

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**MONITORAMENTO E MODELAGEM DE TELHADOS VERDES
COMO TÉCNICA DE DESENVOLVIMENTO URBANO DE BAIXO
IMPACTO**

MARINA SOUTO GONÇALVES

**ORIENTADOR: RICARDO TEZINI MINOTI
CO-ORIENTADORA: LENORA NUNES LUDOLF GOMES**

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA
AMBIENTAL**

BRASÍLIA/DF, JULHO DE 2018.

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**MONITORAMENTO E MODELAGEM DE TELHADOS VERDES COMO
TÉCNICA DE DESENVOLVIMENTO URBANO DE BAIXO IMPACTO**

MARINA SOUTO GONÇALVES

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA
AMBIENTAL.**

APROVADA POR:

**RICARDO TEZINI MINOTI, PhD - UnB
(ORIENTADOR)**

**LENORA NUNES LUDOLF GOMES, Doutora - UnB
(CO-ORIENTADORA)**

**ANTÔNIO JOSÉ DE BRITO, Engenheiro Civil
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**CONCEIÇÃO DE MARIA ALBUQUERQUE ALVES, PhD - UnB
(EXAMINADORA INTERNA)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 06 DE JULHO DE 2018.

FICHA CATALOGRÁFICA

GONÇALVES, MARINA SOUTO

Monitoramento e modelagem de telhados verdes como técnica de desenvolvimento urbano de baixo impacto. [Distrito Federal] 2018.

xii, 97p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Ambiental, 2018)

Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Telhado verde

2. Desenvolvimento urbano de baixo impacto

3. Drenagem urbana

4. Modelo SWMM

I. ENC/FT/UnB

II. Título (Série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

GONÇALVES, M. S. (2018). *Monitoramento e modelagem de telhados verdes como técnica de desenvolvimento urbano de baixo impacto*. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 97p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Marina Souto Gonçalves

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Monitoramento e modelagem de telhados verdes como técnica de desenvolvimento urbano de baixo impacto.

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Ambiental / 2018.

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Marina Souto Gonçalves
QE 32 conjunto I casa 17
71.065-091 – Guará II /DF – Brasil.

AGRADECIMENTOS

A Deus por me acalmar, proteger e dar forças, quando nos momentos de desespero não sabia a quem recorrer. Ele que sempre demonstrou, nos pequenos detalhes, todo seu amor. Ao meu anjo da guarda por sempre me reger, guardar e iluminar.

Aos meus familiares por compreenderem minha ausência e apoiarem minhas decisões. Aos meus avós, por terem me acolhido no aconchego de sua casa. À Roberta, por me ensinar o valor de um abraço e a preciosidade de um momento; por mostrar que a saudade é presente, mas que pelos olhos escorrem gotinhas de amor.

Ao meu pai, Adair, pela educação, pelo apoio e por todo o suporte dado na instalação das unidades piloto. Ao meu irmão, Arthur, por ser meu porto seguro, meu orgulho, meu exemplo de fé e serenidade, companheiro desde sempre e para sempre. À minha mãe, Milena, por ser minha inspiração, pelo seu cuidado, pelo carinho e por me acolher em seus abraços. À minha pequena de quatro patas pelo companheirismo nas madrugadas.

Aos meus orientadores, Lenora e Ricardo, por todo o conhecimento transmitido, pela paciência, carinho e dedicação, auxiliando sempre em todas as etapas do projeto. À Maria Elisa, por toda orientação quanto à modelagem, pelo carinho, pela dedicação e pela amizade.

Às professoras, Cristina e Ariuska, pela ajuda e suporte dados durante esses anos, principalmente no meu período de transição de curso. Ao professor Sérgio, por ceder os tensiômetros e sanar dúvidas do projeto. À Conceição e ao Antônio por comporem a banca de apresentação deste projeto, contribuindo para meu crescimento e aprendizado.

Àquelas que estiveram ao meu lado desde o começo dessa caminhada, Enya, Lumena e Bianca, pelas risadas e conversas, pelos abraços e conselhos, pela motivação e confiança, pela amizade. A todos que me acompanharam de alguma forma no andamento do projeto, Amanda, Débora, Gabriel, Douglas e Michelle.

À Caesb, por me proporcionar um ano de muito aprendizado. Aos funcionários, Wilde, Lígia, Renan, Mauro, Luciana, Flávio, Jorge, Augusto e Maria do Carmo, sempre dispostos a ensinar, tornando o estágio um ambiente harmonioso. Às minhas queridas amigas Michelle e Eliane pelos momentos de descontração e por todo carinho. À minha supervisora e amiga, Vanusa, pela paciência em ensinar, pela serenidade e pelo carinho. Aos meus ouvintes oficiais, Gabriel e Angélica, pelo companheirismo, pelas risadas, pelos conselhos, pelas broncas, pelos abraços e pela amizade.

À CHI Water pela concessão da licença do PCSWMM, viabilizando a execução da modelagem e conclusão deste projeto.

RESUMO

É notório o crescimento significativo da população urbana nos últimos anos, fenômeno que aumenta a impermeabilização do solo afetando diretamente o sistema de drenagem da região. A drenagem urbana sustentável é um novo conceito, cujo objetivo é amenizar a frequência e magnitude das inundações e a deterioração ambiental, a partir do armazenamento e infiltração das águas pluviais. O uso dos telhados verdes, na abordagem do desenvolvimento urbano de baixo impacto – LID, vem se destacando não só pela atenuação do escoamento de águas pluviais; mas também por contribuir na melhoria da qualidade do ar, na mitigação do efeito das ilhas de calor, e por tratar a água como um recurso que pode ser aproveitado. Dessa forma avaliou-se, por meio do monitoramento quantitativo da água drenada por unidades piloto de telhado verde e modelagem realizada no programa PCSWMM, a viabilidade da inserção dessa técnica no Distrito Federal – DF. Foram simulados quatro cenários diferentes; um cenário base sem estruturas de drenagem sustentável, e outros três cenários com diferentes considerações a respeito da área de inserção dos telhados verdes, na bacia do C.O. Em resposta à simulação hidrológica, a aplicação dessa técnica, além de amenizar o volume total inundado e diminuir a quantidade de pontos de inundação; mostrou redução de 42,2% até 79,9% na vazão de pico no exutório para um evento de chuva real. Durante o período monitorado, observou-se na unidade piloto de telhado verde com 10 cm de substrato uma retenção do volume precipitado de 29%, na unidade piloto de telhado verde com 15 cm de substrato essa retenção foi de 34%, e na unidade piloto de telhado verde com 20 cm de substrato, a redução foi de 30%. A grama esmeralda se adaptou bem às condições climáticas do cerrado, sendo que o volume drenado pelas unidades piloto de telhado verde, no período chuvoso, mostrou-se suficiente para irrigação das mesmas no período de seca.

Palavras-chave: drenagem urbana sustentável, LID, qualidade ambiental, SWMM.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS E QUADROS.....	x
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	xi
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1 - OBJETIVO GERAL.....	3
2.2 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
3.1 – PROBLEMATIZAÇÃO DA EXPANSÃO URBANA	4
3.2 – O CICLO HIDROLÓGICO	4
3.3 – BALANÇO HÍDRICO	6
3.4 - IMPACTOS DO DESENVOLVIMENTO URBANO NO CICLO HIDROLÓGICO E EM BACIAS HIDROGRÁFICAS	7
3.5 – DRENAGEM URBANA CLÁSSICA E SUSTENTÁVEL.....	9
3.5.1 - Medidas Estruturais	10
3.5.2 - Medidas Não-Estruturais	11
3.6 – TELHADO VERDE	12
3.6.1 - Telhado verde e sua importância na gestão das águas pluviais.....	12
3.6.2 - Telhados verdes e suas especificações	13
3.6.3 – Manutenção da vegetação de telhados verdes e teor de umidade do solo	18
3.6.4 - Tecnologias de execução de coberturas verdes	21
3.6.5 – Exemplos de aplicação de telhados verdes	22
3.6.6 - Aspectos benéficos da utilização de telhado verde	26
3.6.7 - Aproveitamento da água drenada pelo telhado verde.....	33
3.6.8 - Modelagem hidrológica.....	35
4. METODOLOGIA	44

4.1 – MONITORAMENTO DO TELHADO VERDE.....	45
4.1.1 – Caracterização da área de instalação das unidades piloto.....	45
4.1.2 – Construção das unidades piloto	46
4.1.3 – Monitoramento da umidade do solo dos telhados verdes	49
4.1.4 – Dados quantitativos da água drenada das unidades piloto.....	50
4.1.5 – Análise do balanço hídrico da cobertura verde.....	52
4.2 – MODELAGEM DOS TELHADOS VERDES NOS SISTEMAS DE DRENAGEM URBANA.....	53
4.2.1 – Impactos do telhado verde na drenagem urbana.....	53
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
5.1 – MONITORAMENTO DO TELHADO VERDE.....	61
5.1.1 – Dados quantitativos da água drenada das unidades piloto.....	61
5.1.2 – Análise do balanço hídrico da cobertura verde.....	65
5.1.3 – Monitoramento da umidade do solo	66
5.2 – MODELAGEM DOS TELHADOS VERDES NOS SISTEMAS DE DRENAGEM URBANA.....	69
5.2.1 - Avaliação dos impactos de telhados verdes na drenagem urbana por meio da modelagem hidráulica – hidrológica.....	69
5.2.2 – Inserção das unidades de desenvolvimento de baixo impacto na bacia de estudo	70
5.2.3 – Análise dos cenários	75
5.2.4 – Análise da espessura do substrato de telhados verdes	86
5.2.5 – Influência dos telhados verdes em escala de sub-bacia	88
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	90
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Representação do ciclo hidrológico	6
Figura 3.2: Características das alterações no balanço hídrico e no hidrograma de uma área rural para urbana.....	7
Figura 3.3: Esquema das camadas de um telhado verde	13
Figura 3.4: Representação esquemática dos diferentes sistemas de telhado verde	14
Figura 3.5: Sistemas modular, alveolar e laminar	22
Figura 3.6: Cobertura durante e após a instalação do telhado verde no Village Mall	23
Figura 3.7: Telhado verde do Instituto Federal de Brasília.....	24
Figura 3.8: Imagens do telhado verde instalado na Escola Francesa de Brasília	24
Figura 3.9: Filtro de drenagem e revestimento vivo modular	25
Figura 3.10: Sistema de irrigação automática com o dispositivo de monitoramento e as mangueiras ressecadas devida à exposição ao sol	26
Figura 3.11: Telhado verde em outubro, período bastante quente e seco, em Brasília.....	26
Figura 3.12: Sistema de telhado verde combinado ao sistema de geração de energia solar fotovoltaica	33
Figura 3.13: Visão Conceitual do Fenômeno do escoamento em SWMM	39
Figura 3.14: Representação de um controle LID – Bacia de Filtração.....	43
Figura 4.1: Fluxograma das etapas que constituem a metodologia deste projeto.	44
Figura 4.2: Localização da Estação Experimental da Biologia e detalhamento da área de instalação das unidades piloto e da área de estudo no PCSWMM.....	45
Figura 4.3: Representação da precipitação total mensal para os anos de 2012 a 2017	46
Figura 4.4: Etapa de instalação das unidades piloto, inclinação dos cavaletes	47
Figura 4.5: Adição de substrato com a respectiva profundidade de cada unidade e plantação das placas de grama Esmeralda	48
Figura 4.6: Instalação das estruturas piloto concluída para início do monitoramento	48
Figura 4.7: Instalação dos tensiômetros para monitoramento da umidade do solo.....	49
Figura 4.8: Graduação das bombonas e sua ligação com as unidades piloto para verificação do volume armazenado	51
Figura 4.9: Esquema representativo do telhado verde considerado nas simulações do modelo SWMM.....	53
Figura 4.10: Série histórica pluviométrica da estação Caesb Hidrologia.....	56
Figura 4.11: Hietograma de projeto, Tempo de retorno de 1, 2, 10 e 100 anos	57
Figura 4.12: Postos pluviométricos inseridos no modelo e as sub-bacias que os englobam	58
Figura 5.1: Desenvolvimento da vegetação da unidade piloto com 15 cm de substrato.....	63

Figura 5.2: Condição do solo na época de desenvolvimento da vegetação brinco de princesa	64
Figura 5.3: Resultados do balanço hídrico das unidades piloto de telhados verdes	66
Figura 5.4: Curva de retenção de água no solo	67
Figura 5.5: Dados de monitoramento dos tensiômetros instalados nas três unidades piloto de telhado verde.....	69
Figura 5.6: Gráfico dos resultados da Vazão observada (Qobs) e da vazão simulada (Qsim)	70
Figura 5.7: Ajuste dos parâmetros da sub-bacia após a introdução de controles por dispositivos de baixo impacto-LIDs	71
Figura 5.8: Representação da implementação de LID em áreas impermeáveis	71
Figura 5.9: Mapa % de área impermeável para o cenário real.	72
Figura 5.10: Mapa % de área impermeável para o cenário 2.	73
Figura 5.11: Editor de uso de controles LID	75
Figura 5.12: Fluxograma dos cenários considerados no projeto	76
Figura 5.13: Hidrograma gerado para os cenários de base, 1, 2 e 3 referente à chuva real (TR=0,09 anos).....	76
Figura 5.14: Hidrogramas gerados para os cenários de base, 1, 2 e 3 referente à chuva de projeto do PDDU (TR=1 ano).	78
Figura 5.15: Representação dos poços de visita inundados e do escoamento gerado pela sub-bacia 1 para os cenários 1 e 2, chuva de projeto (TR=1 ano).....	80
Figura 5.16: Hidrogramas gerados para os cenários de base, 1, 2 e 3 referente à chuva de projeto do PDDU (TR=2 anos).....	81
Figura 5.17: Hidrogramas gerados para os cenários de base, 1, 2 e 3 referente à chuva de projeto do PDDU (TR=10 anos).....	82
Figura 5.18: Perfil de drenagem para o cenário base e cenário 2, indicando os poços de visita 31 e 311 para evento com TR=10 anos.	84
Figura 5.19: Hidrogramas gerados para os cenários de base, 1, 2 e 3 referente à chuva de projeto do PDDU (TR=100 anos).....	85
Figura 5.20: Comportamento dos telhados verdes de 10, 15 e 20 cm de profundidade de substrato.....	87
Figura 5.21: Impacto de telhados verdes em escala de sub-bacia urbana.	89

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Quadro 3.1: Parâmetros de qualidade de água da chuva para usos restritivos não potáveis.	34
Tabela 4.1: Resumo dos parâmetros dos eventos utilizados na modelagem.....	58
Tabela 5.1: Comparação de dados pluviométricos ETE Norte e lâmina de água armazenada na bombona do telhado convencional.	61
Tabela 5.2: Dados quantitativos do volume drenado e do coeficiente de escoamento (Coef. Esc) para cada unidade piloto de telhado verde (TV) e para o telhado convencional (TC).	62
Tabela 5.3: Dados de caracterização das camadas de telhado verde no SWMM.....	74
Tabela 5.4: Resultados obtidos na simulação referente à chuva real (TR=0,09 anos).	77
Tabela 5.5: Resultados obtidos na simulação referente à chuva de projeto do PDDU	79
Tabela 5.6: Resultados obtidos na simulação referente à chuva de projeto do PDDU	81
Tabela 5.7: Resultados obtidos na simulação referente à chuva de projeto do PDDU (TR=10 anos)	83
Tabela 5.8: Resultados obtidos na simulação referente à chuva de projeto do PDDU (TR=100 anos).	86
Tabela 5.9: Características das sub-bacias	88

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

Caesb – Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal

CHWater – *Computational Hydraulics International Water*

cm – Centímetros

CN – Curva-Número

C.O – Centro Olímpico

°C – Graus Celsius

DF – Distrito Federal

DQO – Demanda Química de Oxigênio

EPA – *United States Environmental Protection Agency*

ETA – Estação de Tratamento de Água

ETE – Estação de Tratamento de Esgoto

GIS – *Geographic Information System*

IDF – Intensidade, Duração e Frequência

IFB – Instituto Federal de Brasília

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

IPTU – Imposto Predial e Territorial Urbano

Kg – Quilograma

KPa - Quilopascal

L – Litro

LEED – *Leadership in Energy and Environmental Desing*

LID – *Low Impact Development*

LSA – Laboratório de Saneamento Ambiental

m – Metro

m² - Metro quadrado

min – Minuto

MJ – Megajoule

mm – Milímetro

mm/m² - Milímetro por metro quadrado

NOVACAP – Companhia Urbanizadora da Nova capital do Brasil

PDDU – Plano Diretor de Drenagem Urbana

PCSWMM – *Personal Computer Storm Water Management Model*

Qobs – Vazão observada

Qsim – Vazão simulada

s – Segundo

SCS – *Soil Conservation Service*

SICAD – Sistema Cartográfico do Distrito Federal

SQN – Superquadra Norte

SWMM – *Storm Water Management Model*

TR – Tempo de retorno

UC – Unidade de Cor

UnB – Universidade de Brasília

US\$/m² - Dólar por metro quadrado

UT – Unidade de Turbidez

1. INTRODUÇÃO

Tem-se observado um aumento significativo da população urbana nos últimos anos. Em decorrência desse fenômeno, há uma grande expansão das cidades acarretando a redução das áreas verdes. Além disso, as emissões antropogênicas de gases de efeito estufa vêm aumentando desde a era pré-industrial, em grande parte pelo crescimento econômico e populacional. Efeitos desse aumento são observados nas últimas décadas, através de mudanças no clima, com alterações na precipitação, e conseqüentemente, nos sistemas hidrológicos (IPCC, 2014).

As ocupações, geralmente irregulares, também acontecem sobre as áreas de mananciais de abastecimento humano, comprometendo a disponibilidade hídrica das cidades. Além disso, há excessiva impermeabilização do solo, que altera o regime natural do escoamento nas bacias hidrográficas, com o aumento das vazões de pico e dos volumes escoados superficialmente. Com isso, há sobrecarga nos sistemas de drenagem urbana tradicionais, inflexíveis às alterações dos regimes hidrológicos; provocando o aumento da frequência e magnitude das inundações e a deterioração ambiental.

Por isso, o conceito de drenagem urbana sustentável vem sendo cada vez mais aplicado. O conceito do desenvolvimento urbano de baixo impacto (*Low Impact Development – LID*) visa a contribuir para a conservação de áreas verdes no meio urbano e para o controle quali-quantitativo das águas pluviais, além de minimizar os efeitos das áreas impermeabilizadas e tratar a água como um recurso, no sentido de poder ser aproveitada.

