



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Claudia Maria Loiola do Nascimento

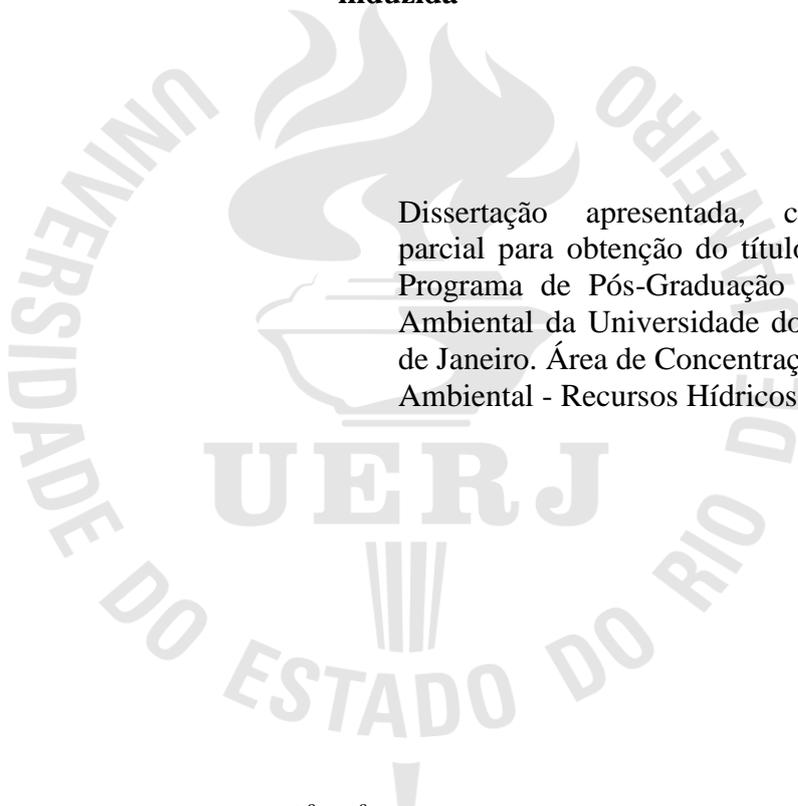
**Avaliação das relações chuva-vazão em telhados verdes modulares sob
chuva simulada induzida**

Rio de Janeiro

2015

Claudia Maria Loiola do Nascimento

**Avaliação das relações chuva-vazão em telhados verdes modulares sob chuva simulada
induzida**



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de Concentração: Saneamento Ambiental - Recursos Hídricos.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a. Luciene Pimentel da Silva

Coorientador: Prof. Dr. Wellington Mary

Rio de Janeiro

2015

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

N244 Nascimento, Claudia Maria Loiola do.
Avaliação das relações chuva vazão em telhados verdes
modulares sob chuva simulada induzida / Claudia Maria Loiola
do Nascimento. - 2015.
128 f.

Orientador: Luciene Pimentel da Silva.
Coorientador: Wellington Mary
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de
Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia Ambiental. 2. Telhados - Dissertações. 3.
Chuva artificial - Dissertações. 4. Avaliação de comportamento -
Dissertações. I. Silva, Luciene Pimentel. II. Mary, Wellington.
III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. IV. Título.

CDU 62:502.12

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta
dissertação, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Claudia Maria Loiola do Nascimento

**Avaliação das relações chuva-vazão em telhados verdes modulares sob chuva simulada
induzida**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de Concentração: Saneamento Ambiental - Recursos Hídricos.

Aprovada em 15 de maio de 2015.

Banca Examinadora:

Prof.^a Dr.^a. Luciene Pimentel da Silva
Faculdade de Engenharia - UERJ

Prof. Dr. Wellington Mary
Faculdade de Arquitetura - UFRJ

Prof. Dr. Alfredo Akira Ohnuma Junior
Faculdade de Engenharia - UERJ

Prof.^a Dr.^a. Aline Pires Veról
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo - UFRJ

Rio de Janeiro

2015

DEDICATÓRIA

Dedico este mestrado aos meus pais Yollanda F. Loiola do Nascimento (in memoriam) e José Loiola do Nascimento (in memoriam), principais responsáveis pelo que sou hoje. Ao meu filho Diogo Loiola Gomes (in memoriam), cuja doce lembrança sempre me acompanha e me inspirou em vários momentos deste trabalho e, a minha filha Joyce Loiola Gomes, grande amiga e incentivadora.

Esta conquista ofereço a vocês, agradecendo por terem permitido que eu fizesse parte de suas vidas.

AGRADECIMENTOS

A Deus que sempre me sustentou quando fraquejei.

A minha filha, amiga e parceira, pelo amor e compreensão durante todo o período do curso, inclusive participando na realização de ensaios.

A minha orientadora, Prof^a. Dra. Luciene Pimentel da Silva, pela transmissão do conhecimento, orientação, paciência, incentivo, confiança e viabilização de itens indispensáveis ao desenvolvimento da pesquisa, tornando mais fácil e agradável esse desafio.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Wellington Mary, pelas orientações, sugestões e incentivo ao longo do trabalho.

Aos demais professores do Peamb/UERJ, que compartilharam seus conhecimentos proporcionando valiosos ensinamentos.

Aos colegas de mestrado aqui representados por Joana Miloski e Fabrício Pimenta, pela boa convivência e amizade e em especial àqueles que ao longo dessa trajetória desistiram (Moises Castro Alves e Leila Herdy), dos quais mais recebi do que dei, ajudando a manter minha confiança na superação das dificuldades.

Ao Prefeito dos Campi da UERJ Prof. Dr. Ivair Lopes Machado, pelo incentivo, auxílio e permissão de utilização das dependências dos prédios, ferramentas e ocupação de espaço na cobertura do edifício Reitor Haroldo Lisboa da Cunha, para o desenvolvimento do experimento.

A minha chefia direta, e demais colegas de trabalho, aqui representados por José Roberto, Fernando, Nautali, Luiz Ricardo, pelo apoio, compreensão e auxílio nos ensaios, sempre que necessário.

Aos colegas do Setor Manutenção da UERJ, pela colaboração e apoio, em especial às equipes de: Serralheria, pelo corte, confecção e montagem de alguns itens de infraestrutura; de Hidráulica, pela execução das instalações hidráulica, necessárias ao funcionamento do sistema de simulação de chuva; de Elétrica, na execução dos pontos de energia e aterramento das bancadas; de Almoxarifado, pela recepção e guarda de materiais adquiridos; Motoristas pelo transporte dos itens de grandes dimensões; Portaria do edifício, pela sempre prestimosa atenção e a todos os demais que em algum momento contribuíram para viabilização do experimento.

A todos os demais colegas da UERJ, professores e técnicos, que me incentivaram e torceram por meu sucesso nessa empreitada.

A empresa Cidade Jardim pela doação dos módulos plásticos, composto orgânico e mix de suculentas, utilizados nos experimentos de pesquisa, bem como a orientação e assistência técnica.

A Ecotelhado®, representado pelo engenheiro Eric Watson, pela contribuição com a experiência e doação de módulos.

A Icopor, aqui representados por Francisco Rey e Alexandre Baruffi, pela doação dos produtos impermeabilizantes (Icopor Membrana Contínua e Icopor Strong) e orientação na utilização desses materiais.

MCT/FINEP. Pelo apoio e recursos para confecção das bancadas e simulador de chuva.

Aos demais colegas, Marcio Alexandre, Wagner Acioly, Wilker, Daniel, Rafael Brizzi e minha sobrinha Raquel, que contribuíram com participação nos ensaios, sem os quais essa realização ficaria comprometida

A todos que os demais que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a concretização dessa pesquisa experimental.

Jamais se desespere em meio às sombrias aflições de sua vida,
pois das nuvens mais negras cai água límpida e fecunda.

Autor desconhecido

RESUMO

LOIOLA, Cláudia Maria. **Relação chuva-vazão nos telhados verdes modulares sob chuva simulada induzida**. 2015. 128f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

A perda de vegetação natural e o aumento das superfícies impermeáveis decorrentes da expansão urbana têm mostrado que os tradicionais sistemas de drenagem urbana são insuficientes e pouco adaptáveis às alterações de uso do solo. Uma das consequências disso é o aumento da velocidade do escoamento superficial (*runoff*) que favorece as inundações, com enormes prejuízos materiais e ambientais. As inundações ocorrem geralmente quando há ocorrência de chuvas de alta intensidade. O objetivo deste trabalho foi estudar a contribuição dos telhados verdes modulares submetidos a chuvas de alta intensidade, 155mm/h com duração de 7,0 minutos para retenção e retardo do escoamento superficial. Além disso, foram determinados valores para parâmetros de modelos clássicos chuva-vazão: Método Racional (C) e CN (SCS), que poderá, futuramente, servir de modelagem hidrológica dos impactos da adoção de telhados verdes no controle das enchentes urbanas. A metodologia adotada foi de natureza experimental e envolveu a construção de bancadas com inclinação regulável para suporte dos módulos experimentais e um sistema para indução de chuvas com intensidade controlada. Foram estudados três modelos de sistema modular para telhado verde que permitem o armazenamento de água no fundo da bandeja que compõe os módulos, sendo 2 de 17,0 L (M-17 e F-17) e 1 de 4,0 L (M-4), nas condições de solo seco e solo úmido. Em cada módulo vegetado foram utilizadas 3 espécies de vegetação: *Portulaca oleracea* (Onze horas), *Callisia repens* (Dinheiro em penca) e *Apnia cordifolia* (Rosinha do sol). Os resultados demonstraram que os volumes retidos, calculados a partir da observação do *runoff*, nas diferentes situações, foram coerentes entre si e com dados relatados na literatura. Os módulos vegetados produziram os melhores resultados com solo seco e os piores resultados com solo úmido. O percentual médio de retenção, considerando todos os tipos de módulos, foi de 58% do volume total de água induzida, com retardo médio de 12 minutos no *runoff*. Os valores médios de “C” (Método Racional) foram 0,4, 0,48, 0,36, para os módulos M-17, M-4 e F-17, respectivamente e os de CN (SCS) foram 93, 95, 93, para os mesmos módulos. Conforme esperado, os maiores valores de CN foram para solos úmidos, mantendo a relação que quanto menor o volume retido, maior o *runoff* e o CN. O módulo F-17 foi o que apresentou melhor desempenho em todos os aspectos (redução do escoamento, retenção hídrica e retardo do *runoff*). Este estudo demonstra a boa contribuição que esse tipo de sistema pode proporcionar na retenção e retardo do escoamento superficial, mesmo para chuvas intensas de curta duração, principalmente após período de curta estiagem, situação comum em locais de clima tropical. Futuros estudos deverão avaliar o desempenho dos sistemas modulares de telhados verdes com outras características e intensidades de chuvas. A adoção de telhados verdes deve ser cautelosa, sobretudo pela carga extra que esse tipo de sistema representa.

Palavras-chave: Telhado verde modular; Telhado vegetado; Redução do escoamento superficial; Retenção hídrica; Chuva simulada.

ABSTRACT

LOIOLA, Cláudia Maria. **Rainfall-runoff relationship in modular Green roofs induced under simulated rainfall**. 2015. 128f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

The loss of natural vegetation and the increase of impermeable surfaces due to the urban expansion have shown that the traditional urban drain systems are ineffective and not much adaptable to the changes of ground use. One of the consequences is the increase of the speed of runoff, which furthers flood, with great material and environmental damage. The flood usually occurs because of stormwaters. The aim of this essay was to study the modular green roofs' contribution, submitted to storms, 155mm/h lasting 7,0 minutes, in retention and delay of runoff. Besides, values were determined for these rain-flow classic model parameters: Rational method (C) and CN (SCS), which will be used for hydrological modeling of the effects of using green roofs to control urban flood. The methodology used is experimental and involved building worktops with adjustable inclination to support the experimental modules and a system for controlled induction of rain intensity. Three modular system models were studied for green roof which allow the storage of water at the bottom of the tray that the modules are made up, two are 17,0 L (M-17 and F-17) and one is 4,0 L (M-4), in dry soil and moist conditions. In each vegetated module three species of vegetation were used: *Portulaca oleracea*, *Callisia repens* e *Apnia Cordfolia*. The results show that the retained volume, calculated through observing the runoff, in different situations, are coherent with each other and have data reported in literature. The vegetated modules produced the best results with dry soil and the worst results with moist soil. The average percentage of retention, considering all the types of modules, was 58% of the total volume of induced water, with a 12 minute average delay on runoff. The average values of "C" (Rational method) were 0,4; 0,48; 0,36, to modules M-17, M-4 and F-17, respectively and the ones for CN (SCS) were 93, 95, 93, to the same modules. As expected, the greatest CN values were the ones for moist ground, keeping the relation of lesser retained volume and more runoff and CN. The module F-17 presented better performance in all aspects (flow reduction, hydric retention, runoff delay). This study shows the good contribution this kind of system may provide for retention and delay runoff, even for short duration heavy rains, mainly after dry season, common situation in places with tropical weather. Future studies should assess the green roof's performance of modular systems accounting other characteristics and types of rain's intensity. Adopting green roofs must be cautious, especially the extra burden that such a system is.

Keywords: Green roof; Vegetated roof; Runoff reduction; Hydric retention; Simulated rainfall.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Detalhe esquemático de um telhado verde extensivo	24
Figura 2 –	Detalhe esquemático de um telhado verde intensivo	24
Figura 3 –	Registro de Jardim Suspenso da Babilônia.	25
Figura 4 –	Representação gráfica do que seria uma grande edificação no período antigo com telhado vegetado.....	25
Figura 5 -	Foto do Palácio Palácio Capanema, sede do Ministério da Educação, no Rio de Janeiro, jardim projetado por Burle Max.....	26
Figura 6 -	Sistema modular de telhado verde UGA.....	28
Figura 7 -	Sistema modular para telhados verdes, a base de resíduos de couro “a”. Com meio de suporte para vegetação envolto em feltro “b”.....	28
Figura 8 -	Estrutura modular tipo “tapete” para desenvolvimento de telhado verde.....	28
Figura 9 -	Sistema modular Hexa, Ecotelhado.....	29
Figura 10 -	Elementos modulares do Instituto Cidade Jardim (ICJ)	29
Figura 11 -	Diferença de temperatura entre telhado convencional e telhado vegetado em um dia típico na cidade de Chicago.....	31
Figura 12 -	Desenho esquemático da influência da vegetação sobre a temperatura do entorno.....	33
Figura 13 -	Equipamentos de medição de temperatura e umidade em área vegetada (I) e área pavimentada (II), em diferentes alturas.....	34
Figura 14 -	Comparação da temperatura medida nos dias 3 e 4 de novembro de 2001, com diferentes tipos de plantas (A, B, C, D, E e F), solo nu e superfície pavimentada.....	35
Figura 15 -	Comparação da transferência de calor, em 4 nov. 2001, através de diferentes superfícies.....	35
Figura 16 -	Temperatura do ar em diferentes alturas sobre a área vegetada em 3 e 4 de novembro de 2001.....	35
Figura 17	Temperatura do ar em diferentes alturas sobre a área pavimentada em 3 e 4 de novembro de 2001.....	35
Figura 18	A vegetação na mitigação da poluição do ar.....	39

Figura 19 -	Desenho experimental de telhados verdes na Escola Teófilo. Projeto HIDROCIDADES.....	47
Figura 20	Parte da cobertura do prédio onde foram instalados os experimentos.....	58
Figura 21	Localização do experimento no Campus Maracanã (Pavilhão Reitor Haroldo Lisboa da Cunha).....	59
Figura 22	Localização da UERJ no Estado do Rio de Janeiro – Brasil.....	59
Figura 23	Foto do reservatório de água de 500L para utilização nos experimentos..	61
Figura 24	Perspectiva da bancada de apoio para módulos experimentais, em tubo retangular metálico, 50 x 30mm x 1,5mm, projetada no software AutoCad 2013.....	61
Figura 25	Bancadas executadas conforme projeto.....	62
Figura 26	Detalhe da distribuição das bancadas com os módulos experimentais na cobertura do edifício.....	62
Figura 27	Placa cimentícia, 8mm de espessura, fabricação Brasilit.....	64
Figura 28	Adesivos utilizados para a montagem das caixas.....	64
Figura 29	Tela de poliéster utilizada para reforço das juntas.....	64
Figura 30	Produtos impermeabilizantes para uso interno. Icooper Membrana Contínua (esquerda) e, Icooper Membrana Contínua – Stornng (direita).....	64
Figura 31	Foto da aplicação da primeira demão do impermeabilizante Icooper Strong.....	65
Figura 32	Caixa para Unidade experimental com as 2 demãos de impermeabilizantes.....	65
Figura 33	Sistema de captação do runoff dos módulos com calha de PVC, saco de argila expandida e tela de fechamento.....	65
Figura 34	Bandejas que formam o Sistema Modular de 17 L e 4 L	67
Figura 35	Composto utilizado nos módulos Cidade Jardim.....	67
Figura 36	Composição do substrato.....	67
Figura 37	Bancada com Unidades experimentais – módulos vegetados e controle (telha).....	68
Figura 38	Módulos sem vegetação. Da esquerda para direita, F-17, M-4 e M-17....	68

Figura 39	(a) <i>Calliisia repens</i> (Dinheiro em penca), (b) <i>Aptenia cordifolia</i> (Rosinha do sol), (c) <i>Portulaca oleracea</i> (Onze horas).....	69
Figura 40	Desenho esquemático da unidade bombeadora do simulador de chuva (croqui sem escala).....	71
Figura 41	Foto da unidade bombeadora do simulador de chuva (frontal).....	71
Figura 42 -	Foto da unidade bombeadora do simulador de chuva (interna).....	71
Figura 43	Características de desempenho do bico de jato.....	72
Figura 44	Bico de jato pulverização uniforme de projeção quadrada.....	73
Figura 45	Foto dos bicos de jato HH-4.8SQ, Spraying Systems.....	73
Figura 46	Foto dos suportes de fixação dos bicos de jato (período de testes).....	73
Figura 47	Dia do plantio, em 03 dez. 2014.....	83
Figura 48	Primeira floração da <i>Portulaca oleracea</i> (Onze horas), em 08 dez. 2014 (5 dias após o plantio).....	83
Figura 49	Desenvolvimento da vegetação em 21 dez. 2014 (18 dias após o plantio).....	83
Figura 50	Vegetação nos módulos em 05 jan. 2015. Nítida predominância da <i>Portulaca oleracea</i> (Onze horas), 33 dias após o plantio.....	83
Figura 51	Módulo M-17 com presença de abelhas da espécie <i>T. spinipes</i> nas flores.....	84
Figura 52	Foto ampliada da espécie <i>T. spinipes</i> na flor da <i>Portulaca oleracea</i>	84
Figura 53	Módulos experimentais vegetados. Da esquerda para a direita, módulos Flat 17L (F-17); Sistema Modular 4L (M-4) e Sistema Modular 17L (M-17), em 24 jan. 2015.....	86
Figura 54	Módulos experimentais sem vegetação. Da esquerda para a direita, módulos Flat 17L (F-17); Sistema Modular 4L (M-4) e Sistema Modular 17L (M-17). Ensaio de 29 jan 2015.....	86
Figura 55	Foto de ensaio de 155 mm/h nos módulos vegetados, em 23 jan. 2015....	87
Figura 56	Funcionamento dos bicos no ensaio de 155 mm/h sobre módulos vegetados. 23 jan. 2015.....	87
Figura 57	Aguardando o término do runoff para quantificação do volume. Vento durante o ensaio de 23 jan. 2015.....	87

Figura 58	Funcionamento dos bicos de jato sobre módulos não vegetados. Ensaio de 28 jan. 2015.....	87
Figura 59	Relação entre CN's e volume retido em todos os tipos de nos módulos, nas condições seca e úmida.....	99
Figura 60	Relação do CN x Graus de Saturação considerando todos os módulos nas condições seca e úmida.....	100
Figura 61	Relação CN X Grau de Saturação (> 40%).....	100

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 –	Percentuais de retenção hídrica média, relatados na bibliografia consultada.....	45
Quadro 2 –	Percentuais médios de redução no escoamento, relatados na bibliografia consultada.....	46
Quadro 3 –	Maiores intensidades de chuva registradas nos pluviômetros 19 e 32 em abril 2010 e abril 2011, quando houve registros de grandes alagamentos.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Coefficiente de chuvas IDF.....	74
Tabela 2 -	Cálculo da intensidade de chuva para o pluviômetro Sabóia Lima (mm/h).....	75
Tabela 3 -	Resumo dos ensaios realizados (intensidade aplicada, dia, horário, duração, temperatura).....	86
Tabela 4 -	Resultados apurados nos ensaios com chuva simulada induzida de 155mm/h, por 7 min., em solo seco, nos módulos vegetados e sem vegetação.....	89
Tabela 5 -	Resultados apurados nos ensaios com chuva simulada induzida de 155mm/h, por 7 min., em solo úmido, nos módulos vegetados e sem vegetação.....	90
Tabela 6-	Resultados médios, por módulos, considerando tipo e condição do solo, intensidade de 155mm/h, durante 7 minutos.....	91
Tabela 7 -	Percentual médio de retenção de água nos sistemas modulares.....	92
Tabela 8 -	Duração média do <i>runoff</i> , em minutos	93
Tabela 9 -	Grau de saturação dos substratos e volumes retidos.....	94
Tabela 10 -	Coefficiente de escoamento do Método Racional (médios), condição de solo seco e úmido, intensidade de 155mm/h com duração de 7 minutos ..	97
Tabela 11 -	Valores de CN por tipo de sistema modular, vegetado sem vegetação, com solo seco (intensidade de 155 mm/h, por 7 minutos).....	98
Tabela 12 -	Valores de CN por tipo de sistema modular, vegetado e sem vegetação, com solo úmido (intensidade de 155mm/h, por 7 minutos).....	98
Tabela 13 -	Ensaio de 155 mm/h, em módulo vegetado seco, em 03 mar. 2015, como repetição do ensaio de 28 jan., sem análise de umidade do solo.....	103

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AU	Agricultura urbana
“C”	Coefficiente de escoamento
CN (SCS)	Curva Número (Soil Conservation Service)
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
C/V	Modulo com vegetação
DP	Deflúvio pluvial
EPA	Environmental Protection Association
EPS	Poliestireno expandido
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
FLL	Guidline for the planning
GS	Grau de saturação
IAF	Índice de de área foliar
ICJ	Instituto Cidade Jardim
IGRA	International Green Roof Association
IPCC	Intergovernmental Painel on Climate Change
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LAGEFIS	Laboratório de Geografia Física da UERJ
MP	Material particulado
P	Pluviosidade total
PCRJ	Prefeitura da Cidade do rio de Janeiro
Pefe	Precipitação efetiva, Q ou <i>runoff</i>
PVC	Policloreto de vinila
S	Capacidade máxima de retenção de água pelo solo
S/V	Módulo sem vegetação
SCS	Soil Conservation Service
SE	Sudeste
UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro
UGA	Universidade de Georgia em Atenas

LISTA DE SIMBOLOS

%	Porcentagem
x	Multiplicação
>	Maior
<	Menor
H ₂ O	Molécula da água
L	Litro
mL	Mililitro
cm	Centímetro
cm ³	Centímetros cúbicos
mm	Milímetro
ha	hectare
km	Quilômetro
km ²	Quilômetro quadrado
m	Metro
m ²	Metro quadrado
m ³	Metro cúbico
m/s	Metro por segundo
m ³ /s	Metro cúbico por segundo
mm/h	Milímetro por hora
km/h	Kilômetro por hora
kg	Kilograma
g	grama
rpm	Rotações por minuto
psi	Libra por polegada quadrada
Bar	Unidade de pressão
bsp	Tipo de rosca (paralela)
CV	Cavalo vapor
H	Hora
min	Minuto
seg	Segundo

SO ₂	Dióxido de enxofre
HNO ₂	Ácido nitroso
CO ₂	Dióxido de carbono
ppm	Parte por milhão
°C	Graus Celsius
°F	Grau Fahrenheit
dB	Decibéis
MP	Material particulado
pH	Potencial hidrogeniônico
P	Fósforo
Fe	Ferro
Zn	Zinco
Pb	Chumbo
Cr	Cromo
Mn	Manganês
Cd	Cádmio
Cu	Cobre
N	Nitrogênio

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	20
	Objetivo Geral	22
	<u>Objetivos Específicos</u>	22
1	TELHADOS VERDES	23
1.1	Caracterização dos telhados verdes	23
1.2	Os primeiros telhados verdes	25
1.3	A percepção dos telhados verdes no Brasil	26
1.4	Telhados verdes modulares	27
1.5	Funções dos telhados verdes	30
1.5.1	<u>Redução da temperatura – ilhas de calor</u>	30
1.5.2	<u>Redução no consumo de energia</u>	36
1.5.3	<u>Redução nos níveis de ruído</u>	37
1.5.4	<u>Mitigação da poluição do ar</u>	38
1.5.5	<u>O telhado verde como habitat animal</u>	40
1.5.6	<u>Áreas verdes e paisagem</u>	41
1.5.7	<u>Agricultura urbana</u>	42
1.5.8	<u>Retenção do <i>runoff</i> e qualidade dos efluentes pluviais</u>	44
2.	CONTROLE DAS ENCHENTES E TELHADOS VERDES	50
2.1	Relação chuva-vazão	50
2.2	Método Racional	51
2.3	Método da Curva Número - CN (SCS)	53
2.4	Análise de Parâmetros físico-hídricos dos solos	55
2.5	Relação chuva-vazão em telhados verdes	57
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	58
3.1	Localização das unidades experimentais	58
3.2	Instalações hidráulicas e elétricas	60
3.3	Bancada de apoio para módulos experimentais de telhados verdes	61
3.4	Caixas para apoio das unidades piloto experimentais de telhados verdes e sistema de coleta de <i>runoff</i>	63
3.5	Módulos tipo piloto de telhados verdes, telha ondulada (controle), solo não vegetado	66

3.6	Vegetação utilizada	68
3.7	Simulador de chuvas	70
3.8	Intensidade das chuvas induzidas	74
3.9	Parametrização das relações chuva-vazão	77
3.9.1	<u>Método Racional e coeficiente de runoff</u>	78
3.9.2	<u>SCS e o parâmetro CN</u>	78
3.10	Validação do simulador de chuvas	79
4	RESULTADOS	80
4.1	Desempenho da infraestrutura experimental básica	80
4.2	Unidades experimentais vegetadas	82
4.2.1	<u>Presença de insetos e aves</u>	83
4.3	Indução de chuvas simuladas e análise das relações chuva-vazão	85
4.4	Retenção hídrica	92
4.4.1	<u>Análise dos valores de “C”</u>	97
4.4.2	<u>Análise dos valores de CN (SCS)</u>	97
5	CONCLUSÃO	104
	REFERÊNCIAS	109
	APÊNDICE A – Quadro de registro dos resultados dos ensaios.....	116
	APÊNDICES B - Quadros de resultados das unidades experimentais M-17L, M-4L e F-17L relacionados ao coeficiente de escoamento superficial “C”	117
	APÊNDICES C - Quadros de resultados das unidades experimentais M-17L, M-4L e F-17L, relacionados ao CN (SCS), 155mm/h.....	123

INTRODUÇÃO

Problemática e Justificativa

O espaço urbano se caracteriza pela ocupação de um ambiente natural com alterações no padrão de ocupação do solo. Estudos indicam que em áreas altamente urbanizadas, com reduzidas áreas verdes, é possível perceber alterações no microclima original, com elevação da temperatura e redução da umidade. (BERNDSSON, 2010).

Segundo o censo de 2010 do IBGE¹, 84% da população brasileira habita em cidades. Essa concentração urbana caracterizada por edifícios residenciais ou comerciais via de acesso e grandes áreas pavimentadas, vem, ao longo do tempo, se expandindo em termos de espaço e densidade sobre áreas naturais, por vezes sem o devido planejamento e infraestrutura. Quando isso ocorre, são predominantemente ocupadas pela população economicamente menos favorecida, trazendo como consequência o aumento da demanda por água potável e outros serviços imprescindíveis às atividades socioeconômicas (BERNDSSON, 2010; OLIVEIRA, 2009).

Os reflexos dessa urbanização intensa sobre os processos hidrológicos têm evidenciado que as soluções tradicionais de drenagem urbana têm se mostrado insuficientes e pouco adaptáveis a essas alterações de ocupação do uso do solo, impactando diretamente aumento da velocidade do escoamento superficial (*runoff*) que facilita as inundações que provocam a deterioração da qualidade da água (superficial e subterrânea), na redução da possibilidade de infiltração da água no solo, redução da recarga dos aquíferos, além dos prejuízos ambientais, materiais e de vidas humanas (OLIVEIRA, 2009).

O Projeto HIDROCIDADES, que vem sendo desenvolvido por um conjunto de pesquisadores da Universidade do estado do Rio de Janeiro e da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, com suporte financeiro do CNPq, está associado às questões relacionadas à conservação da água em meio urbano e periurbano (PIMENTEL DA SILVA et al, 2008).

Nesse contexto, este trabalho trata de uma das linhas de investigação do projeto HIDROCIDADES. O uso de tecnologias de telhados verdes ou coberturas vegetadas,

¹ http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/tabelas_pdf/Brasil_tab_1_13.pdf.

associada ao controle de enchentes. Os telhados verdes podem representar uma importante medida no retardo e redução do escoamento superficial, tanto pontualmente quanto de maneira agregada, quando disseminada na bacia hidrográfica, melhorando as condições de drenagem urbana, e vêm sendo considerados uma importante medida para o desenvolvimento urbano sustentável. Outros benefícios desse tipo de cobertura são: redução do consumo energético, interceptação e dissipação solar, melhoria na qualidade do ar e conforto visual com restituição da área verde urbana, melhoria no ecossistema local, podendo ainda associar o benefício da retenção de água para fins não potáveis e a utilização desse espaço para desenvolvimento da agricultura urbana.

Embora pouco difundida no Brasil essa tecnologia não é inovadora e vem sendo praticada em vários países (Alemanha, Estados Unidos, Bélgica, Suécia e outros), inclusive na gestão de águas pluviais. Isso motiva a adequação à realidade brasileira através de materiais e espécies vegetais adequadas a essas condições climáticas.

