenamento de água.	50

5.6	Análise comparativa entre umidade antecedente e lâminas percoladas, armazenadas e escoadas para os Módulos I, II e III.....	53
5.7	Análise comparativa da lâmina precipitada em relação às lâminas escoadas, armazenadas e percoladas.....	56
5.8	Análise das amostras de água: pH, turbidez e cor aparente.....	59
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	62
6.1	Simulador de Chuvas	62
6.2	Intensidade de Precipitação e Tempo de Retorno	62
6.2.1	Desempenho hidrológico	62
6.2.2	Avaliação dos substratos.....	62
7.	CONCLUSÕES.....	64
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65

1. INTRODUÇÃO

O telhado verde pode ser entendido como áreas de superfície verde instaladas em coberturas planas ou inclinadas de grandes edifícios, onde suas estruturas devem ser capazes de suportar uma determinada vegetação sobre o telhado da edificação. Sua instalação é feita sobre uma base impermeável com drenagem adequada, constituído basicamente por um substrato e a cobertura vegetal.

As construções de telhados verdes são denominadas de diversas maneiras, como: coberturas verdes, ecotelhados, telhado jardim, telhado ecológico, telhados vivos, biocoberturas e green roofs. (OHNUMA JÚNIOR, 2008)

A técnica construtiva de telhado verde tem sido de grande aceitação pelos seus inúmeros benefícios, dentre eles, destaca-se a contribuição direta para o controle quantitativo do escoamento superficial através da diminuição dos volumes escoados e a atenuação das vazões de pico que seriam geradas em estruturas impermeabilizadas. E, por sua vez, o telhado verde pode funcionar também como controle qualitativo, na retenção de poluentes do escoamento superficial, poluentes estes provenientes da poeira industrial que se estabelece nos telhados de residências e grandes edificações.

Além disso, segundo afirmam Carter e Butler 2008 o telhado verde tem sido de grande importância para o aproveitamento de água pluvial, atendendo às técnicas compensatórias contra os impactos negativos causados pelo desenvolvimento urbano, e também, melhoria do conforto térmico, acústico e ambiental da edificação, e melhoria da qualidade do ar nos centros urbanos. Segundo a INTERNATIONAL GREEN ROOF ASSOCIATION (2010) há três categorias para classificá-los:

- 1) Extensiva: para telhados com pouca capacidade, baixa manutenção e custos mais baixos;
- 2) Semi-Intensiva: média capacidade, custo médio e periódica manutenção; e
- 3) Intensivo: alta capacidade, alto custo e manutenção, irrigação e adubação regularmente.

A técnica construtiva de telhado verde não é considerada inovação tecnológica, pois na antiguidade já era bastante utilizada pelos povos da antiguidade. Uma grande e famosa construção são os Jardins Suspensos da Babilônia, majestosa estrutura construída pelo Rei Nabucodonosor I para sua esposa Amyitis, datado de 500aC, considerados uma das Sete Maravilhas do Mundo Antigo. (DISCOVERY, 2010).

Na Europa, muitos países utilizam desta técnica como meio de obter isolamento térmico, e em razão de gerar impactos ambientais positivos. A Alemanha iniciou o desenvolvimento desta técnica na década 60. Outra utilização é na França, em que os jardins plantados no século XIII prosperam em cima de uma Abadia beneditina. Na Noruega casas com esse tipo de telhado são usadas como proteção contra invernos extremamente frios. Já nos Estados Unidos, mesmo não sendo muito difundido, o telhado verde vem sendo objeto de grande utilização contra impactos ambientais negativos. (INTERNATIONAL GREEN ROOF ASSOCIATION, 2014).

Na Universidade de Humboldt de Berlim, foi criada uma rede de cooperação entre Alemanha, Brasil, Espanha, Grécia, Bolívia, Cuba, México e Equador voltados para a pesquisa sobre o melhor tipo de vegetação a ser utilizada em cada telhado verde. Através de experimentos práticos, os especialistas dessas universidades trocam informações constantes. (ABREU, 2009).

No Brasil, esse sistema construtivo de telhado verde anda não é muito utilizado, mas teve início pelo arquiteto-paisagista Roberto Burle Marx, que foi convidado para projetar o primeiro telhado verde, o Terraço Jardim do Palácio Gustavo Capanema, no Rio de Janeiro, por volta de 1936. (TOMAZ, 2005)

O uso de soluções alternativas como elemento de drenagem urbana ainda é uma prática bastante restrita. Praticamente não há registros sobre a utilização e monitoramento acerca do uso dessas soluções. No entanto, algumas pesquisas têm sido realizadas demonstrando que a eficiência dessas soluções está condicionada às características locais como tipo de solo, regime de precipitações, topografia, qualidade das águas de drenagem, dentre outros. (SILVA, 2006)

Para a implantação das estruturas é importante considerar parâmetros como a inclinação do telhado e a umidade antecedente, que são fatores decisivos para o desempenho do telhado verde extensivo. (MOURA, 2012)

No caso deste trabalho, adotou-se para os três módulos de telhado verde, a inclinação de 10%, a qual, segundo Moura (2012), mostrou-se mais eficiente, onde para o módulo com inclinação de 10%, houve maiores valores de lâmina armazenada, sendo que a eficiência de um telhado verde baseia-se na lâmina armazenada. Além disso, foram adotadas mudanças para melhoria do sistema. Em sua base foi utilizado manta geotêxtil bedim, como filtro e para manter certa umidade e argila expandida sobre o dreno para facilitar a drenagem da água. Para preenchimentos dos módulos, foram adquiridos três diferentes tipos de substratos, os quais têm características específicas para o adequado estabelecimento das plantas rasteiras.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O crescimento urbano desordenado e a impermeabilização do solo

Por muito tempo, a grande maioria da população mundial concentrou-se nos campos, em áreas rurais, fato que começou a mudar após o advento da revolução industrial. Nas últimas décadas, a tendência de crescimento da população urbana pode ser observada em vários países, levando a expectativa de que até o ano de 2030 cerca de 60% da população mundial esteja morando em áreas urbanas. (URBAN, 2003)

Com processo de urbanização de maneira acelerada e desorganizada, sem uma política adequada de uso e ocupação do solo, aumentam cada vez mais as áreas impermeáveis nas cidades. Essa impermeabilização do solo diminui sua capacidade natural de retenção. Uma das consequências é a ocorrência de enchentes e inundações. No Brasil seu controle quantitativo ainda é a maior preocupação das grandes cidades. Córregos são transformados em coletores de esgoto a céu aberto, que, durante as enchentes provocam doenças tais como leptospirose. Planejar ou gerenciar sistemas de drenagem envolve tipicamente administrar um problema de alocação de espaço (SHEAFFER e WRIGHT, 1982 *apud* CANHOLI, 2005, p.21).

Segundo a Asce (1992), dependendo das condições de ocupação do território, a porcentagem de áreas impermeáveis de uma bacia pode oscilar entre 10% e 100%. Sendo que, para zonas de baixa densidade residencial, por exemplo, compreendem entre 10% e 30%. Já para zonas de densidade residencial elevada, essa porcentagem oscila entre 30% e 60%, e grandes áreas centrais e comerciais possuem áreas impermeáveis que variam entre 80% e 100%.

2.2 Sistema de drenagem

Os sistemas tradicionais de drenagem urbana são constituídos, tipicamente, pela rede de transporte de escoamento. As soluções mais empregadas consistem na construção de galerias e condutos subterrâneos, obras consideradas hidraulicamente eficientes no sentido de transportar rapidamente os excessos de água para jusante. (SILVA, 2006)

Na segunda metade do século XX houve uma aceleração do crescimento urbano com a concentração da população em espaços pequenos. Em consequência disso, todo o ecossistema terrestre e aquático sofreu impactos de grande escala, afetando a própria população devido à ocorrência de inundações, doenças e baixa qualidade de vida. (TUCCI, 2005)

Nessa época, as soluções propostas para o controle das inundações se concentraram na ampliação das canalizações, incluindo a implantação de novas obras e modificações nos cursos d'água naturais, por meio da retificação de trechos de rios ou revestimentos de seus leitos (NASCIMENTO *et al.*, 1997).

As enchentes, nos últimos anos têm se tornado cada vez mais graves e frequentes, acometendo sazonalmente as grandes cidades e demonstrando a fragilidade do sistema de drenagem urbano, com grandes impactos financeiros e psicológicos incidentes sobre a população (BRAGA *et al.*, 2003).

No que se refere à qualidade da água pluvial, a urbanização também provoca impactos negativos, principalmente em virtude do acúmulo de poluentes sobre as superfícies que acabam por serem conduzidos até os corpos d'água durante eventos chuvosos. Nesse contexto, conceitos recentes relacionados ao desenvolvimento de sistemas de drenagem urbana sustentáveis e o uso das chamadas soluções alternativas de drenagem são destacados. (SILVA, 2006).

Hoje, como um novo parâmetro de eficiência da drenagem, diz-se que a melhor drenagem é aquela cujas ações propostas asseguram que o escoamento não produza impacto nem no local nem a jusante. Este novo parâmetro implica na manutenção das condições de pré-desenvolvimento, trabalhando na fonte da geração do desenvolvimento, utilizando, para isto, procedimentos que viabilizem o acréscimo da infiltração e o aumento do retardo do escoamento (ARAUJO, *et al.*, 2005 *apud* ANDRADE FILHO, BRONDANI, 2005, p.02).

2.3 Vazões de Pico e Hidrogramas

Quando a situação natural das paisagens vai sendo substituída por condicionantes impermeáveis, reduz-se assim a capacidade de infiltração no solo, aumenta-se o escoamento superficial e a água escoada para o sistema de drenagem atinge um pico elevado. (TUCCI, 1993)

Segundo Roesner *et al.*(2001) vazões de pico após o processo de ocupação aumentam de duas a mais de dez vezes com relação à vazão para a situação não urbanizada. Os autores informam que, na área metropolitana de Denver, Estados Unidos, os aumentos registrados na vazões máximas variaram de duas vezes, para um tempo de retorno de cem anos, a 57 vezes para um tempo de retorno de dois anos. A Figura 1 representa os hidrogramas de uma área urbanizada e não urbanizada.

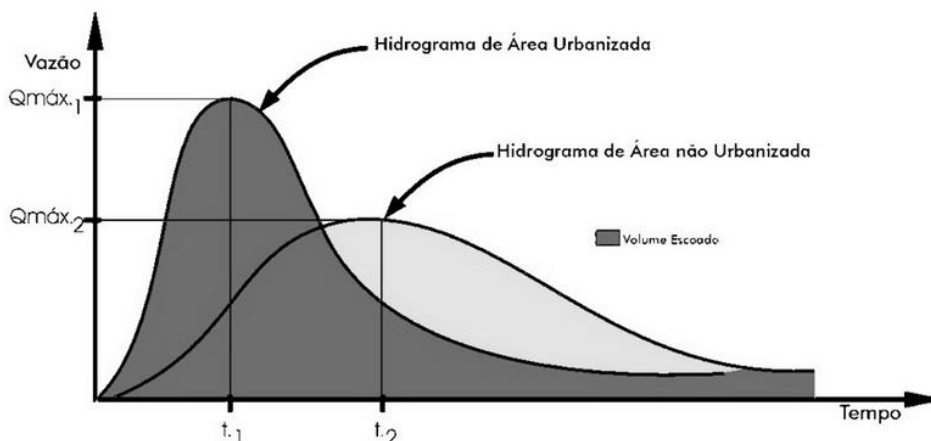


Figura 1 - Hidrogramas representativos de entrada e saída.

Onde $Q_{máx,1}$ representa a vazão de pico para a área urbanizada no tempo t_1 . O hidrograma da área não urbanizada representa $Q_{máx,2}$ como a vazão de pico, a qual é menor que $Q_{máx,1}$. A área em cinza demonstra o volume de água do escoamento superficial. Fazendo uma analogia com o comportamento hidrológico do telhado verde, essa ilustração pode ser entendida como os hidrogramas de entrada e saída para um telhado verde, onde o hidrograma em cinza escuro é a entrada de intensidade de precipitação não constante. Enquanto que, o hidrograma em cinza claro represente a saída, demonstrando a atenuação da onda de cheia, e um leve retardo do escoamento superficial.

2.4 Soluções alternativas para minimização dos impactos

Durante muito tempo, tentou-se solucionar o problema da drenagem urbana aumentando a velocidade dos escoamentos com obras de canalização. Isso transferiu para jusante o problema de redução de espaços naturais, ou seja, a várzea utilizada pelo rio ou córrego nas cheias, que fora suprimida pela urbanização, foi requerida a jusante.

Diante deste cenário, alternativas vem sendo desenvolvidas a fim de minimizar os impactos ambientais decorrentes do processo de urbanização. Algumas técnicas inovadoras, como estacionamentos permeáveis, estão sendo adotadas. Essas visam à atenuação das vazões de pico, ajudam no controle de enchente, além de promoverem a redução de concentração de poluentes nas áreas urbanas (ANDRADE FILHO, BRONDANI, 2005).

A ideologia do Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto (Low Impact Development) vem sendo uma das propostas com grande credibilidade no mercado atual. Este conceito constitui-se no princípio da gestão das águas pluviais com controle de escoamento na

fonte, com medidas estratégicas para controlar a evaporação, infiltração, transpiração, armazenagem e utilização de águas pluviais (PRINCE GEORGES COUNTY, 1999)

Dentre as alternativas propostas pela LID - *Low Impact Development*, segue alguns exemplos: telhados verdes, trincheiras de infiltração, pavimentos permeáveis e reservatórios de aproveitamento de água da chuva. Tais estruturas transformam superfícies impermeáveis de áreas urbanas em coberturas multifuncionais, retendo as águas pluviais, criando habitat, e promovendo melhorias das condições climáticas e da poluição do ar (CARTER e BUTLER, 2008).

2.5 Histórico de Telhados Verdes

O telhado verde é uma importante técnica construtiva como sistema de drenagem urbana alternativa difundida desde a Antiguidade. Os Jardins Suspensos da Babilônia, construídos cerca de 500 a.c. sobre vigas de pedras arqueadas e impermeabilizadas com espessas camadas de junco e piche eram localizados no lado leste do rio Eufrates entre as margens do rio e os palácios reais (Figura 2). São uma das sete maravilhas tendo um importante vestígio como um poço fora dos padrões que imagina-se ter sido usado para bombear água. (DISCOVERY, 2010)



Figura 2 - Ilustração dos antigos Jardins da Babilônia de 500 a.c. Fonte: <http://ecobriefing.wordpress.com/2009/06/14/telhado-verde-das-babilnias-aos-dias-atuais/>

Os telhados verdes foram amplamente difundidos, no Império Romano onde árvores eram cultivadas na cobertura de edifícios; no período renascentista na Itália, pré-colombiano no México, na Índia entre os séculos XVI e XVII e em algumas cidades da Espanha, na França a partir do século XVIII e na Escandinávia no início do século XIX (ARAÚJO, 2007).

O grande número de construções com coberturas verdes, pelos povos da antiguidade, se deve ao seu ótimo desempenho térmico proporcionado, em função da camada combinada

entre solo e vegetação, que em ambientes de climas quentes, impedem a passagem de calor para dentro das edificações e em climas frios retêm por mais tempo o calor dentro das edificações (OSMUNDSON, 1999).

Na década de 20, o conceito de telhado verde foi criado por *Le Corbusier* com a intenção de recuperar o espaço ocupado pela construção de cobertura do edifício (PORTOLANO, 2007).

Nos anos 50, a Alemanha foi pioneira em pesquisas científicas sobre o tema que tinha como objetivo a conservação das águas e energia através desse sistema construtivo. Com investimento do governo nesse setor, muitas técnicas de construção foram desenvolvidas e nos anos 70 materiais foram introduzidos nesse sistema como materiais drenantes, membranas impermeabilizantes, agentes anti raízes, entre outros. Nos anos 80, houve aumento nas construções de 15 a 20%, totalizando dez milhões de metros quadrados de telhados verdes na Alemanha em 1996; crescimento possível por leis de subsídio municipais, estaduais e federais (PECK, 1999 apud ARAÚJO, 2007).

Os telhados verdes também estão se tornando cada vez mais popular nos Estados Unidos, embora eles não sejam tão comuns quanto na Europa. No Brasil o Telhado verde teve como grande defensor o paisagista Burle Marx, com obras de inegável qualidade e reconhecimento mundial, embora Marx não tivesse a oportunidade de trabalhar com muitos telhados verdes ao longo da sua carreira, destacam-se os executados sobre a sala de exposições do Ministério de Educação e Saúde, atual Ministério de Educação e Cultura (TOMAZ, 2005). Na Figura 3 é possível observar o telhado verde projetado pelo arquiteto Burle Marx.

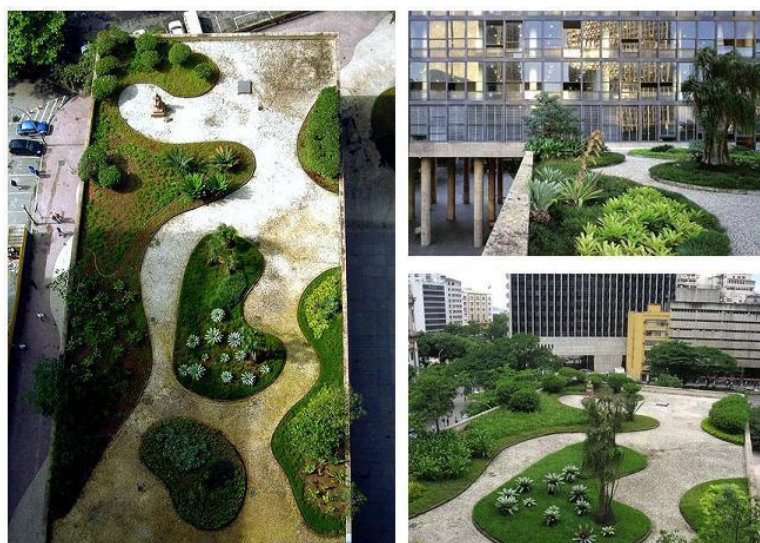


Figura 3 - Telhado verde no Palácio Capanema, Rio de Janeiro. Fonte: <http://ambientalistasemrede.org/o-telhado-verde-de-le-corbusier/>

2.6 Tipos de Telhado verde

Considerando a classificação dos tipos de telhado verde segundo a INTERNATIONAL GREEN ROOF ASSOCIATION (2010):

- 1) Extensivo - Utilizados em telhados com pouca capacidade de carga. São menos caros que os Intensivos, uma vez que são mais leves ($60 - 150 \text{ Kg/m}^2$) e exigem menos apoio estrutural e não precisam de manutenção frequente. A camada de substrato não é muito profunda.
- 2) Semi - Intensivo - Em comparação com o tipo extensivo, possui custos mais elevados, é mais pesado ($120 - 200 \text{ Kg/m}^2$) e possui um substrato mais profundo. Permitindo o cultivo de várias gramíneas, pequenos arbustos e plantas herbáceas.
- 3) Intensivo – Suporta uma variedade de projetos paisagísticos, são acessíveis e utilizados como espaço de lazer; com passarelas, bancos, parques ou lagoas podem ser características adicionais sobre o telhado. Demandando um alto custo de manutenção a irrigação e a adubação deve ser constante, além de um peso elevado, $180 - 500 \text{ Kg/m}^2$. Gramados, plantas perenes, arbustos e árvores são indicados para este tipo de telhado.