Um bom exemplo dessa tendência é o telhado verde, objeto de estudo deste projeto, que vem se destacando pelos benefícios que apresenta, como o conforto térmico, melhoria da qualidade do ar, redução da poluição sonora, aspecto estético, mitigação do efeito das “ilhas de calor”, atenuação do escoamento de águas pluviais, economia de energia, e minimização dos riscos de inundações.

Muitos estudos demonstram que a qualidade da água drenada pelo telhado verde é influenciada por diversos fatores, tais como a sazonalidade, fontes de poluição local, dinâmica da precipitação, direção do vento, composição do substrato, dentre outros. Devido ao cenário de crescente escassez hídrica, e às diversas tecnologias de tratamento de água, é de suma importância estudar a viabilidade do uso da água escoada das coberturas verdes, para fins não potáveis, como por exemplo, para irrigação, uso em descarga sanitária e paisagismo urbano.

A eficiência do telhado verde na redução da vazão escoada da água pluvial já foi verificada por diversos autores. Como, por exemplo, no estudo realizado por Castro (2011), no qual os resultados indicaram que o uso de telhados verdes pode proporcionar uma melhor distribuição do escoamento superficial ao longo do tempo, através da diminuição da velocidade de liberação do excesso de água retida nos poros do substrato.

Para avaliar a eficácia da estrutura dos telhados verdes, o ideal é que haja sua implantação e seu monitoramento em longo período. Contudo, quando não são encontrados dados de longo período, um recurso utilizado é o monitoramento do telhado verde por um período de tempo menor, e a calibração de parâmetros de algum tipo de modelo matemático que possa ser utilizado para avaliar o desempenho da estrutura frente a eventos não monitorados mediante simulação.

Desde 2015, estudos a respeito de telhados verdes vêm sendo realizados pelos estudantes do curso de Engenharia Ambiental, na Universidade de Brasília-UnB (FUJIWARA e SANTOS, 2016; SALERNO, 2017); com o objetivo de avaliar, em termos qualitativos e quantitativos, a água drenada de telhados verdes em estruturas piloto.

Dando continuidade a essa linha de pesquisa; o projeto em questão é proposto como forma de explorar ainda mais a eficiência dessa técnica de desenvolvimento de baixo impacto, principalmente quanto à retenção de água, no cerrado. Tendo em vista a importância da adaptação da vegetação a esse clima específico, escolheu-se a grama Esmeralda (*Zoysia japonica*) para ser incorporada a três estruturas piloto, com 10 cm, 15 cm e 20 cm de substrato, respectivamente. Sendo que o intuito da pesquisa é avaliar o comportamento dessas estruturas em relação à retenção de água, por meio da modelagem aplicada a áreas do Distrito Federal – DF; e à adaptação da vegetação ao período seco e chuvoso da região.

Este projeto foi estruturado em capítulos, compreendendo: introdução à aplicação de telhados verdes no ambiente urbano; objetivos do estudo em relação às condições climáticas do Distrito Federal; fundamentação teórica a respeito dos conceitos e técnicas de inserção de telhados verdes; metodologia utilizada para monitoramento de unidades piloto de telhado verde e modelagem dos mesmos; resultados encontrados e discussões a respeito da viabilidade de implantação das coberturas vegetais, conclusões e recomendações para estudos futuros; e por fim, referências bibliográficas.

2. OBJETIVOS

2.1 - OBJETIVO GERAL

Analisar, por meio de monitoramento e modelagem, a contribuição de telhados verdes como uma técnica de desenvolvimento urbano de baixo impacto, em condições climáticas do Distrito Federal.

2.2 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar o comportamento da vegetação quanto ao período chuvoso da região do Distrito Federal, por meio do monitoramento de estruturas piloto de telhados verdes com diferentes profundidades de substrato;
- Verificar, a partir de instalações de telhado verde, em escala piloto, a eficiência da estrutura quanto à retenção de água e resistência da vegetação, no clima do cerrado;
- Analisar a eficiência da incorporação de telhados verdes nas edificações pré-existentes da bacia do C.O – Centro Olímpico, Distrito Federal – DF, por meio da modelagem matemática.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 – PROBLEMATIZAÇÃO DA EXPANSÃO URBANA

O grande desenvolvimento urbano no Brasil ocorreu no final dos anos 1960 até o final dos anos 1990, quando o país passou de 55% de população urbana para 76%. Esta concentração de população ocorreu principalmente em grandes metrópoles gerando o aumento da poluição e da frequência das inundações, em função da impermeabilização do solo e da canalização dos corpos d'água. Nos últimos anos, o aumento da população urbana vem ocorrendo principalmente na periferia das metrópoles, ocupando áreas de mananciais e áreas propícias a inundações (TUCCI, 2003).

A expansão urbana atrelada à impermeabilização excessiva do solo, traz diversos problemas para os sistemas de drenagem. Com a intensa perda de áreas verdes, há alteração do regime natural do escoamento das bacias, acarretando o aumento das vazões de pico e volumes escoados superficialmente.

Os principais problemas relacionados com a infraestrutura e a urbanização nos países em desenvolvimento são a grande concentração populacional em pequenas áreas; aumento da periferia das cidades de forma descontrolada, em consequência da migração rural em busca de emprego nas cidades; legislações equivocadas de controle do espaço urbano; dentre outros.

Segundo Tucci (2005a), as enchentes aumentam sua frequência e magnitude por causa da impermeabilização do solo e da construção da rede de condutos pluviais. À medida que a cidade se urbaniza, em geral, há aumento das vazões máximas e da sua frequência; aumento da produção de sedimentos resultante da falta de proteção das superfícies e da produção de resíduos sólidos; deterioração da qualidade da água superficial e subterrânea, em virtude da lavagem das ruas e das ligações clandestinas de esgoto na rede pluvial; e implantação desorganizada da infraestrutura urbana com redução da seção do escoamento.

3.2 – O CICLO HIDROLÓGICO

A hidrologia é a ciência que trata da água na Terra, sua ocorrência, circulação e distribuição; e tem tido uma evolução significativa em face dos problemas crescentes, principalmente a ocupação das bacias.

O ciclo hidrológico é o sistema pelo qual a natureza faz a água circular do oceano para a atmosfera e então para os continentes, de onde retorna ao oceano de forma superficial

ou subterrânea. Esse ciclo é governado pela ação da gravidade, pelo tipo e densidade da cobertura vegetal, e pelos fatores climáticos (temperatura do ar, ventos, umidade relativa do ar e insolação).

O ciclo hidrológico só é fechado em nível global. Os volumes evaporados em um determinado local do planeta não precipitam necessariamente no mesmo local, porque há movimentos contínuos, com dinâmicas diferentes, na atmosfera e também na superfície terrestre (TUCCI, 2009). Os fatores que contribuem para esses movimentos são a heterogeneidade com que a energia solar atinge a superfície de diversos locais, o diferente comportamento térmico dos continentes em relação aos oceanos, a quantidade de vapor de água, gás carbônico (CO₂) e ozônio na atmosfera, a variabilidade espacial de solos e coberturas vegetais, e a influência da rotação e inclinação do eixo terrestre na circulação atmosférica.

O ciclo hidrológico se dá a partir do vapor de água presente na atmosfera que, sob determinadas condições meteorológicas, condensa-se, formando microgotículas de água que se mantêm suspensas no ar. O agrupamento dessas microgotículas com partículas de poeira formam a nuvem, e através dessa dinâmica de massas de ar, acontece a precipitação.

A precipitação é a principal transferência de água da atmosfera para a superfície terrestre. Segundo Tucci (2009), ela ocorre quando complexos fenômenos de aglutinação e crescimento das microgotículas, em nuvens com presença significativa de umidade (vapor de água) e núcleos de condensação (poeira ou gelo), formam uma grande quantidade de gotas com tamanho e peso suficientes para que a força da gravidade supere a turbulência normal ou movimentos ascendentes do meio atmosférico.

Na trajetória em direção a superfície terrestre, a precipitação já sofre evaporação, podendo ocorrer sua completa vaporização. Quando a mesma cai sobre um solo com vegetação, parte do volume precipitado sofre interceptação em folhas e caules, de onde também evapora.

Quando atinge o solo, a água pode seguir diversos caminhos. Como o solo é um meio poroso, ocorre a infiltração da água enquanto o mesmo não se encontra saturado. A medida que o solo vai sendo saturado, ocorre o decréscimo da infiltração; e o excesso da precipitação não infiltrada, dá origem ao escoamento superficial.

A infiltração favorece a umidade do solo, essencial para os vegetais que a absorvem pelas raízes e a devolvem, em parte, à atmosfera por meio da transpiração, na forma de vapor de água. A infiltração também contribui no escoamento de base dos rios, pois a água infiltrada percola para o lençol freático.

Já o escoamento superficial é impulsionado pela gravidade para as cotas mais baixas, vencendo principalmente o atrito com a superfície do solo (TUCCI, 2009). A presença de vegetação na superfície do solo, contribui para amenizar o escoamento superficial, favorecendo a infiltração no decorrer da trajetória. Ela também reduz a energia cinética de impacto da chuva no solo, minimizando a erosão.

Por fim, fechando o ciclo hidrológico, Tucci (2009) descreve que em qualquer tempo e local por onde circula a água na superfície terrestre, seja nos continentes ou nos oceanos, há evaporação para atmosfera. A evapotranspiração, que é a soma da evaporação e da transpiração, depende de diversos fatores como a radiação solar, as tensões de vapor do ar e o vento. Na figura 3.1 apresenta-se o resumo das etapas do ciclo hidrológico.

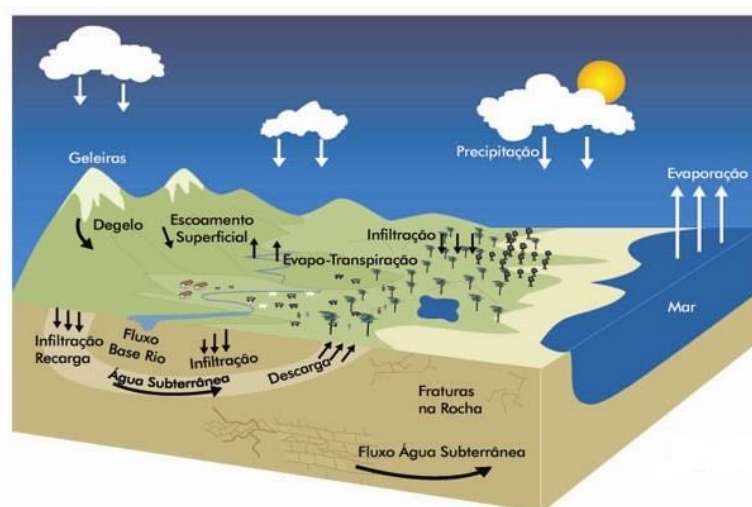


Figura 3.1: Representação do ciclo hidrológico (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2017).

3.3 – BALANÇO HÍDRICO

Segundo Tucci (2009), as consequências da urbanização sobre o clima, contrariamente aos impactos hidrológicos, são de pequena escala mas podem, ao longo prazo, introduzir alterações significativas no balanço hídrico, com impactos inclusive sobre a qualidade das águas devido, por exemplo, a alterações da qualidade da água da chuva e diminuição das vazões mínimas.

No estudo realizado por Araújo *et al.* (2014), em Londrina, foi construído um sistema modular de telhado verde com três unidades e vegetação tipo gramínea, com o objetivo de estudar o balanço hídrico.

O monitoramento do sistema foi feito por 35 dias e o balanço hídrico foi determinado pela medição da evapotranspiração, precipitação e drenagem. Após fazer o balanço hídrico geral do sistema, Araújo *et al.* (2014) conclui que a evapotranspiração correspondeu a

43,51% da entrada de água no sistema na forma de precipitação e irrigação, e a redução do volume médio de drenagem foi de 42,5%. A capacidade de retenção de água, atrelada à capacidade de perda de água por evapotranspiração, pode proporcionar a minimização de picos de vazão nas áreas urbanas (ARAÚJO *et al.*, 2014).

3.4 - IMPACTOS DO DESENVOLVIMENTO URBANO NO CICLO HIDROLÓGICO E EM BACIAS HIDROGRÁFICAS

Como introduzido no item 3.1, a urbanização e ocupação do homem nas bacias hidrográficas foram realizadas com pouco planejamento, tendo como objetivos o mínimo custo e o máximo benefício de seus usuários, sem maior preocupação com a preservação do meio ambiente. Com o crescimento demográfico e a exploração da água, os recursos naturais têm se deteriorado (TUCCI, 2009).

O desenvolvimento urbano altera a cobertura vegetal, substituindo-a por telhados convencionais, ruas asfaltadas e calçadas; fazendo com que a água que antes infiltrava no solo e recarregava os aquíferos, seja escoada pelos condutos. Consequente à redução da infiltração no solo, há o aumento do volume escoado superficialmente; a redução da evapotranspiração, já que as áreas impermeáveis não retêm água, como a cobertura vegetal; e a diminuição do nível do lençol freático por falta de alimentação do aquífero. Na figura 3.2-a são apresentadas as características de tais alterações no uso do solo devido à urbanização; e seus efeitos sobre o hidrograma, apresentado na figura 3.2-b.

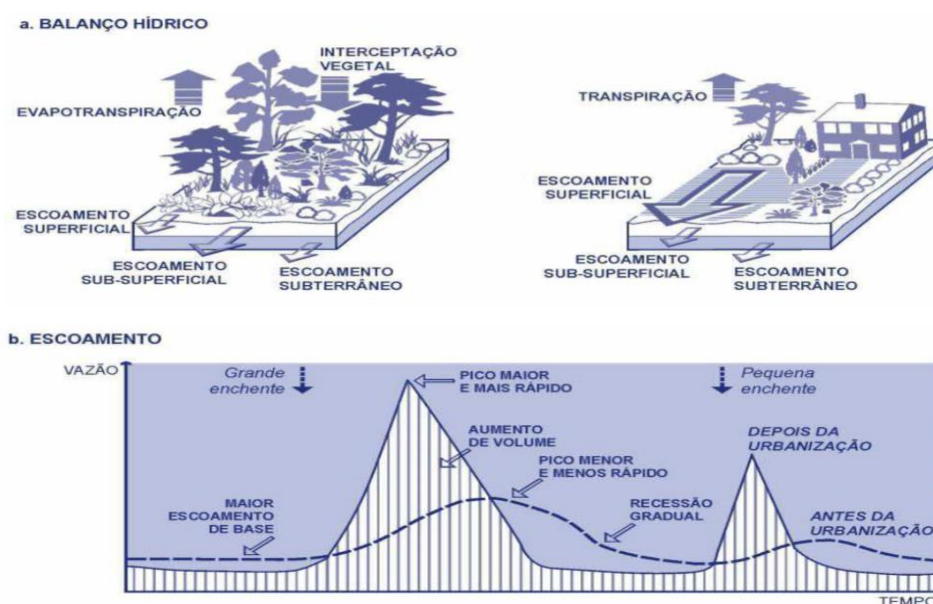


Figura 3.2: Características das alterações no balanço hídrico e no hidrograma de uma área rural para urbana (modificado, SCHUELER, 1987; *apud* MANUAL DE DRENAGEM URBANA, 2017).

Outro fator importante relacionado aos elementos antrópicos que são introduzidos na bacia hidrográfica é o aumento da temperatura. Segundo Tucci (2005a), as superfícies impermeáveis absorvem parte da energia solar, aumentando a temperatura ambiente, produzindo ilhas de calor na parte central dos centros urbanos, onde predomina o concreto e o asfalto. O aumento da absorção de radiação solar por parte da superfície intensifica a emissão de radiação térmica de volta para o ambiente, gerando calor. O acréscimo de temperatura também cria condições de movimento de ar ascendente, que pode aumentar a precipitação.

Outra consequência do desenvolvimento de áreas urbanas é a intensificação do carreamento de sedimentos que pode ser causada pela alta velocidade do escoamento, obras civis, limpeza de terrenos para loteamentos, construção de ruas, avenidas e rodovias, entre outros.

O transporte de sedimentos é de especial interesse durante uma fase de construção urbana, na qual seu carregamento alcança nível máximo. Já depois da construção ocorre uma diminuição no transporte de sedimentos. No entanto, a produção de lixo é outro problema que obstrui ainda mais a drenagem, criando péssimas condições ambientais, e não é amenizado, enquanto não houver frequência de coleta e educação ambiental da população. (FILENI, 2017; TUCCI, 2007).

As principais consequências ambientais da produção de sedimentos são o assoreamento das seções da drenagem, com redução da capacidade de escoamento de condutos, rios e lagos urbanos; e o transporte de poluentes agregados ao sedimento, que contaminam as águas pluviais (MANUAL DE DRENAGEM URBANA, 2017).

A ocorrência de erosões também pode ser consequência do desenvolvimento urbano, podendo-se transformar em uma fonte de poluição difusa, na qual quanto maior for a exposição à erosão de uma bacia, maior será o efeito direto na qualidade da água. Isso se deve ao transporte de poluentes agregados aos sedimentos, que contaminam as águas pluviais, sendo esses poluentes advindos de diversas fontes como as áreas agrícolas, pastagens, ruas, avenidas, estradas, obras, minas abandonadas, áreas canalizadas, jardins e hortas, sistemas de tratamento de esgoto com vazamentos, entre outros (ROSSMAN, 2010a).

O impacto sobre a qualidade da água se dá, também, através da poluição no ar que se precipita junto com a água; da lavagem das superfícies urbanas contaminadas com diferentes componentes orgânicos e metais; dos sedimentos erodidos e resíduos sólidos depositados ou transportados para a drenagem; e esgoto que não coletado, acaba escoando através da drenagem.

3.5 – DRENAGEM URBANA CLÁSSICA E SUSTENTÁVEL

A interação dos homens com os cursos d'água e a necessidade de expansão das cidades com o crescimento da urbanização deu origem aos sistemas de drenagem (MOURA, 2004). O termo drenagem urbana é entendido como o conjunto de medidas que tenham por objetivo minimizar os riscos a que as populações estão sujeitas, diminuir os prejuízos causados por inundações e possibilitar o desenvolvimento urbano de forma harmônica, articulada e sustentável (TUCCI, 2009).

As soluções eficazes de drenagem urbana dependem da existência de uma política para ocupação do solo urbano devidamente articulada com a política de drenagem urbana, principalmente no que se refere à ocupação das várzeas de inundação; de um processo de planejamento que contemple medidas de curto, médio e longo prazos em toda a bacia, e integre as medidas de drenagem de águas pluviais; e da implantação e desenvolvimento de obras e atividades de comunicação social, e participação pública.