A natureza da metodologia adotada foi física-experimental. Consistiu na indução de chuva, sobre módulos prismáticos vegetados embutidos em caixas cimentícias, com uso de um simulador que permite o controle do volume de água, projetado para esses estudos. Essas caixas foram alocadas sobre bancadas metálicas, com tampo que possibilita o ajuste de inclinação, que foram projetadas e montadas para a realização dos experimentos. Em essência, a metodologia envolveu a identificação das relações chuva-vazão nos módulos vegetados que simulam as condições de telhados verdes. Foram realizados experimentos para um conjunto de intensidades de chuva em condições de solo seco e úmido, avaliando o comportamento hidrológico do conjunto a partir da inferência dos volumes de *runoff*. Por diferença dos volumes induzidos, foi possível o cálculo dos volumes armazenados em cada um dos módulos experimentais. Envolveu também a comparação do comportamento hidrológico entre módulos experimentais nas condições de controle (superfície de telha ondulada em fibrocimento), solo nu e vegetados com diferentes configurações.

Apesar de haver considerável número de referências que tratam de pesquisas com telhados verdes essas não abordam chuvas intensas, típicas de clima tropical, o que instigou o presente estudo.

Objetivo Geral

Estudar a parametrização das relações chuva-vazão em telhado verde modular, em bancada experimental, sob chuva simulada induzida.

Objetivos Específicos

- a) Comparar os valores obtidos de “C” e CN em sistemas modulares com os dos sistemas tradicionais, disponíveis nas referências;
- b) Quantificar a retenção de água e o retardo no *runoff* nos diferentes arranjos de telhados verdes modulares e se o sistema modular atua de forma equivalente aos sistemas tradicionais
- c) Verificar se a vegetação interfere na retenção ou retardo do *runoff*;

Estrutura da dissertação

Na introdução são feitas considerações sobre a relevância do tema, além dos objetivos gerais e específicos.

O Capítulo 1 apresenta revisão sobre telhados verdes. Como surgiu, suas contribuições e benefícios. Como: redução da temperatura, redução no consumo de energia, redução nos níveis de ruído, mitigação da poluição do ar, o telhado verde como habitat animal, áreas verdes e paisagem, agricultura urbana, retenção do *runoff* e qualidade dos efluentes pluviais.

O Capítulo 2 aborda o telhado verde no controle de enchentes, as relações chuva-vazão e os métodos de cálculos de escoamento superficial.

O Capítulo 3 descreve a concepção da construção da infraestrutura preliminar para viabilização da pesquisa, espécies vegetais, materiais utilizados e a metodologia aplicada.

O Capítulo 4 apresenta e analisa os resultados obtidos, abordando outros estudos e referências no tema como comparativo.

O Capítulo 5 discute os resultados e sugere temas para futuros trabalhos que possibilitem a continuidade da presente pesquisa.

1. TELHADOS VERDES

1.1 Caracterização dos telhados verdes

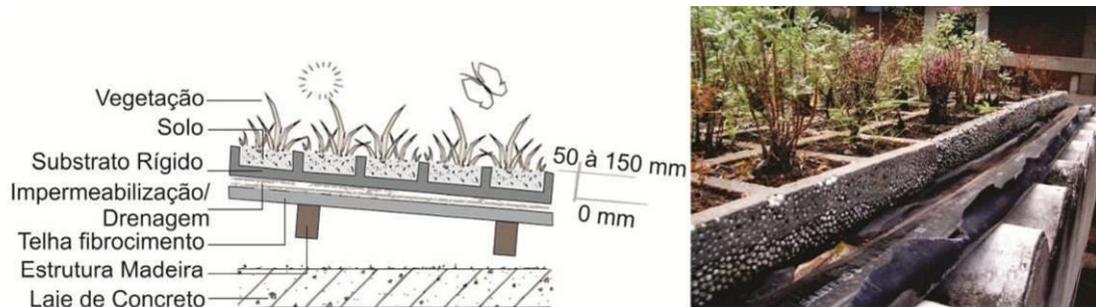
Telhado verde é uma solução construtiva que consiste na aplicação de cobertura vegetal com solo ou substrato agrícola, sobre superfície impermeabilizada ou sobre telha. É formado por camada impermeabilizante, camada anti-raízes, substrato e vegetação.

Cada elemento da composição do telhado verde possui finalidade específica, Ohnuma (2008):

- a) Laje ou telha: estrutura ou apoio principal;
- b) Camada impermeabilizante: impedir a infiltração da água para a laje ou estrutura;
- c) Membrana antirraiz: impedir a ação perfurante das raízes das plantas. É uma camada adicional caso a impermeabilização não seja resistente o suficiente;
- d) Geomanta e camada filtrante: reter partículas menores de substrato e vegetação impedindo o entupimento da camada de drenagem;
- e) substrato: elemento suporte e nutriente da vegetação;
- f) vegetação: cobertura vegetal.

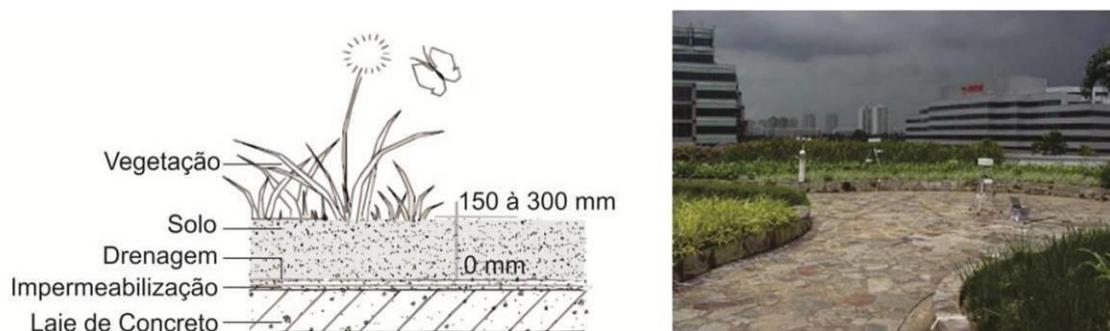
É aplicável em coberturas de diferentes tipos de edificações, residenciais, comerciais ou industriais e é considerado como alternativa viável e sustentável em substituição às coberturas tradicionais em telha ou laje. São geralmente classificados como extensivo ou intensivo, entretanto há autores que incluem o tipo semi-intensivo, Palla, Gnecco e Lanza (2010), Berardi; GhaffarianHoseini; GhaffarianHoseini (2014). O tipo extensivo (Figura 1) tem baixo peso, requer menor altura de substrato, vegetação rasteira e baixa manutenção e consumo de água quase insignificante. O tipo intensivo (Figura 2), por possuir maior altura de substrato e comportar espécies arbustivas de maior altura possui maior peso, facultada utilização do espaço como recreação, possibilita maior retenção de água da chuva, entretanto requer maiores cuidados na manutenção e irrigação (ROSSETI et al, 2013, BERARDI; GHAFFARIANHOSEINI; GHAFFARIANHOSEINI, 2014; OBERNDORFER et al., 2007).

Figura 1 – Detalhe esquemático de um telhado verde extensivo.



Fonte: ROSSETI et al (2013).

Figura 2 – Detalhe esquemático de um telhado verde intensivo.



Fonte: ROSSETI et al (2013).

Entretanto, segundo Berndtsson (2010), não há consenso entre os autores quanto à espessura (altura) que classifica os telhados verdes em intensivo e extensivo.

Vários municípios no Brasil incentivam a adoção dessa técnica. Alguns, como o Rio de Janeiro e Recife já dispõem de legislação para esse fim (Lei 6349/2012), outros, como Curitiba e São Paulo, estão com Projetos de Lei em tramitação.

Pelas diversas contribuições que apresenta, os telhados verdes têm sido estudados sob o enfoque dos detalhes construtivos, da mudança comportamental, da inserção nos meios urbanos e rurais, do desempenho como estrutura de controle do escoamento pluvial, dentre outros (SILVA SANTOS, 2013).

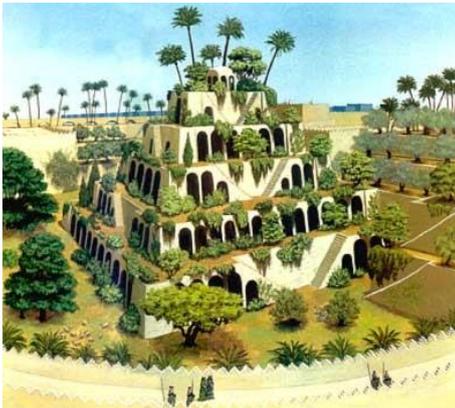
O telhado verde também é conhecido como telhado vivo, cobertura verde, ecotelhado, na língua inglesa é conhecido como: “green roof”, “living roof”, “ecological roof”, “sod roof”, “turf roof” e “roofgarden”.

1.2 Os Primeiros telhados verdes

Telhado verde não é uma solução moderna, mas um desenvolvimento tecnológico da arquitetura vernacular adotada em muitas regiões do planeta, sendo reconhecida, há tempos, por sua característica isolante, utilizável em clima extremamente quente ou frio.

Os famosos jardins suspensos da Babilônia são amplamente citados na literatura e até hoje são lembrados por sua beleza (Figuras 3 e 4).

Figura 3 - Registro de jardim suspenso da Babilônia.



Fonte:

<http://ecobriefing.wordpress.com/2009/06/14/telhado-verde-das-babilnias-aos-dias-atuais/> (acesso em 23 dez. 2013).

Figura 4 - Representação gráfica do que seria uma grande edificação no período antigo com telhado vegetado.



Fonte: <http://arquiteturasustentavel.org/o-telhado-verde-de-le-corbusier-2/> (acesso em 23 dez. 2013).

O uso do telhado verde modernista, no passado mais recente, surgiu no início do século XIX com o arquiteto modernista Charles-Edouard Jeanneret-Gris, mais conhecido como Le Corbusier, e definido como conceito arquitetônico apenas em 1920, representando novo espaço fora da edificação para ser desfrutado. Solução também utilizada pelo arquiteto Frank Lloyd Wright, pai da arquitetura verde, para integrar os edifícios à paisagem. Após a Segunda Guerra Mundial, países como Alemanha, Suíça e Áustria adotaram esse modelo de forma intensa, mas só a partir das últimas décadas do século XX vem ganhando reconhecimento e importância, em razão dos benefícios proporcionados, sendo a Alemanha talvez seu principal expoente (CANERO e REDONDO, 2010).

O conceito terraço jardim serviu de influência para vários outros arquitetos. No Brasil, foi utilizado por Lucio Costa no projeto do Palácio Gustavo Capanema (Figura 5), no Rio de Janeiro, atual sede do Ministério da Educação – MEC, inaugurado em 1947.

Figura 5.- Foto do Palácio Palácio Capanema, sede do Ministério da Educação, no Rio de Janeiro, jardim projetado por Burle Max.



Fonte: <http://arquiteturasustentavel.org/o-telhado-verde-de-le-corbusier-2/> (acesso em 23 dez. 2013).

1.3 A Percepção dos telhados verdes no Brasil

A vegetação dos telhados ainda é pouco utilizada no Brasil, algumas pesquisas objetivaram analisar a percepção da população com relação às vantagens e desvantagens desse tipo de cobertura. Em Kerbs (2012), foi constatado que nem todos os entrevistados haviam tido contato ou viram pessoalmente uma cobertura viva (verde), mas a grande maioria informou ter conhecimento da existência dessa tecnologia. As vantagens foram associadas primordialmente aos ganhos estéticos e conforto térmico, seguido das demais questões ambientais. As questões associadas aos ganhos psicológicos e de redução de ruído, foram pouco lembrados ou citados, sendo que, as maiores preocupações estavam relacionadas à manutenção, custos com mão-de-obra para implantação e aspectos técnicos como impermeabilização. Nascimento (2008), com aplicação de questionário eletrônico e email, na região de Curitiba, Paraná, buscou conhecer a percepção dos profissionais do mercado formal

de engenharia e arquitetura da região e constatou a existência de conceitos errôneos e desinformação desses profissionais quanto aos benefícios ambientais dessa técnica.

Kist (2011) pesquisando a satisfação de moradores de um condomínio na cidade de Porto Alegre que possuíam coberturas verdes, constatou que a maioria das edificações precisou de reformas no sistema de impermeabilização ou substituição da vegetação inicial, mas, apesar disso os moradores demonstraram bom nível de satisfação com essa tecnologia e recomendariam seu uso ou aplicariam novamente em outra situação.

Essas pesquisas confirmaram o crescente desejo de utilização desse sistema e demonstra que há percepção dessa técnica quanto aos ganhos ambientais, embora os entrevistados tenham considerado que esses ganhos também podem trazer aspectos considerados problemáticos relacionados aos custos de implantação e manutenção.

1.4 Telhados verdes modulares

Mais recentemente, têm surgido sistemas modulares para implantação de telhados verdes. O apelo desses sistemas é sobretudo a facilidade de implantação, com retórica de “faça você mesmo” ou da língua inglesa “DIY” ou “*Do It Yourself*”. Mas, dependendo do projeto, da localização da edificação e localização do fornecedor, pode ficar mais onerosa a implantação, salientam Andros; Maclin, (2007). Os fornecedores, eventualmente, já possuem uma espécie de “pacote completo”, que poderá envolver além dos módulos, o fornecimento do substrato e opções de espécies vegetais, e até mesmo o projeto arquitetônico e serviço de implantação. Há diferentes alternativas, algumas inclusive patenteadas. As Figuras 6 a 8 apresentam algumas dessas alternativas.

Basicamente, nos telhados verdes chamados genericamente de modulares, o conjunto substrato e planta é inserido em módulos, que se encaixam uns nos outros, na forma de um mosaico, que irá ser disposto sobre a superfície da cobertura. Geralmente, a superfície interna da unidade modular é forrada com material filtrante e/ou impermeabilizante, sobre o qual se sobrepõe o substrato agrícola e a vegetação propriamente dita. O módulo é constituído geralmente de matéria plástica. Há na literatura menções da utilização de materiais recicláveis, como couro, resíduos de material a cortado como caixas de leite, na produção dos módulos. Algumas vezes os módulos são chamados de “bandeja” (HUI; CHAN, 2008).

Figura 6 - Sistema modular de telhado verde UGA.



Fonte: Carter e Butler (2008).

Figura 7 - Sistema modular para telhados verdes a base de resíduos de couro “a”. Com meio de suporte para vegetação envolto em feltro “b”.



Fonte: Araújo et al. (2014).

Figura 8- Estrutura modular tipo “tapete” para desenvolvimento de telhado verde.



Fonte: Hui e Chan (2008).

No Brasil foram identificados, em especial, os sistemas modulares, Ecotelhado (Figura 9) e do Instituto Cidade Jardim (ICJ) (Figura 10). O ICJ tem também uma estrutura denominada “flat”, similar à estrutura modular, mas não possui paredes laterais nas bandejas.

Ambos fornecem todo o material e prestam assessoria em toda a instalação. Cuidado especial deve ser tomado na questão dos esforços estruturais para suportar o conjunto dos módulos. Isso precisará ser percebido pelo interessado.

Figura 9 - Sistema modular Hexa Ecotelhado.



Fonte: Disponível em <http://ecotelhado.com/> (acesso em 19 dez. 2014).

Figura 10 - Elementos modulares do Instituto Cidade Jardim (ICJ).

Sistema Modular

Plantio pode ser feito in loco (BÁSICO) ou pré-cultivado para entrega PREMIUM

Tela filtro cortada e colada dentro de cada módulo - tudo em uma peça

Módulo como embalagem para transporte do substrato

Sistema Flat Novo

Plantio 'in loco'

Substrato ensacado - possibilita reduzir quantidade de plástico no módulo de cultivo

Tela filtro em rolo aplicada 'in loco' - menor custo de produção

5cm a menos de plásticos (sem bordas para conter substrato)

Menor uso de matérias primas

= MENOR CUSTO

Mesmo padrão de (1) encaixe, (2) reservatório de água, (3) drenagem e (4) integração para hidráulica & elétrica

Instituto Cidade Jardim 2013. Todos os Direitos Reservados.

Fonte: <http://www.studiocidadejardim.com.br/> (Acesso em 19 dez. 2014).

O ICJ apresenta diferentes tipos modulares, sendo que esses módulos, em forma de bandeja, possuem na parte inferior um sistema interessante de pequenos reservatórios acumuladores de água. Mais adiante no texto o sistema modular ICJ será mais detalhado, já que essa foi a estrutura modular utilizada na constituição das unidades experimentais vegetadas e não vegetadas utilizadas na pesquisa desenvolvida na dissertação de mestrado. A questão da função de retenção de águas pluviais exercida pelos telhados verdes será aprofundada na seção.

1.5 – Funções dos telhados verdes

Os telhados verdes possuem várias funções comprovadas em artigos científicos e literatura especializada, sendo sua aplicação uma das propostas para a sustentabilidade de edificações que constitui ação transversal, contemplando diferentes áreas.

Dependendo das características construtivas, essas coberturas podem apresentar excelentes funções na retenção e retardo das águas pluviais, que contribui de forma positiva no controle de inundações e enchentes urbanas; no conforto térmico das edificações, cuja variação de temperatura com relação ao ambiente externo pode ser bastante significativa; na eficiência energética e redução de transmissão de calor, reduzindo o consumo de energia com refrigeração; no isolamento acústico através da contribuição na absorção de ruídos pela porosidade dos substratos e vegetação; na redução da poluição atmosférica; na biodiversidade, através da atração de aves e insetos; na possibilidade de utilização de espaços anteriormente subutilizados para outras atividades, seja recreativa, contemplativa ou com agricultura (Jonhston; Newton, 2004). Além dos benefícios estéticos, psicológicos e melhoria da qualidade de vida, inclusive com possibilidades de geração de trabalho e renda em atividades de agricultura urbana (PIMENTEL DA SILVA, 2008).

1.5.1 Redução da temperatura – ilhas de calor

O aquecimento global, o aumento de superfícies impermeáveis, excesso de calor a partir de edifícios residenciais, indústrias e o tráfego viário vêm favorecendo à contínua

elevação das temperaturas nos aglomerados urbanos. A diferença de temperatura entre a cidade e as regiões rurais é conhecida como o efeito de ilha de calor urbano, Wong et al. (2003). No verão, esse efeito pode chegar a diferenças de quase 10°C, prejudicando, drasticamente, a qualidade de vida e a saúde dos habitantes das cidades, IGRA².

Esse aumento de temperatura, em especial nas regiões centrais urbanas, traz consequências climáticas desagradáveis na esfera local colocando em perigo a saúde humana, especialmente para as cidades de climas mais quentes. A moderação nos picos de calor no ambiente local pode significar não só a sua sustentabilidade, mas também o potencial de ocupação dessas áreas sem o risco de mortalidade e morbidade causado por excesso de calor (ALEXANDRI e JONES, 2008; OLIVEIRA, 2009).

A Figura 11 demonstra, através de uma fotografia com câmera térmica, as temperaturas em duas coberturas contíguas, sendo uma com telhado convencional e outra, com telhado vegetado, na cidade de Chicago, Estados Unidos. No telhado vegetado a temperatura está em torno de 23°C (74 °F) e no telhado convencional 54 °C (130 °F), com variação de 31 °C entre a menor e maior temperatura.

Figura 11- Diferença de temperatura entre telhado convencional e telhado vegetado em um dia típico na cidade de Chicago.



Fonte: EPA – Environmental Protection Agency (2008). Adaptado pela autora (2015).

O efeito de ilha de calor explica o motivo das temperaturas rurais serem inferiores às urbanas, Alexandri e Jones (2008). Para Bianchini e Hawage (2012); Santamouris (2012) esse efeito é devido principalmente às cores escuras dos telhados dos edifícios, sobretudo nas aglomerações de edificações. Telhados com cores escuras absorvem a energia do sol e podem

² International Green Roof Association. Disponível em http://www.igra-world.com/benefits/public_benefits.php (Acesso em 05 jul. 2014).

atingir temperatura mais elevada do que a temperatura ambiente favorecendo o aumento da demanda de energia para refrigeração, conseqüentemente maiores custos, além das doenças relacionadas com calor, Ouldboukhitine et al. (2012); Alexandri e Jones (2008); Santamouris (2012).

As zonas rurais não estão expostas ao problema descrito acima, em razão da vegetação. Árvores e plantas podem ajudar a controlar a temperatura do entorno por conta do processo de evapotranspiração, Oberndorfer et al. (2007). Em áreas abertas as plantas usam a energia solar para controle da temperatura, liberando vapor e contribuindo para o ciclo da água, enquanto que nas áreas urbanas não há vegetação suficiente para arrefecer o ambiente (BIANCHINI e HAWAGE, 2012).

As superfícies de concreto também contribuem para a elevação da temperatura em razão de suas propriedades, pois capturam e armazenam o calor recebido durante o dia, liberando-o mais tarde, durante a noite, indicam Berardi; GhaffarianHoseini, Amir e GhaffarianHoseini, Ali (2014). A radiação presa nas ruas entre edifícios altos e a circulação de ar muitas vezes ruim nas cidades possibilitam aos edifícios funcionarem como obstáculos contra as correntes de ar naturais (OULDBOUKHITINE et al., 2012).

Santamouris (2012) destaca que, uma forma de reduzir o efeito das ilhas de calor é pelo aumento do albedo (medida de refletividade de uma superfície) ou por aumento de cobertura vegetal que proporcione umidade suficiente no solo para a evapotranspiração. Oberndorfer et al. (2007) relatam que um modelo de simulação regional, com 50% de cobertura verde, distribuído uniformemente por toda Toronto, mostrou redução de temperatura tão grande como 2°C em algumas áreas. Em ambientes urbanos a vegetação tem sido amplamente substituída por superfícies escuras e impermeáveis, como ruas e avenidas com pavimentos asfálticos, telhados escuros com materiais que absorvem o calor, estacionamentos e grandes áreas pavimentadas. Todas essas são condições facilitadoras para a absorção do calor. Alexandri e Jones (2008) concluíram que essa é uma das razões porque as regiões urbanas mostram-se significativamente mais quentes que o entorno de áreas suburbanas e rurais, especialmente à noite.

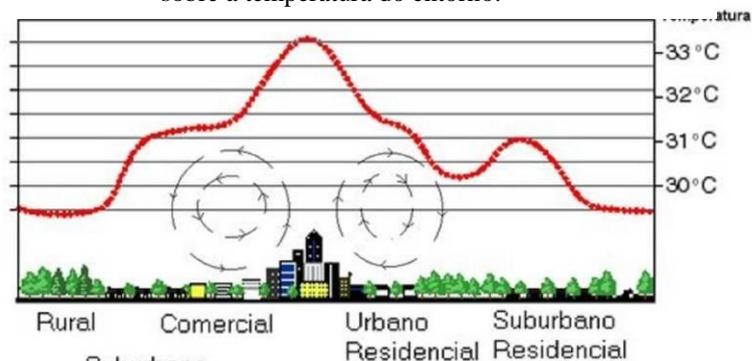
Para Alexandri e Jones (2008) e Wong et al. (2003) essa situação é decorrente da evolução das sociedades que antes ocupavam pequenos vilarejos e foram se expandindo geográfica e economicamente, com grandes construções e infraestrutura urbana, avançando sobre áreas antes ocupadas por vegetações.

Os tipos de materiais construtivos utilizados, associados à supressão de vegetação, vêm exercendo comprovada influência sobre os climas locais nas áreas urbanas,

especialmente nas regiões centrais (mais densamente povoadas) (ALEXANDRI e JONES, 2008).

A figura 12 apresenta, esquematicamente, a influência da vegetação na temperatura ambiente. As áreas mais urbanizadas a temperatura tende a ser maior em razão da pouca vegetação, das construções e das superfícies impermeáveis que também podem interferir na movimentação do ar e dos ventos. Já nas áreas suburbanas ou rurais, mais vegetadas, a temperatura tende a ser menos elevada, favorecida pela menor concentração de edificações e maior incidência de solo vegetado.

Figura 12 - Desenho esquemático da influência da vegetação sobre a temperatura do entorno.



Fonte: <http://geoconceicao.blogspot.com.br/2012/03/1-origem-das-ilhas-de-calor-os-grandes.html> (Acesso em 07 mai. 2014).

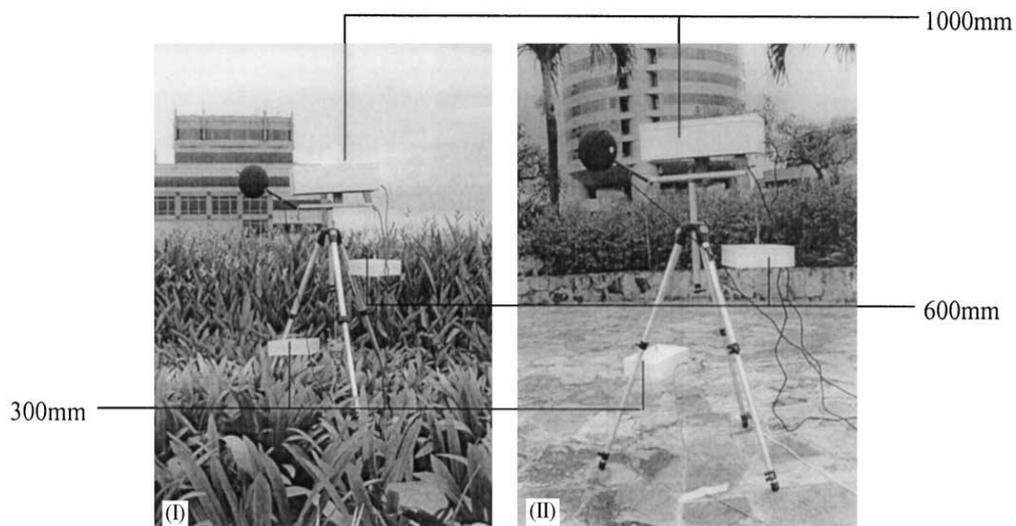
Bianchini e Hawage (2012) destacam que em geral a vegetação pode interferir no microclima por meio de sombreamento e da evapotranspiração, que converte a água do solo e das folhas em vapor d'água e em umidade, favorecendo assim a redução da temperatura do entorno. A interceptação da radiação solar pelas folhas reduz a transmissão do calor para as superfícies abaixo. Complementando, Rosseti et al. (2013) relatam que as árvores conseguem interceptar entre 60 e 90% da radiação incidente, propiciando ainda melhorias térmicas com reflexos, tanto na esfera urbana, quanto na local. A taxa de transferência de calor ou a amplitude do isolamento está relacionada ao Índice de Área Foliar (IAF³), que é a área foliar total por unidade de área do solo (m^2/m^2), e a espessura do solo. Um telhado com IAF baixo (IAF=1) pode reduzir em 50% do fluxo de calor da edificação, enquanto o IAF alto (IAF=5) pode promover reduções de até 80%.

³ IAF - Índice de área foliar, que é a área foliar total, dividida pela área de solo (m^2/m^2).

Wong et al. (2003) apresentaram estudo comparativo das temperaturas em clima tropical, em Singapura (sudeste asiático), em cobertura verde intensiva, dotada de caminho com piso pavimentado. O estudo comprovou os efeitos da cobertura vegetada na redução da temperatura. Foram comparadas temperaturas em três diferentes alturas (300 mm, 600 mm e 1000 mm), em áreas vegetadas, solo nu e em superfície pavimentada. As áreas vegetadas possuíam 06 diferentes tipos de vegetação: A (*Heliconia*), B (*Spider Lily* ou lírio da aranha vermelha), C (*Ophiopogon* ou grama preta), D (*Raphis Palm* ou palmeira-dama) E (*Pandanus* ou pândano), F (*Erythrina* ou eritrina).

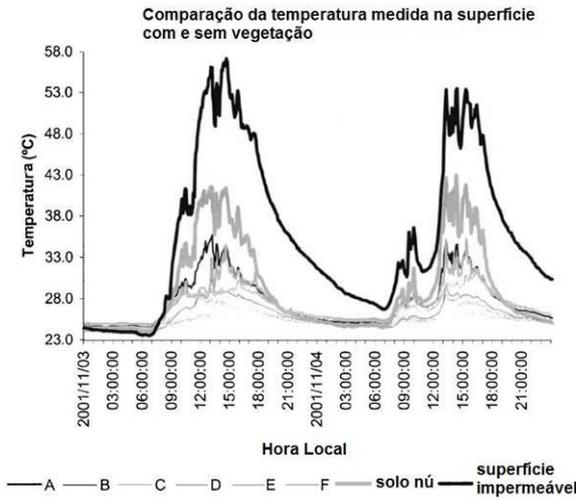
O estudo de Wong et al (2003) relacionou as faixas de variação dessas temperaturas cujos equipamentos de medição foram protegidos por abrigos em madeira branca de forma a não interferir nos valores medidos (Figura 13). A conclusão do estudo comprovou que o sombreamento das plantas influenciou fortemente para a redução da temperatura quando comparada com a superfície pavimentada (Figuras 14 e 15), bem como com proximidade da vegetação (Figuras 16 e 17), chegando a quase 25°C de diferença. Essa variação é decorrente do IAF, sendo maior nas regiões cujo tipo de vegetação tem maior dossel. A área pavimentada apresentou maior transferência de calor que a área com solo nu e com vegetação, sendo que, quanto maior a umidade, menor essa transferência.

Figura 13 - Equipamentos de medição de temperatura e umidade em área vegetada (I) e área pavimentada (II), em diferentes alturas.



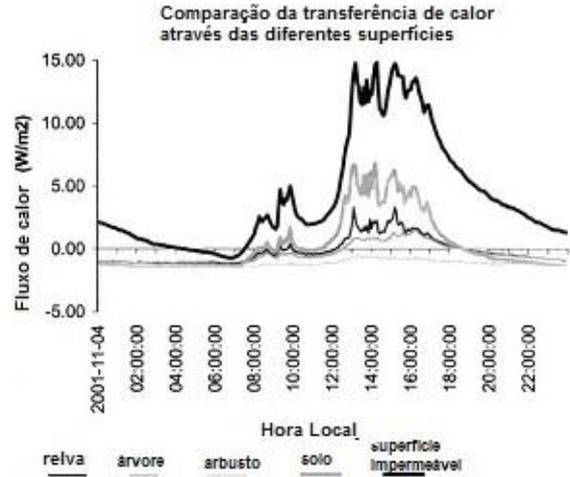
Fonte: Wong et al (2003).