2.7 Estrutura de Telhado Verde

Especificamente no caso de telhados verdes, objeto deste estudo, a estrutura é geralmente composta de materiais especiais, os quais formam várias camadas, com diferentes finalidades (CASTRO e GOLDENFUM, 2010). Normalmente eles possuem uma camada de vegetação, uma de substrato, e uma de drenagem (MENTENS *et al.*, 2006; EMILSSON, 2008). Além dessas camadas, também pode haver uma camada de filtragem (TAYLOR, 2008) e uma membrana impermeável (LAZZARIN *et al.*, 2005).

De acordo com Mentens *et al.* (2003), cada uma dessas camadas possui uma função específica:

- a) Vegetação: maior potencial de retenção de água no substrato, ainda com funções de evapotranspiração e interceptação;

- b) Substrato: fornece água e nutrientes para a vegetação. É onde, durante a chuva, a água pode ser temporariamente armazenada;
- c) Filtragem: previne que partículas finas do substrato sejam transportadas para a drenagem, a qual perderia a sua eficiência;
- d) Drenagem: é necessária em telhados com pouca declividade para que não aconteçam encharcamentos e estresse da cultura;
- e) Impermeabilização: formada de uma membrana impermeável que evita o contato direto da água com a estrutura do telhado.

2.8 Benefícios do Telhado Verde

2.8.1 Retenção de águas pluviais: controla o escoamento pluvial.

No que se refere aos grandes centros urbanos, a retenção de água da chuva é uma das maiores vantagens dos telhados verdes, visto que ele pode funcionar como sistema de drenagem pluvial controlando o escoamento da água da chuva.

Segundo Tassi *et al.* (2014), telhados verdes intensivo é a melhor alternativa para o controle do escoamento pluvial. No entanto, esta prática não é adotada na maioria dos casos, devido à sobrecarga exercida no telhado. Além disso, telhados verdes intensivos não podem ser empregados em telhados inclinados e requerem uma maior manutenção comparada a jardins.

Robertson *et al.* (2005) estimou que a redução do escoamento superficial, com a utilização do telhado verde, varia entre 40% e 80%, em situações extremas de chuva e em condições normais, respectivamente. Teemusk e Mander (2007) investigaram valores que variam entre 70 - 90 % de retenção de águas pluviais no verão, e entre 25-40% no inverno, fatores relacionados diretamente com a taxa de evapotranspiração.

Segundo a *International Green Roof Association* dependendo do sistema de telhado verde implantado e da profundidade do substrato, o escoamento pode ser reduzido entre 50 e 90%.

Na Alemanha, grandes empreendimentos com taxa zero de descarga, que dependem fortemente de telhados verdes, estão operando. Por exemplo, o centro de Bondorf em Sindelfingen, atinge zero de *run-off*, através da utilização de uma área de 11,8 hectares de telhado verde (*WHOLE BUILD DESIGN GUIDE*, 2010)

2.8.2 Melhoria na qualidade da água:

O telhado verde reduz a contaminação na água quando atuado como dispositivo de filtração. Em áreas urbanas até 30% do nitrogênio e do fósforo total descarregados em corpos d'água são derivados de poeira que se acumula sobre os telhados. (*WHOLE BUILDING DESIGN GUIDE*)

Em Potsdamer Platz, distrito de Berlim, telhados verdes extensivos, tem sido empregados em larga escala num esforço para reduzir a poluição no rio Spree. Este programa demonstrou que telhados verdes extensivos podem alcançar grandes reduções na emissão de nutrientes (*WHOLE BUILD DESIGN GUIDE*, 2010).

2.8.3 Isolamento térmico e acústico:

Segundo Spangenberg (2004), o telhado verde é eficiente na redução da temperatura das coberturas em 15° C, dando aos moradores das edificações conforto térmico com consequente diminuição do uso do ar condicionado e redução do consumo de energia. Assim, a utilização em larga escala dos telhados verdes poderia reduzir 1°C ou 2°C a temperatura nas grandes cidades.

No que se refere a isolamento acústico, um telhado verde com 12 cm de substrato pode reduzir o som de 40 decibéis, enquanto que um de 20 cm pode reduzir um som entre 40 e 50 decibéis (*GREEN ROOFS FOR HEALTH CITIES*, 2009).

2.8.4 Atenuação dos efeitos da ilha de calor:

Através do orvalho e do ciclo de evapotranspiração, plantas em superfícies horizontais e verticais são capazes de esfriar cidades quentes durante os meses de verão. No processo de evapotranspiração, plantas usam energia do calor a sua volta (aproximadamente 592 Kcal por litro de água). Um metro quadrado de folhagem pode evaporar acima de 0,5 litros de água em um dia quente. Esse processo diminui os efeitos da Ilha de Calor no verão (*GREEN ROOFS FOR HEALTH CITIES*, 2009).

Em virtude das várias funções da vegetação, os telhados verdes desempenham um papel importante no estabelecimento de microclimas e na atenuação do efeito urbano

chamado de “ilhas de calor”, contribuindo para a redução dos níveis de dióxido de carbono (CO₂) produzidos pelos veículos, indústrias e sistemas mecânicos. Acelerando positivamente a expansão das áreas verdes que se contribui para o bem estar do ser humano, tendo em vista um modelo de urbanização que prioriza e sobrecarrega a cidade e despoeva o campo (NIACHOU, 2001).

2.8.5 *Aumento de Áreas Verdes:*

O telhado verde se torna uma solução eficiente para o aumento das áreas verdes havendo a possibilidade de criar jardins onde antes, não havia espaço. A cadeia da construção civil apresentou nos últimos quatro anos, um expressivo crescimento, sendo que em 2007, representou 8,5% do PIB brasileiro, contribuindo com R\$ 187 bilhões em 2007 (FGV, 2006). Comparando com o crescimento do país, de 3,7% entre 2005 a 2006 e 5,4% entre 2006 a 2007, a cadeia da construção registrou números mais expressivos: 4,6%%, 7,9% e 10,2% respectivamente entre 2006 a 2009 (IBGE, 2008 *apud* RANK, 2009).

2.8.6 *Criação de habitat:*

A destruição da paisagem pelas atividades humanas tem vários efeitos negativos sobre o ecossistema e o habitat. Telhados verdes podem compensar a perda de árvores criando refúgios para a flora e a fauna dentro de centros urbanos. Telhados Verdes em especial, promovem a biodiversidade de abelhas selvagens, borboletas e besouros, ali encontram abrigo e comida (PORTOLANO, 2007).

2.8.7 *Vida útil da cobertura*

Segundo Givoni (1976) *apud* Araújo (2007), a cobertura é o principal elemento de exposição ao processo de trocas térmicas entre o interior e o exterior da construção. São submetidos aos efeitos do clima, que com a radiação solar, as perdas de calor à noite e as chuvas sofrem mais do que qualquer outra parte da edificação.

Materiais usados na construção civil armazenam radiação solar e reemitem essa radiação na forma de calor, tornando as cidades até 17° C mais quentes. O acúmulo desse calor durante o dia devido às propriedades de absorção dos materiais utilizados na construção comprometem a

durabilidade e desgaste dos mesmos reduzindo consequentemente a vida útil da edificação (PIERGILI, 2007).

Segundo Heneine (2008), a exposição ao sol pode acelerar o envelhecimento de materiais betuminosos e a radiação solar muda a composição química e consequente degradação das propriedades mecânicas desses materiais.

Segundo Abreu (2009) os telhados verdes reduzem os efeitos extremos de temperatura e os efeitos do vento, uma vez que nesses telhados a temperatura não passa de 25° C contra 60° C dos telhados convencionais.

2.9 Substratos: composição e espessura da camada.

O substrato é o componente essencial para um bom desempenho do telhado verde quanto ao crescimento da herbácea e capacidade de retenção da água.

O substrato utilizado e a cobertura vegetal atuam sobre o controle do escoamento pluvial superficial, através dos processos de interceptação, armazenamento de água no solo e evapotranspiração (YANG; YU; GONG, 2008).

Existem vários elementos que podem ser utilizados na composição do substrato como casca de arroz carbonizada, turfa, vermiculita, composto orgânico, esterco bovino, moinha de carvão, material de subsolo, bagaço de cana, acícula de pinus, areia lavada, além disso misturas desses materiais. (DUTRA, 2010)

Segundo Lopes (1989) a matéria orgânica é uma fonte de nutrientes, a qual aumenta a capacidade de retenção de água e melhora a estrutura do solo quanto a porosidade.

No que se refere às características da vermiculita expandida, ela é um importante elemento na produção e plantio de mudas, em horticultura e jardinagem, estimulando a germinação de sementes. Em composições com turfas, cascas de pinus e fertilizantes promove o rápido crescimento das raízes das plantas, além de reter ar e umidade. (CETEM, 2005)

Para melhorar a retenção de água na estrutura do substrato, devem ser acrescentados materiais orgânicos como turfa, materiais inorgânicos como perlita ou vermiculita. (JOHNSTON, 1996)

Além disso, a vermiculita torna os solos mais soltos, porosos e arejados, de forma a proporcionar um melhor desenvolvimento nas raízes das plantas. Sendo um retentor de umidade (POTTER, 2001).

Já no caso da moinha de carvão, ela é um subproduto de atividades industriais, acumuladas em pátios de fábrica, sendo esta importante alternativa para substrato vegetal. A

utilização da moinha de carvão foi encontrada em muitas composições de substratos pesquisados, conforme muitos autores afirmam a sua eficiência em substratos.

Segundo Wending e Paiva (2002), a moinha de carvão pode ser utilizada em substratos para aumentar a porosidade, proporcionando bom crescimento dos sistema radicular da planta e boa agregação ao substrato.

Outro ponto importante quanto aos substratos é a espessura da camada, a qual pode beneficiar a retenção de água pluvial no telhado verde, pois o substrato armazena água. Além disso, os processos de evapotranspiração promovem o esvaziamento dele, aumentando a eficiência do telhado no armazenamento do escoamento pluvial. (TASSI *et al.*, 2014)

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral:

Avaliar, qualitativa e quantitativamente, a água escoada, percoladas e armazenadas após passagem nas estruturas experimentais de telhado verde extensivo com diferentes substratos.

3.2 Objetivos Específicos:

- Adequar as estruturas dos módulos de telhado verde com os três diferentes substratos comerciais: *Tropstrato HT*, *Terra Vegetal* e *Vivatto+Terra Vegetal*.
- Realizar testes para calibração do simulador de chuva de acordo com o arranjo dos tubos de PVC e dos micro aspersores.
- Calibrar o recipiente de coleta de água através do transdutor de pressão *Levellogger Júnior* da *AGSOLVE*.
- Acompanhar o crescimento da vegetação de *Callisias Repens* através de registros fotográficos.
- Realizar 15 ensaios de simulação de chuva com tempos durações (d) de 5, 10, 20, 30 e 60 minutos e confeccionar os hidrogramas resultantes para cada módulo de telhado verde.
- Comparar os resultados obtidos com as afirmações de Moura (2012) com base no telhado de inclinação de 10% analisando quais foram as principais influências na utilização de diferentes substratos para o comportamento hidrológico do solo.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A estruturas experimentais dos módulos de telhado verde já se encontravam instaladas na área externa do DEPLAN – Departamento de Planejamento Territorial e Geoprocessamento, as quais já tinham sido utilizadas em uma pesquisas anteriores como a de Moura (2012). Na Figura 5 está a delimitação da área do Campus da Unesp de Rio Claro, onde, a área circular em verde representas a área do Deplan, local onde está localizado o experimento de telhado verde, representado pelo ponto em cor vermelha na figura, com coordenadas geográficas 22°23'31.99"S e 47°32'42.82"O.



Figura 4 – Delimitação da área da Unesp de Rio Claro e Deplan.
Fonte: Imagem obtida através do Google Earth.

Neste caso, as estruturas experimentais foram adaptadas de acordo com a finalidade específica da pesquisa, a qual adotou a inclinação de 10% para todos os módulos de telhado verde. Foi realizada a montagem dos protótipos, e por fim realizadas as simulações de chuva e os ensaios em laboratório.

De um modo geral, o estudo baseou-se em ensaios de simulação de chuvas, coleta das parcelas de água escoadas e infiltradas, análises das amostras de água e teste de umidade dos substrato nas situações de pré e pós-precipitações simuladas de chuva.

A metodologia pode ser entendida em cinco etapas principais:

- 1) Escolha dos três diferentes substratos;
- 2) Adequação e montagem dos módulos de telhado verde;
- 3) Adequação do Simulador de chuva;
- 4) Ensaios nos módulos de telhado verde (módulos de TV) e Aquisição de dados através do Transdutor de pressão *Levellogger*.
- 5) Análises das parcelas escoadas, percoladas e armazenadas no telhado verde com diferentes substratos;
- 6) Tratamento dos dados;

4.1 Escolha dos três diferentes substratos

Foram escolhidos três diferentes substratos comerciais baseando-se inicialmente em seu teor de matéria orgânica, vermiculita, turfa e moinha de carvão, os quais são importantes elementos que podem compor substratos.

4.1.1 Módulo I: Sistema de TV com Substrato Tropstrato HT:

O substrato Tropstrato HT é à base de casca de pinus, turfa, vermiculita, macro e micronutrientes com baixa taxa de degradação. Sendo este isento de micro organismos patogênicos e inodoro. O propósito da utilização desse produto no estudo é ter um parâmetro de referência ideal e considerar as alternativas que possam ser desenvolvidas a partir dos resultados obtidos nas análises das parcelas de água escoada e percolada no telhado verde.

4.1.2 Módulo II: Sistema de TV com Terra Vegetal:

A Terra Vegetal é um solo comercial encontrado em lojas comuns de paisagismo. Esse solo tem a característica de ser esterilizado, atóxico e inodoro. Alguns rótulos dizem que o solo comercial tem a capacidade de aumentar a durabilidade e resistência das plantas a doenças e fatores climáticos, melhorar a aeração e drenagem do solo. Esse substrato foi considerado na pesquisa por ser relativamente barato e acessível a pessoas que queiram construir de maneira fácil e barata, um sistema de telhado verde extensivo em sua residência.

4.1.3 Módulo III: Sistema de TV com Substrato Vivatto + Terra vegetal:

Para o módulo III de TV foi implantada a mistura do Substrato Vivatto + Terra Vegetal. O Substrato Vivatto é um produto formulado com casca de pinus bio-estabilizada, vermiculita, moinho de carvão vegetal, água e espuma fenólica, estes promovem maior retenção de nutrientes o que minimiza a ocorrência de deficiências nutricionais das mudas.

Na Tabela 1 é possível observar dados das especificações técnicas dos substratos.

Substrato Investigado	Módulo	pH	CE (Condutividade Elétrica)	Densidade (Kg/m³)	Umidade (%)	Granulometria (mm)*
TROPSTRATO HT	I	5,8	0,2 - 0,8	0,49	60	< 6
TERRA VEGETAL	II	6,0	1,7	0,93	50	--
VIVATTO + TERRA VEGETAL	III	5,6 – 6,0	0,9 – 1,7	0,60	-	(mistura 1:1 V/V)
VIVATTO	-	5,6	0,9 - 1,5	0,26	48	6%> 4mm 94%< 4mm 74%< 2mm 38%< 1mm

Tabela 1 - Dados obtidos no rótulo dos substratos das fornecedoras Technes, Genebom e Vida Verde. * dados fornecidos pelo fabricante.

4.2 Adequação dos protótipos e plantio de mudas:

As estruturas experimentais, as quais foram utilizadas por Moura (2012), consistem em três bandejas com dimensões de 1,10m x 0,90m x 0,18m. Tais bandejas são advindas de três caixas d'água de 1000L de volume, as quais foram cortadas a 18 cm a partir da base. As bandejas foram furadas para a passagem de um dreno, constituído por um tubo de PVC perfurado, para que a água percolada fosse drenada e coletada. A 170 mm da base da bandeja foi instalada a calha de Gürlach, que tem como finalidade a captação do escoamento superficial direto (ESD). As três bandejas foram cobertas com telhas translúcidas de 2,44 m de comprimento, 1,1 m de largura.

A irrigação dos módulos de TV foi realizada através do simulador de chuvas que está ligado a uma torneira próxima ao local do projeto. A fim de melhorar a pesquisa, foi

implantada uma bomba d'água com o objetivo de pressurizar a água da torneira. Desta forma, a mangueira que sai da torneira foi ligada na entrada da bomba, e outra mangueira, na saída da bomba, está conectada no simulador. Na tubulação que sai da bomba, foi instalado um manômetro para que fosse averiguada a pressão de saída, e foi instalado um registro de pressão para que esta fosse controlada de acordo com a intensidade de precipitação desejada. (Figura 6).



Figura 5 - Detalhe da bomba d'água e tubulação com manômetro e registro.

I - A extremidade da bandeja foi preenchida com argila expandida, também conhecida como cinasita, a fim de servir como uma camada suporte do solo, evitando seu carreamento e facilitando a drenagem da água.

II - Acima da camada drenante (cinasita) foi adicionada uma camada filtrante, constituída por uma manta geotêxtil (bidim), porosa e permeável. A função dessa camada é promover a filtração da água percolada pelo telhado verde, a fim de que não seja carregada uma grande quantidade de partículas do substrato utilizado. Essa camada pode representar um grande auxílio na análise da qualidade da água percolada em um telhado verde, permitindo inclusive que o sistema de telhado verde possa integrar um sistema de aproveitamento de águas pluviais, posteriormente. Sobre a camada filtrante, foi colocada uma camada de substrato de 130mm de espessura.

III - Sobre a camada filtrante foi colocada a camada de substrato de 130 mm de espessura. Sendo, previamente escolhido, um substrato diferente para cada módulo, de acordo com suas características apresentadas acima na Tabela 1.

IV - Foi realizado o replantio de ramos de *Callisias Repens* (“dinheiro em penca”) advindo de um vaso desta planta. Foram plantados 20 conjuntos de ramos, que continham 4 ramos, totalizando 80 ramos plantados em cada módulo de TV. Na figura 7 é possível observar as etapas para adequação e montagem dos módulos de TV. Na figura tem-se como ficou o perfil de cada módulo de TV.



Figura 6 - Mosaico das Etapas I, II, III e IV. Adequação e montagem dos módulos de TV.

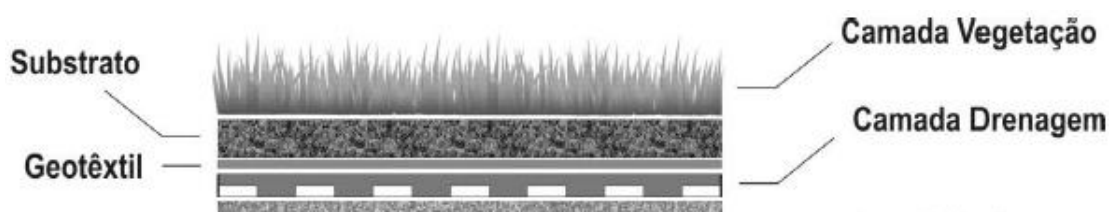


Figura 7 - Perfil do módulo de TV construído. Modificado de Tassi *et al.* (2014).