O planejamento da ocupação da bacia hidrográfica é necessário em uma sociedade com usos crescentes de água, e que tende a ocupar espaços com riscos de inundação, além de danificar o seu meio. A tendência atual envolve desenvolvimento sustentável da bacia hidrográfica, que implica o aproveitamento racional dos recursos com o mínimo dano ao ambiente (TUCCI, 2009).

A lei nº11.445 de janeiro de 2007 (BRASIL, 2007), que estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico, relata que os serviços públicos de saneamento básico devem ser prestados com base na disponibilidade, em todas as áreas urbanas, de serviços de drenagem e manejo das águas pluviais, limpeza e fiscalização preventiva das respectivas redes, adequados à saúde pública e à segurança da vida e do patrimônio público e privado.

A política existente de desenvolvimento e controle dos impactos quantitativos na drenagem se baseia no conceito de escoar a água precipitada o mais rápido possível, no entanto essa metodologia pode aumentar as ocorrências de inundações à jusante devido à canalização. Segundo Tucci (2003), para transportar o volume de água que não é infiltrado, é necessário ampliar a capacidade de condutos e canais ao longo do trajeto, o que leva a custos insustentáveis, podendo chegar a ser dez vezes maior do que o custo de amortecer o pico dos hidrogramas e diminuir a vazão máxima para jusante através de uma detenção.

De acordo com Bahiense (2013), as alterações no ciclo hidrológico induzidas por essas medidas de controle de inundação convencionais trazem consequências negativas de diversas formas, como econômicas (obras de expansão no sistema de drenagem que só

transferem o fenômeno de inundação para áreas a jusante), sociais (falso senso de segurança provocado pelas obras que não solucionam, mas transportam o problema), e ambientais (usos da água em ambiente urbano comprometido).

Atualmente, sabe-se que para o desenvolvimento de um programa consistente de drenagem é indispensável considerar o problema dentro de uma visão generalizada de infraestrutura urbana e ambiental, reconhecendo a necessidade de integração do sistema de drenagem com demais equipamentos urbanos (SOUSA, 2016). Nesse sentido, destacam-se alguns princípios para o planejamento da drenagem urbana como a inserção do Plano de Drenagem no Plano de Desenvolvimento Urbano e Ambiental da cidade; o controle do escoamento considerando a bacia como sistema; a redução do volume do escoamento; e o controle do escoamento de forma a não transferir o problema a jusante (TUCCI, 2002).

As medidas de controle para a drenagem urbana são classificadas em estruturais e não-estruturais; devendo ser utilizadas com o auxílio de um planejamento ambiental urbano para serem eficazes.

3.5.1 - Medidas Estruturais

São medidas de controle de drenagem urbana baseadas em obras de engenharia e utilizadas para reduzir o risco de enchentes (SOUSA, 2016). De acordo com o Manual de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais Urbanas do Distrito Federal – ADASA (2018), o sistema de drenagem pode ser dividido em três subsistemas: controle na fonte, microdrenagem e macrodrenagem.

O controle na fonte é composto por dispositivos instalados junto à origem do escoamento pluvial, cujo objetivo é abater vazões e volumes de escoamento através da infiltração e/ou armazenamento temporário. Tais medidas são tipicamente implantadas em lotes privados para compensar a impermeabilização produzida por novas construções. São também implantadas em áreas públicas, sendo os exemplos mais comuns os pavimentos permeáveis, trincheiras de infiltração, reservatórios de retenção e telhados verdes (ADASA, 2018).

Os pavimentos permeáveis proporcionam a filtração de poluentes, mas podem apresentar um inconveniente relevante, que trata da necessidade de manutenção regular em função da possibilidade de colmatação dos sistemas de infiltração (CASTRO, 2007). Para solos com permeabilidade suficiente para promover a infiltração, a água infiltrada, retorna ao aquífero por fluxo subterrâneo. Os telhados verdes, por sua vez, ajudam na interceptação,

evaporação, armazenamento, absorção e infiltração da água, nutrientes e sedimentos (SOUZA *et al.*, 2012).

Os controles nos sistemas de microdrenagem referem-se aos dispositivos que drenam o sistema viário, como: sarjetas, canaletas, captações (bocas de lobo), condutos de ligação e tubulações com diâmetro máximo de 0,8 metros (ADASA, 2018).

Já a macrodrenagem é formada por canais, galerias e tubulações com diâmetro mínimo de 1 metro, que recebem vazão de um conjunto de redes da microdrenagem. O controle é realizado por dispositivos de abatimento de vazão, próprios para operar com volumes e vazões maiores. Geralmente, são utilizados os reservatórios de detenção abertos ou fechados (ADASA, 2018).

As bacias de detenção são obras hidráulicas de drenagem urbana com a finalidade de reservar temporariamente e/ou infiltrar as águas pluviais, determinando o rearranjo temporal e/ou a redução das vazões escoadas. Castro (2007), divide as bacias de detenção de acordo com a sua forma de trabalho podendo ser: bacia de retenção (finalidade única de estocar temporariamente as águas, proporcionando o rearranjo temporal das vazões), bacias de infiltração (finalidade de infiltrar a totalidade das águas pluviais) e bacias de retenção e infiltração (finalidade de infiltrar parte das águas pluviais, de forma a reduzir os volumes escoados a jusante e proporcionar, ainda, o rearranjo temporal das vazões).

3.5.2 - Medidas Não-Estruturais

Essas medidas procuram diminuir os impactos causados pelas inundações por meio de intervenções constituídas por leis, introdução de normas, regulamentos e programas que visem ao disciplinamento do uso e ocupação do solo, implementação de sistemas de alerta e conscientização da população quanto à manutenção dos diversos componentes do sistema de drenagem (SOUSA, 2016).

A preocupação quanto à drenagem urbana é recente nos municípios brasileiros e para que haja eficiência na implantação dessas medidas, a fiscalização e controle de obras; tanto de projetos de loteamentos quanto obras públicas e de drenagem; devem ser intensos. As medidas não estruturais combinadas com as medidas estruturais podem gerar bons resultados, minimizando os impactos causados pelo aumento do escoamento superficial.

3.6 – TELHADO VERDE

3.6.1 - Telhado verde e sua importância na gestão das águas pluviais

Como já foi visto, o controle atual do escoamento na drenagem urbana baseia-se no princípio de que a melhor drenagem é a que retira a água pluvial excedente o mais rápido possível do seu local de origem. No entanto, de acordo com Tucci (2005a), a cheia natural não deve ser ampliada pelos que ocupam a bacia, seja motivada por um simples loteamento, seja por obras no ambiente urbano. A ocupação do espaço urbano e a drenagem das águas pluviais devem priorizar os mecanismos naturais como a infiltração.

Com o objetivo de controlar os efeitos da urbanização sobre os processos hidrológicos, são adotadas técnicas compensatórias que priorizam o armazenamento e infiltração das águas pluviais em escala de bacia. Tais técnicas como os reservatórios de detenção e retenção já são adotadas em diversas cidades do país; no entanto, apresentam limitações físicas devido à área requisitada; degradação da qualidade das águas pluviais, pelo carreamento de sedimentos; e aumento nos custos dos sistemas de drenagem.

Visto isso, novas abordagens vêm sendo estudadas, tais como as medidas de desenvolvimento urbano de baixo impacto; cujos efeitos pretendidos são a infiltração, a evapotranspiração e a filtragem da água pluvial em escala de lote, melhorando o controle quali-quantitativo dessa. A grande vantagem dessas técnicas encontra-se na possibilidade de gerenciar águas urbanas de forma integrada às atividades locais, com mínimo dano ambiental e à saúde da população, além de serem financeiramente mais acessíveis e de mais fácil conscientização popular pela simplicidade e proximidade às atividades rotineiras da população (SOUZA *et al.*, 2012).

Entre os dispositivos que podem ser empregados no conceito de Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto, destacam-se os telhados verdes, pavimentos permeáveis, coletores de água pluvial e trincheiras de infiltração.

O telhado verde como uma dessas práticas de manejo integrado para tratamento de qualidade e quantidade de águas pluviais, tem como diferencial o provimento de amenidades paisagísticas.

Segundo Souza *et al.*, (2012), dentre as vantagens apresentadas pelos telhados verdes constam a melhoria de eficiência energética, da qualidade do ar e da estética, redução da temperatura e barulho, controle de águas pluviais e aumento da vida útil do telhado. Além disso, a diversidade de opções de configuração de telhados verdes facilita a sua implantação em proporções crescentes.

No Brasil, o Ministério das Cidades tem estimulado a utilização de tecnologias que proporcionem o Desenvolvimento de Baixo Impacto para implantação e ampliação de sistemas de drenagem sustentáveis (BRASIL, 2006).

A eficiência dos telhados verdes estudada, por exemplo, na Universidade Federal de Goiás, mostrou que a utilização dessa técnica como medida do controle quantitativo do escoamento pluvial é muito satisfatória. A aplicação desta técnica foi avaliada em âmbito individual de um lote e em nível mais amplo referente à totalidade de um residencial. Segundo Saddi e Moura (2010), foi possível constatar que o lote sofre redução de seu pico de vazão de escoamento superficial de 36,36% com acréscimo dos telhados verdes e que para o loteamento em geral, esta redução é de 20% do total.

3.6.2 - Telhados verdes e suas especificações

O telhado verde é constituído de várias camadas de modo que cada uma possui uma função específica. A vegetação possui maior potencial de retenção de água no substrato, ainda com funções de evapotranspiração e interceptação. O substrato fornece água e nutrientes para a vegetação, e no momento de chuva pode armazenar a água. A camada do filtro previne que as partículas sejam transportadas para a drenagem. A camada de drenagem é necessária para evitar encharcamentos e estresse da cultura. Por fim, a camada de impermeabilização evita que a água entre em contato direto com a estrutura do telhado.

Na figura 3.3 há um esquema geral da estrutura de camadas do telhado verde, cujo objetivo é suportar o crescimento da vegetação, de forma eficaz.

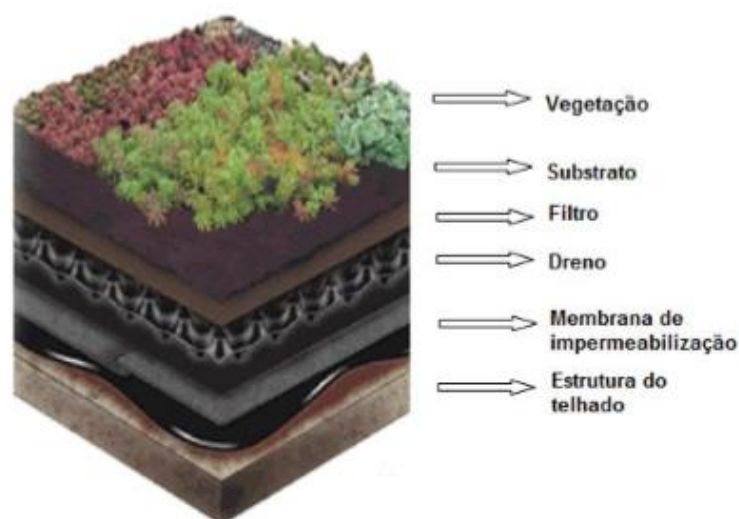


Figura 3.3: Esquema das camadas de um telhado verde (HATHAWAY, *et al.*, 2008; *apud* LORENZINI NETO, 2014).

Substrato

Segundo Saddi e Moura (2010), o substrato deve ser leve; facilitar o enraizamento, fixação e desenvolvimento espacial dos vegetais; possuir estrutura aerada; apresentar resistência à compressão e estabilidade de forma; ser permeável e difundir a umidade; e ser resistente às variações de temperatura. Ele geralmente tende a ter uma base mineral com pequena quantidade de matéria orgânica, sendo a argila expandida comumente utilizada nas estruturas.

Os telhados verdes são classificados de acordo com a profundidade do substrato e conseqüentemente da vegetação. Podem ser intensivos por possuírem uma espessura de solo superior a 20 cm, por serem constituídos por plantas e arbustos de médio porte e necessitarem de um ambiente mais complexo para seu desenvolvimento; ou extensivos que são caracterizados por camadas de solo com espessura inferior a 20 cm e por uma composição de espécies de pequeno porte que necessitam ser mais resistentes (POUEY, 1998). Na figura 3.4 tem-se a representação das classificações de substratos.

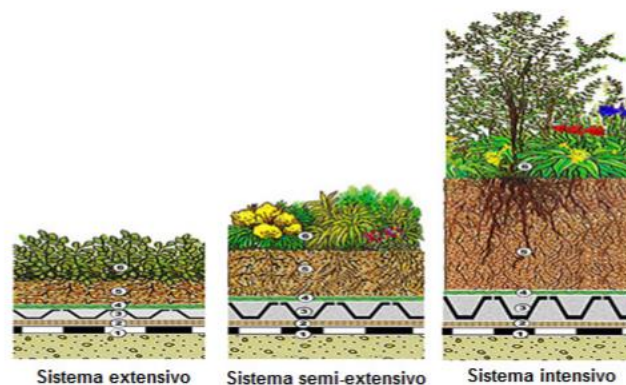


Figura 3.4: Representação esquemática dos diferentes sistemas de telhado verde (GREEN ROOF SERVICE LLC, 2010; apud JOBIM, 2013).

Lorenzini Neto (2014) cita que os telhados verdes extensivos são os mais indicados para prover melhorias estéticas, na qualidade do ar e da água, criação de habitat para plantas e animais, além de isolamento acústico e redução das temperaturas urbanas; e também apresentam fácil aplicação e gerenciamento.

Já os telhados verdes intensivos possuem maior profundidade de substrato e são planejados para se assemelharem à paisagem natural encontrada no solo. Eles apresentam desvantagens como o acréscimo no peso e no custo de manutenção, embora possuam maior potencial de aumentar a diversidade de plantas empregadas e tenham maior capacidade de retenção de água.

Antes da instalação da estrutura, é importante conhecer a vegetação e o substrato. Para definir as espécies a serem plantadas deve-se considerar as características locais de solo, clima, hidrologia e sucessão vegetal; sendo que espécies nativas têm prioridade de escolha, por estarem bem adaptadas às condicionantes locais, minimizando esforços para sua manutenção. Entretanto, algumas de suas características devem ser observadas, como a resistência ao microclima do telhado e a profundidade do substrato.

Vale ressaltar também, o cuidado que se deve ter em relação ao uso de matéria orgânica e fertilizantes que, em excesso, podem resultar em um substrato fértil demais e na morte de algumas espécies de plantas.

Vegetação

Para a escolha da vegetação, diversos fatores devem ser considerados como a intenção e finalidade do projeto, o apelo estético, as condições ambientais locais, a composição e profundidade do substrato, a instalação, o custo de realização, e a manutenção necessária.

Nos telhados verdes extensivos a vegetação é geralmente composta por espécies com maior resistência à seca (gramíneas, ervas e musgos) para minimizar os custos e a manutenção (ECOTELHADO, 2017). Esse tipo requer menos material que os intensivos, e por isso são mais leves. Além de serem instalados em superfícies planas, podem ser utilizados em superfícies íngremes de até 45°. Nesse sistema, as plantas nativas são mais indicadas, por apresentarem menos sensibilidade e exigirem menor cuidado quanto à composição do solo e aos sistemas de irrigação e drenagem (POUEY, 1998).

A instalação das plantas pode ser por sementeira, plantação direta (mudas) ou por tapetes pré-cultivados. A sementeira à mão é mais conveniente no caso da plantação de ervas ou gramíneas e tem menor custo, mas pode apresentar certos problemas de execução como dispersão pelo vento ou chuva, distribuição não-homogênea e necessidade de rega regular durante um período após a sementeira. A plantação direta de mudas apresenta maior custo, mas tem melhores resultados que a sementeira. Já a técnica dos tapetes pré-cultivados é a mais utilizada e evita os problemas relacionados ao desenvolvimento vegetal (SADDI e MOURA, 2010).

Já nos telhados verdes intensivos a vegetação é mais característica de gramas, flores, árvores e arbustos; podendo ser instalado apenas em telhados com declividade menor que 10°. Como neste tipo de estrutura são abrigados vegetais lenhosos (arbustos e árvores) e

vegetais herbáceos de grande porte que podem ser submetidos a ventos e tempestades, recomenda-se que as mesmas sejam ancoradas no substrato.

Sabe-se que a escolha das plantas depende principalmente do clima da região. As espécies que mais se adaptam aos climas mais secos e quentes são as suculentas, pois têm como características a baixa transpiração e a alta retenção de água. Lorenzini Neto (2014) cita o *Sedum*, um dos gêneros de plantas da família das *Crassuláceas*, como o mais comum de se aplicar aos telhados verdes. Este apresenta alta tolerância ao estresse hídrico e se adequa aos substratos mais finos utilizados na estrutura tipo extensiva.

Filtração

O sistema de filtragem consiste de uma camada filtrante que se situa entre a camada de substrato e a camada de drenagem. O filtro tem a finalidade de evitar a colmatção do dreno, fazendo com que ele não perca a sua eficiência (LORENZINI NETO, 2014).

Geralmente é um geotêxtil que retém as partículas finas de solo, permitindo que a água alcance a camada de drenagem. Ele absorve uma parte da água que o atravessa oferecendo um meio úmido para as raízes das plantas, e deve ser escolhido de acordo com o diâmetro das partículas do solo.

De acordo com Saddi e Moura (2010), a camada de filtração para coberturas verdes extensivas, geralmente é constituída por um geotêxtil ou por uma camada a base de fibras de vidro ligadas por resina sintética. Já para as coberturas verdes intensivas, a camada filtrante deve garantir uma resistência suficiente a cortes e ao esforço devido a cargas localizadas, principalmente por causa das raízes compridas e fortes de arbustos e árvores, utilizadas nesse tipo de cobertura.

Drenagem

A camada de drenagem se situa entre o filtro e a membrana impermeável, e é responsável por transportar o fluxo de água excedente não absorvido pela cobertura verde, para o sistema de drenagem da construção. A camada drenante é escolhida de acordo com a inclinação da cobertura, com a resistência da estrutura portante e com a espessura e natureza do substrato (SADDI e MOURA, 2010).

Segundo Pouey (1998), esta camada tem o objetivo de escoar eficazmente a água, evitando que o solo fique encharcado. Além disso, a camada de drenagem também funciona

como um espaço para aeração do sistema; pois, quando não está em uso, ela permanece seca e o ar flui entre os poros do substrato, prevenindo condições anaeróbias.

Segundo Lorenzini Neto (2014), sua forma pode variar bastante, desde argilas expandidas até a chamada “caixa de ovos”, composta de material sintético, que tem como característica a retenção das águas pluviais pelos pequenos reservatórios, as quais ficam disponíveis para as plantas em períodos de baixa pluviometria.