Figura 14 - Comparação da temperatura medida nos dias 3 e 4 de novembro de 2001, com diferentes tipos de plantas (A, B, C, D, E e F), solo nú e superfície pavimentada.



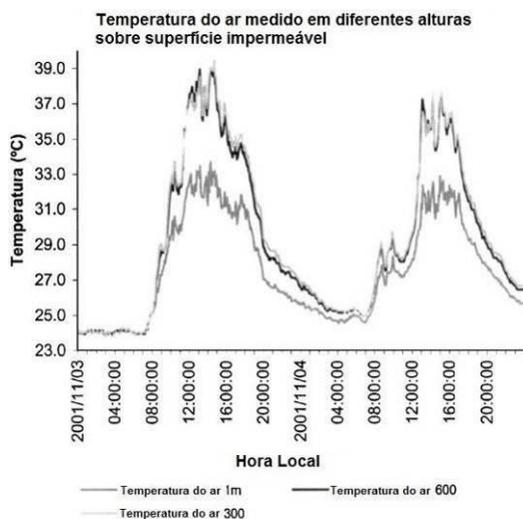
Fonte: Adaptado de Wong et al 2003.

Figura 15 - Comparação da transferência de calor, em 4 nov. 2001, através de diferentes superfícies.



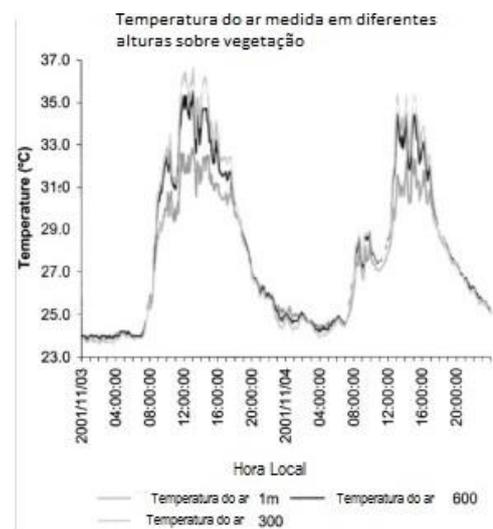
Fonte: Adaptado de Wong et al 2003.

Figura 16 - Temperatura do ar em diferentes alturas sobre a área vegetada em 3 e 4 de novembro de 2001.



Fonte: Adaptado de Wong et al 2003.

Figura 17 - Temperatura do ar em diferentes alturas sobre a área pavimentada em 3 e 4 de novembro de 2001.



Fonte: Adaptado de Wong et al 2003.

1.5.2 Redução no consumo de energia

Os benefícios para a redução do consumo de energia dependem do projeto do telhado verde, do clima local, vento, orientação geográfica e características da construção. No verão os telhados verdes reduzem o fluxo de calor a partir do sombreamento e da evapotranspiração, aumentando o isolamento e a massa térmica Berardi; GhaffarianHoseini, Amir; GhaffarianHoseini, Ali (2014), Wong et al. (2003). Oberndorfer et al. (2007) apontam registros de que a transferência de calor através de um telhado verde em Singapura, ao longo de um dia típico foi inferior a 10% de um telhado comum utilizado como referência. Em outra pesquisa mais abrangente, em Otawa, no Japão, há indicação de redução do fluxo de energia na ordem de 50% ao ano. Já em Madri, há registro de estudo onde a redução na carga de refrigeração após a aplicação da cobertura vegetada, em uma edificação, foi da ordem de 6% durante o verão. Ainda sobre essa questão, outro estudo, na Pensilvânia, confirmou que a evapotranspiração pode ser um importante contribuinte na redução da taxa de transferência de calor e, conseqüentemente, de economia de energia (OBERNDORFER et al., 2007).

Chen apud Rosseti et al. (2013), mencionam estudo comparativo em Singapura com aplicação de cobertura vegetada rasteira e arbustiva, sobre laje impermeabilizada. A observação dos resultados demonstrou redução anual no consumo de energia da ordem de 0,6% para a vegetação rasteira e 1,8% para a arbustiva, porque a magnitude do isolamento depende dos valores do índice de área Foliar (IAF), da vegetação e da espessura do solo. Esses autores relatam outro estudo que comparou a economia de energia em coberturas de espessuras de 150 mm sobre laje impermeabilizada, com redução anual no consumo de 13,5% para IAF=0,002 e 15% para IAF=5 e em cobertura de 450 mm de espessura, a redução foi de 18% para IAF=0,002, e 19,5%, para IAF=5, confirmando dessa forma a interferência da densidade da vegetação e da espessura do solo sobre o desempenho energético dos edifícios. No Brasil foram citados dois exemplos, um na cidade de Campinas, em que uma cobertura vegetada de 10 cm, sobre laje de concreto impermeabilizada, proporcionou economia de 40% no gasto diário de energia elétrica com refrigeração, e outro em Florianópolis, onde estrutura similar proporcionou redução do ganho de calor em 37% e 63%, quando comparado aos telhados cerâmico e metálico, sendo na primavera/verão 94% e 88% no outono/inverno, respectivamente.

Ouldbooukhitine et al. (2012) lembram que as flutuações de temperatura entre o dia e a noite são menores, quando comparadas à cobertura convencional, sendo que a quantidade de

água presente no substrato também é um fator que interfere no comportamento do telhado verde com relação à transferência de fluxo de energia.

1.5.3 Redução nos níveis de ruído

Áreas urbanas são geralmente muito ruidosas. Níveis elevados de ruídos podem propiciar consequências físicas e psicológicas aos indivíduos, através de stress, hipertensão, insônias, deficiência auditiva, distúrbio do sono, Rowe (2011), Rosseti et al. (2013). Áreas próximas de aeroportos, indústrias e ruas com altos edifícios formando corredores apresentam condições mais graves em níveis de ruídos. Os telhados convencionais são geralmente superfícies reflexivas, enquanto telhados verdes podem reduzir a reflexão do som em até 3 dB e melhorar o isolamento acústico em até 8 dB, IGRA e Rosseti et al. (2013).

Num estudo, Berardi; GhaffarianHoseini, Amir e GhaffarianHoseini, Ali (2014), apontam que o telhado verde pode aumentar a perda de transmissão de 5 a 13 dB em frequências baixas e médias, e de 2 dB a 8 dB, em frequências altas. Lembram outro estudo comparativo recente, com telhado de referência (tipo convencional) e duas coberturas verdes idênticas, onde a única diferença era na profundidade do substrato (75 mm e 150 mm). O estudo demonstrou que o de maior espessura foi o mais eficiente nesse sentido.

O nível de redução de ruído dependerá da geometria da construção, da distância da fonte geradora e da espessura do substrato. Entretanto, como salientam Van Renterghem e Botteldooren (2009), além de Rowe (2011), existe uma relação linear entre atenuação do ruído e espessura de substrato, até uma profundidade de 20 cm, a partir daí não se observam alterações significativas. Para Berardi; GhaffarianHoseini, Amir e GhaffarianHoseini, Ali (2014), essa redução fica mais evidente quando são implantados em edificações mais baixas, próximas ao nível da rua, diretamente expostas ao campo sonoro.

Para Van Renterghem e Botteldooren (2009), essa tecnologia tem sido considerada uma importante medida quando utilizado como barreira, adicionando-se ainda as vantagens ecológicas, podendo ser aplicados tanto nos grandes centros urbanos, quanto nas áreas periurbanas, porque a vegetação, em combinação com os substratos utilizados, tanto no telhado extensivo quanto no intensivo são porosos, permitindo a interação das ondas sonoras com as partículas do substrato, atenuando os ruídos.

1.5.4 Mitigação da poluição do ar

De acordo com Rowe (2011), o ar poluído tem sido considerado o principal responsável pelo declínio na saúde humana. Os elevados níveis de ozônio têm sido associados ao aumento dos níveis de mortalidade. Esse autor informa que, um quarto das pessoas nos EUA vive em áreas cujos níveis de poluição por partículas são consideradas insalubres. No Canadá o aumento dos custos com saúde e a perda da produtividade vêm sendo associados à poluição, tendo como principais ocorrências as doenças respiratórias, como a asma, e as doenças cardiovasculares. Alguns estudos, conforme citam Jonhston e Newton (2004), indicam que as plantas possuem capacidade para remoção de poluentes. Árvores com alta relação de galhos e folhas podem reduzir em até 75% essa formação, além de possibilitar o sombreamento, que diminui a reação fotoquímica, que é um fator facilitador da formação desses poluentes.

Ainda segundo Rowe (2011), estima-se que 2000 m² de grama sem cortes em um telhado verde podem remover até 4.000 kg de material particulado. Exemplificando: um automóvel movido à gasolina produz aproximadamente 0,01 g de material particulado (MP₁₀⁴) para cada quilômetro rodado, se um veículo trafega 10.000 quilômetros por ano, logo 0,1 kg de partículas são então liberados, anualmente, para a atmosfera por esse veículo. Nessa mesma linha, Rosseti et al. (2013) citam que 1,0 m² de grama, sem cortes, é capaz de fornecer as necessidades de oxigênio de um ser humano por mais de um ano. Como exemplo, relatam que se em 20% de todos os edifícios existentes em Washington fossem instalados esse tipo de cobertura, equivaleria às funções de 17.000 árvores na remoção da poluição. Ainda, os mesmos autores relatam que em Singapura o dióxido de enxofre (SO₂) e o ácido nítrico (HNO₂) foram reduzidos em 37% e 21%, respectivamente, acima de um telhado verde.

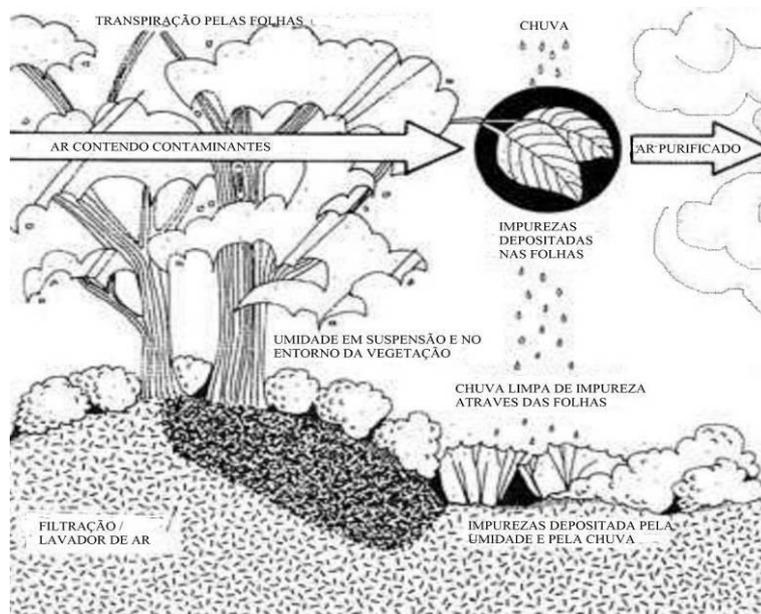
Em Getter et al. (2009), 12 coberturas com idades entre 1 e 6 anos, sendo 8 em Michigan e 4 em Maryland, confirmaram que os telhados verdes podem remover o dióxido de carbono (CO₂) da atmosfera e armazenar na biomassa vegetal, num processo conhecido como sequestro de carbono. Depois, esse carbono é transferido para o substrato através dos resíduos vegetais.

⁴ MP₁₀ – Material particulado menor que 10 micrômetros

Em áreas urbanas, árvores têm sido plantadas para proporcionar uma significativa contribuição na redução de poluentes do ar. As árvores e arbustos têm se mostrado mais eficazes na remoção de contaminantes devido a uma maior área de superfície foliar, sendo comparáveis às florestas urbanas. No entanto, em muitos locais urbanos, há pouco espaço para plantar árvores ou cultivar uma floresta urbana em razão das extensas superfícies impermeáveis, tais como: ruas, estacionamentos e telhados (ROWE, 2011; OBERNDOFER et al. 2007; BERARDI, GHAFFARIANHOSEINI AMIR E GHAFFARIANHOSEINI, ALI, 2014).

A Figura 18 mostra, esquematicamente, como a vegetação atua na mitigação dos efeitos da poluição na atmosférica.

Figura 18 - A vegetação na mitigação da poluição do ar.



Fonte: Johnston, Jacklyn and Newton, John, 2004, f. 14. (modificado).

Para Rowe (2011), não há dúvidas quanto ao aquecimento global. A elevação da temperatura tem coincidido com o aumento da queima de combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás), decorrentes da prestação de serviços de energia, que liberam CO₂ antropogênico para a atmosfera, desde aproximadamente 1850, que corresponde ao período da Revolução Industrial. Dados do IPCC⁵ (2013) indicam que as emissões continuaram a crescer

⁵ IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change 2013 (disponível: <http://www.climatechange2013.org/>. Acesso em 05 jul. 2014).

e a concentração de CO₂ aumentou, até o final de 2011, para mais de 390 ppm, ou seja, 40 % acima do nível pré-industrial, ROWE (2011).

Nesse contexto, a cobertura verde pode contribuir na redução do CO₂, pois o dióxido de carbono já é naturalmente sequestrado durante a fotossíntese, somando a esse há os demais benefícios (contribuição na redução: da temperatura, das ilhas de calor, consumo de energia), (ROWE, 2011; OBERNDOPFER et al. 2007; BERARDI, GHAFARIANHOSEINI AMIR E GHAFARIANHOSEINI, ALI, 2014; ROSSETI et al., 2013).

1.5.5 O telhado verde como habitat animal

A vegetação das coberturas também tem se mostrado uma promessa de contribuição para a conservação dos habitats locais. Estudos têm documentado, em vários países, a presença de comunidades de invertebrados e aves. São insetos como: besouros, formigas, moscas, abelhas, aranhas e cigarrinhas. Espécies raras e incomuns de besouros e aranhas também foram registradas em telhados verdes. Positivamente correlacionada com a riqueza de espécies de plantas, Canero e Redondo (2010) e Rosseti et al. (2013). Estes resultados têm mobilizado organizações conservacionistas na promoção de habitats em telhados vivos, particularmente na Suíça e no Reino Unido, incentivando a discussão da implantação desse tipo de estratégia para maximizar a biodiversidade (CANERO e REDONDO, 2010; OBERNDERFER, 2007; BRENNEISEN, 2006).

A vida nesse tipo de cobertura é facilitada pela água e alimentos oferecidos para os insetos e aves, podendo ainda servir de abrigo às aves e seus ninhos contra seus predadores naturais, intempéries ou nas migrações. Entretanto, nem todos os telhados verdes oferecem condições e atrativos para as aves, cuja demanda dependerá das espécies vegetais plantadas, manutenção e da arquitetura do telhado, Brenneisen (2006). Por outro lado, Canero e Redondo (2010) destacam que as aves também podem danificar a vegetação dos telhados, principalmente na fase de implantação, quando as espécies são mais frágeis. Outra possibilidade desagradável é a introdução inadvertida de plantas e animais que podem ser prejudiciais à espécie vegetativa. As ervas daninhas, por exemplo, são normalmente introduzidas por pássaros. Além da possível contaminação pelos fertilizantes, os excrementos das aves contaminam a água escoada dessas coberturas com altas concentrações de nutrientes. As aves podem ainda transportar organismos infecciosos (CANERO e REDONDO, 2010).

Os benefícios para a vida selvagem dependem do tamanho e densidade da vegetação. As árvores oferecem apoio aos insetos que por sua vez fornecem o alimento para diferentes espécies de aves, até mesmo para algumas espécies de morcegos. Geralmente são as espécies de árvores nativas que apresentam melhor comportamento, uma vez que terá evoluído juntamente com os animais que dependem delas (JONHSTON e NEWTON 2004).

Brenneisen (2006) destaca que os telhados vegetados devem ser projetados com profundidades de substratos variáveis e regime de escoamento que crie um mosaico de micro-habitats sob a superfície do solo, de modo a facilitar colonização mais diversificada de flora e fauna. Em períodos extremamente secos, ao contrário das espécies estabelecidas no chão, os animais não tem condições de recuar para maiores profundidades, devendo essa tecnologia ser vista como solução menos ornamental e mais ecológica, do ponto de vista biótico.

O excesso de aves próximo às edificações incomodam as pessoas que não gostam ou não estão acostumadas com os ruídos produzidos pelos bandos. Há registros de edificações cujas fachadas ficaram respingadas pelos excrementos das aves.

Os telhados vegetados não podem ser substitutos dos habitats da vida selvagem ao nível do chão pela falta de condições de muitos animais ali chegarem. Apesar de se mostrarem como promessa de contribuição local para o habitat animal e conservação de espécies, essa questão tem recebido pouca atenção (BLANK et al., 2013; JONHSTON e NEWTON 2004).

1.5.6 Áreas verdes e paisagem

A vegetação implantada nas coberturas ou superfícies verticais não consegue compensar integralmente a perda de vegetação natural decorrente da urbanização. Entretanto, mostra-se como uma medida compensatória e necessária que agrega inúmeros outros benefícios, que podem ser estéticos ou psicológicos. Em áreas urbanas, mesmo se estiverem acessíveis apenas visualmente, podem ser utilizados para atividades de lazer, relaxamento e equilíbrio mental, como área contemplativa, parque recreativo, jardim ou mesmo horta, já que conforme Pimentel da Silva et al. (2008); Mary et al.(2008 e 2012); a agricultura urbana para a produção de alimentos pode proporcionar benefícios econômicos e educacionais para a população urbana.

A ausência de contato com a natureza por parte das pessoas tem sido visto como “fator contribuinte para o aumento dos níveis de stress e insatisfação da sociedade moderna”, Rosseti et al. (2013). Esse tipo de cobertura não é apenas visualmente mais agradável, alguns também oferecem jardins privados para utilização por aqueles que trabalham na edificação, como espaço para recreação informal, Johnston e Newton (2004). E, pode desempenhar um papel importante no aumento do espaço verde em áreas urbanas densamente povoadas. No Japão já são construídos com a finalidade de proporcionar espaço de amenidade aos usuários (BERTNDTSSON, 2009).

De acordo com Jonhston e Newton (2004) a beleza natural agrega valor real. Este valor é difícil de quantificar, mas num estudo comparativo entre as cidades de Manchester e Connecticut, nos Estados Unidos, os valores das propriedades residenciais arborizadas eram, em média, 6% superiores às equivalentes sem cobertura arbórea. Outro benefício relatado por esses autores foi constatado pelo geógrafo da Universidade de Delamore, Roger Ulrich, que produziu um estudo indicando que pacientes internados em ambientes com vista para árvores e vegetações necessitaram de menos atenção do corpo clínico, menores doses de remédios e permaneceram menos 24 horas no hospital do que os que tinham vista para paredes de tijolos. Sugerindo que as árvores e vegetações em geral podem aumentar a sensação de bem estar dos pacientes e reduzir os custos com os cuidados hospitalares.

1.5.7 Agricultura urbana

Os telhados verdes podem favorecer a agricultura urbana para a produção de alimentos, que podem proporcionar benefícios econômicos e educacionais para a população urbana.

Devido à sua complexidade, o ideal é que a agricultura nas coberturas (“*agriroof*”) seja pensada desde a concepção do projeto do edifício. Vários estudos têm demonstrado que a agricultura no telhado, destinada à produção de alimentos é possível, Pimentel da Silva et al. (2008); Mary et al. (2008 e 2012); Oliveira (2009); Rowe (2011). Para ser adequado para o crescimento de culturas, certo número de critérios devem ser atendidos, como fácil acesso, profundidade mínima de substrato, boa drenagem e meios sustentáveis de irrigação. Nesse contexto, apenas telhados semi-intensivo e intensivo devem ser considerados adequados para este propósito (WALDBAUM, 2008).

A forte influência do custo do combustível sobre o preço dos alimentos poderá ser o principal incentivo da agricultura urbana e periurbana. Espaços vazios ao nível do chão, nos telhados e terraços, bem como paredes podem ser adaptados ou propositadamente construído para o cultivo de alimentos. Estima-se que, se suficientemente planejado, 25% das necessidades alimentares urbanas poderiam ser nesses locais produzidas, Waldbaum (2008). Nessa linha, resíduos orgânicos podem ser compostados, processados e distribuídos para utilização local, criando um ciclo de vida saudável com aplicação de métodos biológicos sustentáveis, além de trazer benefícios para a saúde com significativa economia, diminuindo a dependência do petróleo na questão do transporte rodoviário. Alimentos cultivados localmente viajam a uma curta distância, sendo, portanto mais frescos e mais nutritivos, propiciando às pessoas, em especial as crianças, o contato com a terra e o ciclo vegetativo, ideal para a prática nas escolas, Pimentel da Silva et al. (2008). Restos da cozinha, em vez de acabar em aterros, como acontece no presente, podem ser compostados localmente, eliminando a necessidade de transporte ou reduzindo o volume de resíduos a ser coletado pelo poder público (WALDBAUM, 2008).

A agricultura urbana é praticada por diversas faixas populacionais, envolve grupos com poucos recursos econômicos, mas engloba igualmente população que procura exercer uma atividade secundária que permita combater o ócio e obter rendimento extra. Essa mesma população, por outro lado consegue ter melhor percepção das preocupações sociais e ecológicas. Aliado a esses benefícios esses espaços podem ainda oferecer recreio e lazer, atividades de relaxamento físico e psicológico, convívio intergeracional com o desenvolvimento de funções educativas e promoção da educação ambiental.

A agricultura urbana contemporânea vem ganhando destaque no cenário mundial e nacional, reafirmando-se como um fator permanente nos processos de resgate da cidadania e da sustentabilidade do ecossistema urbano. O enverdecimento de áreas edificadas visa maior integração entre espaço urbano - cidadão – natureza (MARY et al, 2012).

Waldbaum (2008) apresenta um estudo realizado pela Universidade de São Francisco em que relata que a agricultura urbana vem se intensificando em partes da Ásia, África, bem como nas Américas do Sul e Norte, em telhados, varandas, ao longo das estradas ou em terrenos baldios nas áreas urbanas. Informa ainda esse estudo, que Cuba é o único país no mundo que desenvolveu ampla infraestrutura de apoio e suporte à produção urbana de alimentos e aos seus produtores.

1.5.8. Retenção do “runoff” e qualidade dos efluentes pluviais

A camada de substrato e a vegetação nos telhados verdes constituem meios que retêm água. O volume retido irá depender de características da vegetação, da porosidade e do estado de umidade do substrato (Bianchini e Hawage, 2012), assim como das características da precipitação pluviométrica e da evapotranspiração. Dessa forma, a capacidade de retenção dos telhados verdes depende de fatores como, o número de camadas; tipo de solo, vegetação, geometria, característica construtiva, inclinação, insolação, idade, condições meteorológicas (estação do ano, temperatura do ar, umidade, condições de vento), características das chuvas (intensidade e duração) e do grau de saturação do solo imediatamente antes do evento. Acrescenta Berndtsson (2010), que o tempo de retardo do *runoff* é da ordem de 10 minutos, sendo que, em geral, o escoamento total é maior (mais rápido) quanto mais raso for o substrato e mais íngreme a declividade do telhado.

Rosseti et al. (2013) indicam que, em termos gerais, em ambientes não urbanizados, 30% da água da chuva é armazenada em aquíferos superficiais e utilizada pelas plantas, 30% ficam nos aquíferos mais profundos, abastecendo nascentes e rios, e os 40% restantes retornam à atmosfera por evapotranspiração de plantas e solo. Já nas áreas urbanas cujas taxas de impermeabilização chegam a variar de 75% a 100% dos terrenos, apenas 5% das águas pluviais atingem os aquíferos superficiais, 15% os profundos e os 75% restantes atuam sob a forma de escoamento superficial sendo encaminhadas aos rios, córregos e lagos, através das galerias de águas pluviais.

Nesse contexto os telhados verdes têm a capacidade de contribuir no controle do escoamento das águas pluviais, pela retenção ou retardo, minimizando os riscos de inundação, sendo considerado importante instrumento na sua prevenção e controle e talvez o mais importante dos benefícios (MENTENS, RAES E HERMY, 2006,); OBERNDORFER et al, 2007; BERNDTSSON, 2009; METSELAAR, 2012; NAGASE e DUNNETT, 2012; ROSSETI et al 2013; BERARDI; GHAFARIANHOSEINI, AMIR E GHAFARIANHOSEINI, ALI, 2014).

A revisão da literatura revelou predominância de estudos sobre a retenção de águas pluviais e estudos de *runoff* no Continente Europeu, quando os telhados verdes estão sujeitos ao clima temperado. No Brasil, predomina o clima tropical e espera-se que o comportamento dos telhados verdes seja diferenciado.

A captação de água da chuva para armazenamento em reservatórios, dentre outros usos, também serve para irrigação do telhado. Ohnuma (2008) relata que essas estruturas podem acumular 14 mm a mais de chuva que coberturas convencionais. Nesse contexto Berndtsson (2010) relaciona diversos autores que apresentam diferentes faixas percentuais para indicar a redução e o retardo do escoamento. Nos Quadros 1 e 2 são apresentados os percentuais de redução no escoamento devido à retenção nos telhados verdes.

Quadro 1 - Percentuais de retenção hídrica média, relatados na bibliografia consultada

AUTORES	TIPO TELHADO VERDE	TIPO DE CHUVA	FAIXA DE RETENÇÃO
METSELLAR 2012	7 diferentes espessuras (5,10, 20, 40,60,80 cm)	Natural	55 a 75%
FLL (segundo Metsallar 2012)	Extensivo e intensivo	Natural	40%, aumentando 1% a cada 10cm substrato (70% p/ 250 mm)
Wong e Jim (2014)	Extensivo 16 plataformas c/ 4 tipos 40 e 80mm	Natural	Média de 39 a 43%. 72 a 84% para chuvas <2,0mm
Graceson et al (2013)	36 decks 1,0m ² c/ 20cm (h)	Natural	44%
Getter, Rowe e Andresen (2007)	4 plataformas com inclinações (2,5,7,15,25%)	Natural 1	82%, sendo p/ inclinação 25% (75%) e 2% (85%)
Stovin (2013)	extensivo	Simulada (serie anual (modelo matemático))	3,2 a 23%
Berndsson 2010 (cita revisão de estudo)	extensivo	Natural	Espessura <25mm -88%; 25-76mm - 54%; .76mm -48%,
Mentens, Raes e Hermy (2006)	extensivo	Natural	75%- intensivo; 45%- extensivo;
Ohnuma, Almeida e Mendiondo (2014)	extensivo	Natural	30 a 57%
Lee, Lee e Han (2015)	7 pilotos (150 a 200mm)	Simulada, induzida	13 a 34% (150mm); 43 a 61% (200mm)
Carter e Rasmussem (2005)	extensivo	Natural	Média 39%
Carson et al (2013)	3 protótipos	Natural	Retenção p os protótipos (36, 47, 61%) 21 a 34% p/chuva>50mm
Stovin (2010)	protótipo	Natural	Média 34%
Palla, Gnecco e Lanza (2010)	Protótipo com 12 cm	Simulador e natural	Média 51%
Watson (2009)	Extensivo (sobre fibra de coco)	Simulada induzida	55%

Fonte: A autora, 2015

Quadro 2 – Percentuais médios de redução no escoamento, relatados na bibliografia consultada.

AUTORES	TIPO DE TELHADO VERDE		OBSERVAÇÃO
	Extensivo (%)	Intensivo (%)	
Oberndorfer et al.(2007)	66 - 69	25 - 100	extensivo < 10cm < intensivo
Berardi; GhaffarianHoseini, Amir e GhaffarianHoseini, Ali, (2014)	57 - 71,7	----	Sistema tradicional (57%), telhado extensivo com sistema de drenagem (71,7%)
Rowe (2011)	50 - 100	---	Dependendo do substrato
Mentens, Raes e Hermy (2006)	27 - 81	54	Baixa redução para alta precipitação
Gregoire; Clausen 2011	34 - 69	-----	Depende das características do telhado e condições climáticas.

Fonte: A autora, 2015.

O tipo de vegetação dos telhados também pode influenciar na quantidade de água retida ou que escoar, pois dependem da capacidade de interceptação, retenção e transpiração da planta. Nagase e Dunnett (2012) concluíram que as gramíneas são mais efetivas na redução do escoamento das águas pluviais, seguido de flores silvestres (forbs) e de vegetação ornamental (sedum). Entretanto, Berrndtsson (2010), num estudo comparativo entre substrato nu (sem vegetação) e com diferentes tipos de vegetação demonstrou que: a retenção de água foi significativamente mais eficiente no verão do que no inverno, o tipo de substrato e sua espessura são fatores-chaves na redução do escoamento e que a vegetação não é o principal fator de influência, entendimento também partilhado por Palla; Gnecco e Lanza (2010).

Com relação à influência das intensidades de chuva na retenção das águas pluviais em telhados verdes, Carter e Rasmussen (2005), destacam que a retenção, em 32 eventos pluviométricos na Grécia, variou entre 39% e 100%, tendo por média 78%. Quase todos os eventos abaixo de 12 mm demonstraram retenção acima de 90%. A menor retenção ocorreu em evento apresentando 53mm de chuva, nessa situação o comportamento do telhado verde apresentou retenção de 39%. Espera-se então que em países tropicais durante chuvas intensas e no verão em que são recorrentes, a capacidade de retenção de águas pluviais nos telhados seja menor.

Oliveira (2009) em pesquisa experimental, em Jacarepaguá, no Rio de Janeiro, observou que o telhado verde foi capaz de reter 55% da chuva simulada induzida de 42 mm/h, durante 13 minutos (9mm/m²) de telhado, comparado ao telhado testemunho.

Embora de certa forma seja desejável a máxima retenção nos telhados verdes, no contexto urbano para contribuição no controle de enchentes, as águas pluviais constituem uma fonte natural de nutrientes para as plantas, contribuindo na sua saúde e sobrevivência. A camada de drenagem dos telhados vegetados tem também função de retenção de água, porém é importante proporcionar condições que permitam que o excesso de água possa mover-se livremente para fora do telhado, Bianchini e Hawage (2012). Uma drenagem eficaz protege do excesso de água que pode comprometer as condições de desenvolvimento da vegetação. Materiais de drenagem podem ser diferentes, dependendo do sistema adotado para o telhado e das condições meteorológicas locais.