4.3 Adequação do Simulador de chuvas:

O simulador de chuva (Figura 9) utilizado por Moura (2012) foi substituído por outro simulador a fim de melhorar os resultados de distribuição de chuva.

Para tal, foi confeccionado um novo simulador de chuva com três tubos de PVC, cada um com 3 micro aspersores do tipo M50 equidistantes de 0,35 m, e os tubos de PVC com distância de 0,30 m um do outro (Figura 10).

Este novo simulador definitivo pode ser entendido como uma área retangular de 0,70 m x 0,70 m constituído de 9 micro aspersores (Figuras 11 e 12).

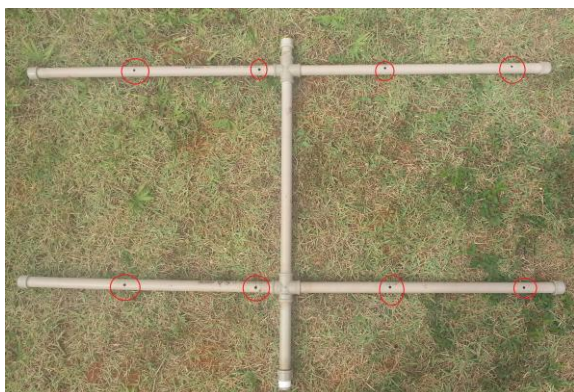


Figura 8 - Simulador de chuva com 8 micro aspersores e 2 Tubos de PVC de $\frac{3}{4}$.



Figura 9 - Simulador de chuva novo com 9 micro aspersores e 3 Tubos de PVC de $\frac{3}{4}$.



Figura 10 - Simulador de chuva definitivo com 9 micro aspersores e 3 Tubos de PVC de $\frac{3}{4}$.



Figura 11 - Micro aspersor tipo M50.

4.3.1 Coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC)

Para realização do teste CUC (Coeficiente de Uniformidade de Christiansen) foram utilizados 20 béqueres, com altura de 120 mm, diâmetro de 60 mm e capacidade de 300 ml, posicionados equidistantes de 0,225 m, para que a água da precipitação fosse captada, e ao final de cada precipitação foram anotados todos os valores de volume de cada béquer.

Foram realizados onze ensaios para o teste CUC (Coeficiente de Uniformidade de Christiansen) com o intuito de obter a melhor distribuição de chuvas no módulo de TV.

Abaixo é apresentado a equação (1), a qual é utilizada para obter os valores de CUC.

$$CUC(\%) = 100 \cdot \left(1 - \frac{S_x}{\bar{X}}\right) \quad (1)$$

Onde, $\bar{X}$ e S_x representam a média e o desvio padrão dos volumes precipitados em todos os béqueres posicionados no módulo de TV para realização do teste.

4.3.2 Cálculo da Intensidade de Precipitação, CN (Curva Número) e coeficientes de escoamento superficial C_{exp} e C_{total} , e Vol.

Considerando o tempo (t) de duração de cada ensaio de 10 minutos. Com a área do béquer (A_b) e o volume precipitado (V_b) em cada béquer conhecidos, foi possível calcular a intensidade de entrada para cada ensaio. Assim, a intensidade I pode ser calculada de acordo com a equação (2).

$$I = \sum_{i=1}^n \frac{V_{b_i}}{A_{b_i} \cdot t} \quad (2)$$

Onde: V_{b_i} é o volume do béquer, A_{b_i} é a área do béquer e t é o tempo de duração da precipitação.

Para o cálculo do período de retorno (T) utilizou-se a equação (3), obtida por Moruzzi e Oliveira (2009), para a cidade de Rio Claro:

$$I = \frac{560,9 \cdot T^{0,141}}{(7,4 + d)^{0,65}} \quad (3)$$

Onde, I é a intensidade de chuva (mm/h), T é o período de retorno (anos) e d é a duração de chuvas (minutos).

Os volumes foram determinados conforme a Equação 4 e sua respectiva forma discretizada para intervalo (Δt) de 10 segundos.

Com o intuito de avaliar a interceptação nos módulos de TV, foram estimados os valores médios de CN (Curva Número), pelo método da SCS (Soil Conservation Service).

O valor do número de deflúvio (CN) foi estimado pela Equação 6 e o valor do coeficiente de escoamento superficial foi estimado para situações distintas, conforme Equações 7 e 8.

$$Vol. = \int_0^d Q(t) dt \quad (4)$$

$$Vol. = \sum_{d=0}^n Q_n \cdot \Delta t \quad (5)$$

$$CN = \frac{25400}{(254 + S)} \quad (6)$$

$$C_{exp.} = \frac{\sum Vol. escoado}{Vol. precipitado} \quad (7)$$

$$C_{total} = \frac{\sum Vol. saída}{Vol. precipitado} \quad (8)$$

Em que: d é a duração do evento em minutos; $Q(t)$ é a vazão em função do tempo; Q_n é a média no intervalo discretizado (Δt); S é a capacidade de armazenamento do solo (mm); $C_{exp.}$ é o valor do coeficiente de escoamento superficial considerando somente a parcela escoada; C_{total} é o valor do coeficiente de escoamento superficial considerando a somatória das parcelas escoadas e percoladas, denominadas *Vol.saída* (Figura 13).

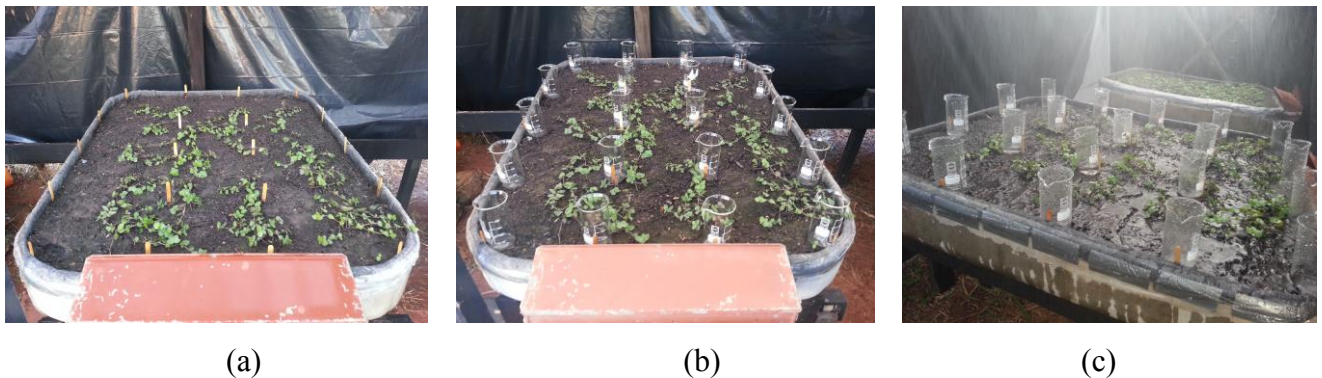


Figura 12 - Palitos posicionados equidistantes de 0,225 m (a). Béqueres dispostos em suas respectivas posições (b). Simulação de Chuva para o teste CUC (c).

4.4 Ensaios nos módulos de TV e aquisição de dados através do Transdutor de pressão Levellogger.

Os ensaios nos módulos de TV foram realizados nos meses de Maio e Junho, sendo realizados a cada 2 dias. No total foram realizados nove ensaios com durações de 5, 10, 20, 30 e 60 minutos.

Durante cada ensaio foi adotado o seguinte procedimento:

- 1) Cobrir o local com a lona plástica no entorno dos módulos, etapa imprescindível para diminuir a interferência do vento durante os ensaios.
- 2) Posicionar os recipientes industriais nas tubulações de saídas do dreno de infiltração e da calha *Gürlach* de escoamento superficial. Lembrando que, o recipiente já equipado com o transdutor de pressão acoplado ao seu fundo.
- 3) Verificar a umidade de cada módulo através do ensaio em laboratório.
- 4) Ligar a torneira e logo após ligar a bomba na energia elétrica, através do fio de extensão próprio para alcançar as tomadas do “hall” de entrada do Deplan.
- 5) Observar o tempo de retardo, o qual é o período de tempo desde o início do ensaio até o momento quando se inicia a saída de água proveniente da infiltração e do escoamento superficial direto.
- 6) Ao final de cada ensaio, observar e anotar na planilha os volumes de água nos recipientes proveniente do escoamento e da infiltração.

Com base no Manual do transdutor de pressão *Levellogger*, é recomendado que a instalação seja feita na posição vertical, detectando exatamente a pressão abaixo da linha do transdutor. Desta forma, cada transdutor foi posicionado verticalmente nos recipientes industriais de captação da água de infiltração e água escoada. Após o ensaio os transdutores são retirados do recipiente, e levados a sua base para aquisição de dados.

O *Levellogger* Junior utiliza transdutor de pressão de silício piezorresistivo de alta qualidade encapsulado em abrigo de aço inoxidável 316L. Ele fornece uma alta acurácia e estabilidade. O corpo do *Levellogger* é revestido com Nitrato de Zircônio (ZrN) para fornecer resistência contra corrosão. (MANUAL *LEVELLOGGER* 3.4.0) – Figura 14.



Figura 13 - Transdutor *Levellogger* e base com cabo de entrada USB para obtenção de dados.

4.5 Análises das parcelas escoadas, percoladas e armazenadas no telhado verde com diferentes substratos.

As análises laboratoriais físico-químicas da água foram realizadas nas instalações do LATARE e no Laboratório de Geoquímica Ambiental - LAGEA, ambos pertencentes ao Departamento de Planejamento Territorial e Geoprocessamento da UNESP- Campus Rio Claro. Foram realizadas análises de 23 amostras de água: Cor (uH); Turbidez (UT); pH;

4.6 Tratamento dos dados.

Os ensaios com volume de chuva controlado obteve o volume de percolado (hidrograma de saída), e o Escoamento Superficial Direto (ESD). Todos os ensaios descritos a seguir foram realizados em cada um dos três módulos- piloto.

4.6.1 Primeira Etapa:

Através do registro esfera, e manômetro de pressão, foi fixada a mesma pressão para todas as simulações de chuva. Os ensaios tiveram intervalo de dois dias entre as simulações de chuvas, com durações de 5, 10, 20, 30 e 60 minutos.

4.6.2 Segunda Etapa:

Esta etapa consiste em compilar todos os dados adquiridos pelo transdutor de pressão *Levellogger* durante os 15 ensaios realizados. Nesta fase, serão avaliados a atenuação de pico ocasionado pela propagação do hidrograma de entrada.

4.6.3 Terceira Etapa:

Nessa etapa, foi avaliada a capacidade de retenção de água no substrato, relacionando as lâminas armazenadas, percoladas e escoadas com as umidades antecedentes. De um modo geral, essa etapa tem como finalidade avaliar o comportamento dos protótipos para diferentes lâminas de precipitação. Considerando também, os dados de qualidade de água como turbidez, pH e cor aparente.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Configuração do simulador de chuvas

Os dois primeiros ensaios foram realizados com o mesmo simulador de chuva utilizado por Moura (2012), sendo este modificado de 6 para 8 micro aspersores. Este simulador consistia em 2 tubos de PVC de $\frac{3}{4}$ e 4 micro aspersores em cada tubo, dispostos a distância de 0,30 m. O maior valor de CUC atingido foi de 68%, com pressão de 2,0 bar e intensidade de precipitação de 337 mm/h.

Com o intuito de aumentar o CUC e diminuir a intensidade de precipitação optou-se por utilizar um novo simulador de chuvas e fechar o registro o máximo possível, aumentando a pressão para 2,2 bar. Lembrando que, o manômetro se encontrava na saída da bomba e antes do registro de pressão. Sendo assim, quanto mais fechado este registro, maior seria a pressão marcada pelo manômetro. No entanto, menor seria o volume de água que passaria pelo fluxo.

Na sequência, foram realizados 4 ensaios variando a distância do simulador de chuvas em relação a extremidade do telhado. Este novo simulador foi construído com 3 tubos de PVC de $\frac{3}{4}$ e 3 micro aspersores em cada tubo, sendo estes dispostos a uma distância de 0,35 m. Já os tubos estavam com distância de 0,30 m. O maior valor de CUC atingido foi de 66%, e intensidade de precipitação de 319 mm/h.

Por último, somente para averiguação do comportamento do simulador, foram realizados cinco testes, sendo três testes com a utilização da bomba e dois testes sem a utilização da bomba, onde o manômetro marcou pressão de 1,8 bar e 0,5 bar, respectivamente. Com resultados de CUC de 49%, 60%, 60%, 52% e 64%. Todavia os resultados de intensidades de precipitação foram altos, não apresentando tanta diferença em relação aos 4 ensaios anteriores, os quais a pressão estabelecida foi de 2,2 bar.

Na Tabela 2 é possível observar as situações consideradas para cada ensaio. Com a aplicação da equação (2) calculou-se as intensidade de precipitação para cada ensaio listadas na segunda coluna desta Tabela.

Finalmente, com base em todos os resultados de CUC e na intensidade de precipitação para cada ensaio, fixou-se a situação do 6º ensaio, onde simulador de chuvas foi disposto rente à extremidade do telhado e a pressão no manômetro de 2,2 bar, atingindo assim uma distribuição de 66%.

Ensaio	Intensidade de Precipitação (mm/h)	Bitola do Tubo de PVC	Número de Tubos de PVC	Número de Micro Aspersores por Tubo de PVC	Distância do Tubo de PVC da extremidade do telhado	Pressão no manômetro (bar)	CUC (%)
1	361	$3/4$	2	4	0,29	2,0	58
2	337	$3/4$	2	4	0,25	2,0	68
3	331	$3/4$	3	3	0,29	2,2	49
4	367	$3/4$	3	3	0,25	2,2	53
5	474	$3/4$	3	3	0,20	2,2	60
6	319	$3/4$	3	3	0,00	2,2	66
7	430	$3/4$	3	3	0,15	1,8	49
8	476	$3/4$	3	3	0,10	1,8	60
9	498	$3/4$	3	3	0,05	1,8	60
10	323	$3/4$	3	3	0,15	0,5	52
11	308	$3/4$	3	3	0,00	0,5	64

Tabela 2 - Ensaio realizados para calibração do Simulador de Chuva.

Posteriormente, com base na Equação 3 foi calculado o tempo de retorno (T) utilizando a intensidade de precipitação de 319 mm/h, a qual foi fixada para todos os ensaios. Considerando as diferentes durações de precipitação, tem-se os diferentes tempos de retorno em anos das chuvas simuladas na Tabela 3.

Duração	Tempo de Retorno (anos)
5	2.007
10	9.565
20	77.585
30	32.5593
60	4.918.601

Tabela 3 - Estimativa do Tempo de Retorno para diferentes durações de chuva.

Embora a utilização da bomba de água tenha sido eficiente para aumentar os valores de CUC, a intensidade de precipitação fixada para todos os ensaios de 319 mm/h foi bastante elevada, apresentando valores de Tempo de Retorno de 2.000 a 5.000.000 anos.

Com base na equação de chuva de Rio Claro obtida por Moruzzi e Oliveira 2009, a faixa ideal de intensidade de precipitação seria de 60 mm/h a 120 mm/h, a qual apresentaria uma faixa de Tempo de Retorno de 2 a 100 anos.

No entanto, nos ensaios preliminares, as intensidades de precipitação foram na faixa de 308 mm/h a 498 mm/h. Sendo assim, na tentativa de controlar o fluxo de água, foi utilizado um registro de pressão na saída da bomba seguido de um manômetro. Todavia, a intensidade de precipitação calculada a cada ensaio era elevada, não havendo a possibilidade de controlar o fluxo de água através do registro de pressão. Além disso, mesmo quando optou-se pela não utilização da bomba, nos dois últimos ensaios de CUC, as intensidades de precipitação continuaram altas, na faixa de 308 mm/h a 323 mm/h.

5.2 Calibração do Recipiente Industrial:

Para calibração do recipiente industrial foi encontrada a equação que relaciona a variação do volume em litros (L) em função da altura do nível de água em centímetros (cm). Esta etapa consistiu em medir através da régua o nível de água a cada litro de água colocado no recipiente. Juntamente com a medição em régua, foram registrados os níveis de água no recipiente através do transdutor de pressão. Na Figura 14 está ilustrado o recipiente de coleta.



Figura 14: Ilustração de recipiente semelhante ao recipiente de coleta utilizado para os ensaios.
Fonte: lcfrepresentacoes.com.br.

Relacionando os dados foi possível obter um R^2 de 99,99%. O erro entre os volumes observados e os volumes estimados pela equação, tal erro foi de 5%, demonstrando um bom resultado. Nos gráficos abaixo é possível observar a equação encontrada e a relação das medidas de régua e *Levellogger*, respectivamente (Figuras 15 e 16).

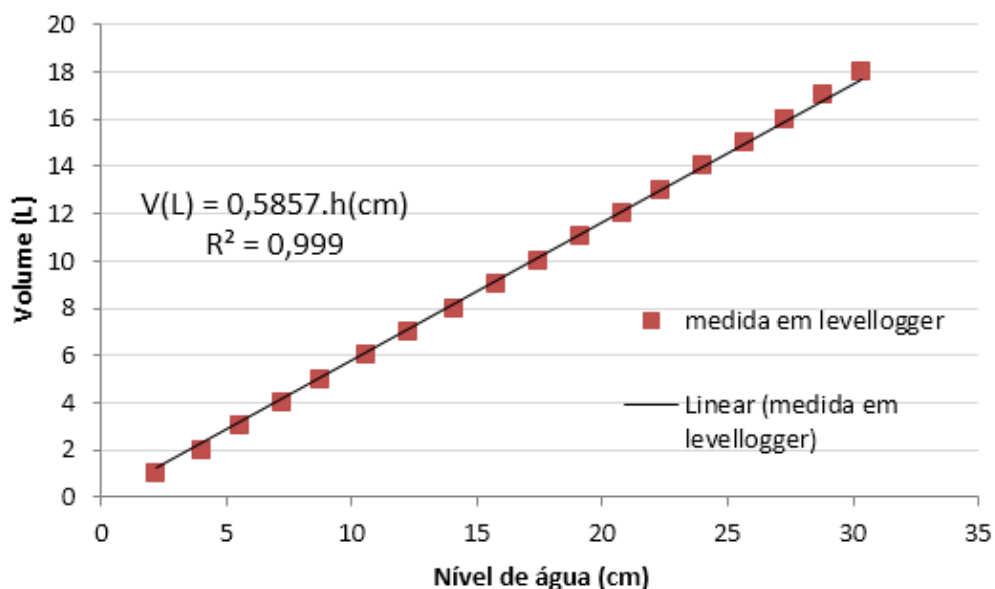


Figura 15 - Equação Volume em função do nível de água.