Saddi e Moura (2010), diferenciam o sistema de drenagem para as coberturas extensivas, constituído de um aglomerado de materiais como cascalho ou módulos de drenagem pré-fabricados em plástico; e para as coberturas intensivas, constituído de materiais puramente drenantes (seixos rolados) e materiais drenantes com capacidade de armazenar uma parte da umidade (granulares de argila expandida ou ardósia expandida).

Impermeabilização

A ação das raízes pode causar sérios danos à membrana ou manta impermeabilizante. A espessura crescente das raízes, com o passar dos anos, exerce uma força poderosa. Assim, deve ser disposta uma proteção sobre a impermeabilização, especialmente quando forem plantadas árvores (POUEY, 1998).

Alguns produtos, como as membranas de impermeabilização compostas por altos polímeros, são impermeáveis e anti-raízes. Do contrário, uma proteção contra a penetração de raízes é fortemente aconselhada, sobretudo no caso de membranas de impermeabilização compostas por apenas uma camada cujas bordas são soldadas ou coladas com adesivos (SADDI e MOURA, 2010).

Para as coberturas extensivas, geralmente, essa proteção é feita com um geotêxtil de alta resistência ao esmagamento e dificilmente penetrável. Já para as coberturas intensivas, a membrana de impermeabilização deve possuir uma proteção mecânica.

Manutenção

A necessidade de manutenção varia muito nas coberturas verdes. Algumas precisam de irrigação eventual, principalmente em períodos de severas secas, sendo necessários, de tempos em tempos, a remoção de sementes de árvores invasoras (POUEY, 1998).

A irrigação do telhado depende de sua vegetação e das condições microclimáticas. Nos telhados verdes intensivos a manutenção e em particular os cuidados com a rega já são

mais exigentes e frequentes, podendo ser necessária a previsão de um sistema irrigação; devido à maior superfície de evaporação deste tipo de vegetação.

De acordo com Pouey (1998), os custos de manutenção variam de acordo com os objetivos da cobertura verde. Jardins formais, com plantas mais exigentes, requerem abastecimento de água, limpeza de ervas daninhas, fertilização e corte ou poda. Já os jardins menos formais, portanto mais naturais, requerem menos manutenção, resultando em menor custo.

Por fim, a limpeza dos drenos também é essencial, pois sua obstrução pode resultar em água parada sobre a estrutura do telhado, podendo causar infiltração na estrutura e prejudicar a vegetação.

3.6.3 – Manutenção da vegetação de telhados verdes e teor de umidade do solo

A água é fator fundamental na produção vegetal. Qualquer cultura, durante seu ciclo de desenvolvimento, consome um enorme volume de água, sendo que cerca de 98% deste volume apenas passa pela planta, perdendo-se posteriormente na atmosfera pelo processo de transpiração. Este fluxo de água é necessário para o desenvolvimento vegetal e por este motivo sua taxa deve ser mantida dentro de limites ótimos para cada cultura (REICHARDT, 1978).

O solo é o reservatório de água para as plantas, sendo composto por uma parte sólida e outro espaço constituído por água e ar, denominado de espaço poroso do solo. Como a recarga natural deste reservatório (chuva) é descontínua, o volume disponível às plantas é variável (REICHARDT, 1978).

Quando as chuvas são excessivas, a capacidade de armazenamento do solo é superada e grandes perdas podem ocorrer, por escoamento superficial, por exemplo, provocando erosão do solo ou percolação profunda. Quando a chuva é esparsa, o solo funciona como um reservatório de água imprescindível ao desenvolvimento vegetal. O esgotamento deste reservatório por uma cultura exige sua recarga artificial que é o caso da irrigação.

Para o bom funcionamento do telhado verde, é importante que se faça a manutenção da vegetação por meio do monitoramento da umidade do solo. Dessa forma, é possível controlar a irrigação, com a determinação do melhor momento de se irrigar e a quantidade de água necessária para tal.

Irrigar no momento apropriado e na quantidade adequada, garantem melhor adaptação e desenvolvimento da vegetação, além de minimizar os impactos ambientais com a redução do gasto de água, e as perdas de nutrientes por lixiviação.

Para a determinação da umidade do solo serão explorados alguns métodos como o método de Richards, o uso de tensiômetros e os blocos de resistência elétrica.

Método de Richards

A curva de retenção da água no solo, fundamental para os estudos que envolvem interações do solo com a vegetação, tem como método clássico de determinação o uso da Câmara de Pressão de Richards. Essa curva expressa a relação entre o potencial matricial do solo (tensão de água) e o conteúdo de água no solo, indicando a qualidade física do solo (EMBRAPA, 2005).

Para se determinar a quantidade correta de água a ser aplicada a cada irrigação, visando repor a água do solo, é desejável conhecer a umidade volumétrica do mesmo no momento da irrigação e a umidade máxima que não prejudique a aeração. Como o tensiômetro não fornece a leitura direta de umidade do solo, esta pode ser determinada indiretamente a partir da curva característica de retenção de água do solo (MAROUELLI, 2008).

A curva de retenção de água no solo mostra o aspecto dinâmico da água no solo, permitindo calcular a quantidade de água que um solo pode reter dentro de determinados limites de potencial matricial. Sendo assim, é possível interpretar as características do armazenamento de água no solo em relação às necessidades hídricas de determinado cultivo.

A retenção de água do solo é conduzida pelas forças capilares, que ocorrem nos poros capilares do solo; e forças de adsorção, que ocorrem nas superfícies dos sólidos do solo. A curva de retenção de água no solo está diretamente relacionada com o desenvolvimento das plantas, permitindo estimar atributos importantes do solo, como a porosidade, capacidade de campo, ponto de murcha permanente, água disponível, condutividade hidráulica não-saturada, dentre outros. Além disso, auxilia no manejo da irrigação da vegetação, sendo possível estimar a água disponível para as plantas por meio da capacidade de campo e do ponto de murcha.

A compactação do solo afeta a curva de retenção de água, por provocar a redução da porosidade total do solo. A textura também influencia no conteúdo de água no solo, de forma que quanto maior a quantidade de argila, maior será o conteúdo de água sob um dado potencial matricial, enquanto que em solos arenosos a tendência é ocorrer o inverso (DAVALO, 2013).

O método da câmara de Richards tem a finalidade de determinar pontos que, constituindo uma curva, relacionam a umidade retida no solo em um determinado potencial matricial. A metodologia do método consiste em colocar amostras saturadas em placas de cerâmica, submetendo-as a uma determinada pressão, até atingir a drenagem máxima da água contida nos seus poros, correspondente à tensão aplicada (EMBRAPA, 1997). Determina-se então a umidade da amostra nas tensões usualmente utilizadas (0,01; 0,033; 0,1; 0,5; e 1,5 Mpa), que serão os pontos da curva característica de retenção de umidade do solo.

Tensiômetro

Os tensiômetros são sensores utilizados para obtenção da umidade do solo, visto que medem sua tensão matricial de água, ou seja, a força com que a água é retida pelo solo, a qual afeta a capacidade de absorção das plantas. Ele consiste de um tubo rígido contendo água, uma cápsula de cerâmica porosa conectada em sua extremidade inferior, que possibilita a troca de água entre o interior do tubo e o solo, e uma tampa em sua extremidade superior, para manutenção do equipamento (MAROUELLI, 2008).

Seu funcionamento se dá por meio da passagem de água do tubo para o solo. Quando o solo está seco, uma porção da água deixa o tensiômetro através da cápsula para o solo, formando um vácuo parcial. Após a irrigação da vegetação, a água do solo volta para o interior do tensiômetro pela ação do vácuo formado durante a condição de solo seco. Assim, o instrumento permite medir o esforço que a planta exerce para extrair água do solo.

Os tensiômetros normalmente funcionam até tensões próximas de 0,85 atm. Após esse limite, a água existente na interface (sólido-líquido) muda do estado líquido para gasoso, fazendo com que o equipamento perca a escorva (vácuo) e pare de funcionar adequadamente.

O solo armazena água em seus poros, fornecendo-a aos poucos às plantas na medida de sua necessidade. Essa capacidade de armazenamento é limitada, dependendo das características das partículas do solo e da profundidade em que se encontram as raízes das plantas; por esse motivo, parte da água é perdida, quando aplicada em excesso, acarretando também na lixiviação dos nutrientes (REICHARDT, 1978).

É de extrema importância saber o momento adequado de se irrigar, pois nem toda a água presente no solo está disponível para as plantas de maneira similar. À medida que o solo vai secando mais difícil se torna para a planta extrair água por meio de suas raízes (MAROUELLI, 2008). Por outro lado, excesso de água não é garantia de bom desenvolvimento das plantas, pois pode haver a saturação de grande parte dos espaços

porosos do solo, comprometendo a aeração e afetando negativamente o funcionamento das raízes.

Os tensiômetros mais comuns são os de vacuômetros metálico tipo Bourbon, de coluna de mercúrio e de punção; sendo o primeiro mais utilizado comercialmente para manejo de irrigação. Eles permitem leitura de tensão até cerca de 80 kPa e para que apresentem desempenho satisfatório, é necessário observar alguns cuidados quanto ao preparo, instalação, operação, manutenção e armazenamento do equipamento (MAROUELLI, 2008).

Antes de sua instalação, os tensiômetros devem ser testados; por meio da escorva, que consiste na retirada do ar presente nos poros da cápsula porosa, e também devem ser reparados possíveis vazamentos. Após a instalação, deve-se atentar à necessidade de manutenção que se dá com a presença de um nível baixo de água no interior do tensiômetro após uma irrigação. As vantagens do tensiômetro são, dentre outras, a simplicidade e facilidade de operação, além de obter em tempo real a tensão de água no solo o que é indiretamente o teor de água no solo.

Blocos de resistência elétrica

Os blocos de resistência elétrica são sensores que compõem um sistema de medição de umidade do solo. Os blocos; feitos por material poroso, geralmente gesso; utilizam a leitura da corrente elétrica como indicador de umidade disponível para as plantas. Tendo em vista que a resistividade do solo depende da sua umidade, pode-se verificar que quanto maior a umidade do solo, menor é a resistência para a passagem da corrente elétrica.

As leituras dos blocos dependem da quantidade de água contida no solo, de sua salinidade, de sua composição e de sua textura.

3.6.4 - Tecnologias de execução de coberturas verdes

Os métodos construtivos de coberturas verdes podem ser por sistema modular (figura 3.5-a), sistema alveolar (figura 3.5-b) e sistema laminar (figura 3.5-c). As características, componentes e modo de instalação são apresentadas a seguir.

- **Sistema Modular:** é um método que garante conforto térmico e tem rápida instalação. Pode ser instalado sobre diversos tipos de estrutura incluindo lajes de concreto impermeabilizadas, telhados de fibrocimento, cerâmicos ou metálicos e estrados de madeira. O sistema é, basicamente composto por módulos pré-vegetados

que são instalados sobre uma membrana anti-raízes e uma membrana que retém nutrientes. A membrana anti-raízes é composta de polietileno de alta densidade e tem a função de impedir que as raízes penetrem na impermeabilização do telhado (SADDI e MOURA, 2010).

- **Sistema Alveolar:** A composição do sistema se destaca pela existência de uma membrana alveolar que é flexível e possui reservatórios de formato hexagonal, localizando-se entre a membrana de absorção e a membrana de impermeabilização. Ela tem a função de ser uma camada drenante e de também reservar água para as raízes da vegetação.
- **Sistema Laminar:** Sua diferenciação consiste em um piso elevado com a função de criar, abaixo do mesmo, um reservatório de água. Com esse sistema é possível criar uma cisterna em cima do telhado para reter a água da chuva, permitindo a reutilização de água e nutrientes gerados na estrutura, evitando o desperdício de água.

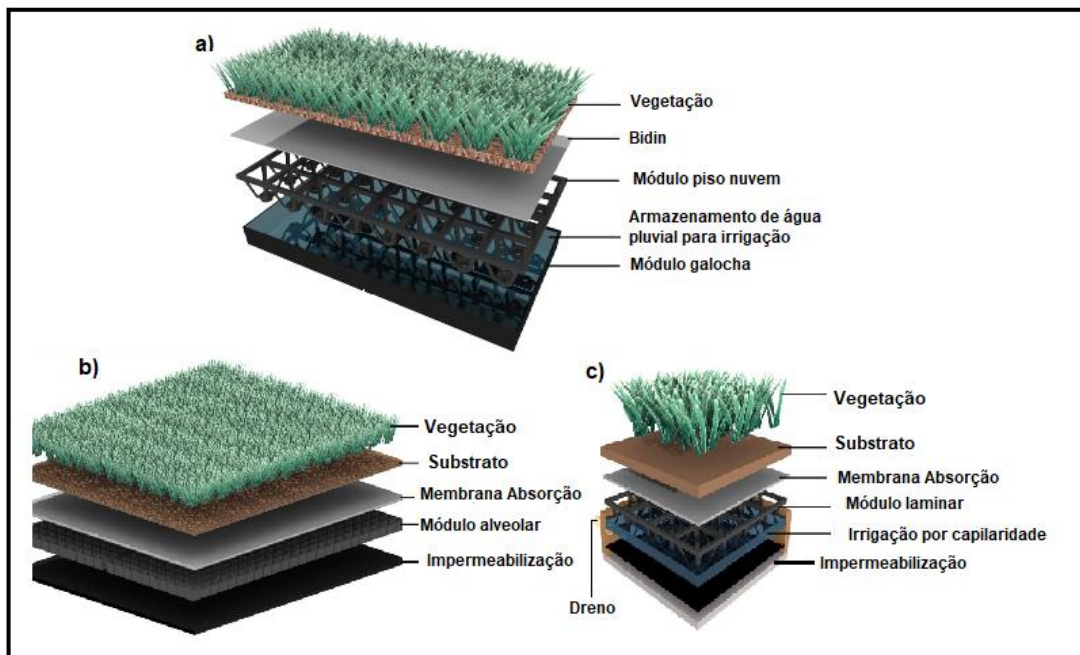


Figura 3.5: Sistemas modular (a), alveolar (b) e laminar (c) (ECOTELHADO, 2017).

3.6.5 – Exemplos de aplicação de telhados verdes

A aplicação de telhados verdes em várias partes do mundo visa não só ao efeito estético, mas também à implantação de tecnologias sustentáveis. Em Toronto, por exemplo, desde que a lei de incentivos aos telhados verdes foi implementada, em 2010, resultou em uma transformação nas coberturas da cidade, esfriando o clima, ajudando a mitigar o

problema das enxurradas, ao mesmo tempo em que agregou beleza e biodiversidade (INSTITUTO CIDADE JARDIM, 2017).

No Brasil, a ideia da cobertura verde vem sendo disseminada aos poucos, mas já é empregada eficientemente em diversos lugares. No Rio de Janeiro, com uma área de 860 m², o telhado verde do Shopping Village Mall, foi idealizado para resolver problemas de isolamento acústico e controle térmico (INSTITUTO CIDADE JARDIM, 2017). Na figura 3.6 estão representados o período durante e após a instalação do telhado verde no empreendimento comercial.

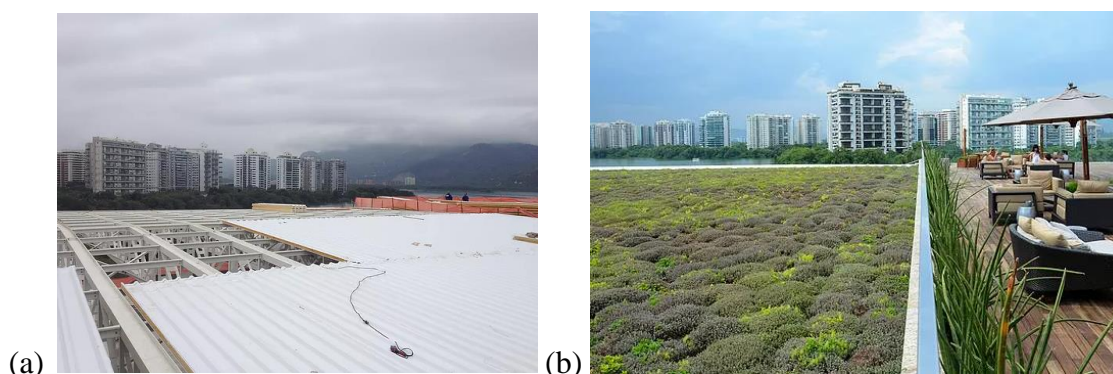


Figura 3.6: Cobertura durante (a) e após (b) a instalação do telhado verde no Village Mall (INSTITUTO CIDADE JARDIM, 2017).

As condições ambientais como precipitação, radiação solar e temperatura têm influência direta no comportamento do telhado verde implantado na região. Esses elementos meteorológicos determinam se a espécie vegetal se adaptará ou não, assim como sua necessidade de irrigação; visto que o estresse hídrico pode prejudicar o crescimento e desenvolvimento da vegetação, pois a água está presente em todo o seu processo de nutrição.

A profundidade do enraizamento é outro fator importante para a sobrevivência da vegetação, pois interfere no uso eficiente da água e dos nutrientes que ficam retidos no solo, além de conferir resistência a ervas daninhas, doenças e insetos. Quanto menor a profundidade do enraizamento, menor à resistência ao clima seco.

A formação de raízes depende de fatores como a época do ano, umidade, luminosidade e temperatura do ambiente, substrato de enraizamento, além de outras características da própria vegetação. As técnicas de propagação vegetativa por estaquia são amplamente difundidas sendo alternativa para a multiplicação das espécies nativas do cerrado, principalmente daquelas com baixo poder germinativo (RIOS e RIBEIRO, 2014).

O Campus Brasília do Instituto Federal de Brasília (IFB) possui uma aplicação do telhado verde no cerrado. O sistema aderido capta a água da chuva para utilizá-la na irrigação da vegetação e nos espelhos d'água da instituição. Constituído por sistema laminar, há

armazenamento de água em uma das camadas do próprio telhado, além do reservatório; diminuindo ainda mais a contribuição dessa área no escoamento superficial. Na figura 3.7 apresenta-se o telhado verde instalado na instituição.



Figura 3.7: Telhado verde do Instituto Federal de Brasília (ECOTELHADO, 2017).

Outra aplicação do telhado verde no cerrado é encontrada na Escola Francesa de Brasília, Lycée Français François Mitterrand, localizada no Lago Sul, Brasília – DF. A cobertura é constituída por 3300 m² de revestimento vivo, sistema de cultivo modular, composto orgânico e uma mistura de plantas suculentas que armazenam água em suas folhas, adaptando-se ao clima do cerrado (Figura 3.8).