No estudo de Oliveira (2009) foram cultivadas espécies comestíveis e ornamentais em sistema de telhado verde sobre telhas onduladas de fibrocimento. O arranjo operou com sucesso dotado de sistema de irrigação fertilizado com reuso da água. Todo o efluente do telhado era drenado para reservatórios e bombeados de volta ao telhado através de um sistema “liga e desliga”, com base nos deficits de umidade dos solos. O sistema de irrigação se dava por gotejo e por alternativa de emergência, caso o sistema de gotejo apresentasse alguma falha (sobretudo entupimento), aspersores eram acionados. Para períodos de estiagem, o sistema era dotado de reservatório superior de abastecimento público (Figura 19). Nesse caso, todos os excessos, *runoff* do telhado, era retido e reaproveitado na irrigação do próprio telhado verde.

Figura 19 - Desenho experimental de telhados verdes na Escola Teófilo. Projeto HIDROCIDADES.



Fonte: Mary (2008) apud Oliveira (2009).

Apesar dos telhados verdes permitirem a redução do escoamento, eles não resolvem o totalmente o problema da redução de recarga das águas subterrâneas em áreas urbanas. Entretanto, segundo Oberndorfer et al. (2007), se em 10% das coberturas fossem instaladas coberturas vegetadas, o runoff poderia ser reduzido em 2,7%.

A qualidade das águas drenadas dos telhados pode ser alterada pelos seguintes fatores, segundo Berndtsson, (2010) e Palla; Gnecco e Lanza (2010): características construtivas do telhado e dimensão; altura do substrato (espessura), número de camadas filtrantes e tipo de material; composição do solo; tipos de vegetação; dinâmica das precipitações; estações climáticas do ano; temperatura do ar; direção e duração dos ventos; características físico-químicas das fontes poluidoras e proximidade; manutenção (fertilização).

Berndtsson (2010) lembra que a água da chuva, em geral, não é poluente, mas pode ser ácida, conter metais, pesticidas ou outros poluentes que são trazidos por fontes poluidoras ou ventos, sendo também contaminantes comuns os hidrocarbonetos, sólidos suspensos, microorganismos patogênicos e nutrientes (fósforo e nitrogênio), estes últimos os mais comuns contaminantes, juntamente com os metais pesados.

A estiagem e a evapotranspiração podem alterar as características físico-químicas do substrato, pois alguns constituintes (elementos químicos) antes dissolvidos na água precipitada passam a ter sua concentração aumentada. Sobre essa questão, Palla; Gnecco e Lanza (2010), a partir de experimentos no Japão e na Suécia, relatam que: o pH dos telhados vegetados é sempre ligeiramente básico; na primeira parte do seu tempo de vida funcionam como uma fonte de nutrientes, especialmente P (fósforo), devido à presença de fertilizantes no solo; que este se comporta como um dissipador para os metais, tanto no tipo intensivo quanto o extensivo são sumidouros de nitrogênio.

Complementando o parágrafo anterior, Berndtsson; Bengtsson e Jinno (2009) apresentam estudo em que o carbono dissolvido foi encontrado com taxas próximas de 20 vezes a encontrada na precipitação, indicando que a fonte é a matéria orgânica contida no solo e a decomposição da vegetação. Quanto à concentração média de Fe, Pb e Zn, estas apresentaram redução quando comparadas a água precipitada, indicando o bom rendimento dessas coberturas para esses metais.

Stovin (2010) e Berndtsson (2010) relatam que a vegetação tem importante papel na retenção dos metais. Foram encontradas concentrações de 61% (Cr), 24% (Mn), 93% (Pb), e 8% (Zn). Já o Cd, Cu, e Fe tiveram aumento de concentração no escoamento de superfícies vegetadas, porém com taxas bem baixas, quase imperceptíveis.

A fertilização nos telhados verdes provoca altas concentrações de nutrientes no *runoff*. Estudos avaliaram a sobrevivência e manutenção de várias espécies em modelos extensivos com vários substratos e rotinas de fertilização. Constataram que significativo número de plantas sobreviveu sem fertilização. O fósforo (P), encontrado nas águas de escoamento é geralmente originário de fertilizantes e excretas de animais, podendo também, segundo Berndtsson (2010), estar relacionado à idade do telhado ou às rotinas de fertilização. Já o nitrogênio (N) é normalmente relacionado com o tipo de solo, sua manutenção (fertilizante) e idade, assim como a relação de nitratos é dependente do tipo de vegetação.

Berndtsson; Bengtsson e Jinno (2009) recomendam que os telhados com vegetação não devam ser vistos como ferramenta para melhorar a qualidade da água de escoamento, reduzindo concentração de poluentes presentes na precipitação podendo, entretanto, ser justificado por uma ampla série de outros benefícios.

2. CONTROLE DE ENCHENTES E TELHADOS VERDES

2.1 Relação chuva-vazão

No meio ambiente natural, chuvas precipitadas sobre a superfície tendem a convergir para rios e cursos d'água, contribuindo para elevação das cotas fluviométricas. Os níveis d'água podem subir mais lentamente ou mais rapidamente, influenciados pela intensidade das chuvas e características da superfície. A configuração da área de drenagem, do leito fluvial, e o rápido aporte de volumes de águas pluviais podem provocar alagamentos e o extravasamento da vazão para fora da calha principal de escoamento fluvial. Dependendo da magnitude, esses alagamentos e inundações podem trazer diversos transtornos para a população.

Os processos envolvidos na urbanização envolvem desmatamento e diminuição das áreas de infiltração naturais, o que tem impacto direto na ocorrência das chamadas inundações urbanas. Algumas medidas visam controlar as enchentes e retardo do escoamento com a diminuição da vazão de pico. Essas medidas visam envolver inserção ou ampliação de sistemas de canalizações e canais de drenagem, ou formas mais inovadoras, que promovam a renaturalização das áreas de drenagem. A renaturalização envolve a preservação ou aumento das áreas vegetadas, das áreas de infiltração, ou ainda, o armazenamento temporário de águas pluviais em reservatórios. Ainda, no contexto da gestão das águas pluviais, outros dispositivos como poços e trincheira de infiltração, pavimentos permeáveis, reservatórios de retenção e retardo de águas pluviais, telhados verdes; entre outros, têm sido adotados.

A determinação da relação entre a chuva precipitadas e a vazão é essencial nos estudos hidrológicos e nos estudos de controle das enchentes. A estimativa das vazões a partir da precipitação é bastante complexa e depende de vários fatores como a intensidade e a duração da chuva, das características físicas e de ocupação do solo, entre outros. A relação chuva-vazão depende também do intervalo de tempo de análise. Conforme a escala de tempo se alonga a relação chuva-vazão vai se simplificando. No entanto observa-se que as enchentes urbanas são fenômenos rápidos que ocorrem em intervalos de poucos minutos ou até algumas horas.

Vários esforços técnicos e científicos foram dispensados ao longo do tempo na parametrização das relações chuva-vazão. A parametrização pode ser através de relações

matemáticas simples ou sistemas mais complexos que buscam representar todos os processos da fase terrestre do ciclo hidrológico: interceptação vegetal, infiltração e percolação, escoamentos, evaporação e transpiração.

2.2 Método Racional

Originalmente desenvolvido para estimar vazões máximas de escoamento em pequenas bacias urbanas, o método racional parte do princípio básico de que a duração da precipitação máxima é igual ao tempo de concentração da bacia em estudo. Para que essa condição seja válida deve-se admitir que a bacia seja pequena, uma vez que a duração é inversamente proporcional a intensidade (TUCCI et al. 1995 apud SARA 2013).

Esse método é o mais simples dentre todos os modelos hidrológicos que promovem a transformação da chuva em escoamento superficial. É largamente utilizado no Brasil e muitos outros países. Embora a denominação “racional” dê a impressão de segurança o método deve ser aplicado com cuidado, pois envolve simplificações e uso de coeficientes de grande subjetividade. A imprecisão do método será maior quanto maior for a área da bacia. Os limites de áreas de drenagem a que seria aplicável o método racional é polêmico. No entanto, segundo Tomaz (2012), este método não deve ser aplicado em áreas de drenagens superiores a $3,0 \text{ Km}^2$, ou quando o tempo de concentração for inferior a uma hora. O conceito de pequenas bacias é variável entre os hidrólogos, não existindo, portanto, uma correta definição. Assim, face à simplicidade de aplicação, do conhecimento e dos fatores a serem considerados, esse método têm sido bastante aplicado e difundido. O Método Racional deve ser aplicado com cuidado, pois conduz a resultados de picos de vazão maiores que outros métodos e não considera as condições antecedentes de umidade do solo (TOMAZ, 2012).

O coeficiente “C” de escoamento superficial, também conhecido como coeficiente de runoff ou coeficiente de deflúvio é, por definição, a razão entre o volume total de escoamento superficial no evento e o volume total precipitado. Esse coeficiente (C) depende também do solo, pois a infiltração decresce a medida que a chuva continua, influenciando dessa forma no grau de compactação do solo, na porosidade do subsolo e depressões onde a água pode ser armazenada, sendo ideal o coeficiente que leva em consideração maior quantidade de fenômenos que influenciam no valor de “C”, exemplo: características e uso do solo, declividade, intensidade, duração do evento, e precipitação (TOMAZ, 2012).

A equação do método é simples e exprime um estado permanente da transformação da chuva em vazão. Consta em diversas referências de hidrologia e é dada, segundo Barbosa Júnior⁶ por:

$$Q_s = C \cdot i \cdot A \quad (1)$$

Sendo Q_s o escoamento superficial em m^3/s ; i a intensidade da chuva m/s ; A , área de drenagem em m^2 ; C o coeficiente de escoamento superficial (*runoff*).

A Equação 1 pode ser reescrita por:

$$Q_s = c_c \cdot C \cdot i \cdot A \quad (2)$$

Onde c_c é o coeficiente de correção para as unidades. Por exemplo, em termos de unidades adotadas em projetos, Q em m^3/s , i em mm/h e A em ha .

$$Q_s (m^3 / s) = \frac{C \cdot i(mm/h) \cdot A(ha)}{360} = 0,00278 C \cdot i(mm/h) \cdot A(ha) \quad (3)$$

Que corresponde a $c_c \cong 0,00278$

Ou para Q em m^3/s , i em mm/h e A em km^2 .

$$Q_s = (m^3 / s) = \frac{C \cdot i(mm/h) \cdot A(km^2)}{3,6} = 0,278 \cdot C \cdot i(mm/h) \cdot A(km^2) \quad (4)$$

Nesse caso $c_c \cong 0,278$

⁶ <http://www.academia.edu/9476587/Elementos_de_Hidrologia_Aplicada> Acesso em 12 fev. 2015

2.3 Método da Curva Número - CN (SCS)

Criado nos Estados Unidos em 1954 pelo Soil Conservation Service (SCS) é um modelo desenvolvido para calcular o escoamento superficial. Nesses cálculos são considerados tipo de solos, altura da precipitação e a umidade antecedente. Tendo ainda como principais parâmetros o potencial máximo de retenção de água pelo solo e a abstração inicial. É considerado empírico por alguns pesquisadores e semiempírico por outros, vêm sendo muito utilizado em vários países, inclusive no Brasil. Em áreas urbanas é utilizado principalmente para dimensionamento de sistemas de drenagem⁷.

O SCS propôs uma equação empírica para o cálculo dos volumes de escoamento superficial, em função do valor também empírico, denominado CN. O modelo pressupõe que a bacia hidrográfica tem capacidade de retenção máxima de água denominada “S”. Ao mesmo tempo é possível a determinação do valor infiltrado total (VIT). A equação se baseia na proporcionalidade da Equação 5.

$$\frac{VIT}{S_{\max}} = \frac{PEFE}{P - ABSI} \quad (5)$$

Nesse caso P é a precipitação total; ABSI as perdas denominadas abstrações iniciais, como as que ocorrem nas depressões dos solos e evaporação direta. PEFE é a precipitação efetiva, ou a parte da precipitação que se transforma em escoamento superficial, dados em (mm), em termos de altura pluviométrica.

A partir de estudos chegou-se a equação 6.

$$ABSI = 0,2 \cdot S_{\max} \quad (6)$$

Dado que a precipitação total (P) é o somatório da precipitação efetiva (PEFE), da abstração inicial (ABSI) e do volume infiltrado total (VIT), tem-se a equação:

(7)

⁷ As Equações 5 a 9 são baseadas em diversos textos da literatura, dentre eles Tucci (1985), Tomaz (2011).

$$P = PEFE + 0,2S_{\max} + VIT$$

Da combinação das equações 6 e 7 resulta a equação 8 para fins de cálculo da precipitação efetiva ou escoamento superficial.

$$PEFE = \frac{(P - 0,2S_{\max})^2}{P + 0,8S_{\max}} \quad (8)$$

Com o estudo das relações P e PEFE para várias bacias o SCS chegou a equação 9 (S_{\max} em mm).

$$S_{\max} = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (9)$$

Os valores de CN são usualmente tabelados em livros e manuais de hidrologia, sendo que áreas impermeáveis, como telhados convencionais, normalmente assumem o valor de CN igual a 98. Esses valores foram estabelecidos a partir dos estudos do SCS com 4.000 tipos de solo dos estados Unidos. No Brasil não há estudos, nessa dimensão, para caracterização dos tipos de solos quanto ao CN.

Lorenzini Neto et al. (2013) relatam que há poucos estudos com relação ao CN em telhados verdes, e os existentes apresentam valores com diferenças substanciais, entre 61 e 83. Um intervalo de CN entre 75 e 95 pode representar, em drenagem pluvial urbana, um aumento de 10% no volume escoado. Destacam ainda que o critério de utilização das perdas iniciais nos telhados verdes pode conduzir a resultados discutíveis, devido a reduzida capacidade de interceptação e retenção superficial desses sistemas. Nesse mesmo estudo, quando considerada as perdas iniciais, resultariam em valor médio de CN igual a 94. Sendo que esse valor julgado incompatível para um telhado verde. Ainda nesse estudo, o CN variou entre 81 e 86, observada as condições de umidade antecedente do solo. O valor médio encontrado para os 48 eventos foi 83, sendo considerado dentro do esperado.

Já no estudo de Ohnuma Jr; Almeida Neto e Mendiondo (2014), em dois diferentes protótipos, o número CN-SCS foi 84 com gramíneas e 76 com herbáceas, sendo que o protótipo com gramínea apresentou armazenamento de água similar a de arruamentos,

enquanto ao de herbáceas assemelhou-se às condições de pastos. Segundo esses autores, além da umidade antecedente do solo, outros dados que podem interferir no resultado da retenção hídrica e conseqüentemente no escoamento superficial são: a intensidade pluviométrica e a porosidade do solo. A eficiência dos telhados verdes nesse estudo quanto à absorção de água pluvial foi de 56% do volume precipitado comparado ao telhado convencional (telha).

O número de CN encontrado no estudo de Carter e Rasmussen (2005) para 11 eventos, na Grécia, foi 88. Esse estudo foi elaborado utilizando ArcView 3.2, que é um nível de entrada do software ArcGIS, com 3 diferentes cenários. O estudo apresentou retenção média de 78%. Os eventos de até 13 mm apresentaram retenção de 90%, enquanto eventos até 5 mm apresentaram 100% de retenção. A menor quantidade retida constatada foi de 39% para evento de 54 mm. Dessa forma esse estudo que considerou que os telhados representam 30% da área impermeável de uma bacia, por si só não possibilita a retenção mínima necessária para uma bacia. Entretanto, em áreas densamente urbanizadas, onde as taxas de impermeabilização são muito elevadas, as taxas de retenção podem apresentar diferentes valores.

2.4 Análise de Parâmetros físico-hídricos dos solos

As amostras de solo para caracterização do teor de umidade, porosidade e densidade foram coletadas, imediatamente antes da realização dos ensaios, por técnico do Laboratório LAGEFIS – Laboratório de Geografia Física da UERJ, utilizando a metodologia descrita no Manual de Métodos de Análises de Solo da EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária.

Para análise da umidade foram coletadas 2 amostras por caixa, retiradas da região central dos módulos experimentais. As amostras foram denominadas de M17(1) e M17(2); M4(1) e M4(2); F17(1) e F17(2), sendo as amostras (1) referentes ao nível mais elevado das caixas e as (2) da parte mais baixa, próximas as calhas, lembrando que as bancadas foram ajustadas com inclinação de 6%. As amostras para análise do teor de umidade foram coletadas em cápsulas de alumínio de 4,0 cm de diâmetro e 3,0 cm de altura (37,7 cm³), lacradas e acondicionadas em embalagem impermeável. No laboratório as amostras foram pesadas e, posteriormente, mantidas em estufa 105 °C, por 24 horas. Após esfriar essas amostras foram novamente pesadas.

Os valores de umidade gravimétrica, volumétrica e porosidade, calculados pelas equações 10 a 13, respectivamente, e foram apresentados pelo LAGEFIS, assim como os valores de densidade real e densidade aparente.

$$Umidade\ Gravimétrica = \frac{100(a - b)}{b} \quad (10)$$

$$Umidade\ Volumétrica = \frac{100(a - b)}{c} \quad (11)$$

Onde:

a = peso da amostra úmida em gramas

b = peso da amostra seca em gramas

c = volume da amostra em centímetro cúbico

$$Porosidade\ Total = \frac{100 \cdot (a - b)}{a} \quad (12)$$

Onde:

a = densidade real em grama por metro cúbico

b = densidade aparente em gramas por centímetro cúbico

A análise para caracterização da porosidade foi coletada utilizando anéis de 5,0 cm de diâmetro com 2,0 cm de altura. Cada amostra teve um volume aproximado de 19,63 cm³. Da mesma forma que as amostras de umidade, essas foram acondicionadas, individualmente, em sacos plásticos, devidamente identificados.

O grau de saturação de uma amostra é a relação entre o volume de água e o volume de vazios, expressa em porcentagem.

Os valores de porosidade permitiram o cálculo do grau de saturação do solo que foi calculado pela Fórmula 13.

$$\% \textit{Satura\c{c}\~{a}o} = \frac{\textit{umidade volum\~{e}trica}}{\textit{porosidade}} \cdot 100 \quad (13)$$

2.5 Relação chuva-vazão em telhados verdes

A vegetação dos telhados verdes, por promover um certo represamento das águas pluviais tende a ter impactos no controle do hidrograma de vazões, alongando o tempo até a ocorrência do pico de vazão e diminuindo sua magnitude, sobretudo se adotado, de forma abrangente na área de drenagem. Nesse sentido, vários estudos sobre telhados verdes buscam a determinação de parâmetros de equações ou sistemas de equações clássicos como os que têm sido adotados em estudo hidrológicos das relações chuva-vazão. O conhecimento prévio desses parâmetros pode facilitar o projeto e uso dos telhados verdes no controle das enchentes urbanas. Além de possibilitarem aplicações das técnicas de simulação hidrológica em bacias hidrográficas agregando o impacto dessa tecnologia como medida de controle de enchentes urbanas. A localização e a configuração desses telhados verdes nas bacias podem apresentar diferentes relações chuva-vazão.

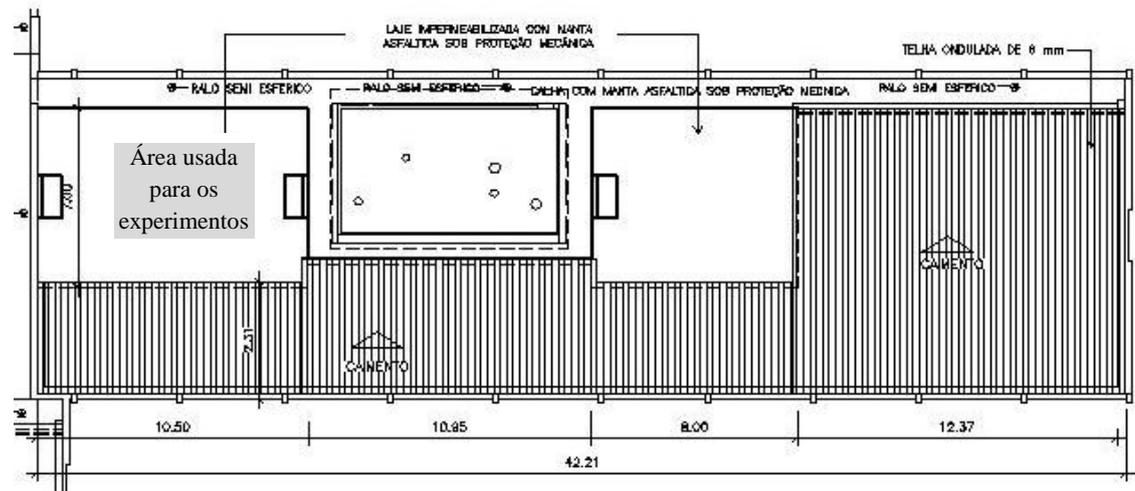
Modelos chuva-vazão são muito úteis, graças, entre outras coisas, a sua flexibilidade em prever comportamentos futuros ocasionados por alterações na ocupação do solo e nas características das chuvas.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Localização das unidades experimentais

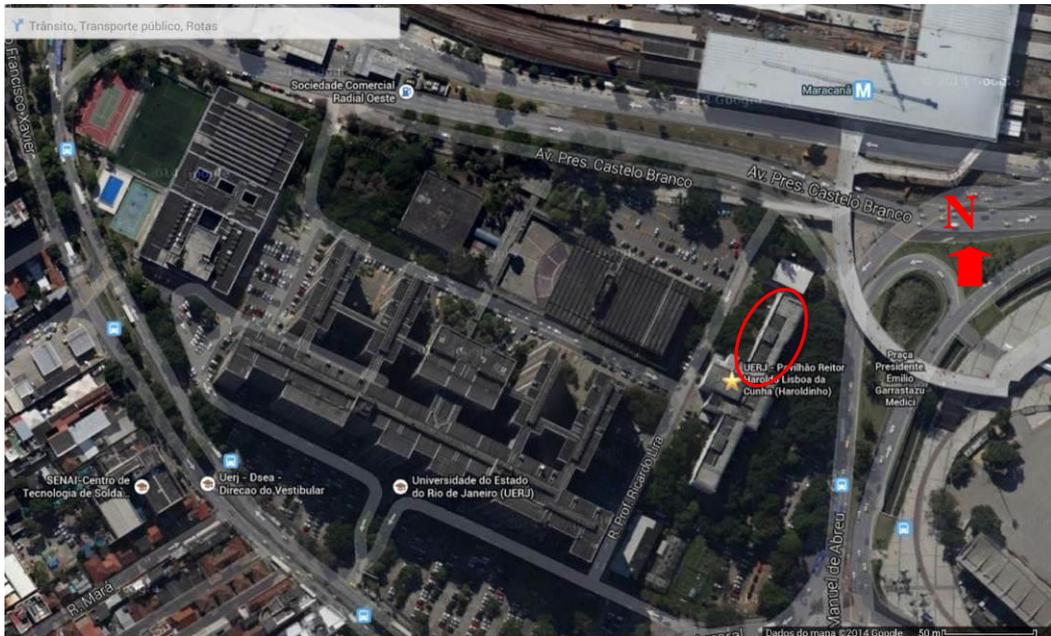
O experimento foi montado na cobertura do Pavilhão Reitor Haroldo Lisboa da Cunha, que é uma edificação de 5 pavimentos, localizada no Campus Francisco Negrão de Lima - Maracanã, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ, à Rua São Francisco Xavier, 524, Maracanã, Rio de Janeiro (Figuras 20 e 21). A Figura 22 localiza a UERJ no Estado do Rio de Janeiro, Brasil.

Figura 20 – Parte da cobertura do prédio onde foram instalados os experimentos.



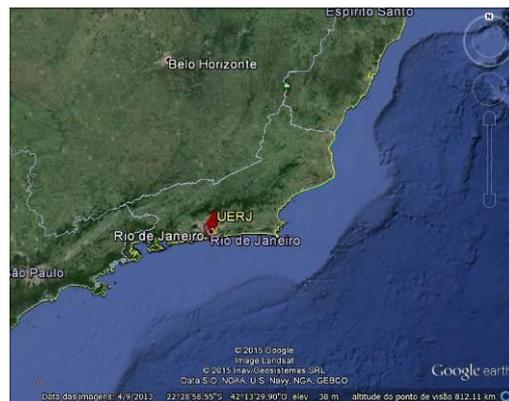
Fonte: Desenho cedido pela Prefeitura dos Campi da UERJ

Figura 21 – Localização do experimento no Campus Maracanã (Pavilhão Reitor Haroldo Lisboa da Cunha).



Fonte: www.google.com.br/maps/@-22.9108588,-43.2349057,353m/data=!3m1!1e3?hl=pt-BR. (Acesso em 24 set. 2014).

Figura 22 – Localização da UERJ no município do Rio de Janeiro _Estado do Rio de Janeiro – Brasil.



Fonte: Google Earth. (Acesso em 25 mai 2015)

As unidades experimentais para estudo das relações chuva-vazão em telhados verdes consistem de um conjunto de bancadas metálicas construídas, com ajuste de declividade da superfície de suporte, módulos em caixas construídas de placas cimentícias com diferentes arranjos de sobreposição sobre telhados. Foram adotados: módulo de controle em telha

ondulada de fibrocimento, módulo com composto agrícola, módulos vegetados e circuito hidráulico implantado para realização dos experimentos para indução de chuvas simuladas com diferentes intensidades e durações. Para realização da indução das chuvas com diferentes durações e intensidades foi projetado e construído um simulador de chuvas.

A seguir, descreve-se cada um dos elementos que compõem as unidades experimentais, as chuvas simuladas induzidas durante os experimentos, a metodologia para determinação das condições de umidade dos solos e modelo utilizado para parametrização das relações chuva-vazão nos diferentes módulos.

3.2 Instalações hidráulicas e elétricas

A água necessária aos experimentos foi proveniente de reservatório de 500L (Figura 23), em *polietileno*, instalado sobre a casa de máquinas dos elevadores do edifício, especificamente para essa finalidade. Desse reservatório deriva uma tubulação em PVC soldável de 32,0 mm, com redução para 25,0 mm, de forma a atender por gravidade aos 2 pontos de consumo com torneira e o ponto do simulador de chuvas, instalados no local do experimento.

Toda a tubulação de distribuição de água foi revestida em tubo de *Polietileno* expandido, com 5,0 mm de espessura, recoberto com papel alumínio e fita adesiva de alumínio de 50,0 mm de largura para isolamento térmico, sobretudo para minimizar eventuais impactos da temperatura da água sobre a vegetação.

O ponto de energia para funcionamento do simulador de chuva é oriundo do quadro elétrico da casa de máquinas de exaustão, existente na cobertura do edifício.

Figura 23 - Foto do reservatório de água, de 500L para utilização nos experimentos.

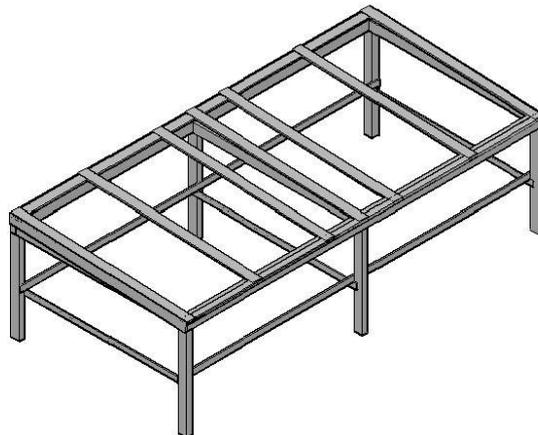


Fonte: A autora, 2015

3.3 Bancada de apoio para módulos experimentais de telhados verdes

As bancadas foram construídas em tubos retangulares de ferro pintado, de 50x30mm, com 1,5mm de espessura, conforme Figuras 24 e 25, medindo 100 x 215 cm, com altura de 60 cm, dotadas de tirante rosca total como mecanismo para regulagem de inclinação. Foram construídas 4 bancadas. A Figura 26 indica como ficou a distribuição dos módulos nas bancadas

Figura 24 - Perspectiva da bancada de apoio para módulos experimentais, em tubo retangular metálico, 50 x 30mm x 1,5mm, projetada no software AutoCad 2013.



Fonte: A autora, 2014.

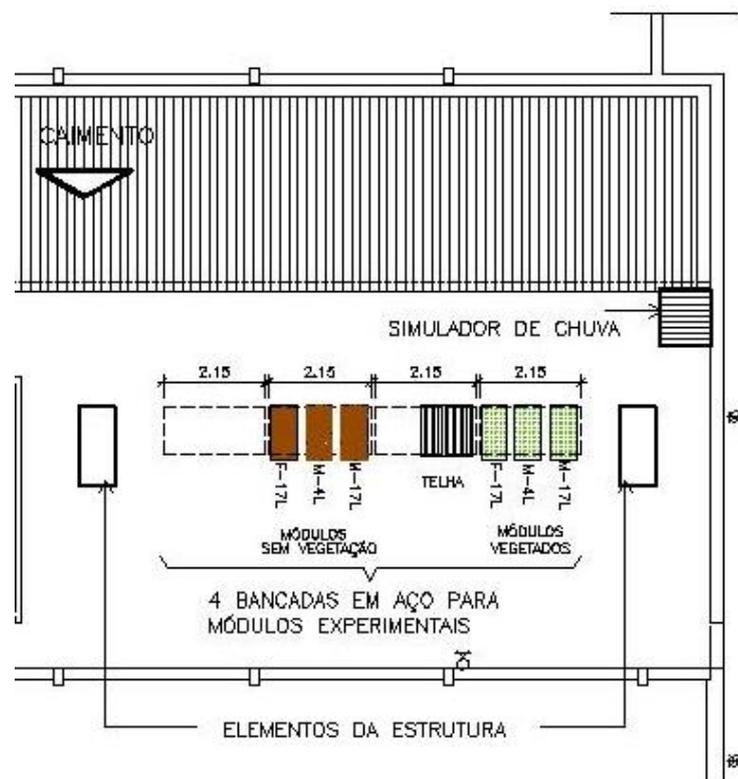
Figura 25 – Bancadas executadas conforme projeto.



Tirante rosca total para ajuste de inclinação

Fonte: A autora, 2014.

Figura 26 – Detalhe da distribuição das bancadas com os módulos experimentais na cobertura do edifício.



Fonte: A autora

O material técnico da empresa Cidade Jardim indica como ideal a inclinação entre 2% e 5% mas, as quatro bancadas metálicas para apoio dos módulos experimentais foram ajustadas para 6% de inclinação, dando prosseguimento aos estudos com telhados verdes, anteriormente desenvolvidos no projeto Hidrocidades, em edificação pré-existente.