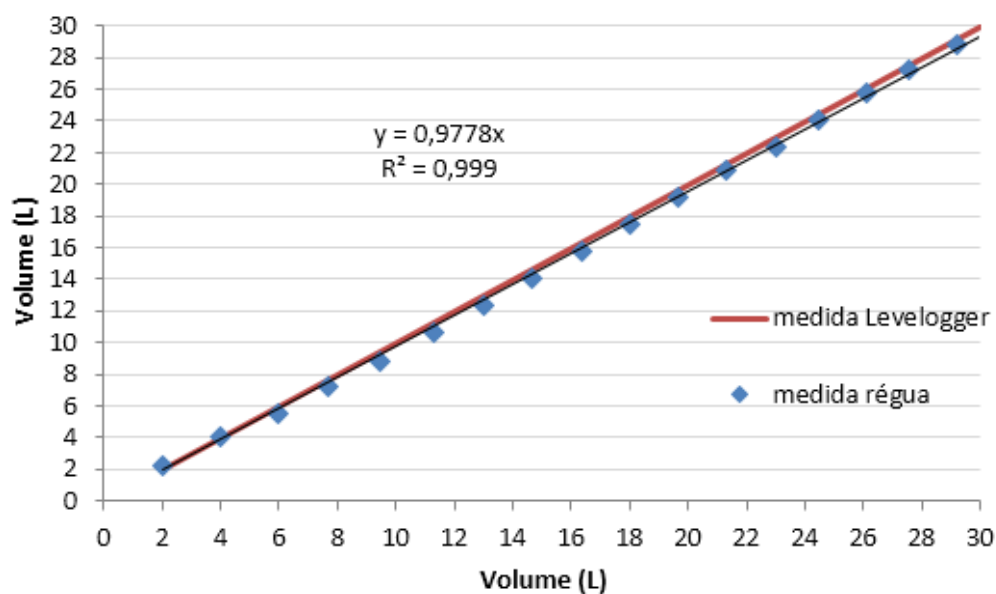


Figura 16 - Gráfico de Calibração do Recipiente Industrial.

5.3 Registro fotográfico do crescimento da cobertura vegetal para cada módulo.

Para que houvesse boa fixação ao substrato e rápido crescimento da herbácea, nos dois primeiros meses foram realizadas irrigações regulares para os três módulos. Posteriormente, as irrigações foram realizadas a cada ensaio de simulação de chuva, com tempo de duração de 5, 10, 20, 30 e 60 minutos e intervalo de dois dias entre cada ensaio.

Preliminarmente, o desempenho de cada substrato pode ser avaliado de acordo com o crescimento da cobertura vegetal, podendo ser observado nas fotos das Figuras 17, 18 e 19, as quais retratam o 1º dia, 45º dia, 60º dia e o 65º dia de crescimento da herbácea “*Callisias repens*”.

Com base nos registros fotográficos, no 45º dia o Módulo I estava totalmente preenchido de vegetação (Figura 20), o Módulo II estava bastante defasado em relação ao I, apresentando solo exposto e baixa densidade de vegetação (Figura 21). Já o Módulo III, apresentou um crescimento intermediário quando comparados aos Módulos I e II. Todavia com pequenos espaços vazios de solo exposto, como mostra a foto do Módulo III em seu 45º dia (Figura 22).

Na sequência, no 60º dia, os Módulos I e III estavam totalmente preenchidos pela herbácea (Figuras 23 e 25), enquanto que o Módulo II ainda não se encontrava totalmente coberto, apresentando pequenos espaços vazios com o solo exposto (Figura 24). Finalmente, no 65º dia houve a poda da cobertura vegetal, onde foi estabelecida uma altura de 5 cm de cobertura vegetal para cada módulo, os quais estariam prontos para o início dos ensaios definitivos de simulações de chuva (Figuras 26 e 28). Todavia, o Módulo II ainda não tinha alcançado a altura de 5cm, sendo este utilizado para os ensaios com uma altura de 2 cm de cobertura vegetal (Figura 27).



Figura 17 - Módulo I, 1º dia.



Figura 18 - Módulo II, 1º dia.



Figura 19 - Módulo III, 1º dia.



Figura 20 - Módulo I, 45º dia.



Figura 21 - Módulo II, 45º dia.



Figura 22 - Módulo III, 45º dia.



Figura 23 - Módulo I, 60º dia.



Figura 24 - Módulo II, 60º dia.

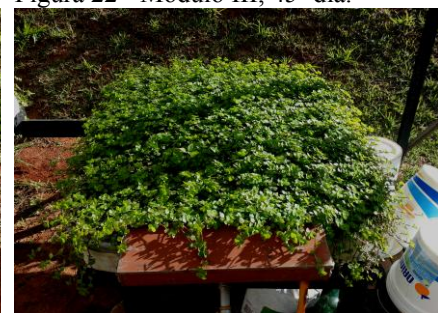


Figura 25 - Módulo III, 60º dia.



Figura 26 - Módulo I, 65º dia.



Figura 27 - Módulo II, 65º dia.



Figura 28 - Módulo III, 65º dia.

É possível afirmar que o Módulo I apresentou melhor desempenho do substrato demonstrando um rápido crescimento da cobertura vegetal. Em segundo lugar o Módulo III, e por último o Módulo II. Lembrando que, para o Módulo I, o substrato teve composição de turfa, vermiculita e casca de pinus. E o Módulo III, casca de pinus, vermiculita, e moinha de carvão. Sendo este misturado na proporção 50% com Terra vegetal. Diferentemente dos Módulos I e III, para o Módulo II foi utilizada a Terra Vegetal, uma terra esterilizada, porém

com baixo teor de matéria orgânica, sem nutrientes em comparação com os substratos dos Módulos I e III.

Corroborando as afirmações de alguns autores já citados neste trabalho, afirma-se que os Módulos I e III apresentaram bom crescimento devido à composição de seus substratos, os quais tem em comum elementos fundamentais para melhor fixação das raízes, para aumentar a porosidade, melhorar a retenção de água, e manter a umidade nos substratos.

5.4 Ensaios nos módulos de TV: Hidrogramas de entrada e saída.

Para cada módulo de TV foram confeccionados os hidrogramas de entrada, saída das parcelas percoladas e escoadas. Os 5 ensaios tiveram durações de chuva de 5, 10, 20, 30 e 60 minutos, totalizando 15 ensaios. Na Figura 28 está ilustrado o gráfico representando um hidrograma resultante, no qual está descrito os Tempo de Pico e de Retardo e a Vazão de Pico.

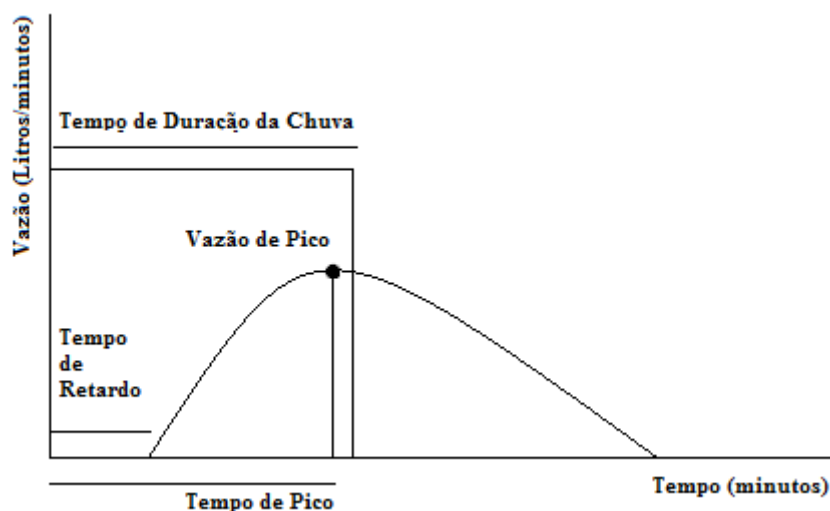


Figura 29: Hidrograma Ilustrativo para representar o Tempo de Retardo, Tempo de Pico e a Vazão de Pico.

Portanto, as figuras seguintes (Figuras 30 a 44) representam os hidrogramas para os módulos I, II e III, respectivamente. Ao final desse item de resultados é possível observar a Tabela 6, na qual são apresentados os valores de tempo de retardo, tempo de pico, vazões de pico, vazões mínimas e médias. Além disso, todos os dados que foram adquiridos através dos transdutores de pressão *Levellogger* para que fosse possível a confecção dos hidrogramas. Para melhor representação da curva de todos os hidrogramas de saída, através de planilha eletrônica, foram utilizadas a média móvel. Desta forma, algumas curvas foram ligeiramente

deslocadas de sua vazão de pico real. No entanto, no Apêndice A estão todos os dados de vazão de pico real.

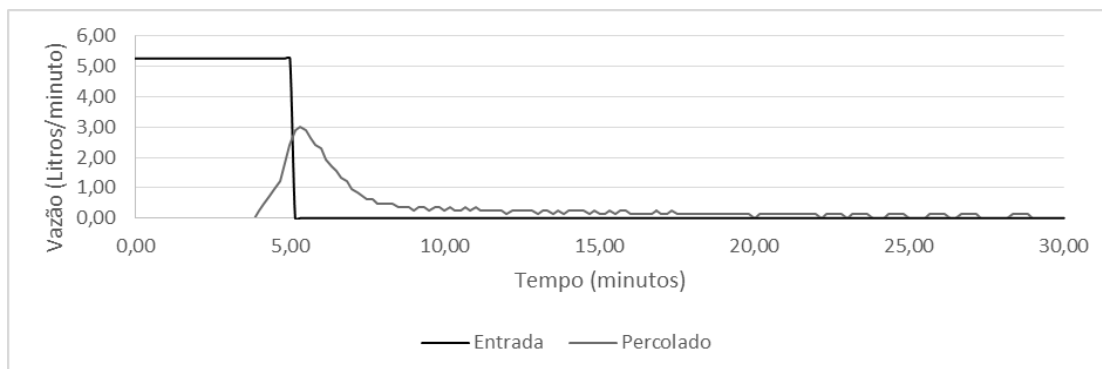


Figura 30 - Hidrogramas para ensaio de 5 minutos e vazão de entrada constante de 5,26 L/min para o Módulo I.

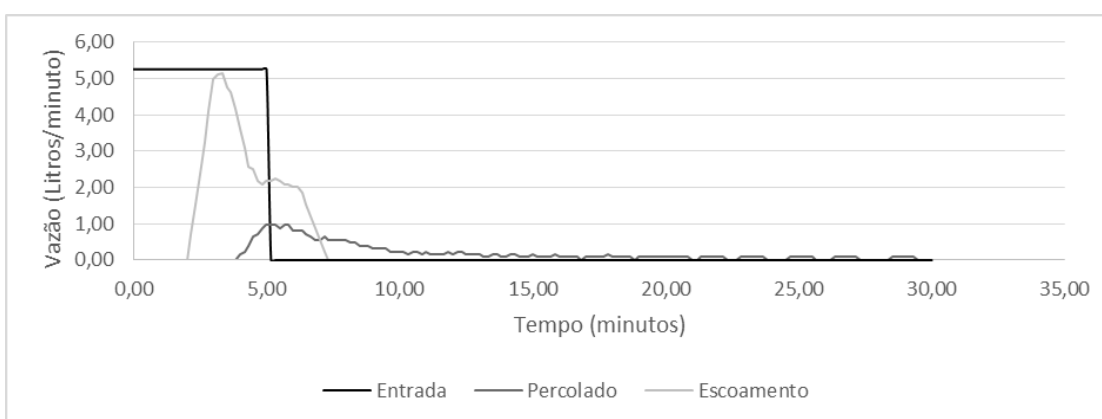


Figura 31 - Hidrogramas para ensaio de 5 minutos e vazão de entrada constante de 5,26 L/min para o Módulo II.

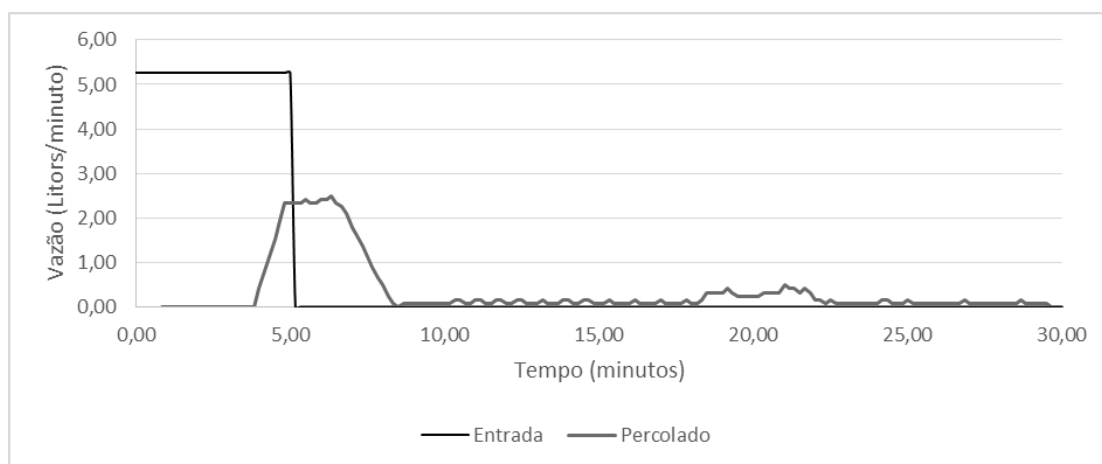


Figura 32 - Hidrogramas para ensaio de 5 minutos e vazão de entrada constante de 5,26 L/min para o Módulo III.

Para as simulações de chuva de 5 minutos, os hidrogramas podem ser visualizados nas Figuras 30, 31 e 32 para os módulos I, II e III, respectivamente. O tempo de retardo para três módulos foi de 4 minutos para o percolado, e o tempo de pico foi de 4,83; 4,50 e 5,50 minutos para os Módulos I, II e III, respectivamente. Sendo que a vazão de pico foi de 3,38 L/min; 1,45 L/min e 2,89 L/min. Tendo em vista que para o Módulo II a vazão de pico foi a mais baixa,

ressalta-se que para este módulo houve escoamento aos 2 minutos de chuva, e aproximadamente aos 3 minutos uma vazão de pico de 5,17 L/min.

Considerando o volume total precipitado de 26,30 litros, os volumes dos percolados foram de 9,59 e 10,58 litros, e os volumes armazenados foram de 16,71 litros e 15,72 litros, para os módulos I e III, respectivamente. Para o módulo II o volume de saída foi de 7,36 litros armazenados, 5,33 litros percolados e 13,61 litros escoados. Portanto, o módulo I mostrou-se mais eficiente no sentido do armazenamento da água da chuva.

O número de média móvel variou de 4 a 6 para que houvesse melhor representação das curvas dos hidrogramas, havendo um deslocamento maior da vazão de pico somente na Figura 30, a qual representa o hidrograma para o módulo I.

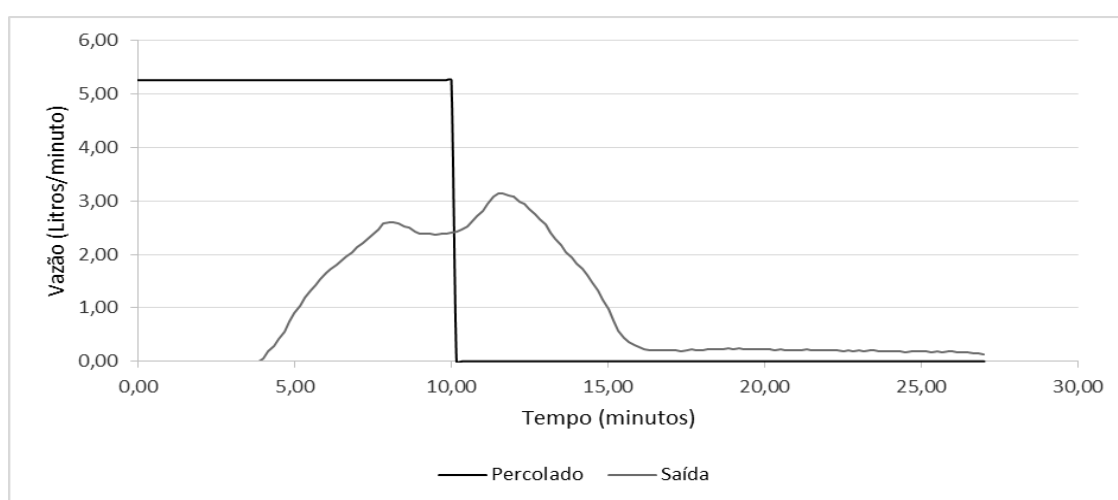


Figura 33 - Hidrogramas para ensaio de 10 minutos e vazão de entrada constante de 5,26 L/min para o Módulo I.

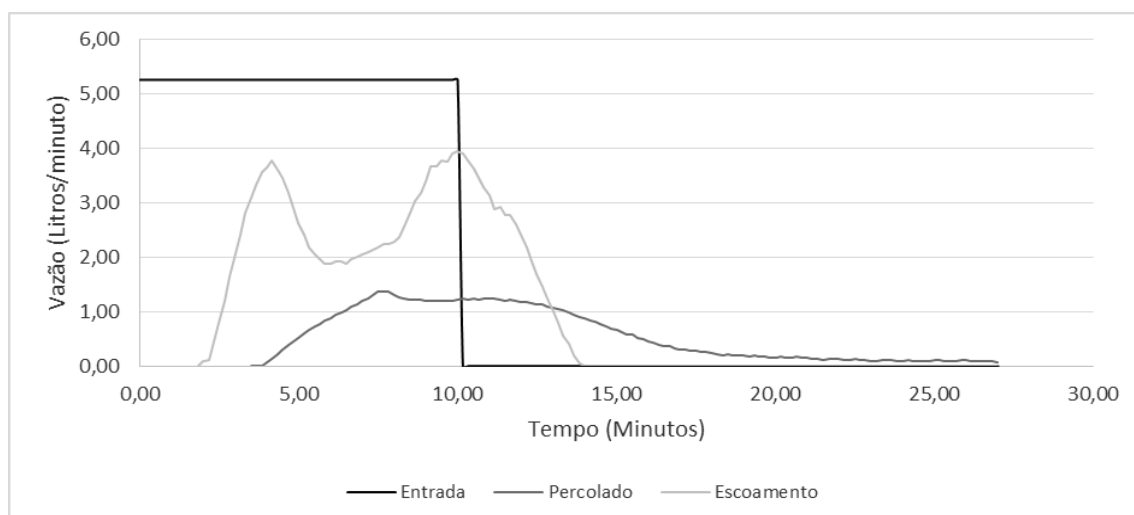


Figura 34 - Hidrogramas para ensaio de 10 minutos e vazão de entrada constante de 5,26 L/min para o Módulo II.