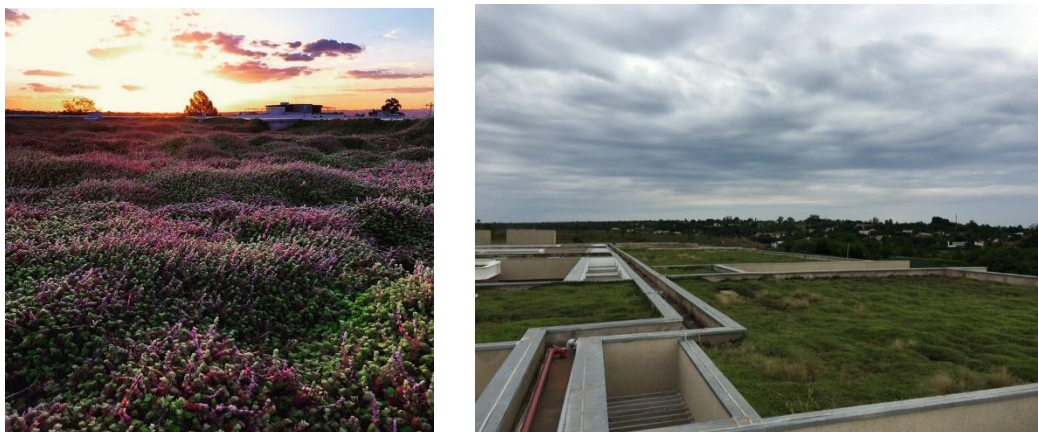


Figura 3.8: Imagens do telhado verde instalado na Escola Francesa de Brasília (INSTITUTO CIDADE JARDIM, 2017).

A estrutura do telhado verde da Escola Francesa de Brasília é composta da seguinte forma: impermeabilização da laje do telhado; distribuição do revestimento vivo modular (bandeja representada na figura 3.9-b); aplicação do filtro de drenagem que reduz o carregamento de partículas sólidas (figura 3.9-a), garantindo o bom funcionamento da drenagem na base do telhado, além de manter a circulação de ar necessária para o bom desenvolvimento radicular; aplicação do substrato de 5 a 10 cm de profundidade; e por fim,

aplicação das mudas. A vegetação é constituída por *Aptenia Cordifolia*, *Callisia Repens* e *Portulacca Oleracea*, que segundo o Instituto Cidade Jardim (2017), proporciona baixa manutenção; maior capacidade de recuperação após estresses; adaptação em diferentes condições de sol, vento e umidade; e proteção contra a proliferação descontrolada de insetos e fungos.

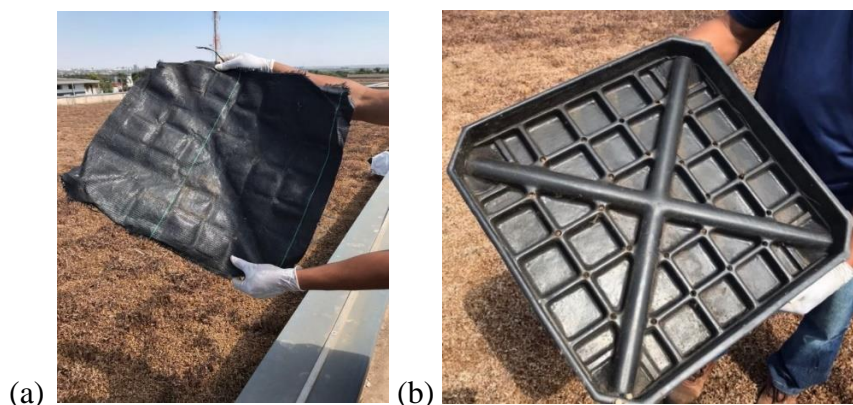


Figura 3.9: Filtro de drenagem (a) e revestimento vivo modular (b) (2017).

O telhado da Escola Francesa de Brasília foi instalado há um pouco mais de um ano, e até o momento vem trazendo muitos benefícios à escola. De todas as salas do prédio, apenas as administrativas e o auditório possuem ar condicionado; nas demais, a temperatura torna-se amena e agradável apenas com o auxílio do telhado verde, gerando uma grande redução no consumo de energia.

Além disso, a manutenção não gera grandes custos. O telhado verde se sustenta nos períodos chuvosos e úmidos sem necessidade de irrigação. Já nos períodos secos, a irrigação torna-se necessária para que a vegetação não morra.

A cobertura verde conta com um sistema automático de irrigação (figura 3.10-a), cujas mangueiras utilizadas são recicláveis e apresentam diversos furos ao longo de seu comprimento. Em períodos secos, quando expostas ao sol, as mangueiras sofrem grande ressecamento (figura 3.10-b), tornando-se ineficazes e sendo necessária sua troca.

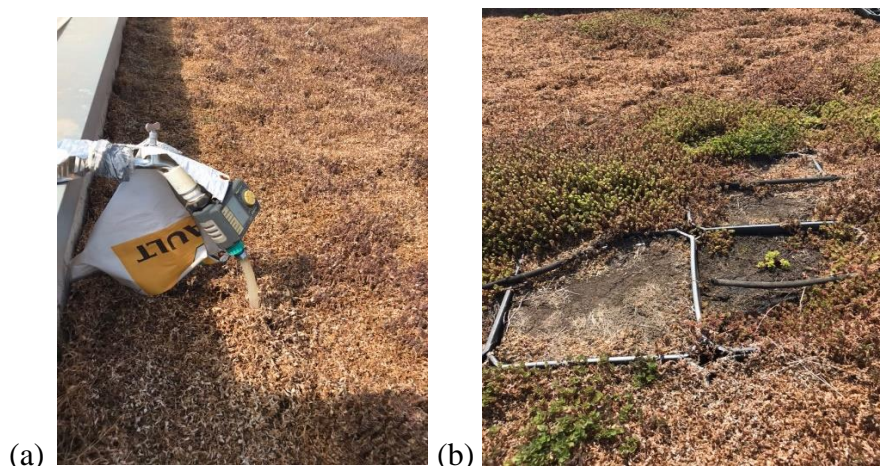


Figura 3.10: Sistema de irrigação automática (a) com o dispositivo de monitoramento e as mangueiras ressecadas (b) devida à exposição ao sol (2017).

Ainda não há aproveitamento da água drenada pelo telhado verde para outros usos, mas a pretensão da Escola é de obter um sistema que possibilite usar a água captada para irrigar o próprio telhado verde e os demais jardins da instituição. Na figura 3.11, pode-se perceber a aparência da vegetação no período seco. É possível ver que nos locais aonde a mangueira de irrigação ainda não foi danificada, a vegetação ainda se encontra verde e com substrato úmido, como foi visto no dia da visita à instituição, em outubro de 2017.



Figura 3.11: Telhado verde em outubro, período bastante quente e seco, em Brasília (2017).

3.6.6 - Aspectos benéficos da utilização de telhado verde

Qualidade da água drenada

Como já visto nos tópicos anteriores, as águas de escoamento superficial podem ser contaminadas com diversos tipos de poluentes que, dissolvidos ou em suspensão, podem provocar diversas alterações no ecossistema aquático. Os substratos das coberturas verdes

são capazes de reter determinados contaminantes, contribuindo de forma significativa para a redução da poluição das águas receptoras.

Budel (2014) comparou a qualidade da água da chuva coletada em um sistema composto por um telhado inclinado com telhas de concreto, e outro composto por uma cobertura plana com telhado verde. O estudo foi realizado em duas casas localizadas na região noroeste da cidade de Curitiba.

Nove amostras foram coletadas e analisadas, sendo que o telhado convencional apresentou maior qualidade no parâmetro turbidez e demanda química de oxigênio (DQO), já o telhado verde diminuiu a acidez natural da água da chuva. As duas coberturas se mostraram equivalentes em relação à concentração de amônia e nitrato, e indicaram concentrações elevadas de fosfato.

Outro estudo realizado por Salerno (2017) buscou avaliar a viabilidade do emprego de telhados verdes em Brasília-DF, por meio da avaliação qualitativa e quantitativa da água drenada de três unidades piloto; sendo uma unidade de telhado convencional, e duas unidades de telhado verde com 10 cm e 20 cm de substrato.

A unidade piloto de telhado verde com 10cm de substrato mostrou que quanto maiores eram os volumes de água drenada, menores eram as concentrações de fósforo total. Já a unidade piloto de telhado verde com 20 cm de substrato apresentou maiores valores de fósforo total, que as demais. No entanto, por mais que as lixiviações dos nutrientes estejam presentes em concentrações maiores nos telhados verdes, os volumes drenados por eles são consideravelmente menores em relação ao volume escoado pelo telhado convencional.

As unidades piloto foram monitoradas por 7 meses, e Salerno (2017) concluiu que mesmo respeitando aos padrões estabelecidos para uso de irrigação de jardins, não houve atendimento ao padrão de cor e odor para demais irrigações. Para tal finalidade, seria necessário aplicar algum tratamento como técnica de filtração; além de um armazenamento adequado que evite a formação de biofilme.

Os impactos na qualidade da água de drenagem de telhados verdes são sazonais e dependem do desenvolvimento da vegetação, da precipitação e das taxas de escoamento superficial. Após a estabilização, telhados verdes tendem a diminuir as cargas de nutrientes na água de drenagem, ou seja, as estruturas com menos de um ano, ainda em processo de estabilização, tendem a ter altas concentrações de nutrientes presentes na água de drenagem quando comparados a telhados mais antigos.

Retenção de água da chuva

O telhado verde ajuda a reter a água da chuva por meio de suas camadas que absorvem quantidades significativas de precipitação, diminuindo o escoamento de águas pluviais.

No estudo sobre telhado verde e sua contribuição na redução da vazão da água pluvial escoada, Baldessar (2012) monitorou protótipos de telhado verde, telhado convencional com telhas de barro, e laje impermeável, em Curitiba. Tanto os resultados de medição diária, quanto os resultados de simulação no *software GreenRoof* utilizado, apontaram os benefícios do uso do telhado verde no processo de gestão de águas pluviais. Tem-se que 77,3% da água de chuva precipitada foi escoada no telhado de barro e 30,7% o valor da água de chuva precipitada que foi escoada pelo telhado verde, apontando uma redução significativa do escoamento.

Jobim (2013) avaliou a capacidade de retenção do escoamento pluvial em diferentes tipos de sistemas de telhados verdes como alveolar simples, alveolar grelhado, hexagonal, modular com galocha, e com produtos recicláveis. Além disso, a composição de substrato variou entre sistema com e sem argila expandida.

O monitoramento permitiu determinar, para cada tipo de sistema, parâmetros que refletem a capacidade de retenção do escoamento pluvial como o coeficiente de escoamento (C), que é a relação entre o escoamento superficial e a precipitação total incidente, ou seja, é a proporção da chuva que é convertida em escoamento superficial; sendo que quanto mais próximo o coeficiente de 0, mais eficiente é o sistema de telhado na retenção das águas pluviais.

O valor da curva-número (CN), que é um parâmetro hidrológico, também é importante na análise da eficiência de telhados verdes no controle quantitativo do escoamento pluvial. Para determinação do CN foi utilizado o volume da chuva efetiva, que é o volume em excesso drenado pelo telhado verde; e a chuva total incidente. Considerando o equacionamento do método, o objetivo do ajuste aos eventos monitorados foi o de encontrar o valor de CN que aplicado no equacionamento, juntamente com a precipitação observada produzisse um volume escoado superficialmente equivalente ao observado (JOBIM, 2013).

Segundo Jobim (2013), foi possível obter uma boa capacidade de retenção de água nos diferentes sistemas e substratos analisados, sendo que para alguns eventos de chuva nem mesmo foi gerado escoamento superficial. O sistema que apresentou maior eficiência, ou

seja, gerou menos escoamento superficial médio por unidade de área foi o sistema comercial do tipo modular com galocha, que possui em sua composição um material poroso capaz de aumentar a retenção de água.

Em todos os casos os sistemas com substrato contendo argila expandida apresentaram menores volumes de escoamento superficial. O sistema que gera um menor coeficiente de escoamento superficial é o modular com galocha, com valor médio de 0,13 para o substrato com argila expandida, e seu percentual médio de retenção do volume de chuva é de 88,1 %. Esse sistema também foi o que apresentou uma maior capacidade de armazenamento de água da chuva, com capacidade média de armazenar entre 14,2 e 13,3 mm/m² para o substrato com e sem argila expandida, respectivamente. Além disso, foi o sistema que apresentou menor perda de eficiência à medida que os volumes de chuva aumentaram (JOBIM, 2013).

Salerno (2017) também obteve resultados favoráveis à retenção de água da chuva no telhado verde, monitorando duas estruturas piloto com 10 cm e 20 cm de substrato, respectivamente, em Brasília-DF. Na primeira unidade piloto, durante o período chuvoso, observou-se uma retenção média do volume precipitado de 45%; já na segunda unidade piloto, uma retenção média de 57%. Concluindo assim, que a vegetação da unidade piloto de telhado verde com 20 cm de substrato se desenvolveu mais e junto com o substrato, por interceptação e evapotranspiração, reteve maiores volumes de água nos eventos de chuva.

Redução da ilha de calor urbana

O efeito da ilha de calor urbana é caracterizado por uma zona urbana que apresenta temperaturas mais elevadas que o meio ambiente imediato (SADDI e MOURA, 2010). Esse fenômeno pode incrementar a temperatura do meio em até 10°C, o que pode causar estresse térmico. Com o emprego de vegetação nos ambientes urbanos construídos, tem-se a melhora do conforto térmico, pois a vegetação ao entrar em processo de evapotranspiração ameniza a temperatura ambiente da construção.

Qualidade do ar e fluxos de ar

O telhado verde possui a capacidade de filtrar partículas de poeira e fuligem do ar. A vegetação retém o carbono através da fotossíntese, como um filtro para o ar, liberando o oxigênio (BALDESSAR, 2012).

Segundo os resultados de uma pesquisa realizada por Laroche *et al.*, (2004; *apud* Saddi e Moura, 2010), um metro quadrado de cobertura verde, principalmente composta de grama, é capaz de capturar em média 0,2 kg de partículas em suspensão no ar por dia o que pode representar uma contribuição significativa para a melhoria da qualidade do ar do meio urbano.

Economia de energia

No verão, a vegetação das coberturas verdes protege os imóveis contra os raios solares e por causa da evapotranspiração pode atenuar os ganhos térmicos. Pelo fato de serem necessárias diversas camadas para instalação de um telhado, toda a espessura da cobertura verde acaba por agir como isolante, dando um bom grau de resistência em transmissão de energia, reduzindo o uso de ar condicionado nos períodos mais quentes, e diminuindo a necessidade de aquecimento nos períodos mais frios.

Os benefícios da vegetação no clima urbano podem ser observados não só na área da vegetação, mas também no seu entorno. No estudo realizado por Rosseti *et al.* (2014), em Cuiabá, foi avaliado o efeito de telhados vegetados no conforto térmico dos pedestres, com simulação pelo *software* ENVI-Met.

O modelo numérico microclimático ENVI-Met é um modelo tridimensional que representa um método para dimensionar os efeitos das modificações no uso do solo sobre a dinâmica climática das cidades. Foram criados três cenários para análise, sendo eles com diferentes proporções de ocupação dos telhados pela vegetação: incorporação do telhado vegetado extensivo em 10%, 50% e 100% dos telhados convencionais.

Rosseti *et al.* (2014) concluíram que a incorporação do telhado verde em diferentes proporções, na área de estudo, foi capaz de provocar alterações no conforto térmico dos pedestres em todos os cenários estudados, sendo que no cenário com 100% de incorporação os efeitos foram mais expressivos.

Um estudo realizado por Panziera *et al.* (2016), objetivou determinar o desempenho térmico de dois tipos diferentes de telhados verdes e compará-los com um telhado convencional, no que se refere ao conforto térmico em Santa Maria, RS. A composição do primeiro telhado verde foi politereftalato de etileno (módulo A); do segundo, foi de policloreto de vinila (módulo B) e do telhado convencional foi fibrocimento (módulo C).

As maiores temperaturas registradas no período do estudo foram de 41,6°C no módulo A; 41,8°C no módulo B; e 44,7°C no módulo C. Isso indica que o telhado verde tem

características que melhor restringem a transmissão de energia térmica para o interior de sua estrutura, quando comparado às demais coberturas monitoradas.

Em praticamente todo o período de monitoramento, as temperaturas no módulo C, telhado convencional, foram superiores em comparação aos demais módulos. Já quando o registro da temperatura ambiente foi de 3,8°C obteve-se temperaturas médias mínimas nos telhados de 4,4°C no módulo A; 3,8°C no módulo B; e 3,3°C no módulo C. Observa-se que no módulo A foi registrado o maior valor de média mínima geral, devido a menor perda de energia térmica pelo substrato. Isso indica que nos dias frios, o módulo A apresentou melhor conservação de energia em relação aos demais.

Como conclusão do monitoramento, Panziera *et al.* (2016) afirmam que as estruturas convencionais não estão tecnologicamente preparadas para incrementar o conforto térmico humano, e que, com a implantação de novas tecnologias, como o telhado verde, é possível reduzir os efeitos das ilhas de calor, bem como melhorar o conforto térmico humano, especialmente no interior das residências.

Habitat para diferentes espécies

Principalmente em relação a insetos e pássaros, o telhado verde funciona como um reforço ao ecossistema. Um resultado desejado de qualquer projeto de construção, segundo Baldessar (2012), seria uma paisagem e um ecossistema que são regenerados e aperfeiçoados como uma consequência de projeto. Ao utilizar plantas nativas da região, onde o telhado verde está inserido, permite, com mais facilidade, que se restabeleça a presença de vida nativa.

Os telhados verdes intensivos, por possuírem espécies vegetais de porte maior e uma maior variedade de que os extensivos, provavelmente podem abrigar um número maior de insetos e pássaros (JOBIM, 2013).

Benefícios econômicos

O custo de telhados verdes é altamente variável entre 54-130 US\$/m² e de telhados convencionais entre 22-107 US\$/m², para novas construções (FERREIRA e MORUZZI, 2007). Mesmo o custo do telhado verde sendo maior que o do telhado convencional, tal diferença é compensada pelos benefícios que são propiciados pelo seu uso. Além da economia de energia por não ser necessário utilizar equipamentos para aquecer ou resfriar o

ambiente; há também o prolongamento da vida útil do telhado comum, pela proteção fornecida contra ocorrências de chuvas e grandes variações de temperatura.