As bancadas metálicas foram aterradas por estarem localizados em área aberta, na cobertura do prédio, visando garantir a segurança dos pesquisadores e dos equipamentos.

3.4 Caixas para apoio das unidades piloto experimentais de telhados verdes e sistema de coleta de *runoff*

As caixas foram elaboradas em placa cimentícia de 8mm de espessura, medindo, 55 x 105 cm, com 15cm de altura (Figura 27), cortadas com serra circular com disco de serra diamantado, coladas com adesivo líquido instantâneo, a base de Ester de Cianocrilato, fabricação Cascola (Figura 28), rejuntadas e estruturadas com massa adesiva à base de poliéster e aditivos, fabricação Iberê (Figura 28) e tela de poliéster, própria para reforço de impermeabilização e vedação de trincas, fabricação Viapol (Figura 29). A impermeabilização do fundo foi feita com impermeabilizante líquido monocomponente, a base de resinas elastoméricas, em emulsão aquosa, Icooper Strong, que possui Poliestireno Expandido – EPS, em grãos, em sua composição, sendo aplicado à frio, com rolo, em 2 demãos cruzadas, espaçadas em 24h (Figura 30). Precedendo a aplicação do “Strong”, foi aplicado em toda parte interna da caixa, como primer, membrana monocomponente a base resina elastomérica em emulsão aquosa, Icooper- Membrana Contínua (Figura 30), diluído em água, na proporção de 1:1, conforme orientação do representante técnico. As laterais internas das caixas foram impermeabilizadas com Icooper Membrana Contínua, sem diluição, aplicado com rolo. As caixas são compostas de 3 lados e fundo. A ausência de um dos lados tem por finalidade possibilitar a captação do *runoff*. Externamente, as caixas foram impermeabilizadas com 3 demãos de membrana acrílica impermeabilizante (Vedapren) e posteriormente pintadas com 2 demãos de resina 100% acrílica elastomérica, que é uma tinta elástica (Suvinil Proteção Total), na cor branca.

Figura 27 - Placa cimentícia, 8mm de espessura, fabricação Brasilit.



Fonte: A autora, 2014.

Figura 28 - Adesivos utilizados para a montagem das caixas.



Fonte: A autora, 2014.

Figura 29 – Tela de poliéster utilizada para reforço das juntas.



Fonte: A autora, 2014.

Figura 30 – Produtos impermeabilizantes para uso interno. Icopor Membrana Contínua (esquerda) e, Icopor Membrana Contínua – Storg (direita).



Fonte: A autora, 2014.

A opção pela utilização do Icopor Strong foi motivada em razão da composição, pois o produto possui membrana antirriz e o EPS⁸ deixa a superfície áspera, evitando que o solo fique aderido à superfície dificultando o escoamento (Figuras 31 e 32).

A superfície controle (telha), também foi impermeabilizada com *Icopor Membrana Contínua*, em duas demãos, sendo a primeira diluída na proporção 1:1 e a segunda sem diluição, aplicadas com rolo.

⁸ EPS – Poliestireno expandido (isopor)

Figura 31 – Foto da aplicação da primeira demão do impermeabilizante Icooper Strong..



Fonte: A autora, 2014.

Figura 32 – Caixa para Unidade Experimental com as 2 demãos de impermeabilizante.



Fonte: A autora, 2014.

Cada caixa foi dotada de sistema independente de coleta de *runoff*, de 75 mm de diâmetro, em tubo PVC, tipo esgoto, formando uma calha, adaptados exclusivamente para esses experimentos, tendo em cada extremidade um cap de PCV e uma curva de 90°, para captação do *runoff*. Esse sistema é suspenso por suportes, feitos em tiras de chapa galvanizada, dobrada, (Figura 33).

Na extremidade de cada caixa, como fechamento, foi incorporada tela, tipo utilizada em tapeçarias e saco em forma de tubo, em tecido 100% Poliamida, tramado em forma de rede (filó), com enchimento de argila expandida, visando a retenção do material particulado (Figura 33).

Figura 33 – Sistema de captação do *runoff* dos módulos com calha de PVC, saco de argila expandida e tela de fechamento.



Saco com argila expandida

Fonte: A autora, 2015.

3.5 Módulos tipo piloto de telhados verdes, telha ondulada (controle), solo não vegetado

Foram adotados sistemas modulares do Instituto Cidade Jardim - ICJ⁹, que foram inseridos nas caixas cimentícias compondo três unidades experimentais vegetadas, conforme o tipo de sistema do Instituto Cidade Jardim (Figura 34):

- a) (M-17L) – composto de 2 peças do Sistema Modular Cidade Jardim – 17,0 L, em plástico 100% reciclado, próprio para implantação de coberturas vegetadas, medindo 50 x 50 cm, com plantio de suculentas cujas mudas foram fornecidas pelo fabricante;
- b) (M-4L) - composto de 2 peças do Sistema Modular Cidade Jardim – 4,0 L, em plástico 100% reciclado, próprio para implantação de coberturas vegetadas, medindo 50 x 50 cm, com plantio de suculentas cujas mudas foram fornecidas pelo fabricante;
- c) (F-17L) - composto de 2 peças do Sistema Flat Cidade Jardim – 17,0 L, em plástico 100% reciclado, próprio para implantação de cobertura vegetada, medindo 50x50 cm, com plantio de suculentas cujas mudas foram fornecidas pelo fabricante.

Nas unidades vegetadas foram plantadas um mix de suculentas fornecido pelo ICJ, detalhadas no Capítulo 3.6. Foi utilizado o composto orgânico (Figuras 35 e 36), com 5 cm de espessura, também fornecido e comercializado pelo ICJ (sacos de 25 Kg). O composto consiste, sobretudo, de turfa cinza, produzido pela Provaso.

Além das unidades experimentais vegetadas, foram introduzidas mais duas para análise comparativa:

- a) telha em fibrocimento, 6 mm de espessura, medindo 110 x 110 cm, fabricação Eternit, atuando como testemunho (Figura 37);
- b) solo não vegetado (Figura 38).

⁹ Instituto Cidade Jardim. <http://www.studiocidadejardim.com.br/>

A caracterização de Modular 17L (M-17), Modular 4L (M-4) ou Flat 17L (F-17), corresponde a capacidade de armazenamento de água em litros, por metro quadrado, na estrutura do fundo dos módulos (bandejas). Informação do fornecedor confirmada na fase de testes (Figura 34).

Figura 34 – Bandejas que formam o Sistema Modular de 17 litros (M-17) e 4 litros (M-4).



Fonte: www.studiocidadejardim.com.br/#!e-studio/cfvq (acesso em 30 abr. 2014), modificado

Figura 35 – Composto utilizado nos módulos Cidade Jardim.



Fonte: A autora, 2015

Figura 36 – Composição do substrato

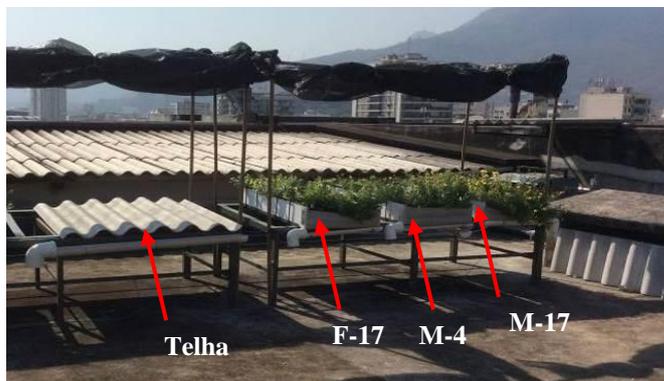


Fonte: A autora, 2015

Nas Figuras 37 e 38 apresentam-se os conjuntos experimentais, bancadas-módulos experimentais. Observa-se a tela agrícola tipo sombrite, percentual de sombreamento de 70%, fixadas em tubos de PVC de 25 mm, por sua vez, fixados às bancadas (enrolada na fotografia). Durante a simulação pluviométrica a tela foi estendida promovendo controle de perdas pelo vento e evaporação direta da “chuva” induzida. Os módulos experimentais foram dispostos lado a lado nas bancadas, de forma que cada bico de jato do simulador de chuva pudesse incidir exclusivamente sobre um módulo experimental. Mas, de qualquer forma, todos os resultados foram comparados com o coletado na telha, que representou o volume total precipitado.

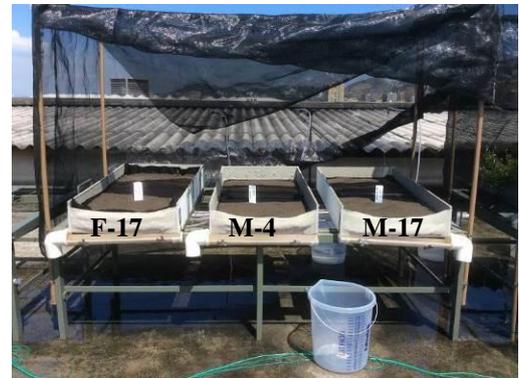
Módulos experimentais idênticos, vegetados (Figura 38) e não vegetados (Figura 37) foram submetidos às mesmas condições de chuva induzida, com a finalidade de garantir o mesmo volume de água em cada um deles e, conseqüentemente, possibilitar a análise comparativa do comportamento hidrológico desses módulos com a telha.

Figura 37 - Bancada com Unidades experimentais – módulos vegetados e controle (telha).



Fonte: A autora, 2015.

Figura 38 - Módulos sem vegetação. Da esquerda para direita, F-17, M-4 e M-17.



Fonte: A autora, 2015.

3.6 Vegetação utilizada

Assim como o composto e as bandejas do sistema Modular e Flat, as mudas¹⁰ (mix de suculentas) (Figuras 39) foram cedidos pelo ICJ. O mix é composto de 70% *Callisia repens*

¹⁰ O mix de suculentas foi sugerido e cedido pelo Instituto Cidade Jardim.

(Dinheiro em Penca), 15% *Portulacca oleracea* (Onze Horas), 15% *Aptenia cordifolia* (Rosinha de Sol).

Figura 39 – (a) *Callisia repens* (Dinheiro em penca), (b) *Aptenia cordifolia*, (*Rosinha do sol*), (c) *Portulaca oleracea* (*Onze horas*).



Fonte: http://pt.wikipedia.org/wiki/Callisia_repens; http://en.wikipedia.org/wiki/Aptenia_cordifolia#mediaviewer/File:Aptenia_cordifolia1.jpg; http://pt.wikipedia.org/wiki/Portulaca_oleracea#mediaviewer/File:Portulaca_oleracea_yellow.JPG (Acesso em 19 dez. 2014).

- a) *Callisia repens*, (Figura 39 a), popularmente conhecida no Brasil como Dinheiro em penca, é uma vegetação rasteira, pequeno porte. Nativa do México, mas muito comum nas Américas do Sul e Central. Folhagem densa, na cor verde-arroxeadada, com caules compridos igualmente arroxeados e bastante ramificados com 15 cm, em média. Classificada como subsuculenta quanto à categoria é de fácil germinação, se espalha vegetativamente por estacas, fragmentos de plantas ou plantas descartadas, formando um “tapete”. Está listada como planta invasora em países como África do Sul, China, Cuba, Porto Rico e Estados Unidos, se adapta melhor à meia sombra¹¹.
- b) *Aptenia cordifolia*, (Figura 39 b), popularmente conhecida no Brasil como Rosinha do sol, é uma vegetação rasteira, vistosa, perene e densa. É nativa da África do Sul. Possui folhagem oval com caules compridos e ramificados, na cor verde, mede de 10 a 30 cm. Classificada como suculenta quanto à categoria é de fácil germinação, multiplicando-se por sementes, divisão de ramagem ou vegetativamente por estacas de caules, possui boa cobertura do solo impedindo o crescimento de ervas daninha. A

¹¹ - www.jardineiro.net e www.pt.wikipédia.org/wiki/Callisia_repens. Acesso em 19 dez. 2014.

floração se estende por todo o ano. Deve ser cultivada em solo fértil com pleno sol. É considerada uma planta comestível, cujo sabor assemelha-se ao espinafre¹².

- c) *Portulaca oleracea*, (Figura 39 c), popularmente conhecida no Brasil como Onze horas, é uma vegetação herbácea, vistosa, folhagem relativamente densa. Folhagem oval, grossa e carnosa. Caule cilíndrico e carnoso, constituído por vários ramos com uma mesma base, coloração verde brilhante. Originária da Europa Ocidental. Classificada como suculenta quanto à categoria é de fácil germinação, multiplicando-se por sementes. Medem de 0,5 a 5 cm, A floração solitária de pequeno porte formada por corola de 5 pétalas de coloração amarelada que se abrem nas manhãs ensolaradas. Pode ser semeada em vários tipos de solo e é considerada daninha e invasora, nas Américas do Sul e Norte. É consumida como salada em parte da Europa, Estados Unidos, sendo um dos ingredientes da sopa francesa “*Soupe Bonne Femme*”. No Sudão e Egito são cultivadas comercialmente para consumo e utilizadas na forma cozida. É também conhecida como medicamentosa, como fonte de vitamina C, com ações antioxidantes e anti-inflamatórias¹³.

3.7 Simulador de chuvas

O simulador de chuvas consiste de conjunto projetado de forma a atender quatro unidades experimentais de forma simultânea (3 módulos vegetados ou sem vegetação e a telha). O conjunto permite que as intensidades de chuva simulada induzidas possam ser diferenciadas. É composto de uma unidade de bombeamento construída em estrutura metálica móvel, em chapa galvanizada, com quatro rodízios; uma bomba de pressurização centrífuga, modelo 7JCP-M2, 220V, 3/4 CV, 3450 rpm, vazão de 3,19 m³/h, altura manométrica de 15,8 (m.c.a.), fabricação Jacuzzi, com botão liga/desliga na própria bomba; manifold de distribuição com quatro saídas; quatro válvulas de regulagem com manômetros de 1/4”, rosca BSP, faixa de pressão 0-4 Bar / 0-60 psi, fabricação Genebre; conjunto de conexões

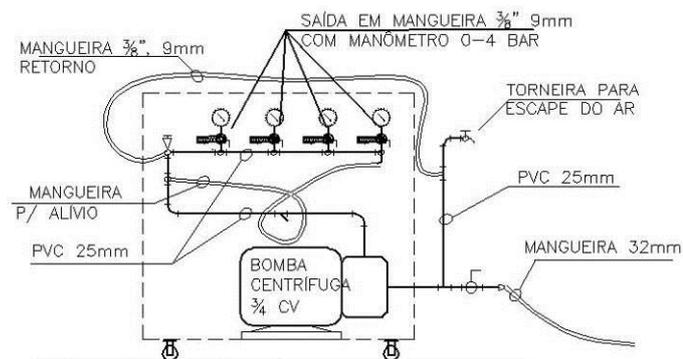
¹² -www.jardineiro.net; www.pt.wikipédia.org/wiki/Aptenia_Cordifolia. (Acesso em 19 dez. 2014).

¹³ <http://panorama.cnpms.embrapa.br/plantas-daninhas/identificacao/folhas-largas/beldroega-portulaca-oleracea-1>; e http://pt.wikipedia.org/wiki/Portulaca_oleracea. (Acesso em 19 dez 2014).

hidráulicas; cabo elétrico; 04 mangotes de interligação com 14,50 metros e 4 suportes com altura regulável, para fixação dos bicos de jato (Figuras 40 a 42), área de projeção quadrada cobrindo 1,0 metro quadrado. Na Figura 40 apresenta-se o desenho esquemático da unidade de bombeamento e seus componentes. Nas Figuras 41 e 42 são apresentadas respectivamente, a vista frontal, com destaque para os manômetros, onde o controle da pressão induz a intensidade de chuva desejada, e a vista da bomba propriamente dita, localizada na parte de trás da unidade de bombeamento.

A bomba faz a sucção e a recalca da água ao manifold que contém, uma válvula de alívio, com linha de recirculação da água não expelida pelo sistema, 4 pontos de saída, dotados de registros e manômetros. O início e o final da linha hidráulica se interligam pela mangueira flexível, de forma a equilibrar a pressão em todo o sistema, em forma de “by pass”. Uma torneira foi prevista visando possibilitar a drenagem de ar por ventura existente no sistema.

Figura 40 – Desenho esquemático da unidade bombeadora do simulador de chuva (croqui sem escala).



Fonte: A autora, 2014.

Figura 41 – Foto da unidade bombeadora do simulador de chuva (frontal).



Fonte: A autora, 2015

Figura 42 – Foto da unidade bombeadora do simulador de chuva (interna).



Fonte: A autora, 2015

Para facilitar a identificação das linhas hidráulicas, as mesmas foram marcadas com abraçadeiras plásticas coloridas, amarelo, azul, verde e vermelho.

A calibração do sistema, antes do ensaio, foi feita quantificando no balde, o volume de água aspergido por cada bico. Os manômetros foram ajustados até que o volume dos 4 bicos, no período determinado, em geral 3,0 minutos, fossem idênticos.

Por exemplo: 155 mm/h durante 7 minutos no módulo experimental de 0,55 m² corresponde a 2,583 L/min em 1,0 m² que é igual a 1,421 L/min em 0,55m², totalizando 9,95 L em 7,0 minutos. Dessa forma 1,421 L/min., durante 3,0 minutos gera 4,26 L no balde. Assim a pressão nos manômetros era ajustada (aproximadamente 0,6 Bar), até que cada bico gerasse, durante 3,0 minutos, 4,26 L no balde.

Após a calibração, as chuvas foram induzidas simultaneamente, sobre as unidades experimentais e sobre a telha (testemunho), durante 7,0 minutos. O período decorrido entre o estágio inicial e final de *runoff* também foram monitorados com cronômetro. Ao final dos ensaios os volumes foram quantificados nos recipientes de coleta e registrados manualmente na planilha constante no Apêndice A.

Os bicos são de pulverização uniforme, com projeção quadrada, padrão de jato cone cheio, em latão, modelo HH-4.8SQ *Fulljet*, fabricação *Spraying Systems Co.* Na Figura 44 é apresentado o bico de jato cone cheio em funcionamento e na Figura 45, os bicos de jato em latão propriamente ditos. Os bicos são alimentados por mangueiras e tubo de sustentação, instalados em suportes, que permitem a variação da altura de posicionamento dos bicos. A altura do jato e a pressão condicionam a intensidade da chuva simulada induzida nas unidades experimentais, definindo também a área de projeção (Figura 43). A altura do bico nesses experimentos foi de aproximadamente 1,30 m

Na figura 46 observam-se os bicos de jato em funcionamento, durante a fase de testes.

Figura 43 – Características de desempenho do bico de jato.

Conexão de Entrada (pol.)	Tipo do Bico				Capacidade	Diâmetro do Orifício (mm)	Diâmetro Máximo de Passagem Livre (mm)	Vazão (litros por minuto)*										Ângulo de Pulverização (°)*		
	G-SQ	GG-SQ	HH-SQ	H-SQ				0.4	0.5	0.7	1.5	2	3	4	6	7	10	0.5	1.5	6
1/8	●	●	●		3.6SQ	1.6	1.3	1.1	1.2	1.4	1.9	2.2	2.7	3.1	3.7	4.0	4.7	40	52	47
	●	●	●	→	4.8SQ	1.9	1.3	1.4	1.6	1.8	2.6	3.0	3.6	4.1	4.9	5.3	6.2	48	63	57
	●	●	●		6SQ	2.4	1.3	1.8	2.0	2.3	3.2	3.7	4.5	5.1	6.1	6.6	7.8	60	66	60
1/4	●	●	●		10SQ	2.8	1.6	2.9	3.3	3.8	5.4	6.2	7.4	8.5	10.2	11.0	13.0	62	67	61
	●	●	●		12SQ	3.2	1.6	3.5	3.9	4.6	6.5	7.4	8.9	10.2	12.3	13.2	15.5	70	75	68
			●		14.5SQ	3.9	1.6	4.3	4.7	5.5	7.8	9.0	10.8	12.3	14.8	15.9	18.8	78	82	75
3/8	●	●	●		18SQ	4.0	2.4	5.3	5.9	6.9	9.7	11.1	13.4	15.3	18.4	19.8	23	71	75	68

Fonte: Catálogo Spraying Systems Co., pag. B43, modificado

Figura 44 – Bico de jato pulverização uniforme de projeção quadrada.



Fonte: Catálogo *Spraying Systems Co*, 70M, p. B42

Figura 45 – Foto dos bicos de jato HH-4.8SQ, *Spraying Systems*



Fonte: A autora, 2014.

Figura 46 – Foto dos suportes de fixação dos bicos de jato (período de testes).



Fonte: A autora, 2015.

A definição dos materiais utilizados na pesquisa levou em consideração a qualidade, confiabilidade, aplicabilidade, viabilidade e custos, sendo que o material das caixas de apoio das unidades piloto pretendeu assemelhar-se às estruturas de concreto.

3.8 Intensidade das chuvas simuladas induzidas

Para definição das chuvas a serem induzidas foram consideradas relações I (Intensidade) - D (Duração) – F (Frequência), conforme metodologia de cálculo de “chuvas de projeto” para microdrenagem sugerida em diversos livros-texto, tendo como referência parâmetros estabelecidos no Manual de Drenagem da Rio-Águas, fundação da PCRJ¹⁴, assim como os estudos de chuvas intensas para a Cidade do Rio de Janeiro desenvolvidos pela mesma fundação¹⁵.

Para definição dos parâmetros “a, b, c e d” da Equação 10 (I-D-F) foram consideradas as sub-regiões “Saboia Lima”, (com características de densa ocupação) e “Via 11” (com característica de paisagem peri-urbana (Tabela 1), Sendo a primeira associada à localização da UERJ.

$$i = \frac{(a \cdot Tr^b)}{(t + c)^a} \quad (10)$$

Onde:

i = intensidade pluviométrica em mm/h;

Tr = tempo de recorrência em anos;

t = tempo de duração da precipitação em minutos.

a, b, c e d, valores dos coeficientes conforme apresentado na Tabela 1

Tabela 1 – Coeficiente de chuvas IDF.

Pluviômetro	a	b	c	d
Via 11	1423	0,19	14,5	0,796
Saboia Lima	1782	0,17	16,6	0,841

¹⁴ PCRJ – Prefeitura do Município do Rio de Janeiro.

¹⁵ Disponível em <http://www.rio.rj.gov.br/web/rio-aguas/licenciamento-de-projetos-particulares-de-drenagem> (Acesso em 02 mai. 2014).

Para o tempo de duração da chuva e o tempo de recorrência foram adotados valores sugeridos em Rio Águas¹⁶, sobretudo os critérios estabelecidos para microdrenagem. Dessa forma, foram adotadas intensidades equivalentes ao calculado para Saboia Lima (Tabela 2), para o tempo de recorrência (Tr) foi adotado 5 anos, caracterizando microdrenagem com aproveitamento de rede de drenagem existente. Os cálculos para Via 11 serviram de comparativo com o projeto HIDROCIDADES, já implantado na região do pluviômetro Via 11, Jacarepaguá. Inicialmente foi planejado um número maior de chuvas a serem simuladas. No entanto, isso acabou não sendo possível. Nesse caso o tempo de recorrência é de 10 anos, caracterizando situação de projeto de microdrenagem em área sem rede de drenagem implantada.

Foram estudadas as magnitudes de chuvas intensas tanto para a área de influência do Posto Sabóia Lima, como para Via 11, cuja área de influência inclui a bacia experimental do Projeto HIDROCIDADES. No entanto, somente valores de Sabóia Lima foram considerados nesse estudo.

Tabela 2 - Cálculo da intensidade de chuva para o pluviômetro Sabóia Lima (mm/h).

Tempo de Recorrência (Tr) em anos		Duração da Precipitação t (min)			
		7	10	12	15
Saboia Lima	5	164,10	148,39	139,61	128,38
	10	184,62	166,95	157,07	144,43

Observa-se que os critérios da escolha das referências Via 11 e Sabóia Lima representando área peri-urbana e densamente ocupadas, respectivamente, para definição de intensidades e durações de chuvas a serem induzidas, foi estritamente ilustrativa, mas pareceu coerente como cenários críticos “límitrofes” para a cidade do Rio de Janeiro. Outras referências ou critérios poderiam ter sido adotados.

Para o estabelecimento das chuvas simuladas a serem induzidas foram observados também no sítio alerta rio da PCRJ intensidades de chuvas que ocorreram em passado recente em que há registros na imprensa da ocorrência de transtornos por excessos pluviométricos. O

¹⁶ Disponível em <http://www.rio.rj.gov.br/web/rio-aguas/licenciamento-de-projetos-particulares-de-drenagem> (Acessado em 02 mai. 2014).

foco foram as regiões da Grande Tijuca, onde está localizada a UERJ, e Vargem Grande, Jacarepaguá, onde está localizada a Bacia hidrográfica representativa operada pela UERJ.

As seguintes estações pluviométricas do Sistema Alerta Rio serviram de base para definição das chuvas:

- a) Estação 19 (Barra –Riocentro), - localizada na Av. Salvador Allende, S/N, instalada na cobertura do prédio do Centro de Reabilitação Infantil Sarah Rio, na Ilha de Pompeba, e monitora as chuvas da região da bacia hidrografia de Jacarepaguá (http://alertario.rio.rj.gov.br/?page_id=862).
- b) Estação 32 (São Cristóvão), localizada na Rua Campo de São Cristóvão, número 268 na cobertura do prédio da Geo-Rio, e monitora as chuvas nos bairros Benfica, Caju, Maracanã e Praça da Bandeira (http://alertario.rio.rj.gov.br/?page_id=862).

Os eventos pluviométricos ocorridos nos dias 05 e 06 de abril de 2010 e, 24 e 25 de abril de 2011, exemplificados no Quadro 1, foram críticos para cidade do Rio de Janeiro, com registros de alagamentos em várias regiões (<http://oglobo.globo.com/rio/rio-vive-pior-enchente-da-historia-3029065> e <http://g1.globo.com/bom-dia-brasil/noticia/2011/04/rio-de-janeiro-enfrenta-durante-quatro-horas-chuva-de-40-dias.html>). (Acesso em 02 nov. 2014).

Quadro 3 - Maiores intensidades de chuva registradas nos pluviômetros 19 e 32 em abril 2010 e abril 2011, quando houve registros de grandes alagamentos.

Data	Pluviômetro	Período / mm		
		15 min	1 h	6 h
05 e 06 abr. 2010	19 - Riocentro	8	25,6	87,6
	32 – São Cristóvão	21,2	46,6	111
24 abr. 2011	19 - Riocentro	33,6	53,4	60,8
	32 – São Cristóvão	11,2	20,2	23,2
25 abr. 2011	19 - Riocentro	7,6	16	43,8
	32 – São Cristóvão	20,6	67,4	147,6

Fonte: Sistema Alerta Rio, disponível em http://www.sistema-alerta-rio.com.br/?page_id=5 (Acesso em 02 nov. 2014).

Com base no Quadro 3 verifica-se que a intensidade de 155mm/h, apesar de bastante intensa, é um valor bem próximo de outros já ocorridos no Município do Rio de Janeiro.

Todas as simulações de chuva induzidas foram realizadas em unidades experimentais vegetadas e sem vegetação, com solos secos e úmidos, conforme modelo SCS Curva Número (CN), descrito no item 3.9.2.

3.9 Parametrização das relações chuva-vazão

Para análise e parametrização da relação chuva-vazão nas unidades experimentais foram considerados o Método Racional (Capítulo 2.2) e o modelo SCS Curva Número (CN), (Capítulo 2.3). São modelos clássicos para bacias hidrográficas que estão sendo aplicados para telhados verdes.

Todas as unidades foram submetidas simultaneamente às mesmas condições de chuva induzida, com o tempo cronometrado, tendo a unidade de controle (telha ondulada de fibrocimento) como balizador da intensidade aplicada. O ensaio foi realizado aplicando simultaneamente todos os bicos de jato, já ligados, sobre as unidades experimentais e a telha. Ao mesmo tempo foi observado e anotado o início da chuva e do *runoff* de cada unidade. Após o período estipulado para a duração da chuva induzida, os bicos de spray foram simultaneamente retirados de todos os experimentos e então, o fim do *runoff* monitorado. Foi considerado término do *runoff* quando o intervalo entre as gotas no escoamento atingisse 1 segundo. Todas as informações foram inseridas em planilhas “excel” de ensaio (apêndice A) para o cálculo do coeficiente de *runoff* e do parâmetro Curva Número (CN).

As unidades foram submetidas às chuvas e duração e intensidade definidas (155mm/h). Cada ensaio foi realizado para a condição úmida, geralmente no dia seguinte da simulação em condição seca. Para atingir essa condição (seca) os módulos vegetados necessitavam de longos períodos sem precipitação. Imediatamente antes de cada ensaio foram coletadas amostras de solo, conforme Capítulo 2.4, para determinação do conteúdo de umidade do substrato agrícola (de acordo, com o método CN-SCS). Todos os ensaios foram repetidos pelo menos uma vez. Foram analisados os resultados individualmente, e também a parametrização das relações chuva-vazão pelas médias dos valores de C (Método Racional) e CN (SCS) obtidos.

3.9.1 Método Racional e coeficiente de *runoff*

O método racional foi descrito no Capítulo 2.2. Os valores do coeficiente de *runoff* (C) foram calculados pela equação 11. Destaca-se que na Equação 11 R é equivalente à Q_s da Equação 1 e DP é equivalente a “ $i \cdot A$ ”.

$$C = \frac{R}{DP} \quad (11)$$

Onde:

- C** - é o coeficiente de escoamento ou coeficiente de *runoff* que se pretende determinar no ensaio – adimensional, varia entre 0 e 1;
- R** - é o volume de efluente líquido em litros (*runoff*) que deixa a unidade experimental e é coletado no recipiente depois de transcorrido o tempo de duração da chuva induzida pré-estabelecido
- DP** - é o deflúvio pluvial, ou seja, o volume em litros induzido na simulação da chuva na unidade experimental, conforme Tabelas 4 e 5.

O Método Racional não considera as condições antecedentes de umidade do solo.