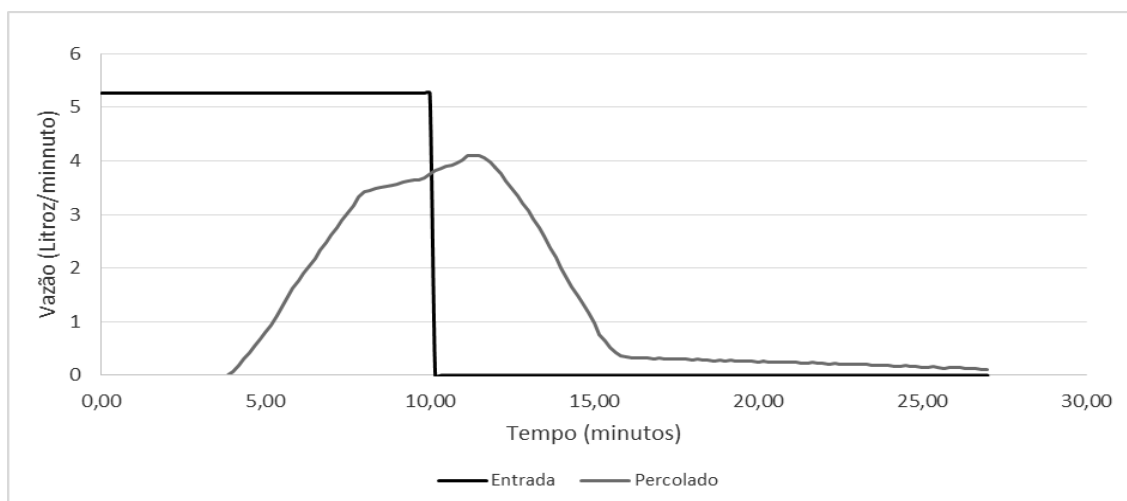


Figura 35 - Hidrogramas para ensaio de 10 minutos e vazão de entrada constante de 5,26 L/min para o Módulo III.

Para as simulações de chuva com duração de 10 minutos, podem ser visualizadas nas Figuras 33, 34 e 35 para os módulos I, II e III, respectivamente. O tempo de retardo para três módulos foi de 4 minutos para o percolado, e o tempo de pico foi de 11,33; 4,33 e 11,17 minutos para os Módulos I, II e III, respectivamente. Sendo que a vazão de pico foi de 5,10 L/min; 1,93 L/min e 5,17 L/min. Tendo em vista que para o módulo II a vazão de pico foi a mais baixa, ressalta-se que para este módulo houve escoamento aos 9,17 minutos de chuva, e aproximadamente aos 3 minutos uma vazão de pico de 5,24 L/min.

Os volumes dos percolados foram de 26,40 e 33,37 litros, e os volumes armazenados foram de 26,20 litros e 19,23 litros, para os módulos I e III, respectivamente. Lembrando que, neste caso não houve parcelas escoadas para esses módulos. Para o módulo II o volume de saída foi de 9,20 litros armazenados, 14,27 litros percolados e 13,61 litros escoados. Novamente, o módulo I mostrou-se mais eficiente no sentido do armazenamento da água da chuva, as parcelas armazenadas e percoladas foram praticamente meio a meio para este módulo.

O número de média móvel variou de 2 a 24 para que houvesse melhor representação das curvas dos hidrogramas, havendo um deslocamento maior da vazão de pico nas Figuras 33 e 35, as quais representam os hidrogramas para os módulos I e II.

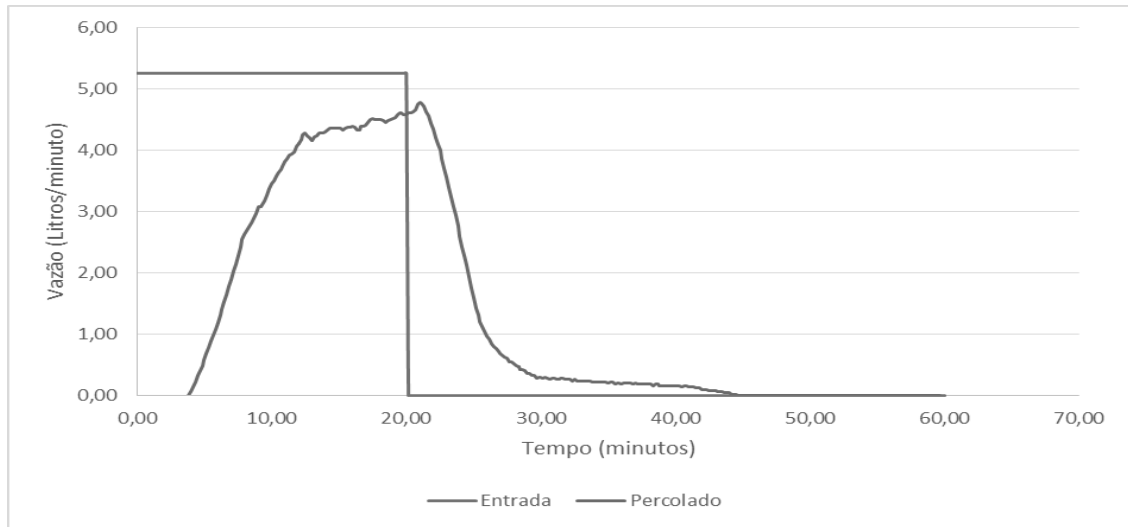


Figura 36 - Hidrogramas para ensaio de 20 minutos e vazão de entrada constante de 5,26 L/min para o Módulo I.

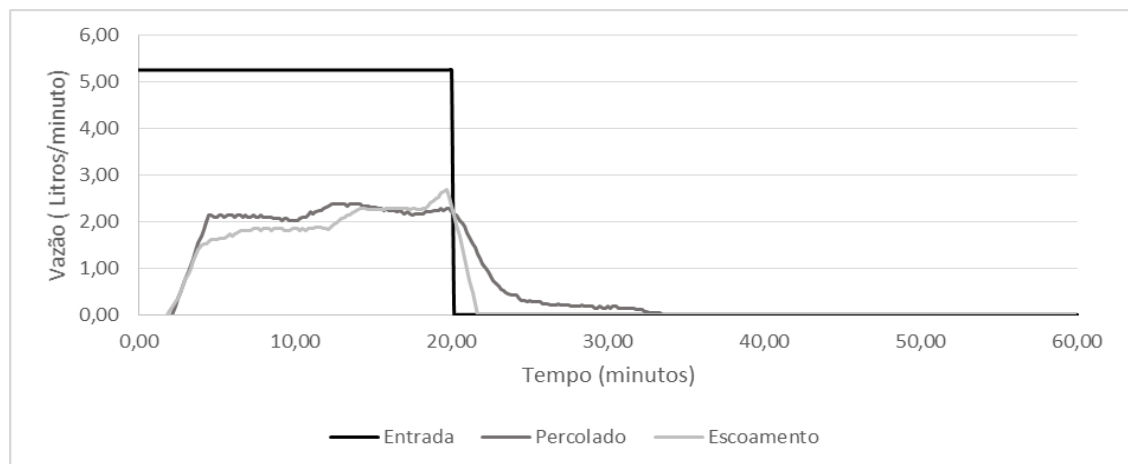


Figura 37 - Hidrogramas para ensaio de 20 minutos e vazão de entrada constante de 5,26 L/min para o Módulo II.

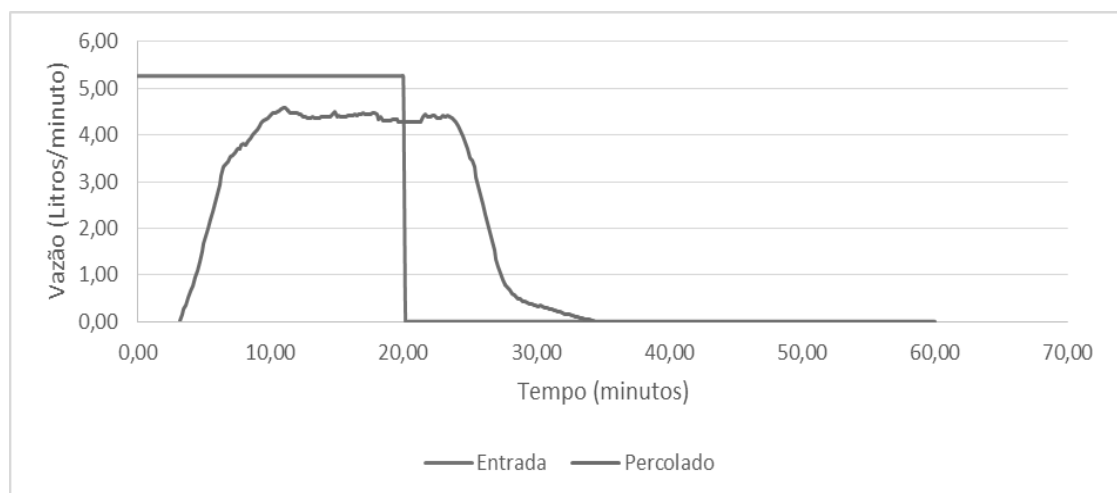


Figura 38 - Hidrogramas para ensaio de 20 minutos e vazão de entrada constante de 5,26 L/min para o Módulo III.

Para as simulações de chuva com duração de 20 minutos, podem ser visualizadas nas Figuras 36, 37 e 38 para os módulos I, II e III, respectivamente. O tempo de retardo para módulos I e III foi de 4 minutos para o percolado, já para o módulo II foi de 2 minutos e 33 segundos. O tempo de pico foi de 20; 11 e 19 minutos para os Módulos I, II e III, respectivamente. Sendo que a vazão de pico foi de 5,24 L/min; 2,89 L/min e 5,24 L/min. Tendo em vista que para o módulo II a vazão de pico foi a mais baixa, ressalta-se que para este módulo, aos 19 minutos de chuva houve escoamento, e aproximadamente aos 2 minutos uma vazão de pico de 2,89 L/min.

Os volumes dos percolados foram de 80 e 93,89 litros, e os volumes armazenados foram de 25,20 litros e 11,31 litros, para os módulos I e III, respectivamente. Lembrando que, neste caso não houve parcelas escoadas para esses módulos. Para o módulo II o volume de saída foi de 24,24 litros armazenados, 43,95 litros percolados e 37,01 litros escoados. Neste caso, o módulo II mostrou-se mais eficiente no sentido do armazenamento da água.

O número de média móvel variou de 2 a 24 para que houvesse melhor representação das curvas dos hidrogramas, havendo um leve deslocamento da vazão de pico nas Figuras 36, 37 e 38.

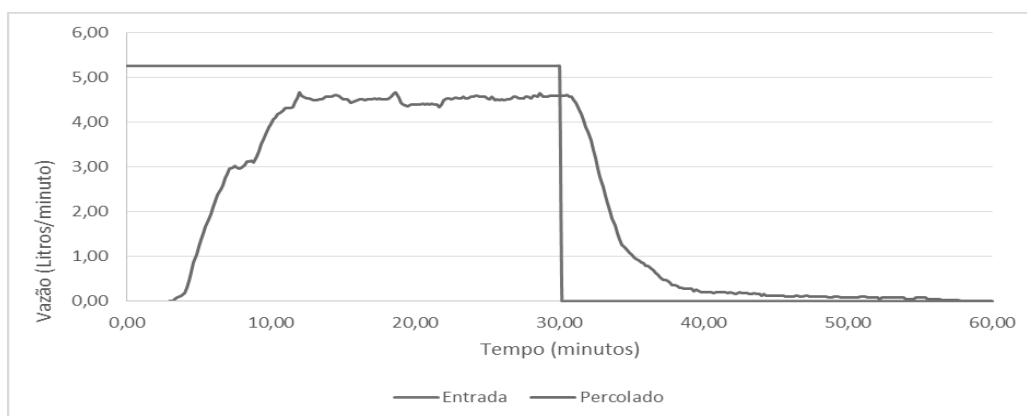


Figura 39 - Hidrogramas para ensaio de 30 minutos e vazão de entrada constante de 5,26 L/min para o Módulo I.

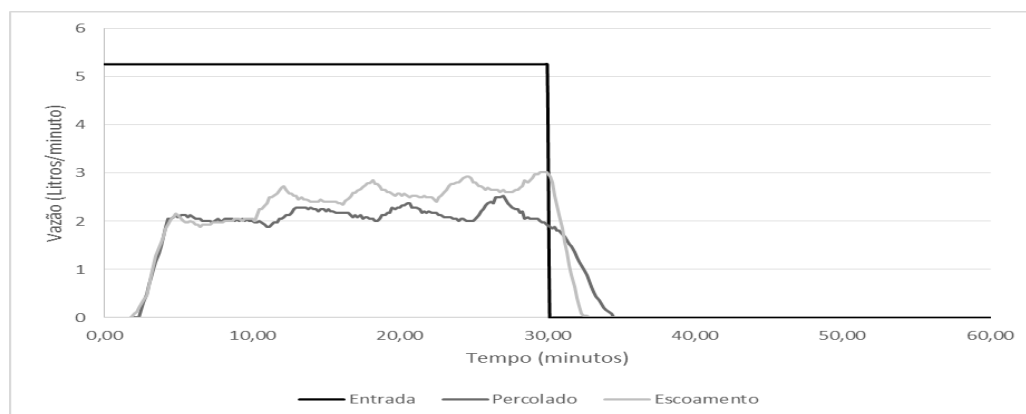


Figura 40 - Hidrogramas para ensaio de 30 minutos e vazão de entrada constante de 5,26 L/min para o Módulo II.

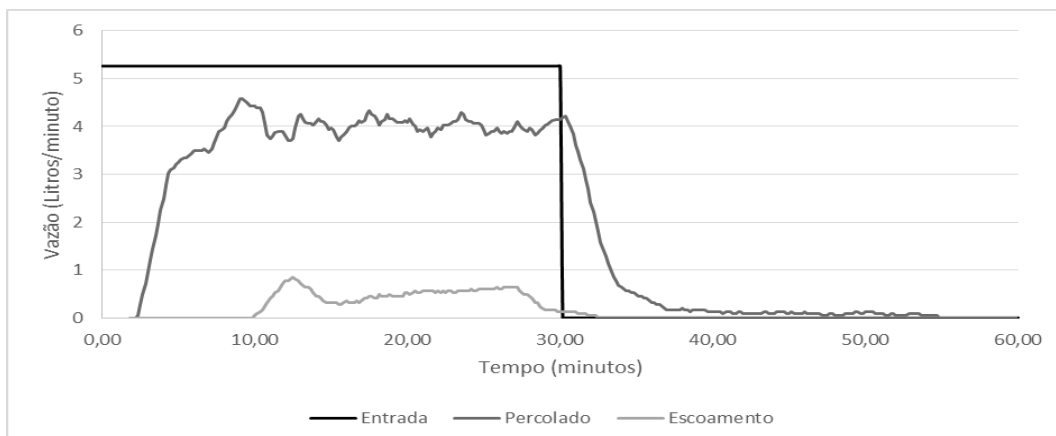


Figura 41 - Hidrogramas para ensaio de 30 minutos e vazão de entrada constante de 5,26 L/min para o Módulo III.

Para as simulações de chuva com duração de 30 minutos, podem ser visualizadas nas Figuras 39, 40 e 41 para os módulos I, II e III, respectivamente. O tempo de retardo foi de 3,33; 2,50; e 2,33 minutos para os módulos I, II e III, respectivamente. O tempo de pico foi de 29,50; 26,50 e 29 minutos para os Módulos I, II e III, respectivamente. Sendo que a vazão de pico foi de 5,25 L/min; 3,38 L/min e 5,25 L/min. Neste caso, aos 10 minutos houve escoamento para o módulo III com vazão de pico de 0,96 L/min. Tendo em vista que para o módulo II a vazão de pico foi a mais baixa, ressalta-se que para este módulo, aos 2 minutos de chuva houve escoamento, e aproximadamente aos 29 minutos uma vazão de pico de 3,86 L/min.

Os volumes dos percolados foram de 127 e 121 litros, e os volumes armazenados foram de 30,80 litros e 26,80 litros, para os módulos I e III, respectivamente. Ressalta-se que, aos 10 minutos houve uma pequena parcela escoada para o módulo III de 10 litros. Para o módulo II o volume de saída foi de 24,80 litros armazenados, 63 litros percolados e 70 litros escoados. Neste caso, o módulo II mostrou-se mais eficiente no sentido do armazenamento da água.

O número de média móvel foi de 12 para que houvesse melhor representação das curvas dos hidrogramas. Percebe-se que para todos os hidrogramas houve um deslocamento na representatividade das vazões de picos.

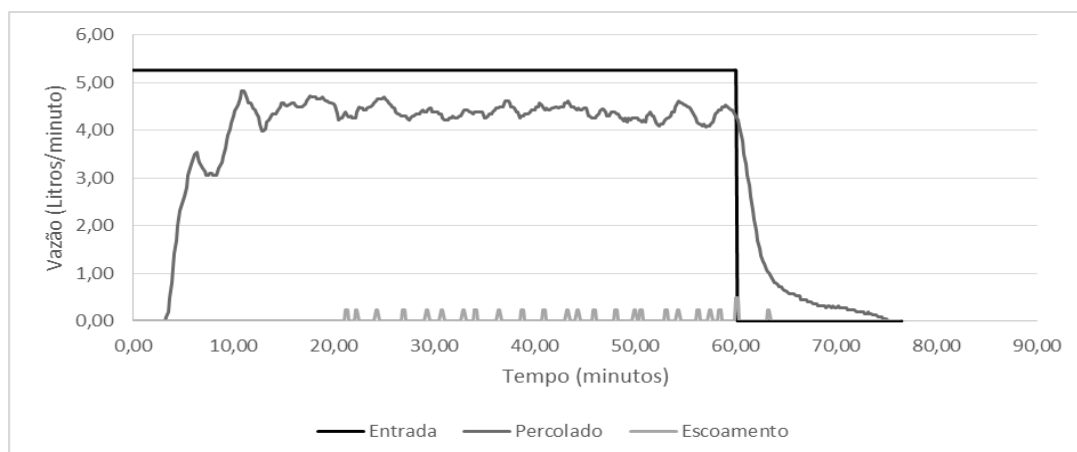


Figura 42 - Hidrogramas para ensaio de 60 minutos e vazão de entrada constante de 5,26 L/min para o Módulo I.

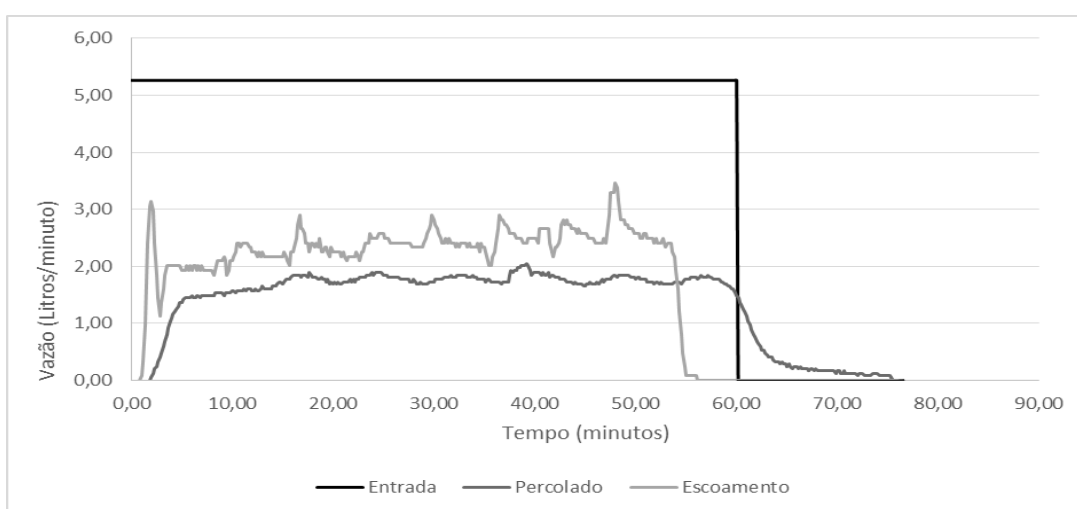


Figura 43 - Hidrogramas para ensaio de 60 minutos e vazão de entrada constante de 5,26 L/min para o Módulo II.