Além disso, o uso de telhado verde torna as edificações mais sustentáveis, podendo ainda ser considerado como requisito para a obtenção de certificações LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*), sendo ideal para empresas e edifícios comerciais, além de permitirem aumentar a área útil da construção no caso de serem acessíveis.

A lei distrital nº 5965 de 16 de agosto de 2017 (BRASIL, 2017), cria o programa IPTU Verde, que dispõe sobre a redução no Imposto Predial e Territorial Urbano – IPTU como incentivo ambiental destinado a proteger, preservar e recuperar o meio ambiente.

O programa do IPTU Verde, recentemente instituído no Distrito Federal, tem o objetivo de fomentar medidas de redução de consumo de recursos naturais e de impactos ambientais, as quais preservem, protejam e recuperem o meio ambiente, mediante a concessão de benefício tributário ao contribuinte.

O benefício tributário que a lei se refere consiste na redução do IPTU aos proprietários de imóveis residenciais e não residenciais que adotem algumas medidas sustentáveis explícitas na lei, como por exemplo sistema de reuso de água, sistema de aquecimento elétrico solar, implantação de telhado verde em todos os telhados disponíveis no imóvel para esse tipo de cobertura, dentre outros.

A lei entende telhado verde, telhado vivo ou ecotelhado como cobertura de edificações na qual é plantada vegetação compatível, com impermeabilização e drenagem adequadas, a qual proporcione melhorias em termos paisagísticos e termoacústicos e redução da poluição ambiental. O percentual a ser descontado do IPTU nesse caso é de 11%, e é válido também implantar mais de uma medida sustentável.

Exemplo dessas medidas sustentáveis combinadas é o uso de telhados verdes e sistemas de geração de energia solar fotovoltaica conjuntamente. São duas tecnologias que contribuem para o desenvolvimento de construções mais sustentáveis.

O calor é um dos fatores que afetam a eficiência de painéis fotovoltaicos instalados em uma cobertura. O calor excessivo pode reduzir consideravelmente a produtividade dos painéis; pois aumenta a condutividade do cristal semicondutor, inibindo a separação de cargas e diminuindo a voltagem das células solares. Sendo assim, quando a cobertura é combinada com o sistema de telhado verde, o resfriamento da superfície impacta positivamente na efetividade e na funcionalidade desta tecnologia (INSTITUTO CIDADE JARDIM, 2017).

Em um sistema combinado de painéis solares e telhados verdes, como mostrado na figura 3.12, a temperatura na superfície da vegetação e no interior do substrato do telhado verde são reduzidas pelo sombreamento das placas solares, proporcionando um melhor desenvolvimento das plantas e menor evaporação de umidade. Ao mesmo tempo, o resfriamento proporcionado pelo telhado verde e a interferência na purificação do ar geram um aumento na geração de energia elétrica.



Figura 3.12: Sistema de telhado verde combinado ao sistema de geração de energia solar fotovoltaica (INSTITUTO CIDADE JARDIM, 2017).

3.6.7 - Aproveitamento da água drenada pelo telhado verde

A racionalização da água potável e a preservação e conservação dos recursos hídricos tornam-se muito importantes em face da escassez de água que pode nos atingir nas próximas décadas. Além de ser uma alternativa viável para redução do escoamento superficial em centros urbanos; a utilização de sistemas de drenagem sustentáveis, como o telhado verde, pode minimizar o efeito de vazões máximas possibilitando também o uso da água pluvial.

Tem-se que um sistema de acumulação de água da chuva para aproveitamento, pressupõe a área da captação, superfície sobre a qual incida a água da chuva; e suas vias de condução para o reservatório onde será armazenada a água. Muitos sistemas de captação, transporte e armazenamento de água da chuva são desenvolvidos com pontos de remoção de sólidos, como folhas, mas também de partículas sólidas menores (BUDEL, 2014).

Segundo Budel (2014), em cobertura de telhado verde pode-se desconsiderar o descarte das primeiras precipitações, pois este tipo de telhado conta com filtração que depende do material utilizado para construção e do substrato da superfície.

O volume que não é consumido pelo substrato e pela vegetação do telhado verde pode ser utilizado como alternativa para substituir a água na descarga de vasos sanitários ou na rega de jardins. Além disso as características pluviográficas dadas pela curva de Intensidade, Frequência e Duração – I.D.F, e seus aspectos construtivos são determinantes na definição do volume potencialmente aproveitável. Sendo que quanto maior a frequência

dos eventos de chuva, há diminuição da retenção de água no telhado verde, aumentando o volume escoado passível de ser aproveitado.

No Brasil, as exigências normativas quanto à reutilização de águas pluviais ainda estão sendo aprimoradas. A caracterização da qualidade da água, relativa aos aspectos químicos e físicos, é de suma importância na verificação do tratamento adequado para o aproveitamento da água drenada pelo telhado verde. Dependendo da qualidade da água e do tratamento utilizado, esta pode ser utilizada para irrigação, rega de jardins, lavagem de pisos, descarga em bacias sanitárias, dentre outros.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2007) regulamenta o uso da água de chuva através da Norma NBR 15527/2007, que traz os principais parâmetros de qualidade de água da chuva para os usos restritivos não potáveis, e estes estão representados no quadro 3.1.

Quadro 3.1: Parâmetros de qualidade de água da chuva para usos restritivos não potáveis (modificado, NBR 15527/2007 - ABNT, 2007).

PARÂMETRO	ANÁLISE	VALOR
Coliformes totais (NMP)	Semestral	Ausência em 100 ml
Coliformes termotolerantes (NMP)	Semestral	Ausência em 100 ml
Turbidez (UNT)	Mensal	<2,0uT ¹ , para usos menos restritivos < 5,0uT.
Cor aparente (caso não seja utilizado nenhum corante) (uH)	Mensal	< 15 uH ²
pH (Deve prever ajuste para proteção das redes de distribuição, caso necessário)	Mensal	pH de 6,0 a 8,0 no caso de tubulação de aço carbono ou galvanizado
Nota: Podem ser utilizados outros processos de desinfecção além do cloro, como a aplicação de raio ultravioleta e de ozônio.		
¹ uT é a unidade de turbidez.		
² uH é a unidade Hazen.		

O telhado verde pode ser conjugado a um sistema de aproveitamento de água de chuva, desde que haja análise do volume passível de ser captado, de acordo com a profundidade do substrato, capacidade de evapotranspiração da vegetação, intervalo e quantidade de chuvas, e área de captação. Além disso, deve-se analisar os aspectos qualitativos da água, de acordo com a composição e profundidade do substrato, a vazão do

escoamento, as características do meio ambiente onde está presente a cobertura, os tipos e a idade da cobertura vegetal. Outro fator que interfere na qualidade da água é a manutenção, ou seja, se o telhado verde recebe fertilizante ou não, além do tipo de área circunvizinha ao telhado.

Segundo Castro (2011), os telhados verdes deveriam agir como filtros adsorventes da poluição, no entanto, podem também contribuir com o carreamento de poluentes presentes no substrato, comprometendo a qualidade da água armazenada. Logo, a adoção do telhado verde como parte constituinte do sistema de aproveitamento de água de chuva demanda análise e cuidados diferenciados, podendo-se optar pelo auxílio de um dispositivo para retenção de partículas.

3.6.8 - Modelagem hidrológica

O modelo hidrológico é uma das ferramentas que a ciência desenvolveu, para melhor entender e representar o comportamento da bacia hidrográfica e prever condições diferentes das observadas. A simulação hidrológica é limitada pela heterogeneidade física da bacia e dos processos envolvidos, o que tem propiciado o desenvolvimento de um grande número de modelos que se diferenciam em função dos dados utilizados, da discretização, das prioridades da representação dos processos e dos objetivos a serem alcançados (TUCCI, 2005b).

Os modelos procuram representar determinado processo a partir de um conjunto de leis gerais ou princípios matemáticos e de um conjunto de circunstâncias empíricas e hipóteses de concepção. Os modelos hidrológicos apresentam algumas limitações básicas como a quantidade e a qualidade dos dados hidrológicos, além da dificuldade de formular matematicamente alguns processos e a simplificação do comportamento espacial de variáveis e fenômenos (TUCCI, 2005b).

A utilização de um modelo segue etapas definidas de uma metodologia como a definição de um problema ou situação que justifique o uso do modelo; a identificação dos dados disponíveis para o desenvolvimento do modelo; a identificação dos processos físicos e químicos relacionados ao modelo; a seleção de equações e cálculos que serão utilizados e que o modelo deve prever; a calibração que define os valores que serão adotados nos parâmetros do modelo; a verificação que assegura a correta implementação do modelo; e a validação que comprova que o modelo, no seu domínio de aplicação é consistente, acurado e está de acordo com suas aplicações (DYM, 1980).

Os modelos podem ser utilizados, por exemplo, para prever eventos de cheias, representar o impacto da urbanização na bacia hidrográfica e até comparar um cenário atual com a implantação de medidas que visam à redução do escoamento superficial, como o telhado verde.

Além disso, segundo Lorenzini Neto (2014), a modelagem hidrológica permite analisar o desempenho de telhados verdes em diferentes escalas espaciais, desde uma pequena edificação até um conjunto de telhados verdes distribuídos em uma grande bacia hidrográfica urbana.

Tipos de modelos de telhado verde

A literatura sugere que os métodos de modelagem de telhados verdes atuais se dividem em quatro tipos de abordagens:

- Métodos que utilizam o método da Curva – Número (CN) do SCS (*Soil Conservation Service*) e que dependem de análise estatística de escoamento coletadas em estações experimentais;
- Modelos físicos, desenvolvidos para aplicações de águas subterrâneas, que resolvem as equações de campo para escoamento em meio não saturado;
- Modelos analíticos, que tratam os telhados verdes como uma combinação de reservatórios de armazenamento lineares;
- Modelos de balanço hídrico, que tratam os telhados verdes como reservatórios simples com saídas restritas.

No estudo de Carter e Jackson (2007; *apud* Lorenzini Neto, 2014) foi utilizada a modelagem hidrológica para analisar o impacto da aplicação de telhados verdes em diversas escalas espaciais de uma bacia hidrográfica. A modelagem foi realizada com o uso do programa *StormNetBuilder* que utiliza o modelo *Storm Water Management Model* (SWMM) como mecanismo de análise. Neste, a infiltração e a propagação do escoamento são realizadas pelo método do CN-SCS e da onda cinemática, respectivamente. No estudo foi demonstrado que a ampla implementação de telhado verde na bacia hidrográfica pode reduzir as vazões de pico em até 26%, embora não altere o tempo de pico.

No estudo de Palla *et al.* (2008), para avaliar a retenção de telhado verde em escala de bacia, foi utilizado o modelo hidrológico SWMM. Foram realizadas simulações com três diferentes cenários de implementação de telhados verdes em escala de bacia (10%, 20% e

100% de substituição de telhados convencionais por telhados verdes) e com uma série temporal de chuva de 18 anos, cuja discretização temporal era de 1 minuto. Foi demonstrado que com apenas 10% de incorporação de telhados verdes, já há redução da taxa de escoamento superficial; e com a incorporação de 100% de telhados verdes, a redução é mais significativa; dependendo fortemente do volume de chuva e da profundidade da camada de substrato do telhado verde.

O estudo de Sherrard e Jacobs (2012; *apud* Lorenzini Neto, 2014), envolvendo simulação hidrológica, retrata o desenvolvimento, a calibração e a validação de um modelo de balanço hídrico de telhado verde, chamado de VR-WRM (*Vegetated Roof Water Balance Model*), que utilizou dados de um telhado verde modular experimental. O VR-WRM é um modelo de balanço hídrico diário unidimensional com um único e uniforme compartimento de armazenamento de solo. As entradas do modelo são a precipitação e o orvalho, e as saídas são o armazenamento, escoamento e evapotranspiração. A partir de simulações com dados observados de chuva, os resultados mostraram que, em média, a redução do escoamento das águas pluviais foi de 32% para o período de estudo.

Nos estudos citados, foi possível concluir que os telhados verdes são efetivos em reduzir o escoamento pluvial e que a modelagem hidrológica pode ser um instrumento importante nessa análise. Palla *et al.*, (2008) cita que para prover o completo controle das águas pluviais em escala de bacia, é indicado complementar o emprego de telhados verdes com outros dispositivos como pavimentos impermeáveis e trincheiras de infiltração.

Além disso, a redução significativa das vazões de pico pode resultar em benefícios econômicos, como mudanças nos diâmetros das tubulações de drenagem pluvial (PALLA *et al.*, 2008).

Modelo Hidrológico SWMM

O *Storm Water Management Model* – SWMM foi desenvolvido pela EPA (*United States Environmental Protection Agency*/ Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos). É um modelo dinâmico chuva-vazão que simula a quantidade e a qualidade do escoamento superficial, especialmente em áreas urbanas (GOMES, 2012).

Pode ser utilizado para a simulação de um único evento chuvoso, bem como para a simulação contínua de longo prazo. Ele acompanha a evolução da quantidade e qualidade do escoamento dentro de cada sub-bacia, assim como a vazão, a altura de escoamento e a

qualidade da água em cada tubulação e canal, durante um período de simulação composto por múltiplos intervalos de tempo.

O SWMM representa o comportamento de um sistema de drenagem através de uma série de fluxos de água e matéria entre os principais módulos descritores do ambiente. O módulo atmosférico é constituído pela precipitação e depósito de poluentes sobre a superfície do solo, cujo objeto representativo das entradas de chuva no sistema é o pluviômetro. O módulo de superfície do solo, por sua vez, é representado por meio de objetos da sub-bacia, sendo responsável por receber a precipitação do módulo atmosférico sob forma de chuva, exportar o fluxo de água por meio da infiltração para o módulo de águas subterrâneas e, também, por meio de escoamento superficial e carreamento de poluentes para o módulo de transporte. O módulo de transporte contém uma rede com elementos de transporte e unidades de armazenamento e tratamento, que transportam a água para os nós exutórios ou para as estações de tratamento (GOMES, 2012).

O SWMM opera utilizando diversos objetos físicos e virtuais interligados uns aos outros, como os pluviômetros, sub-bacias, nós de conexão, condutos, parâmetros climatológicos, hidrogramas unitários, dentre outros. Incluem-se dentro do processo hidrológico: a precipitação variando de acordo com o tempo; acumulação e derretimento de neve; interceptação de precipitações por armazenamento em depressões; evaporação superficial; infiltração nas camadas não saturadas; percolação de água infiltrada nas camadas subterrâneas; interfluxo entre as camadas subterrâneas e o sistema de drenagem; modelagem do fluxo superficial em reservatórios não lineares; e impacto de estruturas de drenagem sustentável na rede (ROSSMAN, 2010a).

A variabilidade espacial em todos os processos hidrológicos é obtida pela divisão de uma determinada área de estudo em áreas de captação de água, menores e homogêneas, chamadas de sub-bacias, cada uma com sua fração de parcelas permeáveis e impermeáveis. Além disso, o programa possui ferramentas de modelagem hidráulica, utilizadas para conduzir o fluxo decorrente do escoamento superficial e das contribuições externas de vazão.

Além de modelar a geração e transporte do escoamento superficial, o SWMM também estima a produção e a evolução de cargas de agentes poluentes associadas a este tipo de escoamento.

Esse modelo emprega os princípios de conservação de massa, de energia e da quantidade de movimento. A seguir serão descritos, brevemente, os métodos empregados pelo SWMM para modelar a quantidade e a qualidade do escoamento derivado da chuva.

Na visão conceitual do fenômeno do escoamento superficial utilizado pelo SWMM, cada bacia é tratada como um reservatório não linear, cujas contribuições são provenientes da precipitação e de qualquer outra sub-bacia situada a montante; e cujos fluxos de saída são a infiltração, a evaporação e o escoamento superficial, conforme representado na figura 3.13.

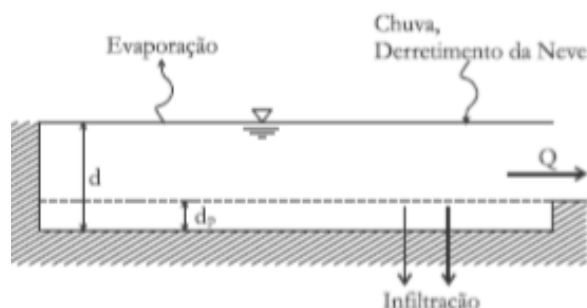


Figura 3.13: Visão Conceitual do Fenômeno do escoamento em SWMM (GOMES, 2012).

De acordo com a representação do escoamento no modelo SWMM (figura 3.13), o escoamento superficial por unidade de área (Q) ocorre somente quando a profundidade da água neste reservatório excede o valor máximo do armazenamento em depressões (d_p). Neste caso, Q é calculado pela equação de Manning; e a lâmina de água no reservatório (d) na sub-bacia é recalculada de forma contínua, no tempo (t) mediante a resolução numérica do balanço hídrico na sub-bacia (GOMES, 2012).

O fenômeno da infiltração se dá através da passagem de água da superfície para o interior do solo. Depende fundamentalmente da água disponível para infiltrar, da natureza do solo, do estado da sua superfície e das quantidades de água e ar, inicialmente presentes no seu interior. O SWMM permite selecionar três modelos de infiltração, representados através da equação de Horton, método de Green-Ampt e método do SCS.

O método SCS – Soil Conservation Service é uma aproximação adotada a partir da Curva-Número (CN) para estimar o escoamento superficial. Durante um evento de chuva, a capacidade total de infiltração do solo, obtida pela tabela do CN, é deplecionada em função da chuva acumulada e da capacidade de infiltração remanescente. Os parâmetros de entrada para esse método são o número CN e o tempo que leva um saturado para secar completamente.

Dentro do método, há uma divisão quanto ao tipo de solo em estudo e sua condição de umidade. Os tipos de solo identificados são (GOMES, 2012):

- **Solo A:** Solos que produzem baixo escoamento superficial e alta infiltração (solos arenosos com baixo teor de argila total, inferior a 8%);

- **Solo B:** Solo menos permeáveis do que o anterior, solos arenosos menos profundos e com permeabilidade superior à média (teor de argila total inferior a 15%);
- **Solo C:** Solos que geram escoamento superficial acima da média e com capacidade de infiltração abaixo da média, contendo percentagem considerável de argila e pouco profundo (teor total de argila entre 20 e 30 %);
- **Solo D:** Solos contendo argilas expansivas e pouco profundas com baixa capacidade de infiltração, gerando a maior proporção de escoamento superficial.

Já as condições de umidade são divididas em;

- **Condição I:** Solos secos (chuvas nos últimos 5 dias não ultrapassaram 15 mm);
- **Condição II:** Situação média na época de cheias (chuvas nos últimos 5 dias totalizaram entre 15 e 40 mm);
- **Condição III:** Solo úmido, próximo da saturação (chuvas nos últimos 5 dias foram superiores a 40 mm e as condições meteorológicas foram desfavoráveis a altas taxas de evaporação).