3.9.2 SCS e o parâmetro CN

O método Curva Número (CN) do *Soil Conservation Service* (SCS) foi descrito no Capítulo 2.3, equações 5, 6, 7, 8 e 9, onde reorganizando a Equação 9, CN seria dado pela Equação 12. De outra forma, CN pode ser dado pela Equação 13 em função do deflúvio pluvial e do volume efluente líquido (*runoff*), que foi adotado neste trabalho. Nesse caso sem o valor do S_{max} , conforme *Knox County*¹⁷.

$$CN = \frac{2500}{(S + 254)} \quad (12)$$

¹⁷ *Stormwater Manual* (disponível em <http://www.knoxcounty.org/stormwater/pdfs/vol2/Vol2%20Chap%203%20Stormwater%20Hydrology.pdf>. Acesso em 03/02/2015).

$$CN = \frac{1000}{10 + 5DP + 10R - 10(R^2 + 1,25R \cdot DP)^{1/2}} \quad (13)$$

Onde:

CN - é Parâmetro Curva Número – adimensional, varia entre 0 e 100, embora dificilmente, na prática, sejam verificados os valores 0 e 100.;

R- é o volume de efluente líquido em polegadas (*runoff*) que deixa a unidade experimental e é coletado no recipiente depois de transcorrido o tempo de duração da chuva induzida pré-estabelecido (Tabelas 5 e 6);

DP- é o deflúvio pluvial, ou seja, o volume em polegadas induzido na simulação da chuva na unidade experimental, também pré-estabelecido, conforme Tabelas 5 e 6.

Os cálculos com base nos resultados dos ensaios para os valores de S, e conseqüentemente cálculo do CN foram obtidos através do software Excel 2010 e confirmados no sítio Zonums Solutions¹⁸. Entretanto, os dados de entrada para cálculo nesse sítio não admitem números com casas decimais, sendo essa conferência utilizada somente para avaliação do grau de certeza.

3.10 Validação do simulador de chuva

Para a validação do simulador foram testadas outras intensidades, inclusive com a utilização de regadores.

¹⁸ http://zonums.com/online/hydrology/curve_number.php.

4. RESULTADOS

4.1. Desempenho da infraestrutura experimental básica

A infraestrutura básica para os experimentos foi constituída de localização, bancadas, caixas cimentícias, calhas, baldes para coleta do *runoff*, suportes para proteção de possíveis perdas pluviométricas decorrentes de ventos, circuito hidráulico e simulador para indução de chuva com intensidade e duração controladas.

A localização dos experimentos na cobertura do Pavilhão Haroldo Lisboa, no Campus UERJ Maracanã, apresentou-se adequada conforme esperado. O forte calor e a estiagem prolongada atipicamente observadas no período do verão de 2015, quando se concentraram as atividades experimentais, certamente penalizaram os envolvidos nas simulações de chuvas induzidas e coletas dos *runoff* (s) correspondentes. Isso suscitou uso de proteção solar na pele, roupas e calçados leves e chapéu. Demonstrou-se fundamental o sombreiro, mesas e bancos adquiridos para os longos períodos em que a equipe envolvida passou na cobertura para implantação da infraestrutura experimental e realização dos experimentos. No entanto, foi essencial do ponto de vista da constatação em cobertura, o real do desempenho da vegetação e estrutura modular proposta pelo ICJ.

A bancada desempenhou o papel esperado de sustentação das unidades experimentais, não apresentando qualquer sinal de desgaste estrutural. As soldas também não apresentaram qualquer problema no período entre sua fabricação e durante uso. Entretanto, algumas partes dos perfis, arranhados durante o transporte, permitiram o surgimento de alguns pontos de corrosão. O sistema para controle da declividade, embora manual, também desempenhou de forma adequada. Ressalta-se, no entanto, que nesse estudo apenas uma declividade foi considerada (6%).

O circuito hidráulico se apresentou robusto sem nenhum tipo de vazamento ou sinais de desgaste. Apesar de todos os esforços para controle da temperatura da água de indução das chuvas simuladas, constatou-se, nos períodos mais quentes, temperaturas altas, em torno de 50 °C. No entanto, não foi observado aparentemente, conforme será descrito no Capítulo 4.2, sinais de sofrimento da vegetação por conta da temperatura da água durante e depois das simulações de chuva induzida. Isso é importante no cultivo de espécies vegetativas como hortaliças, por exemplo, um dos objetivos no contexto do Projeto HIDROCIDADES.

As caixas cimentícias atenderam perfeitamente ao previsto e o material impermeabilizante utilizado se mostrou adequado proporcionando a estanqueidade necessária, atendendo dessa forma perfeitamente ao propósito. O mesmo tipo de impermeabilizante foi utilizado na superfície controle (telha), minimizando assim a possibilidade de absorção de umidade.

Os baldes de 20,0 L, adquiridos para coleta do *runoff*, de fabricação Jprolab, não atenderam adequadamente as expectativas por ter sido detectado, em três dos cinco baldes, problemas de imprecisão na marcação da escala nos mesmos. O problema foi detectado logo no início dos ensaios, em fase de testes, de forma que não comprometeu as leituras de *runoff*. Em todos os experimentos os bicos e baldes atenderam aos mesmos módulos. Ou seja, foram feitas identificações através de cores (M-17, vermelho; M-4, verde; F-17, azul e telha, amarelo), nos bicos e baldes correspondentes.

Inicialmente pensou-se que cada bico de jato pudesse estar associado a dois módulos, atendendo área de formato quadrático, o que seria o ideal. No entanto, a necessidade de construir um suporte que permitisse a movimentação das caixas cimentícias, após a inclusão da estrutura modular vegetativa, não permitiu que essas caixas fossem justapostas. Assim foi atribuído um bico de jato por módulo. Isso acabou comprometendo um pouco a distribuição uniforme da chuva sobre o módulo, já que a caixa é retangular e a projeção do bico de jato selecionado para a indução das chuvas possui forma quadrática.

Com relação ao simulador de chuvas, antes de cada ensaio, procedeu-se à calibração do simulador, com de ajuste nos manômetros. Isso acabou gerando uma demanda a mais antes da realização dos ensaios. Os manômetros não apresentaram precisão suficiente para que se associasse de forma direta, pressão manométrica e volume induzido. Os testes permitiram concluir que após o ajuste o volume induzido ao longo do tempo se mantinha constante durante o ensaio. Outra questão observada foi a dificuldade do sistema de simulação de chuvas na indução de baixos volumes. Embora o bico de jato selecionado tenha sido dimensionado para uma ampla faixa de vazões.

4.2. Unidades experimentais vegetadas

O plantio das mudas disponibilizadas pelo Instituto Cidade Jardim foi realizado em 03 de dezembro de 2014. Foram três espécies, caracterizadas no Capítulo 3.6: *Callisia repens* (*Dinheiro em penca*), *Apnia cordifolia* (*Rosinha do sol*) e *Portulaca oleracea* (*Onze horas*). O desenvolvimento foi rápido e atendeu as expectativas nesse sentido (Figuras 47 e 48).

Essas espécies foram postadas nos Correios no dia 04 nov. 2014, sendo recebidas no dia 07 nov. 2014. O plantio das mudas foi efetuado em caráter provisório, no dia 08 nov. 2014, concentrando as mudas em apenas 3 módulos, até que as instalações hidráulicas fossem concluídas e o simulador de chuva fornecido pela contratada. Após a conclusão da instalação do simulador essas mudas foram então replantadas no dia 03/12/2014, em 5,0 cm altura de composto fornecido pelo ICJ (Provaso), nos diferentes módulos experimentais. Foram regadas com interstício de 24 horas durante a primeira semana e 48 horas a partir da segunda semana. O crescimento foi rápido e atendeu às expectativas (Figuras 49 e 50).

Durante o período inicial de crescimento da vegetação, os módulos ficaram na cobertura, junto ao compartimento casa de máquinas de exaustão (face voltada para SE¹⁹), em local cuja exposição ao sol era durante o período de 7:00 as 13:00 horas, aproximadamente. Embora essas espécies sejam próprias para suportar condições de extremo calor, essa decisão visou não sacrificar exageradamente as espécies sob sol intenso, enquanto as raízes ainda não estivessem suficientemente desenvolvidas.

As temperaturas registradas pela Estação São Cristóvão, durante o mês de dezembro (desenvolvimento das espécies), variaram entre 20,7°C e 31,2°C para as mínimas e entre 23°C e 38,6 °C para as máximas, com somente 4 dias de chuvas de fraca intensidade (1,0 a 5 mm/h) nos dias 5, 13, 24 e 31 de dezembro de 2014 e, um evento com intensidade moderada de 10 mm em uma hora, no dia 23 de dezembro de 2014.

¹⁹ SE - orientação Sudeste

Figura 47- Dia do dia do plantio, em 03 dez. 2014.



Fonte: A autora, 2014.

Figura 48 – Primeira floração da *Portulaca oleracea*, (Onze horas), em 08 dez. 2014 (5 dias após plantio).



Fonte: A autora, 2014.

Figura 49 - Desenvolvimento da vegetação em 21 dez. 2014 (18 dias após plantio).



Fonte: A autora, 2015.

Figura 50 – Vegetação nos módulos em 05 jan. 2015. Nítida predominância da *Portulaca oleracea* (Onze horas), 33 dias após plantio.



Fonte: A autora, 2015

4.2.1 Presença de insetos e aves

Após o plantio das mudas, quando essas iniciaram a florescência e durante todo período dos ensaios, verificou-se a presença de insetos, em especial a abelha *Trigona spinipes*, conhecida popularmente como abelha-cachorro, que é uma espécie que vive em colônias e é comumente encontrada em São Paulo, Rio de Janeiro, Minas Gerais e alguns

outros estados do sul e norte, tanto nas áreas rurais como nas urbanas. Essa espécie mede entre 6,5 mm e 7 mm de comprimento e não possui ferrão (<http://www.cpt.com.br/cursos-criacaodeabelhas/artigos/abelhas-sem-ferrao-irapua-trigona-spinipes>. Acesso em 18 fev. 2015).

Em pesquisa realizada no Campus da Universidade Estadual de Campinas, com vários tipos de espécies de abelhas, a *T. spinipes* foi a mais comumente encontrada, estando presente em 90% das espécies vegetais pesquisadas. É considerada uma espécie generalista por frequentar flores pequenas e abertas, isto é, flores não especializadas, preferindo as de inflorescência (parte das plantas onde se localizam as flores) densa. As *Tigona spinipes* retiram o pólen das flores através da perfuração das anteras poricidas, que são os compartimentos onde são produzidos os grãos de pólen, aponta Agostini, K (2003). Segundo essa autora seria interessante o desenvolvimento de planos de manejo, visando transformar o ambiente urbano em corredor biológico, conectando fragmentos florestais próximos.

A parte da manhã era o período de presença dessas abelhas, justificada pela florescência da *Portulaca oleracea*, conhecida popularmente como onze horas (Figuras 51 e 52).

Figura 51 – Módulos M-17 com a presença de abelhas da espécie *T. spinipes*, nas flores.



Fonte: A autora, 2015.

Figura 52 – Foto ampliada da espécie *T. spinipes* na flor da *Portulaca oleracea*.



Fonte: A autora, 2015.

Em diversas oportunidades também foi possível constatar, na área dos experimentos, a presença de aves da família dos *Psittacidae*s, conhecidas popularmente como maritacas. Não se pode afirmar que essa presença esteja relacionada aos experimentos, mas considerando a configuração física da edificação que tem 3 partes (Figuras 20 e 21), sendo um quadrado interligado com um retângulo de cada lado e que as aves só foram observadas na região do experimento, cabe observação mais detalhada em trabalho futuro.

4.3. Indução de chuvas simuladas e análise das relações chuva-vazão

As induções de chuvas através do simulador foram efetuadas no período entre 13 de janeiro e 03 de março de 2015, em dias ensolarados, parcialmente nublados ou nublados, sempre com ausência de chuvas. As temperaturas registradas nesses dias variaram entre 29 °C e 34 °C, com esporádicas rajadas de ventos que variaram entre 4,5 e 25 km/h. Os dados de temperatura e velocidade do vento foram obtidos no sítio Alerta Rio²⁰, Estação Climatológica São Cristóvão, para os dias em que foram realizados os ensaios. Foi observada certa dificuldade no ajuste manual das pressões para reprodução da intensidade de chuva desejada, sobretudo para valores de intensidade menores do que 150 mm/h. Além disso, apesar das proteções laterais com tela tipo sombrite para minimizar as perdas, observou-se alguma “chuva” escorrendo pela tela. Optou-se assim, por considerar os volumes coletados de forma comparativa. Ou seja, o *runoff* coletado a partir da superfície de telha foi considerado o máximo, ou 100%.

A Tabela 3 apresenta informações gerais dos ensaios realizados em todas as unidades experimentais (controle-telha; 3 módulos sem vegetação, 3 módulos vegetados): data, intensidades e durações das chuvas induzidas, o estado do solo (úmido (U) ou seco (S)), horário de início e término do runoff, temperaturas e velocidades dos ventos. Os dados apurados nos ensaios foram registrados em planilha modelo, apresentada no Apêndice A.

²⁰ www.alertario.rio.rj.gov.br

Tabela 3- Resumo dos ensaios realizados (intensidade aplicada, dia, horário, duração, temperatura).

DATA	Chuva simulada		Estado do Solo	Início do Ensaio (hh:mm)	Término do Ensaio (hh:mm)	Temperatura (°C)	Vento (km/h)
	Intensidade (mm/h)	Duração (min)					
23/01/2015	155	7	U	15:47	16:12	28,8	5,4
24/01/2015	155	7	U	12:48	13:29	30,1	12,96
28/01/2015	155	7	S	15:40	16:05	34,3	6,48
	155	7	S	16:15	16:39	34,3	9,36
29/01/2015	155	7	U	10:50	11:28	32,8	10,08
30/01/2015	155	7	U	17:00	17:35	31,0	9,0
14/02/2015	155	7	S	10:30	10:52	31,7	0,0
	155	7	S	11:00	11:26	31,7	12,6
23/02/2015	130	15	S	13:00	13:41	33,1	7,96
	130	15	S	14:00	14:39	34,2	11,16
24/02/2015	130	15	U	13:30	14:27	32,6	19,44
	130	15	U	14:50	15:32	31,5	25,92

Fonte: A autora, 2015.

Conforme especificado no Capítulo 3, os módulos experimentais utilizados na pesquisa foram os a seguir denominados: Sistema Modular Cidade Jardim de 17 litros (M-17), Sistema Modular de 4 litros (M-4) e o Sistema Flat de 17 litros (F-17). Essas referências serão utilizadas a seguir. Esses módulos, nas formas, vegetado e sem vegetação, são apresentados nas figuras 52 e 53.

Figura 53 – Módulos experimentais vegetados. Da esquerda para a direita, módulos Flat 17L (F-17); Sistema Modular 4L (M-4) e Sistema Modular 17L (M-17), em 24 jan. 2015.



Fonte: A autora, 2015.

Figura 54 – Módulos experimentais sem vegetação. Da esquerda para a direita, módulos Flat 17L (F-17); Sistema Modular 4L (M-4) e Sistema Modular 17L (M-17). Ensaio de 29 jan 2015.



Fonte: A autora, 2015.

As Figuras de 55 e 56 mostram a indução de chuva durante ensaios, com um bico de jato sobre cada módulo vegetado e sobre a telha, que foram feitos simultaneamente. As simulações nos módulos sem vegetação foram geralmente efetuadas logo após o término da simulação nas unidades vegetadas.

Figura 55 – Foto de ensaio de 155 mm/h nos módulos vegetados, em 23 jan. 2015.



Fonte: A autora, 2015.

Figura 56 – Funcionamento dos bicos no ensaio de 155 mm/h sobre módulos vegetados. 23 jan. 2015.



Fonte: A autora, 2015.

Figura 57 – Aguardando o término do *runoff* para quantificação do volume. Vento durante o ensaio 23 jan. 2015



Fonte: A autora, 2015.

Figura 58 - Funcionamento dos bicos de jato sobre módulos não vegetados. Ensaio 28 jan 2015



Fonte: A autora, 2015.

Nos apêndices B e C são apresentados os resultados obtidos por tipo de módulo: valores da intensidade da chuva induzida, a duração, os volumes induzidos na unidade experimental, volumes coletados (*Runoff* /PEFE) e os volumes retidos representados por “S” equação do CN. Sendo que o apêndice B apresenta também os valores do coeficiente de escoamento “C” do Método Racional e o apêndice C, os valores obtidos para o parâmetro CN da equação do SCS. Os volumes coletados na superfície controle (telha) foram considerados como pluviosidade (P) de referência (C=1 e CN=100), conforme mencionado anteriormente. Os valores de CN indicados nas tabelas de resultados são os calculados através da equação 3.

Nas Tabelas 4 e 5 são apresentados os resultados que aparecem detalhadamente nos dos apêndices B e C na forma consolidada. Apresenta-se ainda nessas tabelas o tempo de duração do *runoff* e na Tabela 6 estão indicados os valores com a média dos dois ensaios realizados em cada tipo de módulo nas condições seca e úmida.

Tabela 4 - Resultados apurados nos ensaios com chuva simulada induzida de 155 mm/h, por 7 min. em solo seco, nos módulos vegetados e sem vegetação.

	Seco - Sem Vegetação								Seco - Vegetado					
	M-17		M-4		F-17		Telha		M-17		M-4		F-17	
	28/jan	14/fev	28/jan	14/fev	28/jan	14/fev	28/jan	14/fev	28/jan	14/fev	28/jan	14/fev	28/jan	14/fev
P (mm)	18,09	18,09	18,09	18,09	18,09	18,09	18,09	18,09	18,09	18,09	18,09	18,09	18,09	18,09
PEFE (mm)	4,09	3,76	7,27	7,82	3,64	4,91	18,09	18,09	7,95	2,55	8,09	5,64	3,64	1,73
PEFE (L)	2,25	2,07	4,00	4,30	2,00	2,70	9,95	9,95	4,37	1,40	4,45	3,10	2,00	0,95
Retido (L)	7,70	7,88	5,95	5,65	7,95	7,25	0,00	0,00	5,63	8,55	5,55	6,85	8,00	9,00
Retido (%)	77,39	79,20	59,80	56,78	79,90	72,86	0,00	0,00	56,58	85,93	55,78	68,84	80,40	90,45
CN (SCS)	90	90	94	95	90	92	100	100	95	88	95	92	90	86
C. (Racional) Grau de saturação (%)	0,23	0,27	0,40	0,43	0,20	0,27	1,00	1,00	0,44	0,14	0,44	0,31	0,20	0,10
Umidade (%)	5,1	47,6	3,9	57,6	8,0	49,8	0,00	0,00	24,8	43,7	4,4	36,1	18,8	39,8
Início runoff (mm:ss)	02:30	04:12	02:18	03:35	04:21	05:01	00:05	00:06	03:14	03:56	02:29	02:55	04:43	04:14
Duração runoff (mm:ss)	20:10	18:03	13:54	14:30	23:45	21:14	07:00	07:00	17:04	12:54	11:39	11:21	21:57	17:31

Fonte: A autora, 2015.

Tabela 5 - Resultados apurados nos ensaios com chuva simulada induzida de 155 mm/h, por 7 min. em solo úmido, nos módulos vegetados e sem vegetação

	Úmido - Sem Vegetação								Úmido - Vegetado							
	M-17		M-4		F-17		Telha		M-17		M-4		F-17		Telha	
	29/jan	30/jan	29/jan	30/jan	29/jan	30/jan	29/jan	30/jan	23/jan	24/jan	23/jan	24/jan	23/jan	24/jan	23/jan	24/jan
P (mm)	18,09	18,09	18,09	18,09	18,09	18,09	18,09	18,09	18,09	18,09	18,09	18,09	18,09	18,09	18,09	18,09
PEFE (mm)	8,45	6,73	10,00	8,04	8,45	6,91	18,09	18,09	11,09	13,82	11,82	12,35	10,36	13,00	18,09	18,09
PEFE (L)	4,65	3,70	5,50	4,42	4,65	3,80	9,95	9,95	6,10	7,60	6,50	6,79	5,70	7,15	9,95	9,95
Retido (L)	5,40	6,42	4,55	5,70	5,40	6,32	0,00	0,00	3,85	2,35	3,45	3,16	4,25	2,80	0,00	0,00
Retido (%)	53,73	63,88	45,27	56,72	53,73	62,89	0,00	0,00	38,73	23,64	34,71	31,79	42,76	28,17	0,00	0,00
CN (SCS) C.	95	93	96	95	95	94	100	100	97	98	97	98	97	98	100	100
(Racional) Grau de saturação (%)	0,46	0,37	0,55	0,44	0,46	0,38	1,00	1,00	0,61	0,76	0,65	0,68	0,57	0,72	1,00	1,00
Umidade (%)	62,68	38,73	46,93	33,65	88,17	41,1	0,00	0,00	67,41	43,00	71,59	37,29	62,99	52,69	0,00	0,00
Início runoff (mm:ss)	02:08	01:04	02:02	02:29	03:02	03:31	00:07	00:06	01:14	01:30	01:40	01:41	02:11	01:58	00:05	00:05
Duração runoff (hh:mm:ss)	11:32	10:22	13:48	10:43	34:15	31:35	07:00	07:00	17:02	27:25	14:18	21:40	22:28	38:30	07:00	07:00

Fonte: A autora, 2015.

²¹ Os ensaios úmidos vegetados e sem vegetação foi realizados em diferentes datas, por isso há duas colunas com resultados em telha.

Tabela 6 – Resultados médios por módulo, considerando tipo e a condição do solo, intensidade de 155mm/h durante 7 minutos.

	Solo úmido						Telha	Solo seco					
	M-17		M-4		F-17			M17		M4		F17	
	C/V	S/V	C/V	S/V	C/V	S/V		C/V	S/V	C/V	S/V	C/V	S/V
P (mm)	18,09	18,09	18,09	18,09	18,09	18,09	18,09	18,09	18,09	18,09	18,09	18,09	18,09
Pefe (mm)	12,45	7,59	12,08	9,02	11,68	7,68	18,09	5,25	3,92	6,86	7,54	2,68	4,27
Runoff (L)	6,85	4,20	6,64	4,96	6,42	4,22	9,95	2,89	2,16	3,78	4,15	1,48	2,35
Retido (L)	3,10	5,91	3,30	5,12	3,52	5,86	0,00	7,09	7,79	6,20	5,80	8,50	7,60
Retido (%)	31,16	59,40	33,17	51,46	35,38	58,89	0,00	71,25	59,40	62,31	33,17	85,43	51,46
CN (SCS)	97	94	97	96	97	94	100	91	90	93	94	88	91
C (Racional)	0,68	0,41	0,65	0,50	0,64	0,42	1,00	0,29	0,25	0,38	0,42	0,15	0,24
Redução runoff (%)	31,18	58,04	33,22	50,14	35,43	57,55	0,00	70,98	78,33	62,08	58,32	85,19	76,40
Início runoff (mm:ss)	01:22	01:36	01:40	02:15	02:05	03:16	00:06	03:35	03:21	02:42	02:56	04:28	04:41
Duração runoff (mm:ss)	22:13	10:56	17:59	12:15	30:29:00	32:55	07:06	15:00	19:07	11:30	14:12	19:58	23:00

Fonte: A autora, 2015.

²² Módulo vegetado (C/V); Módulo sem vegetação (S/V)

4.4 Retenção hídrica

Conforme esperado, para todos os sistemas modulares, vegetados ou não, a retenção de água nos módulos em condição atribuída como úmida, foi menor. O percentual médio retido para situação “seco” foi de 71,99%, e para a situação “úmido” foi de 44,67%. Na Tabela 7 são apresentados os percentuais médios retidos nos sistemas modulares vegetados e não vegetados, para as situações “úmido” e “seco”.

Tabela 7 – Percentual médio de retenção de água nos sistemas modulares.

Estado do substrato	S/ vegetação	Vegetado	Média Geral
SECO	70,99	72,99	71,99
ÚMIDO	56,04	33,3	44,67
MÉDIA GERAL	63,52	53,14	58,33

Fonte: A autora, 2015.

Como pode ser observado da Tabela 7, os percentuais médios de retenção variaram entre 33,3% para o módulo vegetado em estado “úmido”, e o maior foi de aproximadamente 72,99% para módulo sem vegetação em estado “seco”. Sendo a média geral independentemente do estado e da presença de vegetação de 58,33%. O período durante o verão de 2015, em que foram realizados os ensaios, foi excepcionalmente seco, deixando os módulos de solos sem vegetação mais expostos à evaporação direta. Empiricamente, transcorrido o mesmo tempo e em mesmas condições, os substratos dos sistemas modulares vegetados se apresentavam sempre mais úmidos. Observou-se que a vegetação promove certo sombreamento na superfície, o que fez com que os módulos vegetados retivessem umidade por mais tempo, talvez compensando perdas por evapotranspiração nos curtos espaços de tempo.

Observou-se que, em geral, os módulos vegetados necessitam de período maior para a obtenção da condição seca do que os módulos sem vegetação. Com temperaturas médias de 34°C os módulos sem vegetação alcançavam essa condição entre 4 e 5 dias, enquanto os vegetados só atingiram essa condição com 7 ou 8 dias.

Em termos de percentual de água retido, os sistemas modulares mais eficientes foram, conforme esperado os tipos M-17 L e F-17 L. Sendo que de forma geral a performance do sistema F-17 L foi melhor. Isso se confirmou, quando se leva em consideração a duração do *runoff*, sempre maior para o sistema modular F-17 L. Como não houve diferença entre os sistemas modulares em termos de desenvolvimento da vegetação, pode-se afirmar que dentro dos objetivos dessa pesquisa, o sistema modular F-17 L apresentou a maior eficiência.

Os tempos de duração do *runoff* (espaço de tempo entre o início e o final do *runoff*) variaram entre 10 minutos e 22 segundos, para o sistema M-17, sem vegetação, estado úmido, até 38 minutos e 30 segundos, para o sistema F-17, vegetado, estado úmido. A duração do *runoff* para o estado úmido foi maior nos módulos vegetados. Essa propriedade é interessante em termos de controle dos escoamentos superficiais. Ainda que com substrato em estado úmido, o sistema modular F-17 pode retardar em até aproximadamente 30 minutos o escoamento direto. Na Tabela 8 são apresentados os valores médios em minutos do tempo de duração do *runoff*.

Tabela 8 – Duração média o *runoff*, em minutos

Estado do substrato	S/ vegetação	Vegetado	Média Geral
SECO	18,60	15,40	17,0
ÚMIDO	18,71	23,55	21,13
MÉDIA GERAL	18,66	19,48	19,07

Fonte: A autora, 2015.

Observa-se na Tabela 8 que a duração média do *runoff* para todos os sistemas modulares, independentemente do estado do substrato, ou da presença de vegetação, foi de aproximadamente 19 minutos. Ou seja, em média, o escoamento direto a partir de telhados com cobertura modular, seria retardado em até 12 minutos. Observa-se também que considerando a média, o sistema modular vegetado, promoveu maior retardo do *runoff*.

Os graus de saturação variaram entre valores bem baixos, da ordem de 3% até 65%. Da observação da Tabela 9, diferente do que se esperava, não foi evidente a relação entre os graus de saturação e os volumes retidos.

Tabela 9 – Grau de saturação do substrato e volumes retidos

DATA DO ENSAIO	GRAU DE SATURAÇÃO (%)	VOLUME RETIDO (L)	VEGETAÇÃO	ESTADO DO SOLO
23/01	33,64	3,85	V	U
23/01	34,99	4,25	V	U
23/01	47,85	3,45	V	U
24/01	27,50	2,35	V	U
24/01	34,59	2,80	V	U
24/01	20,72	3,16	V	U
28/01	24,75	5,63	V	S
28/01	5,07	7,70	SV	S
28/01	18,76	8,00	V	S
28/01	8,00	7,95	SV	S
28/01	4,36	5,55	V	S
28/01	3,89	5,95	SV	S
29/01	55,98	5,40	SV	U
29/01	65,04	5,40	SV	U
29/01	34,14	4,55	SV	U
30/01	24,53	6,42	SV	U
30/01	29,24	6,32	SV	U
30/01	24,54	5,70	SV	U
14/02	43,71	8,55	V	S
14/02	47,58	7,25	SV	S
14/02	39,81	9,00	V	S
14/02	49,79	7,25	SV	S
14/02	36,10	6,85	V	S
14/02	57,56	5,65	SV	S

Fonte: A autora, 2015.

23

Pode se observar, na Tabela 9, que há tendência para redução da retenção nos módulos sem vegetação quando aumenta o grau de saturação. A média dos valores foi de 33,89%.

Na análise comparativa entre os módulos vegetados e não vegetados, sob condição úmida, as unidades não vegetadas apresentaram maior retenção de água durante os ensaios. O

²³ (U) solo úmido; (S) solo seco; (SV) sem vegetação; (V) vegetado

início do *runoff* nas unidades vegetadas foi mais rápido do que para os módulos sem vegetação, em geral, na metade do tempo da condição de solo seco. Constatou-se também que as unidades vegetadas sempre apresentaram teor de umidade superior aos não vegetados, contribuindo dessa forma para a menor eficiência na retenção dos volumes induzidos durante os ensaios.

A alta intensidade de chuva induzida e a impossibilidade de perfeita distribuição espacial da chuva simulada na unidade experimental, favorecida pela forma geométrica do sistema modular e pela distribuição desigual da vegetação também pode ter interferido no tempo para início e duração do *runoff*. Foi observado durante o ensaio a formação de “sulcos” preferenciais de escoamento, promovendo a aceleração do início do *runoff*. Ao final dos ensaios pode ser verificado que as extremidades dos módulos estavam aparentemente menos umedecidas.

A umidade antecedente do solo para esses casos não indicou substancial diferença na média, tendo o comportamento desses módulos obedecido o mesmo padrão nos dois ensaios.

No comparativo entre os módulos vegetados e sem vegetação, na condição seca os melhores rendimentos foram obtidos pelos vegetados, chegando a 90,45% em termos de retenção hídrica com redução do *runoff* entre 10 e 44% do volume total induzido. Já na condição úmida, para módulos vegetados, a retenção variou entre 23,64 e 42,76%. Esses valores estão em consonância com os apresentados por Mentens, Raes e Hermy (2006) que indicam valores médios de redução do *runoff* de 30, 51 e 67% para estações, quentes e amenas e frias, respectivamente, com experimentos que variaram entre 50 e 150 mm de altura de substrato, porém sem indicativos da umidade antecedente daqueles experimentos.