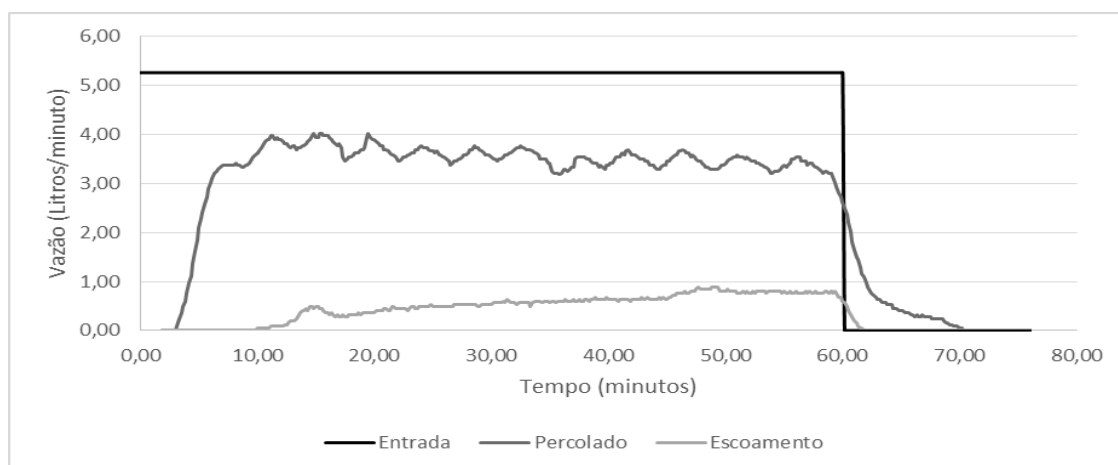


Figura 44 - Hidrogramas para ensaio de 30 minutos e vazão de entrada constante de 5,26 L/min para o Módulo III.

Para as simulações de chuva com duração de 60 minutos, podem ser visualizadas nas Figuras 42, 43 e 44 para os módulos I, II e III, respectivamente. O tempo de retardo foi de 3,33; 2,00; e 2,17 minutos para os módulos I, II e III, respectivamente. O tempo de pico foi de

41,83; 37,5 e 46,5 minutos para os Módulos I, II e III, respectivamente. Sendo que a vazão de pico foi de 5,25 L/min; 3,38 L/min e 5,24 L/min. Neste caso, aos 10 minutos houve escoamento para o módulo III com vazão de pico de 1,45 L/min. Além disso, para o módulo I, aos 58 minutos houve uma pequena parcela escoada de 2 litros, com vazão de pico de 0,96 L/min. Tendo em vista que para o módulo II a vazão de pico foi a mais baixa, ressalta-se que para este módulo, aos 60 segundos de chuva houve escoamento, e aproximadamente aos 48 minutos uma vazão de pico de 4,82 L/min.

Os volumes dos percolados foram de 252 e 207 litros, e os volumes armazenados foram de 61,80 litros e 79 litros, para os módulos I e III, respectivamente. Ressalta-se que, aos 10 minutos houve novamente uma parcela escoada para o módulo III, de 29,60 litros. Para o módulo II o volume de saída foi de 81,90 litros armazenados, 105 litros percolados e 128,70 litros escoados. Neste caso, o módulo II mostrou-se mais eficiente no sentido do armazenamento da água.

O número de média móvel foi de 2 a 12 para que houvesse melhor representação das curvas dos hidrogramas. Percebe-se que, para todos os hidrogramas houve um deslocamento na representatividade das vazões de picos.

Para o módulo I, a cada ensaio houve uma gradativa diminuição das parcelas escoadas, sendo que para as chuvas de 30 e 60 minutos as parcelas de água armazenadas e percoladas foram as mesmas, havendo o aparecimento do escoamento nos 20 minutos na simulação de 60 minutos. Para o módulo II, as parcelas armazenadas foram menores que as escoadas, e somente na simulação de 20 minutos que a parcela percolada foi maior que a escoada. Para o módulo III, houve diminuição das parcelas armazenadas dos ensaios 1 ao 3. Do 3º ensaio ao 5º ensaio as parcelas armazenadas e escoadas aumentaram, havendo diminuição na parcela percolada.

5.5 Estimativa dos Coeficientes de escoamento experimentais e Armazenamento de água.

Para cálculo do C_{exp} (Coeficiente de escoamento experimental) foi feito o produto das lâminas escoadas (em mm) pela precipitação total (em mm) de cada evento. Na Tabela acima, nota-se valores baixos de C_{exp} para os módulos I e III, atingindo médias de C_{exp} de 0,002 e 0,075, respectivamente. Enquanto que, para o Módulo II, no qual houve maiores lâminas de escoamento superficial, o C_{exp} apresentou valores na faixa de 0,35 a 0,55, com média de 0,45.

Pode-se afirmar que, os módulos de telhados verdes foram eficientes no controle do escoamento superficial quando analisados os coeficientes de escoamento experimental e o armazenamento de água.

Corroborando com Tassi *et al.* (2014), onde os autores afirmam que o coeficiente de escoamento superficial reflete a capacidade do telhado verde no controle quantitativo do escoamento. Sendo que, baixos valores de C_{exp} indicam que uma parcela maior de chuva fica retida no telhado, enquanto valores elevados de C demonstram que grande parte da precipitação é escoada.

Ressaltando que, para o módulo II, houve considerável escoamento com uma média de 45% do volume total de chuva, quando submetido a lâmina de 53,17 mm. Tal resultado apresentou-se satisfatório quando comparado aos resultados de Tassi *et al.* (2014), o qual obteve uma média de 38% de escoamento do volume total de chuva, quando submetido a precipitação de 56 mm.

Módulo	Precipitação total (mm)	UA (%)	C_{exp}	C_{total}	CN	Armazenamento (mm/m²)
I	26,58	61	0,00	0,36	93,76	17
II	26,58	55	0,52	0,50	90,56	8
III	26,58	76	0,00	0,76	90,89	16
I	53,17	74	0,00	0,80	89,08	27
II	53,17	61	0,55	0,80	80,31	9
III	53,17	SAT	0,00	0,72	97,15	20
I	106,33	65	0,00	0,83	96,47	26
II	106,33	63	0,35	0,77	91,20	25
III	106,33	SAT	0,00	0,84	91,02	12
I	159,50	72	0,00	0,74	75,42	31
II	159,50	64	0,44	0,40	94,11	25
III	159,50	SAT	0,06	0,63	92,89	27
I	319,00	82	0,01	0,89	95,69	63
II	319,00	75	0,41	0,83	90,36	84
III	319,00	SAT	0,09	0,75	76,08	81

Tabela 4 - Relação da umidade antecedente com os coeficientes de escoamento, armazenamento de água no substrato e Curva Número (CN).

Em comparação com os estudos de Moura (2012), nesta pesquisa, o telhado verde com inclinação de 10%. Para a mesma lâmina precipitada, porém com tempo de duração de 30 minutos, Moura (2012) obteve uma lâmina armazenada de 14,83 mm/m² e coeficiente de escoamento estimado de 0,02, com umidade antecedente de 21,2%. Desta forma, o grande armazenamento pode ser explicado pela baixa umidade antecedente. Enquanto que, nesta pesquisa, para o módulo II, quando o armazenamento de água foi satisfatório de 9 mm/m², foi estimado um coeficiente C de 0,55, para umidade antecedente de 61%. Com base nos resultados referentes ao módulo II, o qual houve maiores parcelas de escoamento superficial, foi possível estimar um *Cexp* mais elevado quando comparado aos módulos I e III.

Nos estudos de Tassi *et al.* (2014) esses valores foram de 0,51 para *Cexp* e 12,1mm/m² para capacidade de armazenamento, quando a umidade antecedente era de 44%, lembrando que o substrato era apenas de 8 cm com inclinação de apenas 1%.

Em relação ao armazenamento, outros autores, a exemplo de Mendingo e Cunha (2004), conseguiram uma capacidade de armazenamento média de 14 mm/m² em um telhado com substrato de 15 cm com inclinação de 10%, instalado e monitorado durante um mês na cidade de São Carlos, SP, no qual o maior volume de chuva observado foi de aproximadamente 35 mm.

Além disso, para cada módulo estimou-se o valor de CN (Curva Número) de 88,9% 90,25% e 89,23% utilizando o modelo SCS.

Segundo Tassi *et al.* (2006), este modelo consiste no método da Curva-Número do SCS (*Soil Conservation Service*), Serviço de Conservação de Solos do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, que possui apenas um parâmetro. O parâmetro CN, ou Curva-Número depende de condições de uso, ocupação, e umidade antecedente do solo, variando de 0 a 100.

Os valores de CN são Tabelados em livros e manuais de hidrologia, sendo que áreas impermeáveis, como telhados convencionais, normalmente assumem o valor de CN igual a 98 (CARTER e RASMUSSEN, 2005). No que se refere ao CN de telhados verdes, há poucos estudos. No entanto, alguns exemplos apresentados por Carter e Rasmussen (2005), estimaram o valor do CN de um telhado verde em 86.

Além disso, com base nos estudos apresentados por Getter *et al.* (2007), onde foram avaliados telhados verdes com inclinação de 2 a 25% de inclinação e espessura de 6 cm, o valor de CN foi de aproximadamente de 88%, para uma inclinação de 10%, com 58,27 % da lâmina armazenada. A curva número encontrada com o estudo pode ser observada na Figura 45.

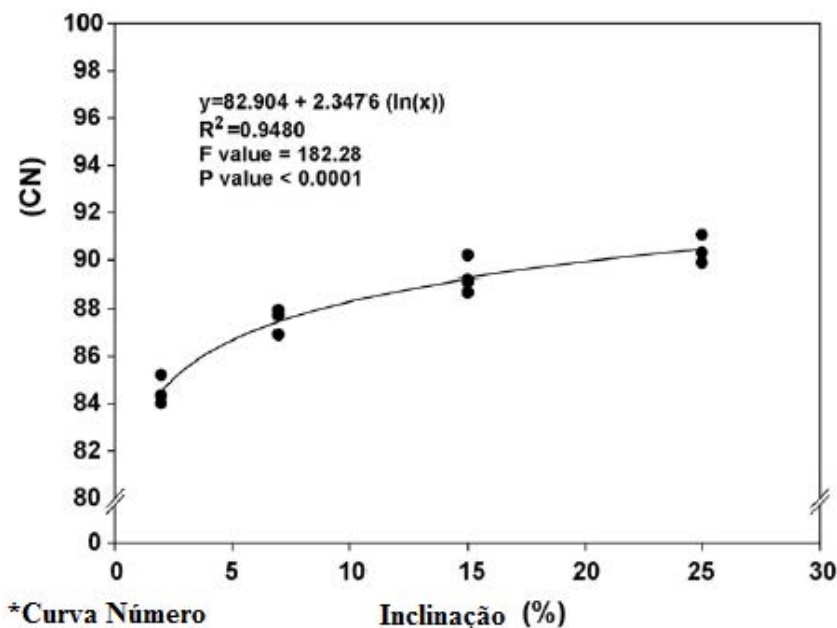


Figura 45 - Números de deflúvio (CN) em função da inclinação. Gráfico modificado de Getter *et al.* (2007).

5.6 Análise comparativa entre umidade antecedente e lâminas percoladas, armazenadas e escoadas para os Módulos I, II e III.

O procedimento técnico utilizado para determinação do teor de umidade de solo baseou-se na norma NBR 6457/1986. Para cada ensaio foi obtido o teor de umidade do solo antes e depois das simulações de chuva. Coletou-se amostras dos solos em cápsulas metálicas, as quais foram levadas ao laboratório para pesagem e secagem. Com base nos dados apresentados na Tabela observou-se notável diferença entre as umidades antecedentes e posteriores para a maioria dos ensaios. Nota-se que, para o segundo ensaio, não houve muita diferença de umidade, podendo essa diferença ser explicada devido a umidade relativa do ar baixa de 28%, a qual poderia ter influenciado na rápida perda de umidade do solo para a atmosfera. Além disso, a alta temperatura do ambiente pode ter facilitado uma rápida evaporação da água do solo.

Destaca-se que, para os 4º e 5º ensaios, nos quais houve saturação do solo nos módulos I e III, houve também escoamento. Portanto, essa saturação pode ser comprovada devido as lâminas de água escoadas no ensaio.

As Figuras 46, 47 e 48 representam a variação das lâminas escoadas, armazenadas e percoladas em função da umidade antecedente para os três módulos de TV.

Módulos	Ensaio	Umidade Antecedente (%)	Umidade Posterior (%)	Δu	Umidade Relativa do Ar (%)	Temperatura (°C)
I	1º	61	73	12	24	26,4
	2º	74	75	1	28	30,4
	3º	65	88	23	61	22,9
	4º	72	88	16	57	22,8
	5º	82	SAT	-	33	27,3
II	1º	55	63	8	24	26,4
	2º	61	61	0	28	30,4
	3º	63	78	15	61	22,9
	4º	64	72	8	57	22,8
	5º	75	82	7	33	27,3
III	1º	76	91	15	24	26,4
	2º	SAT	SAT	-	28	30,4
	3º	SAT	SAT	-	61	22,9
	4º	SAT	SAT	-	57	22,8
	5º	SAT	SAT	-	33	27,3

Tabela 5 - Umidade Posterior e Antecedente.

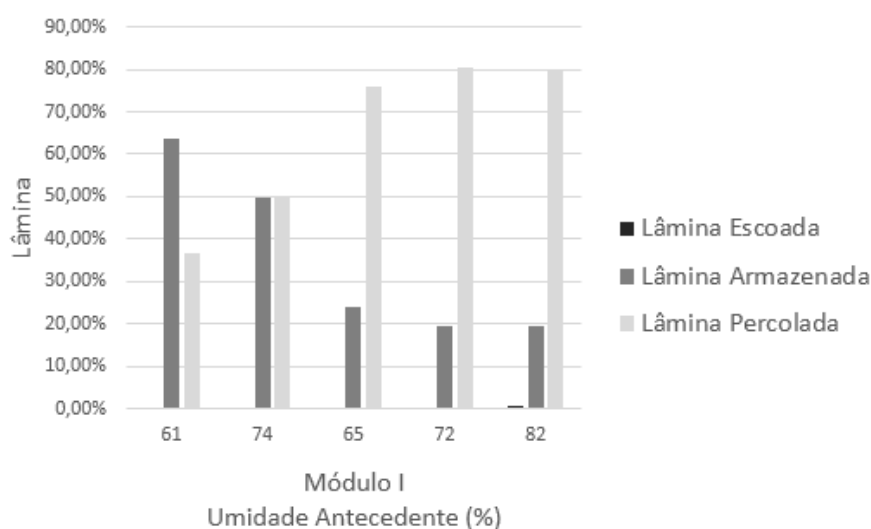


Figura 46 - Gráfico comparativo entre Lâmina Percolada e Escoda e Umidade Antecedente.

Nota: Para lâminas de 26,58 mm; 53,17 mm; 106,33 mm; 159,50 mm; 319,00 mm.

Para o módulo I, a maior lâmina percolada foi de 80,48%, no 4º ensaio, no qual a umidade antecedente foi de 72%. Enquanto que, o maior valor para lâmina armazenada foi de 63,54%, no 1º ensaio quando a umidade antecedente foi de 61%. Para o módulo I houve lâmina escoada somente durante o último ensaio, uma lâmina escoada de 0,63%, onde a umidade antecedente era de 82%.

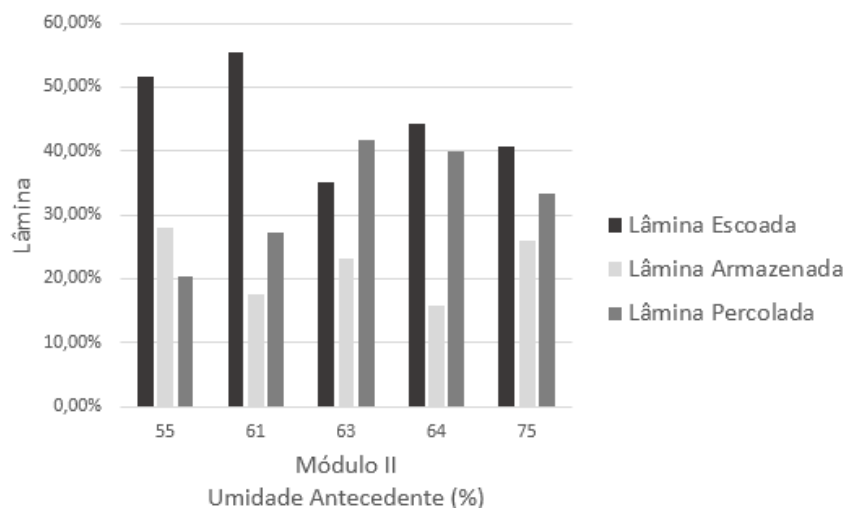


Figura 47 - Gráfico comparativo entre Lâmina Percolada e Escoda e Umidade Antecedente.
Nota: Para lâminas de 26,58 mm; 53,17 mm; 106,33 mm; 159,50 mm; 319,00 mm.

No módulo II o maior valor alcançado de lâmina percolada foi de 41,78% para umidade antecedente de 63%. A máxima lâmina escoda foi de 55,38% para umidade antecedente de 61%. Sendo que a maior lâmina armazenada foi no primeiro ensaio quando a umidade antecedente era de 55%.

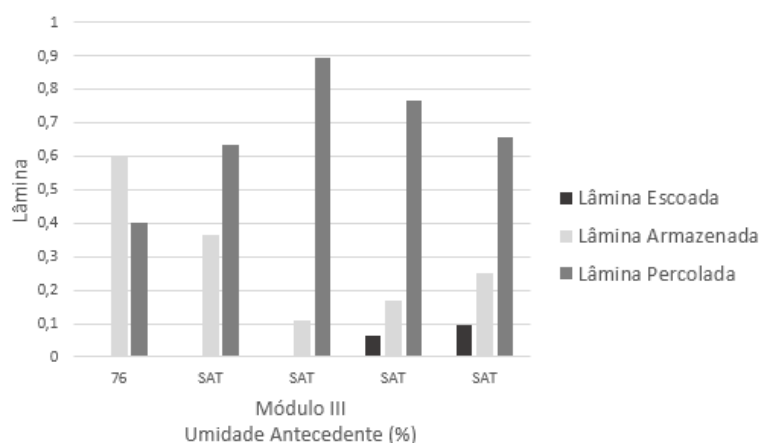


Figura 48 - Gráfico comparativo entre Lâmina Percolada e Escoda e Umidade Antecedente.
Nota: Para lâminas de 26,58mm; 53,17mm; 106,33mm; 159,50mm; 319,00mm.