A estrutura desse método de infiltração é constituída pelo algoritmo de precipitação de projeto, determinação do volume superficial e propagação do escoamento na bacia. A determinação do volume superficial é realizada por meio da equação 3.1, que relaciona a razão entre a precipitação total acumulada (P) em mm, com o volume superficial acumulado (Q) em mm, e a razão entre a infiltração e o escoamento da bacia.

$$Q = \frac{(P-Ia)^2}{(P-Ia)+S} \quad (\text{Equação 3.1})$$

Sendo que;

P = Precipitação (mm);

Ia = Perdas iniciais;

S = Armazenamento do solo, sendo que para condições médias, $Ia = 0,2*S$.

Para determinar a capacidade máxima da camada superior do solo S, foi estabelecida uma escala onde a variável é o parâmetro CN. Este parâmetro foi classificado de acordo com o tipo e uso do solo. A equação 3.2 relaciona S e CN.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (\text{Equação 3.2})$$

O método do SCS requer menor número de dados de entrada para o cálculo da vazão gerada, comparado aos outros métodos. É necessário conhecer a precipitação e dados de uso e ocupação do solo, representados pelo CN (COSTA, 2013).

Em relação ao modelo de transporte hidráulico que é regido pelas equações de conservação de massa e da quantidade de movimento, para fluxo gradualmente variado não

permanente; o SWMM possibilita ao usuário selecionar o grau de sofisticação para resolução das equações.

Um dos modelos hidráulicos de transporte é o fluxo em regime uniforme, que representa a forma mais simples de transporte da água, no qual considera-se que para cada intervalo de tempo o escoamento é uniforme e permanente. Neste modelo, há simples transferência do hidrograma de entrada no nó de montante do conduto para o nó de jusante, sem atraso ou mudança na sua forma (GOMES, 2012).

O modelo de onda cinemática, por sua vez, resolve a equação da continuidade junto com uma forma simplificada da equação da quantidade de movimento em cada um dos condutos (ROSSMAN, 2010a). Neste modelo, a declividade da superfície livre da água deve ser igual à declividade do fundo do conduto; e pode haver defasagem nos hidrogramas de saída em relação aos hidrogramas de entradas, visto que para esse modelo são permitidas variações da vazão e da área no espaço e no tempo no interior do conduto.

Já o modelo de onda dinâmica, resolve as equações completas unidimensionais de Saint Venant, acarretando resultados mais precisos. Com este modelo de transporte, é possível representar o fluxo pressurizado quando um conduto fechado se encontra completamente cheio, e pode ser considerado o armazenamento nos condutos, assim como o ressalto hidráulico, as perdas nas entradas e saídas dos condutos, o remanso e o fluxo pressurizado. Além disso, o modelo da onda dinâmica pode ser aplicado em qualquer tipo de traçado da rede de drenagem, visto que há o cálculo simultâneo dos valores dos níveis de água nos nós e das vazões nos condutos.

Modelagem de telhados verdes no SWMM

No SWMM, a representação dos controles LID é feita pela combinação de camadas verticais, cujas propriedades são definidas por unidade de área. Desta forma, é possível que LIDs com mesmo projeto, mas com área de cobertura diferente, sejam facilmente colocados em diferentes sub-bacias da área de estudo (GOMES, 2012).

A camada superficial, recebe diretamente a precipitação; a camada de solo, é responsável por manter o crescimento vegetal; e a camada de armazenamento, pode conter o dreno profundo responsável pelo transporte da água desta camada para um conduto ou caixa de contenção. Durante a simulação, o SWMM realiza o balanço hídrico, determinando o que escoar de uma camada para a outra e o que é armazenado.

O conjunto apropriado de equações do balanço hídrico para a unidade LID é resolvido ao longo de intervalos de tempo para determinar os volumes de água que se transformam em escoamento superficial, infiltração, evaporação, ou que permanecem armazenados dentro da unidade. As equações 3.3, 3.4 e 3.5 representam, respectivamente, a diferença entre a taxa de fluxo de água de entrada e a taxa de fluxo de saída para a camada superficial ($d1$), camada de solo (θ) e camada de armazenamento ($d3$) (ROSSMAN, 2010b).

$$\frac{\partial d1}{dt} = i + q0 - e1 - f1 - q1 \quad (\text{Equação 3.3})$$

$$L2 \frac{\partial \theta}{dt} = f1 - e2 - f2 \quad (\text{Equação 3.4})$$

$$\Phi \frac{\partial d3}{dt} = f2 - f3 - q1 \quad (\text{Equação 3.5})$$

Onde;

$d1$, $d3$ = profundidade da água superficial inundada e da água na camada de armazenamento (m);

θ = umidade da camada do solo (m^3/m^3);

i = taxa de precipitação fornecida externamente (m/s);

$q0$ = taxa de fluxo superficial externa (m/s);

$q1$ = vazão de escoamento superficial (m/s);

$e1$, $e2$ = taxa de evapotranspiração da superfície e da camada de solo (m/s);

$f1$, $f2$ e $f3$ = taxa de infiltração superficial, de percolação no solo e de infiltração do solo natural (m/s);

$L2$ = profundidade da camada de solo (m)

Φ = taxa de vazios da camada de armazenamento (m^3/m^3).

Para o telhado verde, o caminho percorrido pela água entre as camadas é representado na figura 3.14. Para os controles LIDs, a infiltração é modelada, pelo programa, através da equação de Green-Ampt, que assume a existência de uma frente de umedecimento na coluna de solo, separando uma camada do solo com a umidade inicial de outra camada situada na parte superior onde o solo é saturado.

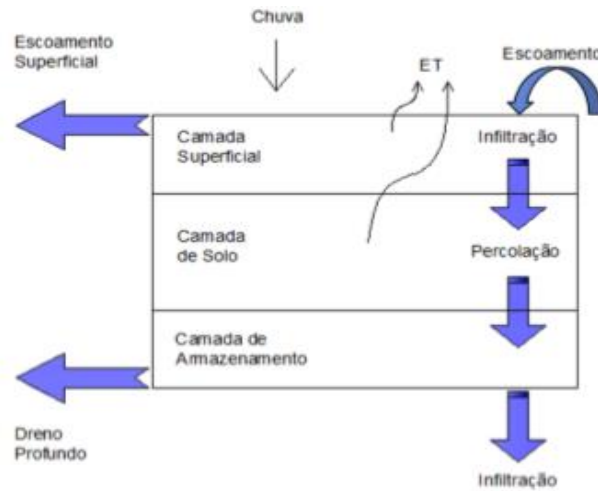


Figura 3.14: Representação de um controle LID – Bacia de Filtração (GOMES, 2012).

Vale ressaltar que este modelo pode ser usado para avaliar o desempenho dos sistemas de Desenvolvimento de Baixo Impacto – LID e, conseqüentemente, apoiar autoridades locais na avaliação da eficiência hidrológica dos telhados verdes. Essa técnica é uma ferramenta válida em se tratando da redução do escoamento superficial, sendo assim, é importante modelar processos hidrológicos para auxiliar engenheiros e municípios no projeto e verificação do sistema de drenagem urbano (CIPOLLA *et al.*, 2016).

O SWMM simplifica a modelagem das técnicas de Desenvolvimento de Baixo Impacto – LID, seja em uma escala detalhada a nível de lote; como pode ser visto no estudo de Saddi e Moura (2010), no qual o modelo foi aplicado para apenas um lote e para todo o condomínio, localizado em Goiânia-GO. Ou também, em uma escala de sub-bacias ou bacias hidrográficas, como feito no estudo de Nunes *et al.*, (2017), no qual o modelo foi aplicado em três sub-bacias da bacia do rio Morto, localizada no Rio de Janeiro.

4. METODOLOGIA

Para obter informações a respeito da eficiência de telhados verdes no Distrito Federal, foram utilizadas duas etapas metodológicas: construção e monitoramento das unidades piloto de telhado verde na Estação Experimental da Biologia – UnB, e modelagem matemática com o auxílio de programa computacional, o PCSWMM.

A construção das unidades piloto de telhado verde se refere à composição de suas camadas, principalmente em relação à escolha da vegetação e profundidade de substrato.

A concepção do monitoramento corresponde à aquisição de dados de precipitação e volume drenado por cada unidade piloto, tanto do telhado convencional como dos telhados verdes. Nesta etapa, avaliou-se também a unidade do solo dos telhados verdes para manutenção da vegetação.

Para a etapa da modelagem matemática utilizou-se o programa PCSWMM com implementação de unidades de desenvolvimento de baixo impacto - LIDs, como o telhado verde, a fim de avaliar os parâmetros que caracterizam o comportamento da bacia em estudo, durante diferentes eventos de chuva.

As etapas metodológicas são apresentadas no fluxograma da figura 4.1.

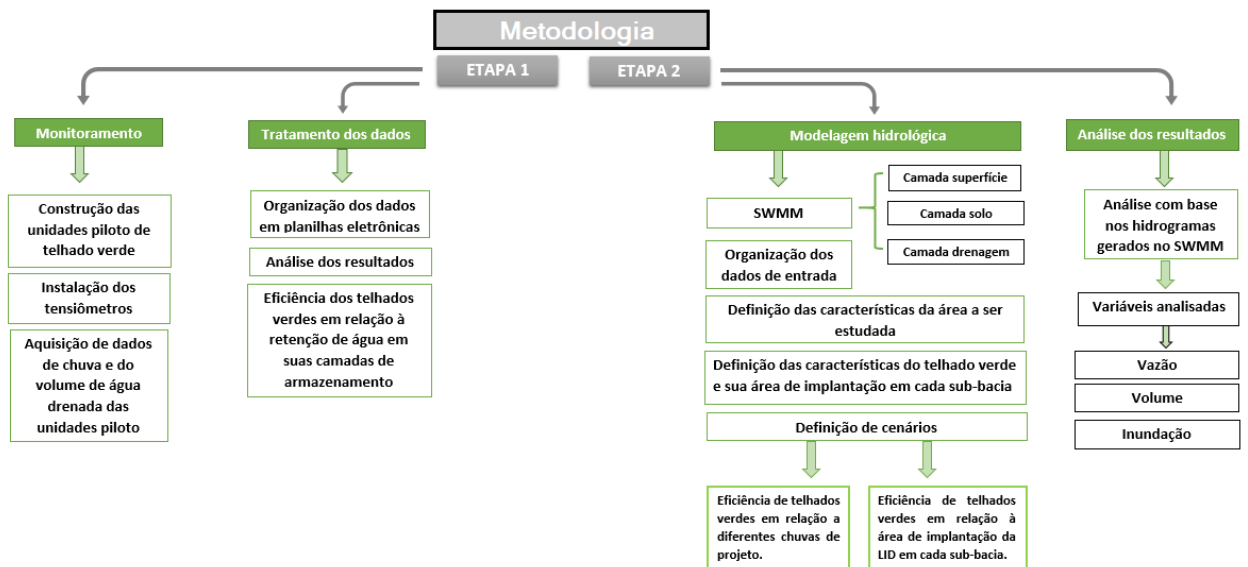


Figura 4.1: Fluxograma das etapas que constituem a metodologia deste projeto.

4.1 – MONITORAMENTO DO TELHADO VERDE

4.1.1 – Caracterização da área de instalação das unidades piloto

As estruturas piloto de telhado verde foram instaladas na Estação Experimental de Biologia do campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília – DF. Foram monitoradas quatro estruturas piloto, sendo uma de telhado convencional, e as outras de telhado verde com 10 cm, 15 cm e 20 cm de substrato, respectivamente.

Próximo à área de instalação das estruturas dos telhados, encontra-se a Estação de Tratamento de Esgoto – ETE Norte, e também a bacia do Centro Olímpico da UnB – C.O como é apresentado na figura 4.2.

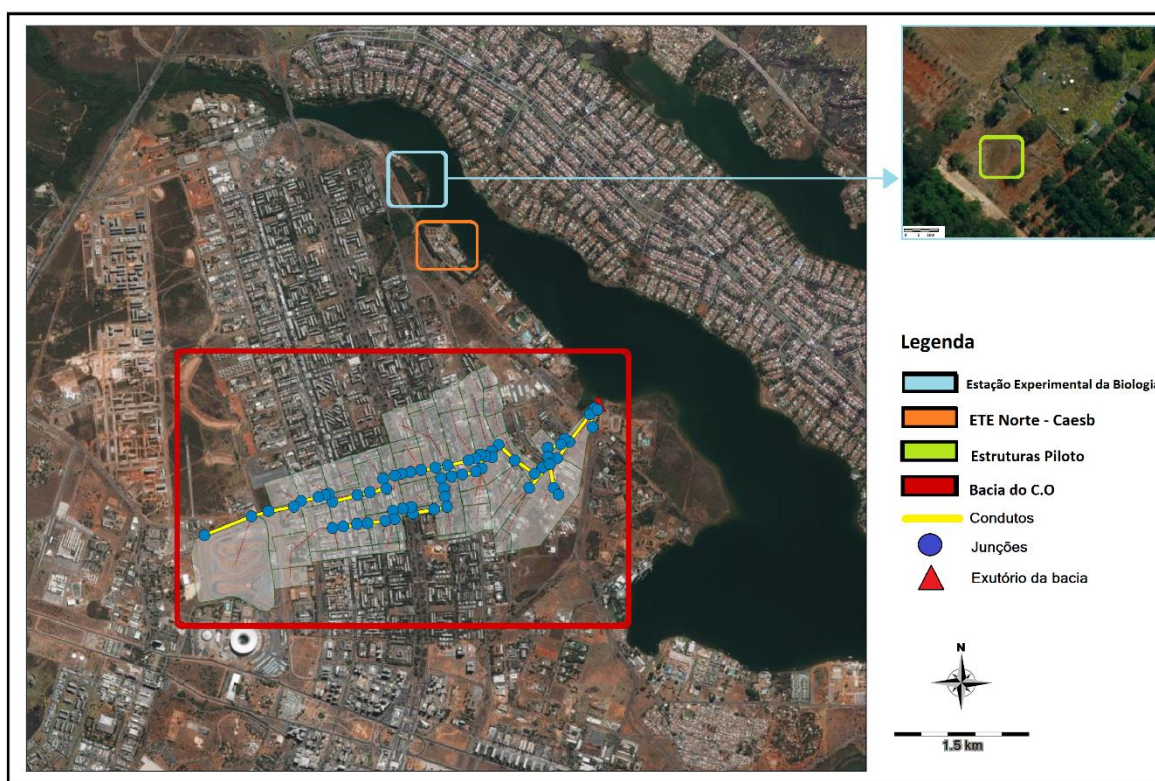


Figura 4.2: Localização da Estação Experimental da Biologia e detalhamento da área de instalação das unidades piloto e da área de estudo no PCSWMM (Dados do geoportal, 2018).

A precipitação pluviométrica na região é predominante de setembro a maio, não sendo muito presente em junho, julho e agosto, como pode ser observado na figura 4.3. Segundo Coutinho (2017), o clima predominante no domínio do cerrado é o tropical sazonal, de inverno seco, cuja temperatura média anual fica em torno de 22 a 23°C, com radiação solar bastante intensa.

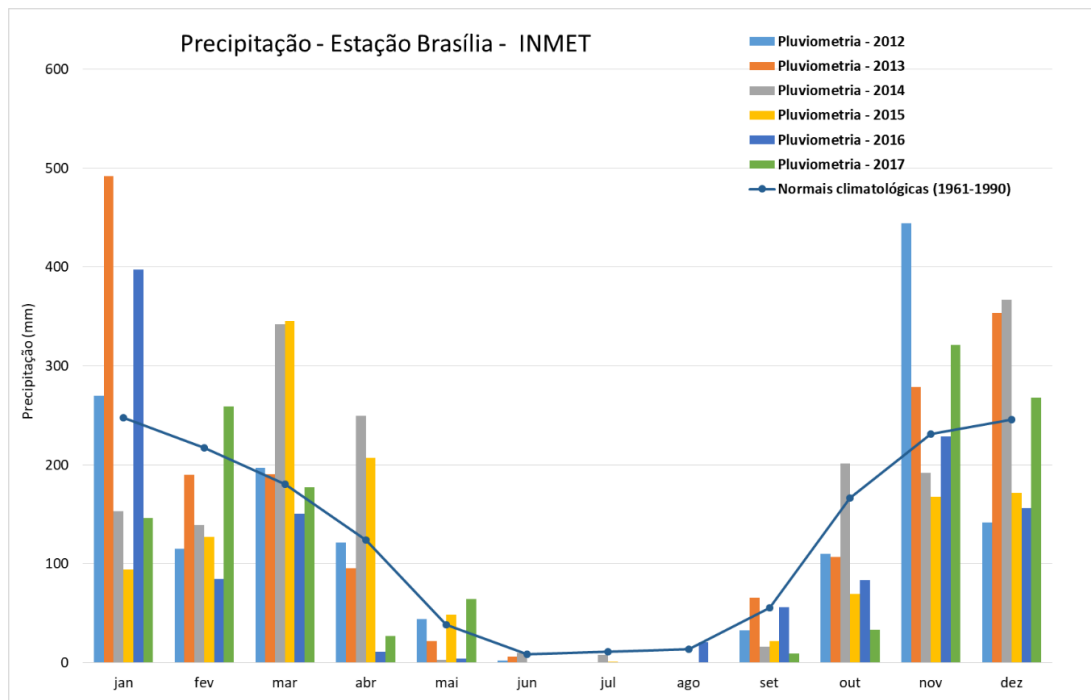


Figura 4.3: Representação da precipitação total mensal para os anos de 2012 a 2017 (Dados da rede do INMET, 2017).

O local de instalação das unidades piloto apresenta baixo potencial de poluição do ar, pois é rodeado por diversas espécies de árvores; além disso, o fluxo de veículos é relativamente baixo na área experimental dos telhados verdes. Outras potenciais fontes diretas de poluição atmosféricas, capazes de contribuir para a alteração da qualidade da água de chuva não são verificadas na área de estudo nem em suas imediações.

4.1.2 – Construção das unidades piloto

Desde 2015 os telhados verdes são objetos de estudos no campo da Engenharia Ambiental da Universidade de Brasília. Com Fujiwara e Santos (2016) e Salerno (2017), o estudo da viabilidade de aplicação dos telhados se iniciou, principalmente avaliando a incorporação desta tecnologia no Distrito Federal.