Vários autores abordam as faixas de retenção para telhados verdes. Metssalar (2012) usou 7 diferentes espessuras de substratos, com chuvas acumuladas anuais usando modelo matemático que resultou na faixa de retenção de 55 a 75%. Berndtsson (2010) em revisão bibliográfica com chuvas fracas indicou 88% de retenção para espessuras menores de 25 mm e 48% para espessuras superiores a 75mm. Mentens, Raes e Hermy (2006) apurou uma média de 45% para telhados extensivos e 75% para intensivos. Getter, Rowe, e Andresen, (2007) para intensidade média de chuva de 38mm/dia concluiu que a redução pode chegar a 85% com inclinação de 2% para o telhado. Entretanto, por serem pesquisas com chuvas acumuladas naturais não ficou claro nessas faixas de retenção a umidade antecedente do solo. No Brasil Ohnuma, Almeida Neto e Mendiondo (2014) encontraram percentual de até 56%, com chuvas naturais.

Palla, Gnecco e Lanza (2010), na Universidade de Gênova, pesquisaram telhados de 12 cm de espessura com inclinações de 2 a 10%. As intensidades de chuva variaram de 108 a 198 mm/h, com períodos entre 15 e 20min., com uso de um simulador de chuva em laboratório e modelo matemático e apresentando como resultado retenção total anual 40-80%. Lee, Lee e Han (2015) avaliaram a relação chuva-vazão com chuvas naturais e simulador de chuva. Entretanto as intensidades utilizadas foram baixas (1,5 a 7,6mm/h) com duração de 2 a 17 horas e a redução do *runoff* indicada é de 27 a 49%. Ambos os estudo não informam claramente as faixas de umidade antecedentes do solo.

A maioria das fontes consultadas apresentam pesquisas em clima temperado, com intensidades médias de 25 mm/h (SCHROLL, 2011; GETTER, ROWE e ANDRESEN, 2007). Stovin, Poe e Berreta (2013) apresentam simulações e comparativos com modelos matemáticos e intensidade de chuvas acumuladas, por vezes sem o indicativo das faixas de chuvas adotadas na pesquisa, dificultando assim a comparação. Carson et al (2013) em pesquisa com chuvas naturais e modelo matemático, mencionam várias faixas de chuva, porém poucos eventos estão acima de 50 mm/h.

O comportamento dos módulos M-17 e F-17 foi relativamente equivalente, na condição úmida (vegetado e sem vegetação) e na condição de solo seco sem vegetação, apresentando relativa distorção na condição de solo seco vegetado.

Negase e Dunnett (2012) estudaram, na Universidade de Sheffield, a diferença na retenção de água em telhados verdes relacionada com diferentes espécies vegetais, sem, contudo indicar se a diferença ocorre nas duas situações, seca e úmida e concluíram que a grama foi mais efetiva na retenção do que flores silvestres e suculentas. Nesse sentido, Getter, Rowe e Andresen (2007) indicam que as raízes das plantas podem também influenciar na duração do *runoff*, através de canais formados por insetos ou a decadência das raízes, facilitando o início do *runoff*.

4.4.1 Análise dos valores de “C”

24

Tabela 10 – Coeficientes de escoamento do Método Racional (médios), condição de solo seco e úmido, intensidade de 155mm/h com duração de 7 minutos.

	M17		M4		F17		Telha
	C/V	S/V	C/V	S/V	C/V	S/V	
Seco	0,29	0,25	0,38	0,42	0,15	0,24	1,00
Úmido	0,68	0,41	0,65	0,50	0,64	0,42	1,00

Fonte: A autora, 2015.

A média de “C” no presente trabalho (Tabela 10), para módulos vegetados, foi 0,27 em solos secos e para solos úmidos 0,65. Esses valores estão compatíveis com os citados para telhados verdes por: Ohnuma Jr. (2014), média de 0,40; Locatelli (2014), de 0,43 a 0,68; Lorenzini Neto (2013), de 0,25 a 0,3; Berdndtsson (2010) 0,5; Palla (2010), de 0,33 a 0,48 e Mentens (2006) de 0,4 a 0,71. Em outras literaturas (Fundação Rio-Águas, 2010) destinadas a projetos de drenagem esses valores correspondem a áreas residenciais suburbanas (0,25-0,40), florestas ou pastos com declividade inferior a 5% (0,25-0,30) e o valor médio de 0,65 dos módulos com solo úmido são comparáveis com solo compactado (0,59-0,79) e áreas residenciais com unidades múltiplas ou prédios e apartamentos (0,50-0,70), ou ainda em Tomaz (2012), com coeficientes de “C” de 0,10 a 0,30 para quintais e lotes vazios e de 0,25 a 0,60 para vias macadamizadas.

4.4.2. Análise dos valores de CN (SCS)

No Apêndice B são apresentados os valores de CN, calculados pela eq. 3, por tipo de sistema modular, vegetado e sem vegetação, para condições seca e úmida, para as chuvas de 155 mm/h, duração de 7 minutos e para chuva de 130 mm/h e duração de 15 minutos. Nas

²⁴ (C/V) com vegetação; (S/V) sem vegetação

Tabelas 11 e 12 são apresentados de forma consolidada os valores de CN obtidos para a chuva de 155 mm/h e duração de 7 minutos, nas condições solo seco e solo úmido, respectivamente. Nas mesmas tabelas são apresentados também os graus de saturação médios, observados nos sistemas modulares. Nesse caso, a superfície de controle, telha ondulada de fibrocimento, teria CN igual a 100.

Tabela 11– Valores de CN por tipo de sistema modular, vegetados e sem vegetação com solo seco (intensidade de 155mm/h, por 7 minutos).

Tipo do sistema modular	CN (vegetado)	CN (não vegetado)	Grau de Saturação (%)
M-17L	88 - 95	90	5,1 – 47,6
M-4L	92 - 95	94 - 95	3,9 – 57,6
F-17L	86 - 90	90 – 92	8,00 – 49,8

Fonte: A autora, 2015.

Tabela 12 - Valores de CN por tipo de sistema modular, vegetados e sem vegetação com solo úmido (intensidade de 155mm/h, por 7 minutos).

Tipo do sistema modular	CN (vegetado)	CN (não vegetado)	Grau de Saturação (%)
M-17L	97 - 98	93 - 95	24,5 – 56
M-4L	97 - 98	95 - 96	20,7 – 47,9
F-17L	97 - 98	94 - 95	29,2 – 65,0

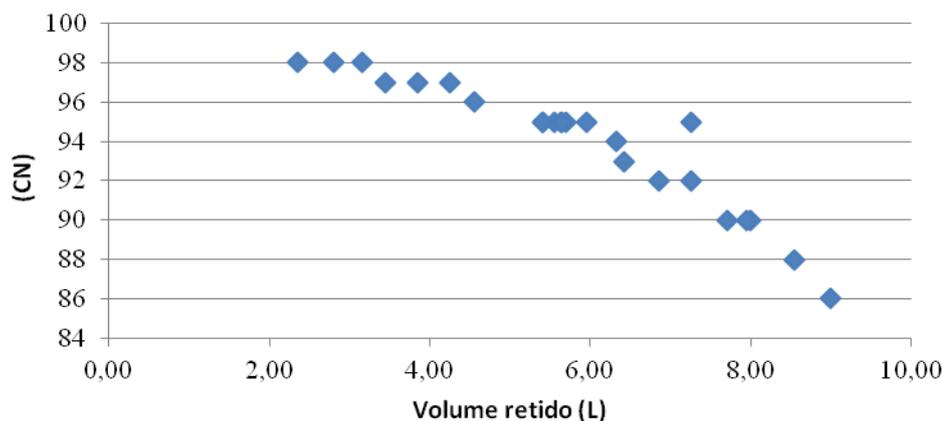
Fonte: A autora, 2015.

Os valores de CN para os sistemas modulares variaram entre 86 (sistema modular F-17 L, solo seco, vegetado) e 98 (M-17 L e M-4 L, solos úmidos, vegetados). Conforme Tabela 6, os módulos vegetados, com solo seco, apresentaram menores valores, média igual a 91, enquanto que CN para os tipos sem vegetação foram em média 92. Para solo úmido, a média para solo sem vegetação foi de 95, enquanto para os módulos vegetados a média foi de 97. O valor de CN médio para os sistemas modulares M-17 L, M-4 L e F-17 L foram respectivamente, 93, 95 e 93. Se levado em conta a condição úmida e seca, os valores seriam respectivamente, para a condição seca: 91, 94 e 89, para a condição úmida: 96, 96 e 96.

Ainda, considerando a condição vegetado e não vegetado, os valores seriam: vegetado – 94, 95, 93; e não vegetado 92, 95, 93.

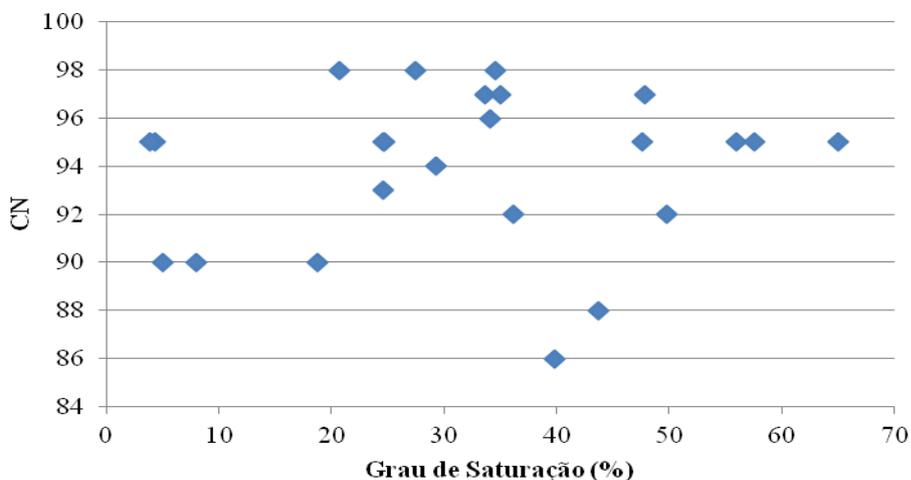
Os valores de grau de saturação variaram entre 3,89 e 65%. Sendo os valores admitidos para condição seca, entre 3,89 e 57,6 %. E, para a condição úmida, entre 20,72 e 65%. Conforme esperado, os valores de CN para a condição úmida foram maiores do que para a condição seca. Exceto, para um dos ensaios, a hipótese de condição seca e úmida do substrato foi considerada válida, já que em todas as outras situações o grau de saturação dos solos foi maior para a condição estabelecida como úmida. No entanto, observa-se uma superposição entre as faixas de variação dos graus de saturação para as condições admitidas como seca e úmida, o que poderia levar a um critério diferente, mais detalhado para diferenciar “seco” e “úmido”. Foram realizadas análises entre CN’s e volumes retidos (Figura 59). Conforme esperado, quanto maior o volume retido (menor *runoff*), menor o valor de CN. Foram também analisadas a relação entre os valores de CN’s e os graus de saturação médios obtidos para os substratos dos sistemas modulares. Nesse caso, no entanto, não se pode observar uma tendência determinada (Figura 60). Foram feitas diversas tentativas para relacionar CNs e os graus de saturação, classificando as amostras pela condição seca e úmida, vegetado ou não, por tipos modulares, pela classificação dos graus de saturação. Sendo que no último caso, pode-se obter uma tendência mais clara, para as amostras com graus de saturação maiores do que 40 % (Figura 61).

Figura 59 – Relação entre CN’s e volume retido em todos os tipos de solos nos módulos, nas condições seca e úmida.



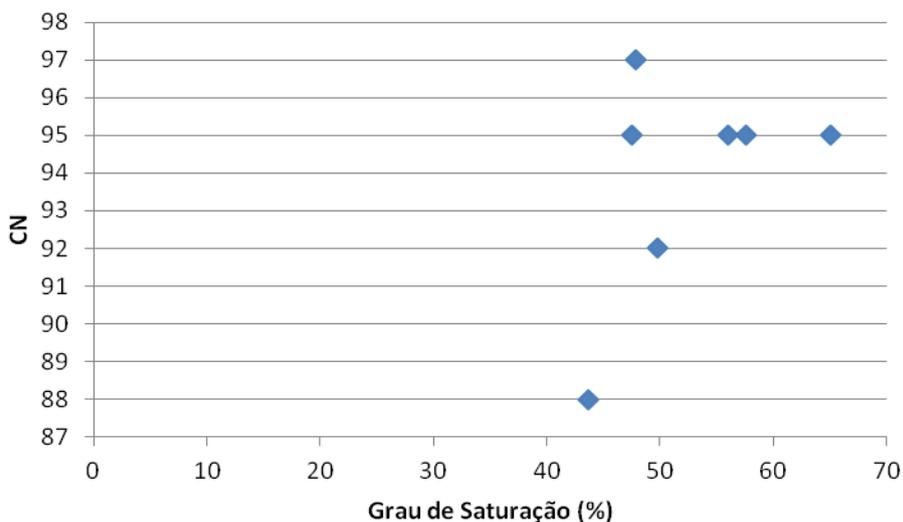
Fonte: A autora, 2015.

Figura 60 – Relação do CN x Grau de Saturação considerando todos os módulos nas condições seca e úmida.



Fonte: A autora, 2015.

Figura 61 – Relação CN X Grau de Saturação (> 40%)



Fonte: A autora, 2015.

Foram feitas várias conjecturas para justificar o comportamento dos valores de CN em relação ao grau de saturação, desde a possibilidade de erros nas análises das amostras em laboratório, até questões associadas à gênese da metodologia experimental adotada, como por exemplo, o uso da média dos graus de saturação entre os dois elementos que compunham os sistemas modulares. No entanto, o que pareceu mais plausível foi a observação de uma

dispersão, até certo ponto esperada. Ressalta-se que não foram realizadas muitas repetições com diferentes volumes de chuva simulada induzida, assim como também, não foram repetidas muitas vezes análises de solo, ou mesmo estudada uma nova forma para classificar as amostras em seca e úmida, o que parece em princípio ser necessário. Afinal, não se pode dizer que grau de saturação de 40 % seria representativo de condição seca e úmida ao mesmo tempo, como foi verificado nos ensaios. Embora sob hipótese de condição seca, o grau de umidade e saturação verificados foram altos.

Outro dado a ser considerado é a forma física das bandejas que compõe os módulos. Essas bandejas possuem reservatórios de água (Figura 34), descrita no Capítulo 3.5, com capacidade para 4 ou 17 litros por metro quadrado. Dessa forma, quando da execução dos ensaios, principalmente na situação de solo seco, não foi possível mensurar quanto ficou efetivamente retido no solo e quanto ficou retido no fundo das bandejas.

Os valores de CN obtidos nesse estudo com telhados verdes modulares são compatíveis com os valores apresentados na descrição da metodologia do SCS para bacias urbanas e suburbanas (vários livros-texto e.g. Tucci (1993); Tomaz (2008)) para solo “tipo D”, solos contendo argilas expansivas e pouco profundos com muito baixa capacidade de infiltração, gerando a maior proporção de escoamento superficial. Para esse grupo de solos, CN varia entre 77 e 98.

Com relação a valores obtidos em outros experimentos envolvendo telhados verdes, observou-se que os valores encontrados de CN para telhados verdes na literatura foram: 83 (Lorenzini Neto et al. 2013); 84-90 (Getter, Rowe, e Andresen, 2007); 88 (Carter e Rasmussen, 2005); 86 (Carter e Jackson, 2007); 76-84 (Ohnuma, Almeida Neto e Mendiondo, 2014). Nem sempre nesses estudos os autores relatam claramente se houve correção da condição (II ou III), após o cálculo para a determinação de CN.

Todos os valores de CN em solo úmido ficaram acima dos valores referenciados em literatura sobre telhados verdes, o que não ocorreu com solo seco. Entretanto os valores deste trabalho são os de cálculo e as referências consultadas não indicam claramente se os valores apresentados foram ajustados de acordo com a umidade antecedente do solo.

Tomaz (2008) relata que os valores de CN são melhores (promovem melhor controle dos escoamentos superficiais) para solos secos com vegetação esparsa que para solos com vegetação densa e ressalta em Tomaz (2011), que o número da curva (CN) descreve uma situação média e útil, devendo ser utilizada com precaução, pois a equação não contém o parâmetro tempo e não considera a duração da chuva.

O comportamento dos módulos vegetado e sem vegetação quanto ao CN (SCS) e “C” foram proporcionais, na avaliação do escoamento superficial (*runoff*), embora não se possa comparar as duas metodologias, que têm concepção diferenciada (modelos empíricos).

Alguns dados de umidade do solo causaram surpresa e suscitam dúvidas (Tabelas 4 e 5). Por exemplo: comparando o M-17 nos dois ensaios com solo seco, apesar da umidade no dia 14 fev. ser 38% superior a do dia 28 jan. o *runoff* foi 66% menor e o grau de saturação 76% superior. O M-4, apesar da baixa umidade do dia 28 jan., (6,54%), com grau de saturação de 4,4% e *runoff* de 4,4 L (45% do volume aplicado) não demonstrou coerência na proporcionalidade com o dia 14 fev., quando a umidade indicada no relatório foi de 60,99%, com grau de saturação de 36,1% e *runoff* de 3,1 L (31% do volume aplicado). Ou seja, de acordo com as análises do solo nesses ensaios os maiores teores de umidade e graus de saturação ocasionaram menores *runoff*. Da mesma forma que nos módulos vegetados os módulos sem vegetação também causaram surpresa. Comparando os dois ensaios de 28 jan. e 14 fev. pode-se observar que, apesar da grande diferença nos teores de umidade e grau de saturação os volumes de *runoff* e retido foram quase iguais nos mesmos tipos de módulos. Ainda com relação a esses dados o entendimento é que os maiores teores de umidade e graus de saturação demandaram mais tempo para o início do *runoff*.

Em razão dessas constatações foi providenciado um ensaio no dia 03 de março de 2015, quando os solos estavam bem secos, próximo ao ponto de murcha, foi efetuado novo ensaio visando avaliar dos resultados apresentados no dia 28 de jan. e 14 fev. pelo M-17. Esses novos resultados para o M-17 foram: Pefe (5,82 mm); *runoff* (3,2 L); retido (6,7 L); CN (93); C (0,32); início e término do *runoff* (3:12 e 17:40 min.). Já para o M-4 e o F-17 os valores foram praticamente idênticos aos do dia 28 de jan. 2015 (Tabela 13), levando a crer que os reais valores do M-17 daquela oportunidade (28 jan.) seriam equivalentes ao do ensaio do dia 03 de março. Nesse novo ensaio não houve coleta de solo para análise do teor de umidade, por esse motivo os dados foram considerados em tabela independente, não participando das médias e serviram somente para balizar o entendimento.

Tabela 13 - Ensaio de 155 mm/h, com solo seco, em módulo vegetado, em 03 mar. 2015, como repetição do ensaio de 28 jan., sem análise de umidade do solo.

	Seco - Vegetado (03 mar 2015)			
	M-17	M-4	F-17	Telha
	03/mar	03/mar	03/mar	03/mar
P (mm)	18,00	18,00	18,00	18,00
PEFE (mm)	5,82	7,85	3,82	18,09
PEFE (L)	3,20	4,32	2,10	9,90
Retido (L)	6,70	5,58	7,80	0,00
Retido (%)	67,65	56,34	78,76	0,00
CN (SCS)	93	95	90	100
C (Racional)	0,32	0,44	0,21	1,00
Umidade (%)	--	--	--	--
Início runoff (mm:ss)	03:12	02:47	04:03	00:04
Duração runoff (mm:ss)	17:40	16:17	22:12	07:00

Fonte: A autora, 2015.

5 CONCLUSÃO

O objetivo do presente trabalho foi avaliar a relação chuva-vazão nos telhados verdes modulares, sobretudo nos sistemas ICJ, sob chuva intensa de curta duração.

A infraestrutura definida, projetada e executada, como: localização dos experimentos, bancadas metálicas, instalações elétricas e hidráulicas, materiais empregados e vegetação utilizada, atenderam adequadamente ao pretendido, complementando estudos do Projeto HIDROCIDADES.

O simulador de chuva, um dos principais componentes da pesquisa não atendeu plenamente as expectativas uma vez que não foi possível o ajuste do equipamento para indução de chuvas de média e baixa intensidade, para tal será necessário modificar o sistema, com substituição da bomba, circuito de retorno e possivelmente, acoplar a um pressurizador.

A metodologia adotada para a realização dos ensaios, apesar de não ser possível sem a participação de pelo menos 3 pessoas, se mostrou eficiente e viável.

As espécies vegetativas utilizadas apresentaram rápido desenvolvimento, aproximadamente 40 dias para preencher toda a área dos módulos. Entretanto, observou-se a predominância da *Portulaca oleracea* (Onze horas) sobre as demais, confirmando considerações do Capítulo 3.6, que a indica como uma espécie invasora. Por outro lado, a fluorescência dessa espécie foi a principal responsável pela atração dos insetos observados nos módulos, em especial a abelha *Trigona spinipes*, conhecida popularmente como abelha-cachorro. Com relação às aves, não foi possível confirmar se a presença de *Psittacidaes*, conhecidas popularmente como maritacas, estariam relacionadas com o projeto. Essas aves, embora tenham sido observadas na cobertura do edifício, não foram vistas nos módulos.

Os ensaios foram realizados sob temperaturas elevadas (29 a 34 °C), com eventuais e rápidas rajadas de vento (5 a 26 Km/h) que pouco interferiram nos ensaios em razão tela agrícola instalada com essa finalidade.

A forma geométrica retangular dos módulos e a aspersão da chuva por um único bico não permitiu uma distribuição espacial uniforme da chuva. Assim, os solos das regiões centrais dos módulos atingiram níveis de saturação mais rapidamente que as extremidades, pressupondo que isso pode ter induzido a aceleração do início do escoamento superficial (*runoff*).

Todos os resultados de umidade gravimétrica demonstraram que as regiões mais próximas a calha de coleta do *runoff*, eram mais úmidas, talvez em razão da inclinação adotada (6%).

O módulo vegetado F-17, seguido do M-17 foram os que apresentaram melhores resultados, tanto em retenção quanto na redução do *runoff*, principalmente com solo seco. As diferenças em volumes retidos entre eles foram, em média, menores de 10% nos dois tipos de módulos (vegetado e sem vegetação) e em qualquer condição de solo. Entretanto, os tempos de duração do *runoff* variaram entre 10 minutos e 22 segundos, para o M-17 sem vegetação, estado úmido, até 38 minutos e 30 segundos para o sistema F-17 vegetado, estado úmido.

Os módulos do Sistema Modular Cidade Jardim possuem características físicas que possibilitam a retenção de água nas “cubetas” das bandejas. Dessa forma, embora sabendo-se que há capacidade de armazenamento de água nesses “compartimentos”, não foi possível apontar ou diferenciar quanto ficou retido no fundo das peças módulos e quanto ficou retido no composto, apesar dos dados referentes ao grau de saturação do composto.

Analisando o sistema modular como um todo, só diferenciando quanto a seco e úmido, a retenção hídrica com solo seco foi 61% superior ao solo úmido. Sendo a duração do *runoff*, independentemente do estado do solo ou da presença da vegetação de aproximadamente 19 minutos.

Alguns resultados relativos à umidade gravimétrica e graus de saturação se mostraram incompatíveis com os dados gerados pelos ensaios: volumes de *runoff*, volumes retidos, e consequentemente, CN e coeficiente de escoamento superficial (C), além do tempo de resposta do *runoff*. Como exemplo: M-17 ensaios com solo seco sem vegetação, onde a diferença de 800% no grau de saturação proporcionou o mesmo rendimento em retenção hídrica, ou no M-4 vegetado seco, onde o módulo com grau de saturação 700% superior reteve 23% mais água. Esses dados causaram surpresa e dificultaram algumas avaliações e comparativos do comportamento hidrológico dos módulos, não permitindo mensurar a real interferência da umidade nesses sistemas, principalmente com solo seco, levando a crer que tenha havido alguns equívocos no relatório de umidade do solo.

Diferentemente do esperado, o Relatório de Umidade do solo, não demonstrou relação direta entre graus de saturação e volumes retidos.

Foi constatado que as unidades vegetadas sempre apresentaram teor de umidade superior aos não vegetados, contribuindo dessa forma para a menor eficiência na retenção dos volumes induzidos durante os ensaios. Aliado a isso, alta intensidade da chuva induzida e a

forma geométrica dos módulos que não possibilitaram uma perfeita distribuição espacial da chuva, podem ter interferido quantitativo de volume de água retido e nos tempos de resposta para início do *runoff*.

Conforme esperado os valores do coeficiente de escoamento superficial (C), dos módulos com solo seco, foram os que apresentaram melhores resultados (0,15 a 0,42), principalmente os módulos vegetados (0,15 a 0,38), com melhor performance para o F-17 (0,15). O que não se confirmou ocorreu na condição úmida (0,41 a 0,68), quando os menores valores foram apresentados pelos módulos sem vegetação (0,41 a 0,50). Esses valores estão em consonância com estudos em telhados verdes que apresentam valores de C entre 0,40 a 0,71.

O valor de CN médio para os sistemas modulares M-17 L, M-4 L e F-17 L foram respectivamente, 93, 95 e 93. Com solo seco o menor valor de CN, calculado a partir dos resultados gerados pelos ensaios, foi 86 no módulo vegetado F-17 e o maior valor foi 95 para o M-4, nas formas, vegetado e sem vegetação. Já os maiores valores de CN foram para os módulos com solo úmido. Entretanto esperava-se que fossem para as formas sem vegetação, o que não ocorreu. Os maiores CN para condição úmida foram dos módulos vegetados (97-98), enquanto os sem vegetação apresentaram de valores entre 94 e 96. A explicação pode estar relacionada à exposição do solo nu às altas temperaturas, favorecendo a evaporação, enquanto o solo vegetado esteve sombreado pela vegetação. Todos os valores de CN em solo úmido ficaram acima dos valores referenciados em literatura sobre telhados verdes. Já os valores em solo seco estão compatíveis com algumas referências.

Os valores de CN nas literaturas sobre telhados verde, que não são muitos, variaram entre 76 e 90. A maioria não apresenta indicativo quanto à que condições de umidade antecedente do solo ou se referem ou a metodologia aplicada para a determinação de CN, levando a crer, em razão dos números, que houve o ajustes, conforme tabela CN (SCS).

Neste trabalho optou-se por adotar valores de CN apurados nos cálculos derivados das fórmulas. Dessa forma, não havendo ajustes ou correções com aplicação da tabela CN-SCS pode-se considerar compatíveis com a literatura.

A média geral do CN (SCS) constatada no presente estudo, entre os módulos vegetados na condição seca e úmida, foi 94, 95, 92, para M-17, M-4 e F17, respectivamente. A opção pela exclusão do módulo sem vegetação na média considerou que estudos que tratam de telhados verdes pressupõe que haverá a vegetação, tendo os módulos sem vegetação utilizada como comparativos do estudo.

Considerando que o volume de composto dos módulos M-17 e M-4 é o mesmo, e que a característica física do M-4, possibilita armazenamento de volume de água menor (no fundo do módulo) que no M-17 ou F-17, supõe-se que esse valor de CN esteja diretamente relacionado com essa característica física, ou seja, o M-4 comparado ao M-17 ou F-17, submetido às mesmas condições, sempre proporcionará maior *runoff*, em caso de altas intensidades de chuva.

A média dos resultados dos ensaios nos módulos M-17, M-4 e F-17 demonstram que a melhor contribuição desse tipo de sistema no retardo e redução do escoamento superficial é para situações de módulos vegetados secos. Entretanto a utilização, M-17 e principalmente do F-17 devem ser vistos com cuidado, em razão do peso desses sistemas, que por metro quadrado, armazenam até 0,05m³ de substrato e 17L de água. Segundo ICJ, o peso do M-17 e do F-17 podem chegar a 80 kg/m² com solo saturado, enquanto o M-4 pode chegar a 60 kg/m².

A média dos resultados dos ensaios nos módulos M-17, M-4 e F-17 demonstram a excelente possibilidade de contribuição desse tipo de sistema no retardo e redução do escoamento superficial, mesmo para chuvas intensas de curta duração, permitindo supor que, se a chuva do dia 14 fev. 2015, no F-17, fosse melhor distribuída não haveria escoamento superficial, ficando retido no solo todo o volume de chuva(9,95L em 0,55m²).

Limitações

O simulador de chuva apresentou limitações para utilização em chuvas reais, não possibilitando a realização de chuvas de média ou baixa intensidade. Sugerem-se adaptações internas no sistema, com substituição das mangueiras de alívio e retorno por outras de maior diâmetro, substituição da bomba por outra de menor vazão ou acréscimo de sistema de pressurização com ar comprimido, de forma a permitir chuvas em forma de névoas.

Resultados não esperados

Esperava-se que o simulador de chuva possibilitasse a simulação de eventos de menor intensidade (chuvas média e fraca).

Os módulos úmidos sem vegetação apresentarem melhores resultados que os úmidos vegetados foi uma ocorrência não esperada. Talvez a vegetação não tenha permitido melhor distribuição da chuva, saturando rapidamente a região central do módulo, que recebeu os jatos dos bicos e, por já estar com umidade elevada, próxima da saturação, favoreceu a formação de um caminho para aceleração do *runoff*, somando-se a isso, a exposição direta do solo nu à radiação solar, proporcionando maior evaporação nos módulos sem vegetação.

Sugestões para trabalhos futuros

Adoção de módulos quadrados de 1,0 x 1,0 m para pesquisa com sistema ICJ ou equivalentes de outra empresa.

Utilização da infraestrutura existente para desenvolvimento de pesquisas com chuvas naturais, com instalação de um pluviômetro.

Adequações no sistema (simulador), de forma a acoplar um pressurizador e outro tipo de bico que possibilite pequenas gotas

Avaliar outros modelos de sistemas modulares quanto à eficiência na retenção e retardo das águas pluviais.

Estudo com outras espécies vegetativas para implantação em telhados verdes e suas relações com retardo e retenção de águas pluviais.

Análise da qualidade das águas pluviais.

Investigar se a razão dos módulos vegetados apresentarem baixo rendimento na condição úmida, comparados aos sem vegetação está relacionada à distribuição espacial da chuva.

Investigar se a presença das aves está relacionada ao telhado verde.