No módulo III o maior valor de lâmina percolada foi de 89,25%, onde o solo já se encontrava saturado. O maior valor de lâmina escoda foi de 9%, para o último ensaio, no qual também o solo já se encontrava saturado. Já o maior valor de lâmina armazenada foi de 59,77% para o primeiro ensaio, onde a umidade antecedente era de 76%.

Pode-se afirmar que, de um modo geral a medida que as umidades aumentaram, os telhados demonstraram menores lâminas armazenadas. Conforme Tassi *et al.* (2014), em seu

estudo em projeto de TV houve perda de eficiência do telhado verde à medida que a umidade do solo sofreu aumento durante todos os ensaios. Além disso, os resultados desta pesquisa corroboram com os estudos de Moura (2012), onde afirmou-se que a umidade antecedente pode ser decisiva no escoamento superficial.

5.7 Análise comparativa da lâmina precipitada em relação às lâminas escoadas, armazenadas e percoladas.

Nota-se que, para os módulos I e III, com o aumento das lâminas precipitadas a cada ensaio, houve um aumento gradativo das lâminas percoladas e consequentemente diminuição das lâminas armazenadas (Figura 49). Ainda para os módulos I e III, houve uma pequena porcentagem de lâmina escoada para os últimos ensaios, quando o substrato já se encontrava saturado.

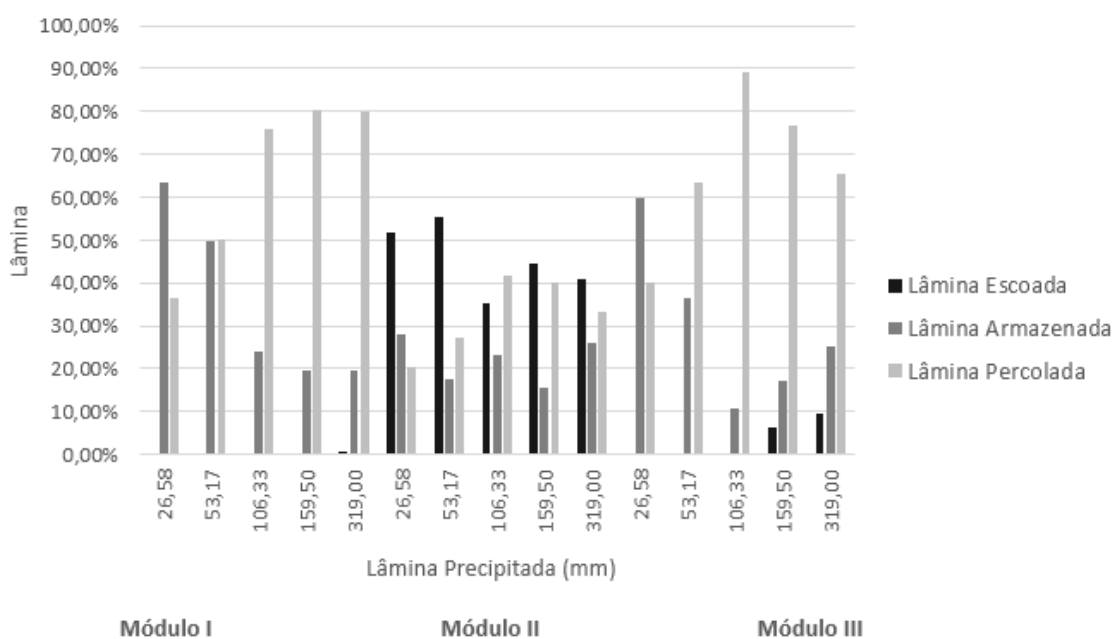
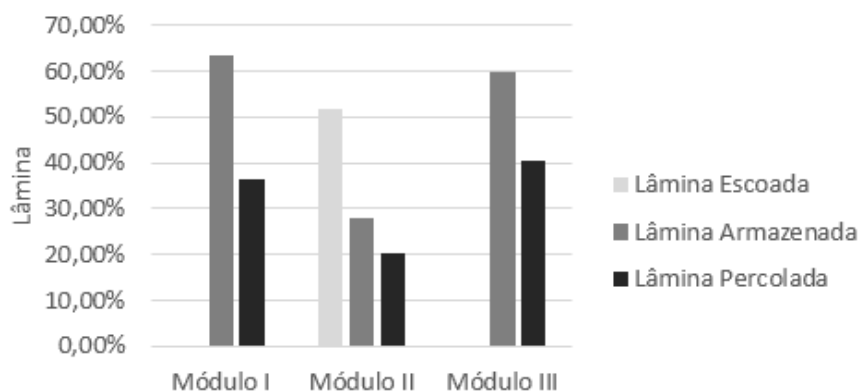


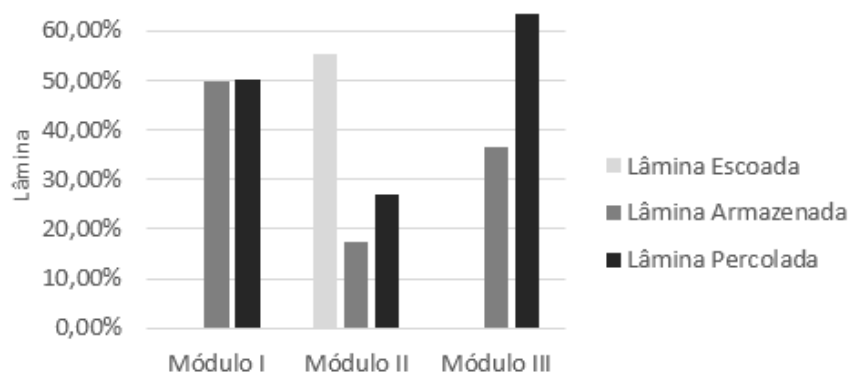
Figura 49 - Gráfico comparativo entre as Lâminas Escoadas, Armazenadas e Percolada.

Lembrando que, durante os ensaios, os módulos I e III estavam totalmente cobertos pela herbácea, enquanto que o módulo II ainda não se encontrava totalmente coberto, apresentando alguns espaços sem vegetação, os quais propiciam menor infiltração da água. De um modo geral, na maioria dos ensaios o Módulo II apresentou os maiores valores de lâmina escoada, em segundo lugar de lâmina percolada, sendo as menores parcelas, as de lâminas armazenadas.



Para lâmina precipitada de 26,58 mm

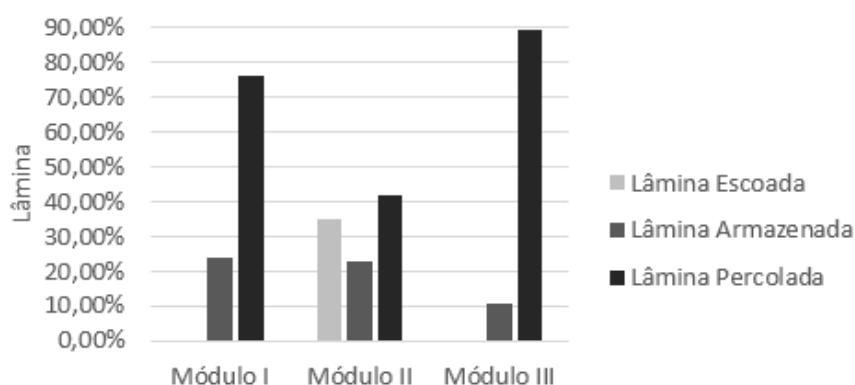
Figura 50 - Gráfico comparativo das parcelas escoadas, armazenadas e percoladas.



Para lâmina precipitada de 53,17 mm

Figura 51 - Gráfico comparativo das parcelas escoadas, armazenadas e percoladas.

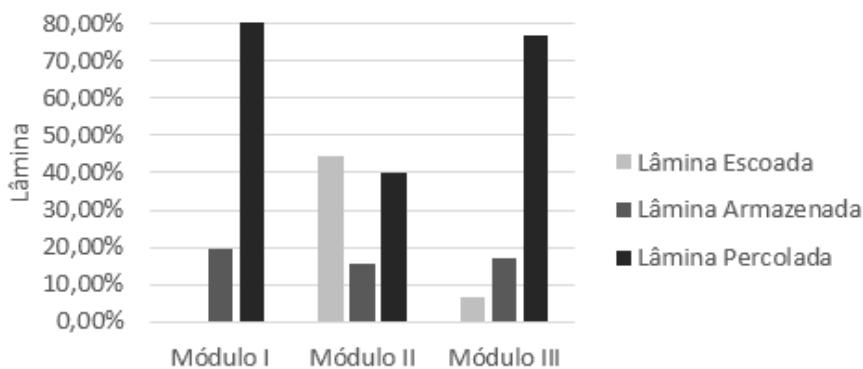
Observa-se nas Figuras 50 e 51 que conforme houve o aumento da lâmina precipitada de 26,58 mm para 53,17 mm nota-se o aumento da parcela de água percolada e diminuição da parcela armazenada para os três Módulos de TV. Além disso, houve aumento da parcela de água escoada para o Módulo II, e consequente diminuição da parcela armazenada.



Para lâmina precipitada de 106,33 mm

Figura 52 - Gráfico comparativo das parcelas escoadas, armazenadas e percoladas.

Notadamente, a partir do 2º ensaio, as parcelas percoladas de água foram maiores que as parcelas armazenadas. No entanto, uma diferença mais expressiva entre essas lâminas só ocorreu a partir do 3º ensaio, o qual teve lâmina de 106,33 mm.

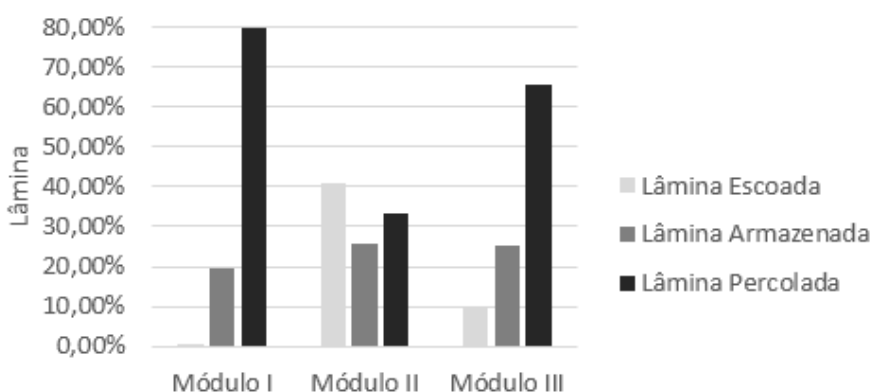


Para lâmina precipitada de 159,50 mm

Figura 53 - Gráfico comparativo das parcelas escoadas, armazenadas e percoladas.

Comparando as lâminas de 106,33 mm e 159,50 mm com as anteriores, as lâminas percoladas seguiram tendo uma relação inversamente proporcional às lâminas armazenadas para os três módulos. Neste caso, houve diminuição da lâmina percolada para o módulo III, e possivelmente, consequente aumento da lâmina armazenada.

Finalmente, comparando as lâminas precipitadas de 159,50 mm e 319,00 mm percebe-se um comportamento similar nos dois ensaios, nos quais para os três módulos as lâminas percoladas seguiram maiores que as lâminas armazenadas.



Para lâmina precipitada de 319,00 mm

Figura 54 - Gráfico comparativo das parcelas escoadas, armazenadas e percoladas.

Para o módulo II, a pequena diminuição da lâmina percolada pode ser explicada devido ao aumento da lâmina armazenada, e consequente diminuição do escoamento superficial.

Para o Módulo III, a partir do 3º ensaio as lâminas percoladas diminuíram gradativamente, enquanto que as lâminas armazenadas aumentaram. Ressaltando que, o início de escoamento superficial pode ser explicado pela aumento da lâmina armazenada, e possível saturação do solo.

5.8 Análise das amostras de água: pH, turbidez e cor aparente.

Foram realizadas análises de 24 amostras de água para obtenção dos parâmetros pH, turbidez e cor aparente. Das 24 amostras, foram 15 amostras de água percolada, 8 amostras das parcelas escoadas e 1 amostra da água da torneira como nível de referência. A água da torneira apresentou um pH 6,36.

Com base nessas informações, afirma-se que as 23 amostras sofreram uma leve alteração de pH, alterado para uma faixa de 7,02 a 7,7. Sendo que, os valores mais altos de pH foram para as lâminas percoladas e escoadas no Módulo II, variando de 7,29 a 7,47. Enquanto que para os Módulos I e III, o pH variou na faixa de 7,02 a 7,4.

Segundo a NBR 15527/07, intitulada “Água de chuva Aproveitamento de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis – Requisitos”, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), os valores de pH da água de chuva para usos menos restritivos deve estar entre 6 e 8. Portanto, todos os valores de pH mostraram-se dentro dos limites estabelecidos pela norma.

Por outro lado, para os testes de turbidez e cor aparente, as 15 amostras de parcelas percoladas demonstraram expressivas alterações. Estando estas acima do limite mínimo aceitável de cor aparente, que deve ser $< 15 \text{uH}$ e de turbidez, sendo o aceitável $< 5 \text{uT}$.

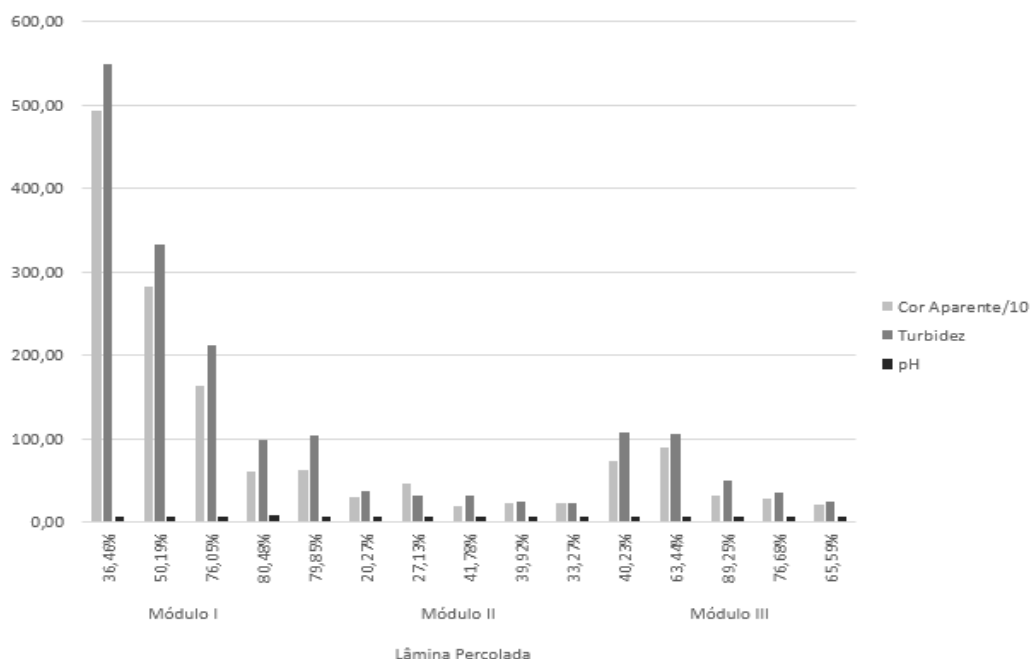


Figura 55 - Gráfico comparativo das lâminas percoladas para os parâmetros cor aparente, turbidez e pH.

Baseando-se na Figura 55, conclui-se que, os níveis mais baixos de turbidez e cor aparente foram para as 8 amostras das parcelas de água escoada. No entanto, houve 5 amostras acima dos limites mínimos para cor aparente e 5 amostras acima dos limites mínimos para turbidez.

Na Tabela 6 apresentam-se os resultados compilados de todos os ensaios realizados nos três módulos investigados, bem como os parâmetros calculados com base nas parcelas de águas escoadas, percoladas e armazenadas nos módulos de TV.

Parâmetros Analisados	Módulo I					Módulo II					Módulo III				
Duração Chuva (min)	5	10	20	30	60	5	10	20	30	60	5	10	20	30	60
Intensidade (mm/h)	319	319	319	319	319	319	319	319	319	319	319	319	319	319	319
Número de pontos para o cálculo da média móvel	4	4	8	12	12	6	6	6	12	12	6	6	6	12	12
Tempo de Retardo (min)	4,00	4,00	4,00	3,33	3,33	4,00	4,00	2,33	2,50	2,00	4,00	4,00	3,17	2,33	3,17
Tempo de Pico	4,83	11,33	20,00	29,50	41,83	4,50	4,33	11,00	26,50	37,50	5,50	11,17	19,33	29,00	46,50
Percolado (min)	3,38	5,10	5,24	5,25	5,25	1,45	1,93	2,89	3,38	3,38	2,89	5,17	5,24	5,25	5,24
Vazão de Pico (L/min)	0,89	1,85	2,73	3,28	3,65	0,59	0,94	1,80	2,04	1,59	1,06	0,56	3,42	3,15	3,15
Vazão Média Percolado (L/min)	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48
Vazão mínima (L/min)	7,08	6,99	7,02	7,70	7,16	7,42	7,40	7,28	7,31	7,27	7,07	7,18	7,12	7,19	7,11
pH	549	332	212	98	103	37	32	31	24	22	107	106	50	36	25
Turbidez (NTU)	492,50	282,40	163,00	60,00	62,70	30,70	46,30	19,00	22,30	23,40	72,70	88,70	32,70	29,00	21,50
Cor Aparente/10	x	x	x	x	20,00	2,17	2,00	2,00	2,00	1,00	x	x	x	10,00	10,00
Tempo de Retardo (min)	x	x	x	x	0,48	1,45	0,48	0,96	0,48	0,48	x	x	x	0,48	0,48
Vazão mínima (L/min)	x	x	x	x	58,83	2,50	9,17	18,50	28,50	47,50	x	x	x	10,67	47,50
Tempo de Pico	x	x	x	x	0,96	5,17	5,24	2,89	3,86	4,82	x	x	x	0,96	1,45
Escoado (min)	x	x	x	x	2	6	2	6	12	6	x	x	x	12	12
Vazão de Pico	x	x	x	x	0,50	3,08	2,81	2,01	2,40	2,36	x	x	x	0,60	0,64
Escoado (L/min)	x	x	x	x	7,17	7,41	7,47	7,37	7,31	7,29	x	x	x	7,08	7,08
Número de pontos para o cálculo da média móvel	x	x	x	x	2	27	10	8	3	7	x	x	x	5	3
Vazão Média Escoado (L/min)	x	x	x	x	3,30	11	5	3	1	1	x	x	x	2	1
pH	26,30	52,60	105,20	157,80	315,60	26,30	52,60	105,20	157,80	315,60	26,30	52,60	105,20	157,80	315,60
Turbidez (NTU)	13,43	30,82	80,89	127,40	254,80	19,36	43,43	81,70	132,92	237,45	13,94	35,34	93,75	131,04	239,83
Cor Aparente	26,58	53,17	106,33	159,50	319,00	26,58	53,17	106,33	159,50	319,00	26,58	53,17	106,33	159,50	319,00
Volume Chuva (L)	16,89	26,48	25,47	31,13	62,26	7,44	9,30	24,50	25,07	82,78	15,89	19,44	11,43	27,09	79,85
Precipitação efetiva (mm)	9,69	26,68	80,86	128,37	254,71	5,39	14,42	44,42	63,68	106,13	10,69	33,73	94,90	122,30	209,23
Lâmina de Precipitada (mm)	0,00	0,00	0,00	0,00	2,02	13,76	29,44	37,41	70,75	130,09	0,00	0,00	0,00	10,11	29,92
Lâmina Armazenada (mm)	9,69	26,68	80,86	128,37	256,74	19,14	43,87	81,83	134,43	236,22	10,69	33,73	94,90	132,41	239,15
Lâmina Percolada (mm)	16,71	26,20	25,20	30,80	61,60	7,36	9,20	24,24	24,80	81,90	15,72	19,23	11,31	26,80	79,00
Lâmina Escoada (mm)	9,59	26,40	80,00	127,00	252,00	5,33	14,27	43,95	63,00	105,00	10,58	33,37	93,89	121,00	207,00
+Percolada	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	13,61	29,13	37,01	70,00	128,70	0,00	0,00	0,00	10,00	29,60
Volume Armazenado (L)	93,76	90,56	90,89	89,08	80,31	97,15	96,47	91,20	91,02	75,42	94,11	92,89	95,69	90,36	76,08
Volume Percolado (L)	17	27	26	31	63	8	9	25	25	84	16	20	12	27	81
Volume Escoado (L)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,52	0,55	0,35	0,44	0,41	0,00	0,00	0,00	0,06	0,09
CN (Curva Número)	0,36	0,50	0,76	0,80	0,80	0,72	0,83	0,77	0,84	0,74	0,40	0,63	0,89	0,83	0,75
Capacidade Armazenamento (mm/m²)	63,54%	49,81%	23,95%	19,52%	19,52%	27,98%	17,49%	23,04%	15,72%	25,95%	59,77%	37%	11%	17%	25%
Coefficiente de Escoamento Experimental (Cexp)	36,46%	50,19%	76,05%	80,48%	79,85%	20,27%	27,13%	41,78%	39,92%	33,27%	40,23%	63,44%	89,25%	76,68%	65,59%
Coefficiente de Escoamento Experimental 2	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,63%	51,75%	55,38%	35,18%	44,36%	40,78%	0,00%	0%	0%	6%	9%

Tabela 6 - Resultados compilados de todos os ensaios realizados nos três módulos investigados, bem como os parâmetros calculados com base nas parcelas de águas escoadas, percoladas e armazenadas nos módulos de TV.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Simulador de Chuvas

Com o novo simulador de chuvas, observou-se bons resultados de CUC de 45% a 68%. Porém, recomenda-se que, para ensaios futuros seja projetado um simulador de chuvas mecânico, onde seja possível a rotação do seu eixo principal, como o simulador de Silva (2006), que conseguiu atingir um CUC de 89% utilizando um simulador mecânico com um único eixo rotacional.

6.2 Intensidade de Precipitação e Tempo de Retorno

Recomenda-se para futuras pesquisas que, haja um maior controle do volume no fluxo de água na saída torneira principal, a qual esteve totalmente aberta para passagem de água, havendo controle de fluxo somente no registro de pressão na saída da bomba.

6.2.1 *Desempenho hidrológico*

Avaliou-se o desempenho hidrológico com o tratamento dos dados obtidos através do transdutor de pressão *Levellogger* possibilitando a confecção de todos os hidrogramas de saída. As curvas dos hidrogramas de saída demonstraram resultados satisfatórios com visível tempo de retardo, o qual mede tempo transcorrido desde o momento que se inicia a chuva ao tempo inicial do hidrograma de saída. Além disso, foi perceptível a atenuação da vazão de pico de 5,26 L/min numa faixa de 1,45 L/min a 5,25 L/min.

6.2.2 *Avaliação dos substratos*

A adequação dos módulos de telhado verde, com diferentes substratos ricos em matéria orgânica e inorgânica foi fator determinante para um rápido crescimento da cobertura vegetal, tal situação foi comprovada através do acompanhamento fotográfico dos módulos de TV durante 2 meses e meio. Além disso, pode-se afirmar que os elementos contidos nos substratos como: vermiculita, casca de pinus, moinha de carvão, e turfa, contribuíram diretamente para o comportamento dos módulos de TV no que se refere à capacidade de armazenamento de água no solo, e controle quantitativo do escoamento superficial.

Os testes de umidade antecedente e posterior para cada ensaio foram fundamentais para análise comparativa de gráficos das lâminas armazenadas, escoadas e percoladas para as lâminas precipitadas de 26,58 mm; 53,17; 106,88; 159,33; 319 mm nos diferentes substratos.

Com base nos gráficos comparativos de lâminas percoladas e armazenadas, percebe-se que o Módulo II, composto unicamente pelo substrato Terra vegetal, apresentou maiores valores de lâmina escoada, sendo quase de 50% o restante do volume de água dividido entre lâmina armazenada e lâmina, as quais oscilaram inversamente proporcionais para todos os ensaios, podendo afirmar que estas foram controladas em relação a umidade antecedente.

Portanto, o maior volume de escoamento no módulo II pode ser explicado pela falta de 100% da cobertura vegetal em relação aos demais, o qual no 65º dia ainda apresentava espaços vazios, com solo exposto, propiciando menor interceptação.

7. CONCLUSÕES

Para todas as precipitações investigadas verificou-se que os módulos apresentaram parceladas percoladas (variando de 36 a 80% para o Módulo I e de 40 a 90% para o Módulo III) e armazenada (variando de 20 a 64% para o Módulo I e de 11 a 60% para o Módulo III). Para o Módulo II os resultados foram de 20 a 42% referente ao volume percolado e de 16 a 28% referente ao volume armazenado.

Os valores de C_{exp} médio foram de 0,002, 0,45 e 0,03 para os Módulos I, II e III, respectivamente; enquanto que os valores do Coeficiente (C_{total}) variaram de 0,36 a 0,89, sendo estes mais expressivos, já que foram consideradas como S, a soma das lâminas percoladas e escoada, considerando que tais parcelas de água escoariam em superfície. A capacidade de armazenamento de água variou de 8 a 90 mm/m² e o valor de CN variou de 75 a 97. Por exemplo, para uma lâmina de 53,17 mm o armazenamento foi de 27 mm/m²; 9 mm/m² e 20 mm/mm², para os Módulos I, II e III, demonstrando uma boa capacidade de armazenamento, visto que vários autores citam como ideal de 12 mm/m² a 16 mm/m².

De um modo geral, os módulos I e III foram mais eficientes que o Módulo II no que se refere a lâminas armazenadas, enquanto que para o Módulo II as porcentagens mais expressivas foram de lâminas escoadas. Para os três módulos, foi notável um balanço de massa quando do aparecimento de lâminas escoadas concomitantemente à diminuição de lâminas armazenadas, tal fato pode ser explicado pela saturação do solo vista nas umidades determinadas durante todos os ensaios.

As análises laboratoriais dos parâmetros de qualidade da água como turbidez e cor aparente demonstraram níveis bem diferentes quando comparados para lâmina percolada e escoada. Para os valores de cor aparente e turbidez houve alteração brusca na parcelas percoladas. Os valores de pH da parcela percolada foi de 7,1 a 7,5, entrada de pH de 6,4. A cor aparente variou de 190 a 5000 uC (entrada utilizada como referência para branco) e a turbidez 22 a 550 uT (entrada de 1uT).

Com base no estudo realizado, é notável a grande importância da aplicação de telhados verdes como técnica compensatória para aumento de áreas verdes, tanto para os edifícios em grandes centros urbanos como para pequenas instalações residenciais. Para a Engenharia Ambiental, o telhado verde pode ser visto como uma alternativa eficiente para solucionar os graves problemas de enchentes que os centros urbanos vem enfrentando. Sobretudo quando se trata da sua eficiência na capacidade de armazenamento da água da chuva, promovendo assim a redução do escoamento superficial, e consequentemente a atenuação da onda de cheia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, Carmosa. **Telhados verdes**. 2009. Disponível em: <<http://obviousmag.org/archives/2009/06/telhadosverdes.html>>. Acesso em: 20 abril 2014.
- AGSOLVE. **Manual de Instruções Levelogger 3.4.1**. Disponível em <http://www.solinst.com/downloads/> Acesso em 21 abril 2014.
- AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (Asce); WATER ENRONMENT FEDERATION (WEF). **Design and construction of urban stormwater management systems**. ASCE Manuals and Reports on Engerneering Practice, New York, n 77, 1992.
- ANDRADE FILHO, G. A; BRONDANI, B. **Estudo do Gerenciamento da Drenagem Urbana na Cidade de Ponta Grossa – PR**. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 23. 2005, Campo Grande. Disponível em: <www.bvsde.paho.org/bvsacd/abes23/IX-011.pdf>. Acesso em: 21 abril 2014.
- ARAÚJO, S. R, **As Funções dos Telhados Verdes no Meio Urbano, na Gestão e no Planejamento de Recursos Hídricos**. 28f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal) - Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2007.
- CANHOLI, A. P. **Drenagem Urbana e controle de enchentes**. São Paulo: Oficina de Textos, 320p, 2005.
- CARTER, T.; BUTLER, C. **Ecological impacts of replacing traditional roofs with green roofs in two urban areas**. *Cities and the Environment*. Vol. 1, art. 9, 2008.
- CARTER, T.; RASMUSSEN, T. C. **Use of green roofs for ultra-urban stream restoration in the Georgia Piedmont (USA)**. In *Proceedings of the Georgia Water Resources Conference*, Athens, Estados Unidos, 2005.
- CASTRO, A. S.; GOLDENFUM, J. A. **Uso de telhados verdes no controle quantitativo do escoamento superficial urbano**. *Atitude*. Porto Alegre - RS, Vol. 7, pp. 75-81, 2010.
- CETEM, **Centro de Tecnologia Mineral**. UGARTE, J. F. O.; SAMPAIO, J. A; FRANÇA, S. C. A. Vermiculita, p. 677 – 698, 2005.
- CHALIE MILLER, P, E., Whole Building Design Guide. **Extensive Green Roofs**. Disponível em: <<http://www.wbdg.org/resources/greenroofs.php>> Acesso em: 17 maio 2014.
- CORREA, C.B.; GONZALEZ, F.J.N. **O uso de coberturas ecológicas na restauração de coberturas planas**. In: **NÚCLEO DE PESQUISA EM TECNOLOGIA DE ARQUITETURA E URBANISMO-NUTAU**. Anais...São Paulo: Pró-reitoria de Pesquisa, Universidade de São Paulo, 2002.
- DISCOVERY, Channel. **As Sete Maravilhas da Antiguidade**, 2010. Disponível em: <http://www.discoverydocs.net/2010/01/download-the-history-channel-as-sete-maravilhas-da-antiguidade-dublado/>> Acesso em 17 Jan 2014.

FGV. **Perfil da Cadeia Produtiva da Construção Civil e da Indústria de Materiais**. São Paulo, FGV Projetos, 2006.

GETTER, K. L.; ROWE, D. B.; ANDRESEN, J. A. **Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention**, 2007. Disponível em: <www.elsevier.com/locate/ecoleng>. Acesso em: 25 abril de 2014.

GREEN ROOFS FOR HEALTH CITIES. **Green Roof Benefits**, 2009. Disponível em <<http://www.greenroofs.org/index.php/about/greenroofbenefits>> Acesso em 05 dez 2013.

GIVONI, B. **Man, climate and arquitetura**. 2 ed. London; Applied Science Publishers Ltda, 1976.

HENEINE, M. C. A. S. **Cobertura Verde**. 2008. 49f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Construção Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008. Disponível em: <<http://www.cecc.eng.ufmg.br>> Acesso em 21 abril 2014.

IBGE apud RANK, Liliane. **Relatório prospectivo setorial: 2009**. Brasília: Centro de gestão e estudos estratégicos. Brasília, 2009. 210 p, 104: il, 2008.

INTERNATIONAL GREEN ROOF ASSOCIATION. **Global Networking for Green Roofs**, 2010. Disponível em: <<http://www.igra-world.com/index.php>>. Acesso em: 21 abril 2014.

JOHNSTON, J.; NEWTON, J. **Building green: A guide for using plants on roofs, walls and pavements**. The London Ecol. Unit, London. 1996.

LOPES, A. S. **Manual de fertilidade do solo**: São Paulo: ANDA/POTAFOS, 1989.

MEDIONDO, E. M.; CUNHA, A. R. **Experimento Hidrológico Para Aproveitamento de Águas de Chuva Usando Coberturas Verdes Leves**. São Carlos, 2004. USP/SHS – Processo FAPESP 03/06580-7.

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***. Vol. 77, pp. 217-226, 2006.

MENTENS, J.; RAES, D.; HERMY, M. **Green roofs as a part of urban water management**. In *Proceedings of the 2nd Water Resources Management*, Southampton, 2003.

MOURA, C.C. de. **Avaliação quali-quantitativa das parcelas escoadas, percoladas e armazenadas em instalação experimental piloto de telhado verde extensivo com diferentes inclinações**. 61f. Trabalho de Conclusão de Curso- Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Campus de Rio Claro (SP), da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 2012.

NASCIMENTO, N. O.; BAPTISTA, M. B.; SOUZA, V. C. B. **Sistema HIDROURB para o pré-dimensionamento de soluções compensatórias em drenagem urbana: parte 1, conceitos** Vitória/ES. In *Anais do Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Vitória, 1997.

NIACHOU, A. et al. **Analysis of green roof thermal properties and investigation of its energy performance.** Energy and Buildings, v. 33, n. 7, p. 719-729, 2001.

ONHUMA JÚNIOR, A. A. **Medidas não-convencionais de reservação d'água e controle da poluição hídrica em lotes domiciliares.** 331 f. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

OLIVEIRA, Clooer Costa. **Substratos para uso em telhados verdes: Avaliação da retenção hídrica e qualidade da água de escoamento.** 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

OLIVEIRA, Eric Watson Netto de. **Telhados verdes para habitações de interesse social: retenção das águas pluviais e conforto térmico.** 86f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

OSMUNDSON, T. **Roofs gardens: history, desing and construction.** New York: W.W. Norton e Company, Inc, 1999.

PECK, S. W. et al. **Greenbacks from green roofs: forging a new industry in Canadá.** Peck and associates, 2002.

PECK apud ARAÚJO, Sidney Rocha de. **Conforto ambiental.** Soropédica, RJ,1999.

PERSCH, C. G.; TASSI, R.; ALLASIA, D. **Avaliação do comportamento de um telhado verde no controle quantitativo do escoamento pluvial a partir de um modelo de balanço de volumes de longo prazo.** In: ANAIS IX Encontro Nacional de Águas Urbanas – Belo Horizonte – MG. 2012.

PORTOLANO, M. G. **A ecologia na arquitetura: teto jardim.** 2007. 65f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ecologia) – Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2007.

POTTER, M. J. **Vermiculite.** U. S. Geological Survey, Minerals Yearbook. p. 82.1-82.3, 2001.

PRINCE GEORGE'S COUNTY. **Department of Environmental Resources. Low Impact Development Design Strategies: An Integrated Design Approach.** Maryland, 1999. Disponível em: < <http://www.lowimpactdevelopment.org>> Acesso em 21 abril 2014.

ROBERTSON, S. et al. **Stanford University's Green Dorm Water System Management Project.** Stanford, Califórnia, 2005. Disponível em: http://sustainability.stanford.edu/greendorm/involvement/coursework/CEE179_exterior_LEPfinalReport.doc> Acesso em 17 out 2013.

ROESNER, L. A., BLEDSOE, B. P. E BRASHEAR, R. W. **“Are best – management – practices criteria really environmentally friendly.”** In: **Journal of Water Resources Planning and Management**, 127 (3), 150 – 154, 2001.

SILVA, G. B. L. **Avaliação Experimental Sobre a Eficiência de Superfícies Permeáveis com Vistas ao Controle do Escoamento Superficial em Áreas Urbanas**. Tese (Doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia, Brasília, DF, 180p., 2006. Disponível em: <<http://repositorio.unb.br>>. Acesso em 21 abril 2014.

SPANGENBERG, Jörg. **Melhoria do clima urbano nas metrópoles tropicais - Estudo de caso**. Disponível em: <http://www.basis-id.de/site2006/science/01_Spangenberg_IMPROVEMENT%20OF%20URBAN%20MICROCLIMATE%20IN%20TROPICAL%20METROPOLIS.pdf> – Site traduzido. Acesso em: 30 maio 2014.

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, Porto Alegre, v. 14, n. 1, p. 139-154, jan./mar. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2014.

TASSI, R.; ALLASIA, D. G.; MELLER, A.; MIRANDA, T.; HOLZ, J.; SILVEIRA, A. L. L. (2006). **Determinação do Parâmetro CN Para Sub-Bacias Urbanas do Arroio Dilúvio** – Porto Alegre/RS. In *Anais do 1º Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste*, Curitiba, 2006.

TAYLOR, B. L. **The Stormwater Control Potential of Green Roofs in Seattle**. In *Proceedings of the Low Impact Development for Urban Ecosystem and Habitat Protection*, Seattle, Estados Unidos, 2008.

TEEMUSK, A., MANDER, U., **Rainwater Runoff Quantify and Quality Performance from a Greenroof: The Effects of Short-Term Events**, Ecol. Eng. (2007), doi:10.1016/j.ecoleng. 2007.01.009. Disponível em <http://www.elsevier.com/locate/ecoleng> Acesso em 14 dez 2013.

TOMAZ, P. **Telhado verde**, 2005. Capítulo 10. Disponível em: <<http://www.hidro.ufcg.edu.br/twiki/pub/NormaAguaDeChuva/NormaDownloads/Capitulo10-Telhadoverde.pdf>>. Acesso em 30 jan 2014.

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

TUCCI, C. E. M et al. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Editora da Universidade UFRGS, Porto Alegre, 1993.

URBAN AGGLOMERATIONS. **World Urbanization Prospects**, 2003. Disponível em: <<http://esa.un.org/unup/>> Acesso em 17 dez 2013.

WENLDING, I.; PAIVA, H. N. **Coleção Jardim e paisagismo**. Viçosa, MG: Aprenda Fácil, 2002. 116p, 2002.

YANG, J.; YU, Q.; GONG, P. **Quantifying Air Pollution Removal by Green Roofs in Chicago**. *Atmospheric Environment*, v. 42, n. 31, p. 7266-7273, oct. 2008.