REFERÊNCIAS

- AGOSTINI, K.; SAZIMA, M. Plantas ornamentais e seus recursos para abelhas no Campus da Universidade Estadual de Campinas, Estado de São Paulo, Brasil. *Bragantia*, v. 62, n. 3, p.335-343. 2003. (disponível em <http://www.scielo.br/pdf/brag/v62n3/v62n3a01.pdf>).
- ALEXANDRI, E.; JONES, P. Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. *Building and Environment*, n. 43, p. 480-493. 2008.
- ALFREDO, K. et al. Observed and modeled performances of prototype green roof test plots subjected to simulated low and high-intensity precipitations in a Laboratory experiment. *Journal of Hydrologic Engineering*. v. 15, p. 444-457. 2010.
- ANDROS, T.; MACLIN, T. Green roof proposal and guide. UGA Environmental Practicum. Athens-Clark Country City Hall. 75p. 2007.
- ARAÚJO et al Balanço hídrico de sistema modular para telhado verde. *Enciclopédia Biosfera*, v. 10, n. 18, p.636-642. 2014.
- BARBOSA JÚNIOR, A. R. Elementos de Hidrologia Aplicada, cap. 6, p. 92-112. Disponível em: <http://www.academia.edu/9476587/Elementos_de_Hidrologia_Aplicada>. Acesso em 12 fev. 2015.
- BERARDI, U; GHAFARIANHOSEINI, A. e GHAFARIANHOSEINI, A.. State-of-Art analysis of the environmental benefits of Green roofs. *Applied Energy*, n. 115, p. 411-428. 2014.
- BERNDTSSON, J. C.; BENGTTSSON, L.; JINNO, K. Runoff water quality from intensive and extensive vegetated roofs. *Ecological Engineering*, n. 35, p. 369-380. 2009.
- BERNDTSSON, J. C. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. *Ecological Engineering*, n. 36, p.351-360. 2010.
- BIANCHINI, F.; HEWAGE, K. How green roof are the green roof? Lifecycle analysis of green roof materials. *Building and Environment*, n. 48, p. 57-65. 2012.
- BLANK, L. et al. Directions in green roof research-bibliometric study. *Building and Environment*, n. 66, p. 23-28. 2013.
- BRENNEISEN, S. Space for wildlife: Designing green roofs as habitats in Switzerland. *Urban Habitats*, v. 1, n. 4. 2006.
- CANERO, R. F. e REDONDO, P. G. Green Roof as a Habitat for Birds: A Review. *Journal of Animal and Veterinary Advances*, n. 15, p. 2041-2052. 2010.
- CARSON, T. B. et al. Hydrological performance of extensive green roofs in New York City: Observations and multi-year modeling of three full-scale systems. *Environmental Research Letters*, n. 8, p. 1-13. 2013.

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

CARTER, T.; BUTLER, C. Ecological impacts of replacing traditional roofs with green roofs in two urban areas. *Cities and the Environment*, v. 1, n. 2, 17p., 2008.

CARTER, T. L.; RASMUSSEN, T. C. Use of green roof for ultra-urban stream restoration in the Georgia Piedmont (USA). Georgia Water Resources Conference. 2005. Disponível em: <http://scholar.google.com.br/scholar?hl=pt-BR&q=Use+of+green+roof+for+ultra-urban+stream+restoration+in+the+Georgia+Piedmont+&btnG=&lr=>. Acesso em 08 out. 2014.

CERQUEIRA, L.F.F.; PIMENTEL da SILVA, L. Re-Desenho Urbanístico pela Gestão Integrada dos Recursos Hídricos e do Planejamento Urbano: o caso das comunidades periurbanas de Jacarepagua-RJ, Brasil. In: XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 27, São Paulo, 2007. 18f.

CHEN, Y. The intervention of plants in the conflicts between buildings and climate – A case study in singapore. A thesis submitted for the degree of doctor of philosophy department of building National University of Singapore, 2006.

ELEFTHERIA, A.; JONES P. Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates, *Building and Environment*, n. 43, p. 480-493. 2008.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies – Green Roof. US, 2008. 29p. Disponível em: <http://www.epa.gov/heatisd/mitigation/greenroofs.htm>. Acesso em: 17 nov. 2014.

FERRAZ, I. L. *O Desempenho térmico de um sistema de cobertura verde comparação ao sistema tradicional de coberturas com telhas cerâmicas*. 2012. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, São Paulo, 2011.

FERREIRA, A. O. et al. Influência da declividade e de desníveis de cobertura do solo no processo de erosão com chuva simulada. Mossoró, Rio Grande do Norte. *Revista Verde*, v. 5, p. 182-190, 2010.

FLL. Guideline for the Planning, Construction and Maintenance of Green Roofing. 2002. Disponível em: <http://www.greenroofsouth.co.uk/FLL%20Guidelines.pdf>. Acesso em: 23/11/2014.

FRANCISCO, S. A. *Estimativa de vazões máximas no rio Benevente (ES) com auxílio de modelo chuva-vazão*. 2013. 97p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia Ambiental). Universidade Federal do Espírito Santo. Espírito Santo. 2013.

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

GETTER, K. L. et al. Carbon sequestration potential of extensive green roofs. *Environmental Science & Technology*, v. 43, n. 19, 7564-7570. 2009..

GRACESON A. et al. The water retention capabilities of growing media for green roofs. *Ecological Engineering*. n. 61, p. 328-334. 2013.

GREGOIRE, B.; CLAUSEN, J. C. Effect of a modular extensive green roof on stormwater runoff and water quality. *Ecological Engineering*. n. 37, p. 963-969. 2011.

HUI, C. M.; CHAN, H.. Development of modular Green roofs for high density urban cities. In: THE 2008 WORLD GREEN ROOF CONGRESS. 2008. Londres. 13p. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10722/62257>. Acesso em: 13 mar 2015.

HUMPHRY, J. B. et al. A Portable Rainfall Simulator for Plot-Scale Runoff Studies. *American Society of Agricultural Engineers*, v. 18, p. 199-204. 2002.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). disponível em <<http://www.censo2010.ibge.gov.br/sinopse/index.php?dados=11&uf=00>>. Acesso em 03 ago. 2014.

INTERNATIONAL GREEN ROOFS ASSOCIATION (IGRA). International Green Roofs Association - ><http://www.igra-world.com/><. Acesso em 22 dez. 2013.

INSTRUÇÕES TÉCNICAS PARA ELABORAÇÃO DE ESTUDOS HIDROLÓGICOS E DIMENSIONAMENTO HIDRAÚLICO DE SISTEMAS DE DRENAGEM. 1 ed., 2010, Rio de Janeiro. Secretaria Municipal de Obras. Disponível em://www.rio.rj.gov.br/web/rio-aguas/licenciamento-de-projetos-particulares-de-drenagem. Acessado em 02 mai. 2014.

IPCC – Intergovernmental Painel on Climate Change 2013. Disponível em: http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_SPM_FINAL.pdf. Acesso em 05 jul. 2014.

ISERLOH, T. et al. A small rainfall simulator for reproducible experiments on soil erosion. *Soil & Tillage Research*, Germany, n. 124, p. 131-137. 2012.

JOHNSTON, J.; NEWTON J. Building Green, A guide to using plants on roofs, walls and pavements. Greater London Authority. 125p. 2004.

KERBS, L. F.; FONTES, P. W.; FEDRIZZI, B. Percepção ambiental no ambiente construído: Um estudo exploratório sobre coberturas vivas. In ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 14. 2012, Juiz de Fora. p.2359-2364. Disponível em: http://scholar.google.com.br/scholar?q=Percep%C3%A7%C3%A3o+ambiental+no+ambiente+constru%C3%ADdo%3A+Um+estudo+explorat%C3%B3rio+sobre+coberturas+vivas.+&btnG=&hl=pt-BR&as_sdt=0%2C5. Acesso em jun. 2014.

KIST, R. C. Coberturas verdes sobre edificações: avaliação de satisfação de moradores de um condomínio horizontal na cidade de Porto Alegre. 2011. 74f. Trabalho de Conclusão de Curso (Título de Engenheiro Civil). Universidade federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

KRISTIN L, et al. The Role of Extensive Green Roof in Sustainable Development, *Hort Science*, n. 41, p. 1276-1285. 2006.

LEE, J. Y.; LEE, M. J.; HAN, M. A pilot study to evaluate runoff quantify from green roofs. *Jornal of Environmental Management*, n. 152, p. 171-176. 2015.

LIOR B. et al. Directions in green roof research: a bibliometric study. *Building and Environment*, n. 66, p. 23-28, 2013.

LOCATELLI, L. et al. Modelling of green roof hydrological performance of urban drainage application. *Jornal Hydrology*, n. 519, p. 3237-3248. 2014.

LORENZINI NETO, F. et al. Calibração e simulação hidrológica de um telhado verde utilizando o Método da Curva-Número do SCS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20. Bento Gonçalves, RS. 2013. 8f.

MARCOLINO, T. P. *Estudo de espécie nativa da restinga para plantio em telhados de construção de interesse social*. 2012. 84f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental)-Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2012.

MARY, W. et al. Telhados Verdes: ferramenta potencial para geração de renda em área de fragilidade social. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENSINO DE PAISAGISMO EM ESCOLAS DE ARQUITETURA E URBANISMO NO BRASIL, 9. 2008. Curitiba.

MARY, W. et al. Tecnologias alternativas de produção vegetal em telhados verdes em áreas de interesse social. *Conexão UEPG*, p. 60-67. Disponível em <http://www.eventos.uepg.br/ojs2/index.php/conexao/article/viewFile/3747/2631>. Acesso em 22 jun. 2014.

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*, n. 77, p. 217-226. 2006.

METSELAAR, K. Water retention and evapotranspiration of green roofs and possible natural vegetation types. *Resources, Conservation and Recycling*, n. 64, p. 49-55. 2012.

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

NASCIMENTO, W. C.; SCHIMID, A. L. Coberturas verdes na Região Metropolitana de Curitiba – Barreiras e potencial de estabelecimento na visão de profissionais da construção civil. In ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 12. 2008, Fortaleza. Disponível em: <http://www.piniweb.com/datapini/bancomaterias/images/ENTAC2.pdf>. Acesso em 26 mai. 2014. 10f.

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

OHNUMA JUNIOR, A. A. *Medidas não convencionais de reservação de água para o controle da poluição hídrica em lotes domiciliares*. 2008. 306f. Tese (Doutorado em Ciência da Engenharia Ambiental) - Departamento de Ciências da Engenharia Ambiental, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, 2008.

OHNUMA JR. A. A.; ALMEIDA NETO, P; MEDIONDO, E. M. Análise da retenção hídrica em telhados verdes a partir da eficiência do Coeficiente de Escoamento. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, n. 2, p. 41-52. 2014.

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

OULDBOUKHITINE, S. E; BELARBI, R.; DJEDJIG, R. Characterization of green roof components: Measurements of thermal and hydrological properties. *Building and Environment*, n. 56, p. 78-85. 2012.

PAIGE, G. B., et al. The Walnut rainfall simulator: A computer controlled variable intensity rainfall simulator. *Engeneering in Agriculture*, v. 20, p. 25-31. 2003.

PALLA, A.; GNECCO, I.; LANZA, L. G. Hydrologic Restoration in the Urban Environment Using Green Roofs. Genova, Italia. *Water Jornal*, n. 2, p. 140-154. 2010.

PIMENTEL da SILVA, L. et al. Métodos Não Convencionais na Conservação da Água em Bacias Peri-Urbanas. In: ENCONTRO NACIONAL DAS ÁGUAS URBANAS, 8. 2008. Rio de Janeiro.

PROWELL, S. E. An analysis of stormwater retention and detention of modular green roof blocks. Athens, Georgia. 2006. 98p. Dissertação (Mestrado em Cência). University of Georgia. EUA.

RENTERGHEM, T. V.; BOTTELDOOREN, D. Reducing the acoustical façade load from Road traffic with Green roofs. *Building an Environmental*, n. 44, p. 1081-1087. 2009.

RIES, J. B. et al. Calibration of simulated rainfall characteristics for the study of soil erosion on agricultural land. *Soil & Tillage Research*. Germany, n. 106, p. 109-116, 2009.

ROSSETI, K. A. C. et al. Abordagens sistêmicas dos efeitos da implantação de telhados vegetados. *Brazilian Geoghaphical Journal: Geosciences and Humanities research medium*. v.4, n. 1, p 55-77. 2013.

ROTH, C. H., MEYER B., GOTTINGEN, F. A Portable rainfall simulator for studying factors affecting runoff, infiltration and soil loss. *Braunschweig*, v. 12, p. 79 - 85. 1985.

ROWE, D. B. Green roofs as means of pollution abatement. *Environmental Pollution*, n. 159, p. 2100-2110. 2011.

SANTAMOURIS, M. Cooling the cities – A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments, *Solar Energy*, 22p. 2012. Disponível em <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2012.07.003>. Acesso em 18 set. 2014.

SANTOS, E. M. Avaliação de técnicas de conservação de água e solo em bacia experimental do semi-árido Pernambucano. 2006. 69f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife. 2006.

SANTOS et al. Telhado verde: desempenho do sistema construtivo na redução do escoamento superficial. *Ambiente Construído*. V. 13, n. 1, p. 161-174. 2013.

SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ A. Classificação hidrológica de solos brasileiros para estimativa da chuva excedente com o método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: classificação, *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 10, n. 4, p. 05-18. 2005.

SARTORI, A.; GENOVEZ A.; LOMBARDI NETO, F. Classificação hidrológica de solos brasileiros para estimativa da chuva excedente com o método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 2: Aplicação, v. 10, n. 4, p. 19-29. 2005.

SCHROLL, E. et al. The role vegetation in regulating stormwater runoff from green roof in winter rainfall climate. *Ecological Engineering*, n.37, p. 595-600. 2011.

SHENG ,L. X. et al. Integrated sustainable roof design. *Procedia Engineering*, n. 21, p. 846 – 852. 2011.

SILVA, S., T. Pedro et al. Telhado verde: desempenho do sistema construtivo na redução do escoamento superficial. *Ambiente Construído*. V.13, n. 13, 2013.

SILVA, E. C. R.; FONSECA, A. B. Horta em escolas urbanas, complexidade e transdisciplinaridade: Contribuição para educação ambiental e para a educação em saúde. *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*, v. 1, n. 3. 2011. <http://revistas.if.usp.br/rbpec/article/viewFile/411/271>. Acesso em 10 set. 2013.

SOUZA, V. F. et al.. Distribuição de fertilizantes em um sistema de fertirrigação por gotejamento. Campina Grande. Paraíba. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 7, n. 1, p. 186-189. 2003.

STOVIN, V. – The potential of Green roofs to manage Urban Stormwater. *Water and Environment Journal*, n. 24, p. 192-199. 2010.

STOVIN, V.; POË, S.; BERRETTA, C.– A modeling study of long term green roof retention performance. *Jornal of Environmental Management*, n. 131, p. 206-215. 2013.

TOMAZ, P. Chuva excedente método do número CN do SCS. In: _____. Curso de manejo de água pluviais. Cap. 12. 2008. 17p. Disponível em:

<http://www.pliniotomaz.com.br/downloads/Novos_livros/livro_metodo_calculos_vazao/capitulo12.pdf>. Acesso em 28 fev. 2015.

TOMAZ, P. Método Racional. In: _____. Curso de manejo de água pluviais. Cap. 2. 2011. 24p. Disponível em: http://www.pliniotomaz.com.br/downloads/livro_calculos/capitulo02.pdf. Acesso em 28 fev. 2015.

TOSSELL, R. W. et al. A portable rainfall simulation. *Canadian Agricultural Engineering*. v.29, n. 2, p. 155-162. 1987.

TUCCI, C.E.M.; PORTO, R. L.; BARROS, M.T. Drenagem urbana. ABRH, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto alegre: ABRH, 1985

TUCCI, C.E.M. Hidrologia: Ciência e Aplicação. Porto alegre. 2. ed. UFRGS, 1993. 943 p.
UNITED STATES PATENT. MacDonough et al. Modular green roof covering system. US n. 6.606.823 B1, 20 march 2002, 19 august 2003.

WALDBAUM, H.. *Green roof for urban agriculture*. What is required to support their implementation in the UK. Advanced Environmental and Energy Studies. University of East London, School of Computing and Technology. 154 p. 2008.

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

WONG, N. H. et al. Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment. *Building and Environment*, n. 38, p. 261-270. 2003.

APÊNDICE A - Quadro de registros dos resultados dos ensaios

Ensaio no.

Data: Hora:

Condições do tempo: S P N N C

Temperatura:

Vento:

Intensidade da chuva simulada: mm/h

Duração: min

Chuva: mm/h (0,55m²)

Pressão utilizada: Bar

Ensaio anterior no.: Data:

Grau de saturação do solo: %

data última chuva:

altura: mm Duração: min

Unidade Experimental	Bico de jato	Precipitação P (mm)	Início runoff (hh/mm/ss)	Término runoff (hh/mm/ss)	Duração runoff (hh/mm/ss)	Runoff (L)	PEFE (mm)	Retido (L)	S (mm)	CN	C (RACIONAL)	Observações
M 17 (0,55m ²)	vermelho											
M 4 (0,55m ²)	verde											
F17 (0,55m ²)	azul											
Superfície de controle	amarelo											

OBSERVAÇÕES

Dados climatológicos referência Alerta Rio São Cristóvão

Condições do tempo

S – Sol

PN - Parcialmente Nublado

N – Nublado

C – Chuva

SCS CN:

$PEFE = ((P - 0,2S) ** 2) / (P + 0,8S)$

$S = (25400 / CN) - 254$

Método Racional:

$Q = 0,278 \text{ C.I.A}$

APÊNDICE B2 – Quadro de resultados da unidade experimental M- 4L, relacionado ao coeficiente de escoamento superficial “C” (150mm/h)

DATA	Chuva simulada		Solo		Volume induzido (L)	Runoff (L)	Volume Retido (L)	“C” (Método Racional) (adimensional)		
	Intensidade (mm/h)	Duração (min)	Seco	Úmido				Controle (telha)	Composto não vegetado	Composto vegetado
23/01/2015	155	7		X	9,95	6,5	3,45	1,0	---	0,65
24/01/2015	155	7		X	9,95	6,79	3,16	1,0	---	0,68
28/01/2015	155	7	X		9,95	4,45	5,55	1,0	---	0,44
	155	7	X		9,95	4,0	5,95	1,0	0,23	---
29/01/2015	155	7		X	9,95	5,5	4,55	1,0	0,55	---
30/01/2015	155	7		X	9,95	4,42	5,70	1,0	0,44	---
14/02/2015	155	7	X		9,95	3,1	6,85	1,0	---	0,31
	155	7	X		9,95	4,3	5,65	1,0	0,43	---
03/03/2015	155	7	X		9,95	4,32	5,58	1,0	---	0,44

APÊNDICE B3 - Quadro de resultados da unidade experimental F-17L, relacionado ao coeficiente de escoamento superficial “C” (150mm/h)

DATA	Chuva simulada		Solo		Volume induzido (L)	Runoff (L)	Volume Retido (L)	“C” (Método Racional) (adimensional)		
	Intensidade (mm/h)	Duração (min)	Seco	Úmido				Controle (telha)	Composto não vegetado	Composto vegetado
23/01/2015	155	7		X	9,95	5,70	4,25	1,0	---	0,57
24/01/2015	155	7		X	9,95	7,15	2,80	1,0	---	0,72
28/01/2015	155	7	X		9,95	2,00	8,00	1,0	---	0,20
	155	7	X		9,95	2,00	7,95	1,0	0,20	---
29/01/2015	155	7		X	9,95	4,65	5,4	1,0	0,46	---
30/01/2015	155	7		X	9,95	6,91	6,32	1,0	0,38	---
14/02/2015	155	7	X		9,95	0,95	9,00	1,0	---	0,10
	155	7	X		9,95	2,70	7,25	1,0	0,27	---

APÊNDICE B4 - Quadro de resultados da unidade experimental M-4L, relacionado ao coeficiente de escoamento superficial “C” (130mm/h)

DATA	Chuva simulada		Solo		Volume induzido (L)	Runoff (L)	Volume Retido (L)	“C” (Método Racional) (adimensional)		
	Intensidade (mm/h)	Duração (min)	Seco	Úmido				Controle (telha)	Composto não vegetado	Composto vegetado
23/02/2015	130	15	X		17,9	8,67	9,53	1,0	---	0,48
	130	15	X		17,9	9,28	8,92	1,0	0,51	---
24/02/2015	130	15		X	17,9	12,4	5,2	1,0	---	0,7
	130	15		X	17,9	12,6	5,0	1,0	0,72	---

Observação: Ensaio com uso de regador. O módulo M-17L não foi ensaiado.

APÊNDICE B5 - Quadro de resultados da unidade experimental F-17L, relacionado ao coeficiente de escoamento superficial “C”, (130mm/h)

DATA	Chuva simulada		Solo		Volume induzido (L)	Runoff (L)	Volume Retido (L)	“C” (Método Racional) (adimensional)		
	Intensidade (mm/h)	Duração (min)	Seco	Úmido				Controle (telha)	Composto não vegetado	Composto vegetado
23/02/2015	130	15	X		17,9	1,30	16,90	1,0	---	0,07
	130	15	X		17,9	5,5	12,7	1,0	0,3	---
24/02/2015	130	15		X	17,9	11,46	6,14	1,0	---	0,65
	130	15		X	17,9	9,9	7,70	1,0	0,56	---

Observação: Ensaio com uso de regador. O módulo M-17L não foi ensaiado.

APÊNDICE B 6²⁵ – Quadro de resultados dos módulos vegetados, relacionado ao coeficiente de escoamento superficial “C”, (155 mm/h) no ensaio de repetição.

Quadro de resultados da Unidade experimental M-17L, relacionado ao coeficiente de escoamento superficial “C”.

DATA	Chuva simulada		Solo		Volume induzido (L)	Runoff (L)	Volume Retido (L)	“C” (Método Racional) (adimensional)		
	Intensidade (mm/h)	Duração (min)	Seco	Úmido				Controle (telha)	Composto não vegetado	Composto vegetado
03/03/2015	155	7	X		9,95	3,20	6,7	1,0	---	0,32

Quadro de resultados da Unidade experimental M-4L, relacionado ao coeficiente de escoamento superficial “C”.

DATA	Chuva simulada		Solo		Volume induzido (L)	Runoff (L)	Volume Retido (L)	“C” (Método Racional) (adimensional)		
	Intensidade (mm/h)	Duração (min)	Seco	Úmido				Controle (telha)	Composto não vegetado	Composto vegetado
03/03/2015	155	7	X		9,95	4,32	5,58	1,0	---	0,44

Quadro de resultados da Unidade experimental F-17L, relacionado ao coeficiente de escoamento superficial “C”.

DATA	Chuva simulada		Solo		Volume induzido (L)	Runoff (L)	Volume Retido (L)	“C” (Método Racional) (adimensional)		
	Intensidade (mm/h)	Duração (min)	Seco	Úmido				Controle (telha)	Composto não vegetado	Composto vegetado
03/03/2015	155	7	X		9,95	2,10	7,80	1,0	---	0,21

²⁵ Quadro do ensaio (repetição) no módulo vegetado com simulador de chuva, 155mm/h, durante 7 min., com solo seco. Nesse ensaio não houve análise da umidade antecedente do solo.

APÊNDICE C.1 - Quadro de resultados da unidade experimental M-17L, relacionado ao CN (SCS), 155mm/h

DATA	Chuva simulada		Solo		Umidade relativa (%)	Porosidade média	Volume induzido (L)	Runoff (L)	Volume Retido (L)	CN (NRCS) (adimensional)		
	Intensidade (mm/h)	Duração (min)	Seco	Úmido						Controle (telha)	Composto não vegetado	Composto vegetado
23/01/2015	155	7		X	67,41	81,34	9,95	6,10	3,85	100	---	97
24/01/2015	155	7		X	43,0	77,34	9,95	7,60	2,35	100	---	98
28/01/2015	155	7	X		47,43	80,65	9,95	4,37	5,63	100	---	95
	155	7	X		8,95	79,62	9,95	2,25	7,70	100	95	---
29/01/2015	155	7		X	62,28	70,74	9,95	4,65	5,40	100	95	---
30/01/2015	155	7		X	38,73	77,65	9,95	3,70	6,42	100	93	---
14/02/2015	155	7	X		65,34	76,68	9,95	1,40	8,55	100	---	88
	155	7	X		64,18	75,0	9,95	2,07	7,88	100	90	---

APÊNDICE C.2 - Quadro de resultados da unidade experimental M-4L, relacionado ao CN (SCS), 155mm/h

DATA	Chuva simulada		Solo		Umidade relativa (%)	Porosidade média	Volume induzido (L)	Runoff (L)	Volume Retido (L)	CN (NRCS) (adimensional)		
	Intensidade (mm/h)	Duração (min)	Seco	Úmido						Controle (telha)	Composto não vegetado	Composto vegetado
23/01/2015	155	7		X	71,59	76,44	9,95	6,5	3,45	100	---	97
24/01/2015	155	7		X	37,29	79,49	9,95	6,79	3,16	100	---	98
28/01/2015	155	7	X		6,54	76,54	9,95	4,45	5,55	100	---	95
	155	7	X		6,48	78,36	9,95	4,0	5,95	100	95	---
29/01/2015	155	7		X	46,93	74,88	9,95	5,5	4,55	100	96	---
30/01/2015	155	7		X	33,65	74,88	9,95	4,42	5,70	100	95	---
14/02/2015	155	7	X		60,99	78,57	9,95	3,1	6,85	100	---	92
	155	7	X		60,02	69,35	9,95	4,3	5,65	100	95	---

APÊNDICE C. 3 - Quadro de resultados da unidade experimental F-17L relacionado ao CN (SCS), 155mm/h

DATA	Chuva simulada		Solo		Umidade relativa (%)	Porosidade média	Volume induzido (L)	Runoff (L)	Volume Retido (L)	CN (NRCS) (adimensional)		
	Intensidade (mm/h)	Duração (min)	Seco	Úmido						Controle (telha)	Composto não vegetado	Composto vegetado
23/01/2015	155	7		X	62,99	79,68	9,95	5,70	4,25	100	---	97
24/01/2015	155	7		X	52,69	77,05	9,95	7,15	2,80	100	---	98
28/01/2015	155	7	X		33,15	79,55	9,95	2,00	8,00	100	---	90
	155	7	X		12,34	76,96	9,95	2,00	7,95	100	90	---
29/01/2015	155	7		X	88,17	74,54	9,95	4,65	5,40	100	95	---
30/01/2015	155	7		X	41,08	75,35	9,95	6,91	6,32	100	94	---
14/02/2015	155	7	X		63,07	77,68	9,95	0,95	9,00	100	---	86
	155	7	X		62,01	72,85	9,95	2,70	7,25	100	92	---

APÊNDICE C. 4 - Quadro de resultados da unidade experimental M-4L relacionado ao CN (SCS), 130mm/h

DATA	Chuva simulada		Solo		Umidade relativa (%)	Porosidade média	Volume induzido (L)	Runoff (L)	Volume Retido (L)	CN (NRCS) (adimensional)		
	Intensidade (mm/h)	Duração (min)	Seco	Úmido						Controle (telha)	Composto não vegetado	Composto vegetado
23/02/2015	130	15	X		8,49	75,25	17,9	8,67	9,53		---	92
	130	15	X		2,66	74,42	17,9	9,28	8,92		92	---
24/02/2015	130	15		X	51,61	77,47	17,9	12,4	5,2		---	96
	130	15		X	51,00	74,19	17,9	12,6	5,0		96	---

Observação: Ensaio utilizando regador. O módulo M-17L não foi ensaiado.

APÊNDICE C. 5 - Quadro de resultados da unidade experimental F-17L relacionado ao CN (SCS), 130mm/h

DATA	Chuva simulada		Solo		Umidade relativa (%)	Porosidade média	Volume induzido (L)	Runoff (L)	Volume Retido (L)	CN (NRCS) (adimensional)		
	Intensidade (mm/h)	Duração (min)	Seco	Úmido						Controle (telha)	Composto não vegetado	Composto vegetado
23/02/2015	130	15	X		12,21	76,78	17,9	1,30	16,90	100	---	74
	130	15	X		11,12	75,92	17,9	5,5	12,7	100	87	---
24/02/2015	130	15		X	51,61	77,47	17,9	11,46	6,14	100	---	94
	130	15		X	51,0	74,19	17,9	9,9	7,70	100	95	---

Observação: Ensaio utilizando regador. O módulo M-17L não foi ensaiado.

APÊNDICE C. 6²⁶ - Quadro de resultados da unidade experimental F-17L relacionado ao CN (SCS), 155mm/h no ensaio repetição

Quadro de resultados da Unidade experimental M-17L relacionado ao CN (SCS).

DATA	Chuva simulada		Solo		Umidade relativa (%)	Porosidade média	Volume induzido (L)	Runoff (L)	Volume Retido (L)	CN (NRCS) (adimensional)		
	Intensidade (mm/h)	Duração (min)	Seco	Úmido						Controle (telha)	Composto não vegetado	Composto vegetado
03/03/2015	155	7	X		---	---	9,95	3,20	6,70	100	---	93

Quadro de resultados da Unidade experimental M-4L relacionado ao CN (SCS).

DATA	Chuva simulada		Solo		Umidade relativa (%)	Porosidade média	Volume induzido (L)	Runoff (L)	Volume Retido (L)	CN (NRCS) (adimensional)		
	Intensidade (mm/h)	Duração (min)	Seco	Úmido						Controle (telha)	Composto não vegetado	Composto vegetado
03/03/2015	155	7	X		---	---	9,95	4,32	5,58	100	---	95

Quadro de resultados da Unidade experimental F-17L relacionado ao CN (SCS).

DATA	Chuva simulada		Solo		Umidade relativa (%)	Porosidade média	Volume induzido (L)	Runoff (L)	Volume Retido (L)	CN (NRCS) (adimensional)		
	Intensidade (mm/h)	Duração (min)	Seco	Úmido						Controle (telha)	Composto não vegetado	Composto vegetado
03/03/2015	155	7	X		---	---	9,95	2,1	7,80	100	---	90

²⁶ - Quadro do ensaio (repetição) no módulo vegetado com simulador de chuva, 155mm/h, durante 7 min., com solo seco. Nesse ensaio não houve análise da umidade antecedente do solo.