Neste trabalho, o objetivo foi estudar o comportamento do telhado verde com três profundidades diferentes de substrato (10 cm, 15 cm e 20 cm), avaliando a quantidade da água drenada por eles, comparando-o ao telhado convencional.

Duas estruturas piloto de telhado verde já existentes na Estação Experimental de Biologia, foram reutilizadas; já a terceira unidade foi construída, e a piloto do telhado convencional não sofreu modificações. As unidades piloto de telhado verde são compostas por dois cavaletes de metal, um com 1,35 m e o outro com 1,40 m de altura; já a unidade piloto de telhado convencional é composta por um cavalete de 1,70 m e outro com 1,75 m

de altura. Todas as unidades foram alocadas de forma a obter uma inclinação de 7,5%, como mostra a figura 4.4.



Figura 4.4: Etapa de instalação das unidades piloto, inclinação dos cavaletes (2018).

A unidade piloto do telhado convencional é constituída por uma telha de fibrocimento de 1,5 m x 1 m parafusada sobre o cavalete de metal (FUJIWARA e SANTOS, 2016). Para a coleta da água da chuva é utilizada uma calha de policloreto de vinila (PVC), e uma mangueira conectada à bombona de 100 L.

As camadas do telhado verde foram montadas em caixas de madeira de 1,5 m x 1 m, com 0,3 m de altura. Para o escoamento da drenagem foi utilizada uma calha inox, para cada unidade de telhado verde, responsável por receber a água da chuva drenada pelo substrato e direcioná-la a bombonas de 100L.

Cada estrutura de telhado verde é constituída de uma camada impermeabilizante (lona), drenante (argila expandida comercial) e filtrante (manta geotêxtil). Em seguida, tem-se o substrato e a vegetação escolhida, grama Esmeralda.

Para se iniciar a montagem da camada de substrato dos telhados verdes, foi utilizado o solo da própria Estação Experimental da Biologia. Por isso, considerou-se que suas propriedades são semelhantes àsquelas do solo utilizado no estudo de Fujiwara e Santos (2016), visto que as áreas de escavação são próximas.

O substrato foi preparado a fim de se obter a nutrição necessária para a manutenção da vegetação. Sendo assim, adicionou-se em cada estrutura piloto de telhado verde, 133,3 g/m² (total de 200 g) de calcário dolomítico com PRNT de 90%, para a correção do pH e das concentrações de cálcio e magnésio; e 90 g/m² (total de 135 g) de adubo químico NPK com fórmula 10-10-10. Após a adição dos compostos, houve a mistura do substrato de forma a obter sua homogeneidade.

Nas três estruturas piloto, o substrato foi adicionado até atingir a altura de 10 cm, 15 cm e 20 cm, respectivamente (figura 4.5-a). Esse procedimento foi realizado no dia 21 de

dezembro de 2017. Em seguida, houve a plantação da gramínea “brinco de princesa” (*Loudetiopsis Conert*); no entanto, essa vegetação não se desenvolveu no período de 47 dias, talvez pela pouca quantidade de mudas existentes; tendo sido substituída pela grama Esmeralda (*Zoysia japônica*), como mostra a figura 4.5-b.

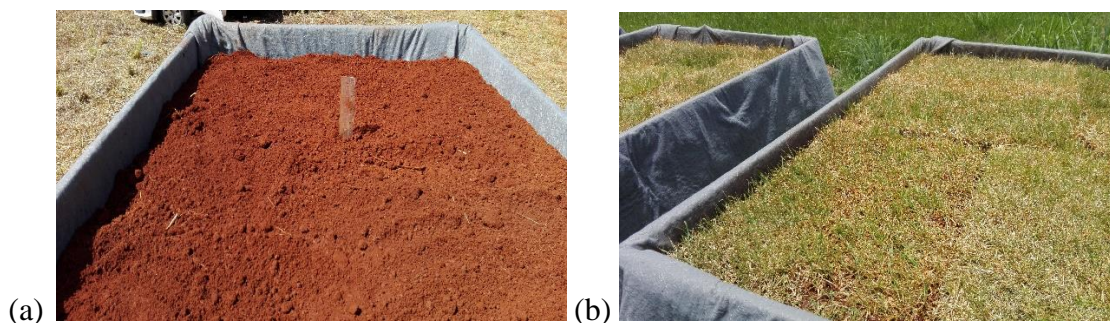


Figura 4.5: Adição de substrato com a respectiva profundidade de cada unidade (a) e plantação das placas de grama Esmeralda (b) (2018).

As placas de grama foram posicionadas de forma que toda a superfície do substrato ficasse devidamente preenchida. A plantação ocorreu em período de chuva (7 de fevereiro de 2018), então não foi preciso irrigá-la; caso contrário, a irrigação deve ser feita com 10 L de água em cada unidade piloto, por cada dia em que não houver chuva.

O monitoramento das unidades piloto se deu no período do dia 23 de dezembro de 2017, até o dia 11 de junho de 2018; consistindo na observação da necessidade ou não de irrigação no período de seca; assim como na verificação do volume de água drenada pelos telhados, no período de chuva.

Vale ressaltar que os dados obtidos do início do monitoramento até o dia 07 de fevereiro de 2018, foram desconsiderados, por haver pouca quantidade de mudas, sendo as unidades piloto de telhado verde constituídas majoritariamente por substrato. Na figura 4.6 pode-se observar a conclusão da instalação das unidades piloto.



Figura 4.6: Instalação das estruturas piloto concluída para início do monitoramento (2018).

4.1.3 – Monitoramento da umidade do solo dos telhados verdes

Para a manutenção da vegetação dos telhados verdes, é imprescindível que se faça o monitoramento da umidade do solo, a fim de se obter informações sobre a lâmina de água a ser aplicada a cada irrigação e o momento apropriado para tal.

O monitoramento baseado na curva de retenção de água no solo, foi realizado com base nos resultados fornecidos pela empresa de análises químicas Solo Química, a qual analisou as amostras indeformadas do solo, pelo método da câmara de pressão de Richards.

Para o acompanhamento do nível de umidade do solo, foram instalados dois tensiômetros em cada telhado verde (figura 4.7); sendo constituídos por um tubo feito de acrílico, que permite a visualização do nível de água em seu interior; uma tampa na extremidade, que garante a vedação e impede a entrada e saída de ar; uma cápsula de cerâmica, que deve estar em contato com o solo; e um manômetro, que permite a leitura da pressão.



Figura 4.7: Instalação dos tensiômetros para monitoramento da umidade do solo (2018).

Antes de serem instalados, os tensiômetros foram testados com a bomba de vácuo. O procedimento, realizado no Laboratório de Hidráulica – UnB, consiste em colocar o instrumento dentro de um recipiente com água, garantindo que a cápsula de cerâmica fique submersa. Em seguida, a bomba de vácuo é ligada, verificando se há ou não formação de bolhas de ar no recipiente. O ideal é utilizar um recipiente transparente, sendo que a ausência de bolhas representa a situação mais favorável, significando que o tensiômetro não tem fissuras e que está apto para ser instalado.

Para o bom funcionamento do instrumento, saturou-se a cápsula porosa por pelo menos 24 horas antes da instalação, para expulsar o ar que pode estar preso nos poros das cápsulas de cerâmica. É importante que o solo esteja o mais úmido possível quando da sua

instalação, para que haja bom contato entre o mesmo e a cápsula porosa. Após instalação, preencheu-se todo o tubo de acrílico com água para retirar todo o ar do sistema.

O acompanhamento da umidade no solo iniciou-se no dia 14 de abril de 2018, com a instalação dos tensiômetros. A profundidade de instalação foi correspondente à região onde se concentravam 80% das raízes da cultura. Cada estrutura piloto contou com um tensiômetro na área de maior inclinação do telhado e outro na extremidade oposta (menor inclinação).

Com o monitoramento da umidade do solo, por meio da curva de retenção de água no solo e das leituras dos tensiômetros, foi possível estabelecer o volume de água necessário para a irrigação de cada unidade piloto de telhado verde. Sendo que o intervalo de tempo entre as irrigações foi arbitrado com base na necessidade hídrica e no aspecto visual da vegetação.

4.1.4 – Dados quantitativos da água drenada das unidades piloto

Um dos objetivos do monitoramento dos telhados verdes é a obtenção de dados para avaliação e comparação da quantidade de água que precipitou e a quantidade que drenou; pois isso indicará sua eficiência como um sistema de técnica compensatória para problemas de drenagem em ambientes urbanos.

As grandezas que caracterizam uma chuva são a altura pluviométrica (P), duração (t) e intensidade (i). A altura pluviométrica é a espessura média da lâmina de água precipitada que recobriria a região atingida pela precipitação admitindo-se que essa água não infiltrasse, não evaporasse, nem escoasse para fora dos limites da região; geralmente expressa em milímetros. A duração é o período de tempo durante o qual a chuva cai, geralmente expressa em horas; e a intensidade corresponde a altura precipitada dividida pelo tempo decorrido (equação 4.1). A intensidade de uma precipitação apresenta variabilidade temporal, mas, para análise dos processos hidrológicos, geralmente são definidos intervalos de tempo nos quais é considerada constante.

$$i = \frac{P}{t} \quad \text{(Equação 4.1)}$$

Em relação à precipitação, para este projeto, houve análise dos dados adquiridos pela estrutura piloto de telhado convencional. O armazenamento do volume de água que atinge a área de 1,5 m² da estrutura, e a graduação da mangueira que marca o nível da água armazenada na bombona, permitiram calcular a altura da lâmina de água através da equação 4.2.

$$H = \left(\frac{V}{\frac{1000}{1,5}} \right) * 1000 \quad (\text{Equação 4.2})$$

Sendo que;

H = altura da lâmina de água (mm);

V = Volume armazenado na bombona do telhado convencional (L).

Para aquisição dos dados quantitativos, foram observados os volumes armazenados nas bombonas de água drenada das unidades piloto sempre após um evento de chuva. As bombonas foram graduadas a cada 1 L para maior precisão dos dados (figura 4.8-a); e os cálculos para a avaliação da relação do volume de chuva com o volume retido pelas unidades piloto no período de chuva, foram realizados por meio de uma comparação entre os dados obtidos na bombona do telhado convencional e o volume drenado e armazenado nas bombonas dos telhados verdes (figura 4.8-b).



Figura 4.8: Graduação das bombonas (a) e sua ligação com as unidades piloto (b) para verificação do volume armazenado (2018).

Vale ressaltar, a importância de considerar o erro na graduação na mangueira das bombonas, e comparar a altura da lâmina de água de cada evento de chuva obtida na estrutura piloto de telhado convencional com a pluviometria obtida na estação ETE Norte, mais próxima da localização das unidades piloto. Os dados da estação ETE Norte são obtidos através de um pluviômetro, aparelho totalizador que marca a altura de chuva total acumulada num dado período de tempo, geralmente um dia.

A avaliação do volume do escoamento pluvial nos telhados verdes e no telhado convencional se dá a partir da determinação do coeficiente de escoamento (C) e da parcela de água armazenada em ambos os tipos de coberturas. O coeficiente C foi calculado por

meio da relação entre o volume de chuva escoado superficialmente (V_{esc}) e o volume total precipitado na área de captação do telhado (V_{chuva}), conforme indicado na equação 4.3.

$$C = \frac{V_{esc}}{V_{chuva}} \quad (\text{Equação 4.3})$$

Os valores do coeficiente de escoamento variam de 0 a 1, sendo que baixos valores de C indicam maior capacidade de retenção de água no telhado, tornando-se mais eficiente; e valores de C maiores apontam maior escoamento de água no telhado, tornando-se menos eficiente. Vale ressaltar que as condições de umidade do solo que antecedem o evento chuvoso monitorado podem influenciar a capacidade de retenção de água nos telhados verdes.

Além disso, avaliou-se a possibilidade de as unidades piloto de telhado verde serem autossustentáveis, com base nos volumes coletados após os eventos de chuva, e a quantidade de água necessária para sua irrigação no período de seca. O aproveitamento da água neste sentido é viável se observada a boa qualidade da água, como odor, aspectos físico-químicos e biológicos. Caso contrário, uma alternativa a tornar a água drenada apta para irrigação é o uso de filtros simples, que ajudam a reter as impurezas do efluente.

4.1.5 – Análise do balanço hídrico da cobertura verde

Foram monitoradas quatro estruturas piloto, sendo uma que simula o telhado convencional, e as outras três que simulam o telhado verde com diferentes profundidades de substrato. Dessa forma, foi possível monitorar o excesso de água que não será retido pelas plantas do telhado verde, e também a água que escorre pelo telhado convencional.

A equação do balanço obedece ao princípio da conservação da massa segundo o qual, em um sistema qualquer, a diferença entre as entradas e as saídas é igual à variação do armazenamento dentro do sistema (FEITOSA e MANOEL FILHO, 2000). As variáveis envolvidas no balanço hídrico são o volume de entrada composto pela precipitação; o armazenamento, que é a quantidade de água retida no telhado verde; e as variáveis de saída, constituídas pela evapotranspiração e pelo escoamento superficial, que é o excesso de escoamento que não ficou retido no telhado verde. As equações 4.4 e 4.5 explicitam tais variáveis do balanço hídrico.

$$Q_e(t) = Q_s(t) + S(t) - S(t - 1) \quad (\text{Equação 4.4})$$

$$S(t) - S(t - 1) = P_t - (E T t + E_{sup} \cdot t) \quad (\text{Equação 4.5})$$

Onde,

$Q_e(t)$ = Vazão de entrada $\rightarrow P_t$ = Precipitação total;

$Q_s(t)$ = Vazão de saída → ET_t = Evapotranspiração total e $E_{sup.t}$ = Escoamento superficial total;

$S(t) - S(t - 1)$ = Armazenamento de água no telhado verde, em um intervalo de tempo.

4.2 – MODELAGEM DOS TELHADOS VERDES NOS SISTEMAS DE DRENAGEM URBANA

4.2.1 – Impactos do telhado verde na drenagem urbana

Com auxílio do modelo hidrológico SWMM, foram elaboradas simulações computacionais de cenários com inserção de telhados verdes nas edificações pré-existentes, de forma ampla na sub-bacia hidrográfica; avaliando assim o potencial da adoção dessa técnica na redução das velocidades de escoamento, das vazões máximas e dos volumes escoados, indicadores essenciais nas questões associadas à ocorrência de enchentes urbanas.

O PCSWMM é um programa computacional disponibilizado pela ChiWater em uma versão universitária gratuita, com o modelo SWMM integrado a ferramentas SIG (Sistema de Informações Geográficas).

A versão 5.1.010 do SWMM, acoplada ao PCSWMM, possibilita representar o desempenho hidrológico dos dispositivos de desenvolvimento de baixo impacto como, por exemplo, o telhado verde. Esses objetos são projetados para subtrair parte do escoamento superficial por meio de processos artificiais combinados de retenção, infiltração e evapotranspiração.

A representação dessa estrutura, no programa, é composta por três camadas: superfície, solo e drenagem; cuja representação se encontra na figura 4.9.

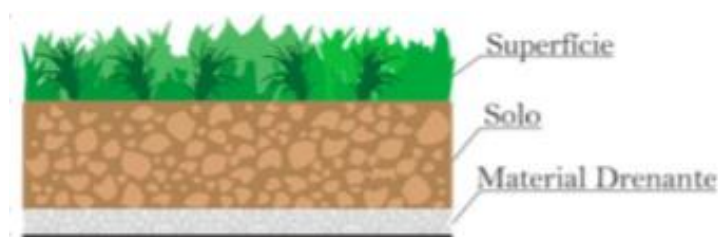


Figura 4.9: Esquema representativo do telhado verde considerado nas simulações do modelo SWMM (adaptado, NUNES et al., 2017).

Para cada camada torna-se necessário definir alguns parâmetros específicos. A camada superficial recebe diretamente a precipitação e gera escoamentos que afluem para o sistema de drenagem, os parâmetros exigidos são os seguintes:

- **Profundidade de armazenamento:** profundidade máxima que a água pode acumular acima da superfície, antes da ocorrência do transbordamento.
- **Fração do volume de vegetação (cobertura vegetal):** fração da área de armazenamento acima da superfície que está coberta de vegetação.
- **Rugosidade Superficial (coeficiente de rugosidade de Manning):** coeficiente de rugosidade de Manning para o escoamento superficial sobre a superfície estudada.
- **Declividade da superfície:** declividade da superfície do telhado verde.

A camada de solo é constituída pelo solo especificamente preparado para manter o crescimento vegetal em bacias de filtração. Os parâmetros exigidos pelo programa para esta camada são os seguintes:

- **Espessura:** espessura da camada do solo.
- **Porosidade:** volume dos poros em relação ao volume total de solo.
- **Capacidade de campo:** razão do volume de água nos poros, pelo volume total do solo, após este ter sido totalmente drenado naturalmente. Abaixo do teor de umidade correspondendo à capacidade de campo, não ocorre drenagem vertical de água através da camada de solo.
- **Ponto de murcha:** Razão do volume de água nos poros de um solo relativamente seco, isto é, quando a água residual da matriz porosa não pode ser extraída pelas raízes das plantas, pelo volume total do solo. O teor de umidade do solo não pode cair abaixo desse limite.
- **Condutividade hidráulica:** condutividade hidráulica do solo completamente saturado.
- **Gradiente da curva de condutividade hidráulica:** inclinação média da curva do log da condutividade versus o teor de umidade do solo, pode ser calculada através da recomendação do manual segundo a equação 4.6;
$$\text{Declividade} = 0,48(\% \text{ areia do solo}) + 0,85(\% \text{ argila do solo}) \quad (\text{Equação 4.6})$$
- **Sucção Capilar (potencial matricial):** valor médio do potencial matricial do solo na frente de umedecimento.

A camada de armazenamento é o leito constituído de material britas, cascalhos ou argila expandida. Os parâmetros exigidos pelo programa para esta camada são os seguintes:

- **Espessura:** espessura da camada drenante.
- **Índice de vazio:** volume de espaço vazio em relação ao volume de sólidos na camada. Os valores variam de 0,5 a 0,75 para a camada de cascalho.

- **Coefficiente de rugosidade de Manning:** A rugosidade recomendada pelo manual do modelo para o cascalho é de 0,05.

Além dos parâmetros de caracterização do telhado verde, o programa exige outros dados para que a simulação seja feita, os quais serão descritos a seguir.

Caracterização da bacia hidrográfica de estudo

A área de estudo escolhida foi a bacia do C.O (Centro Olímpico da Universidade de Brasília – UnB), essencialmente urbana, localizada no bairro da Asa Norte, em Brasília. A área está inserida na Bacia Hidrográfica do Lago Paranoá e possui 5,43 km² de área. Ela tem como cabeceira o Autódromo Nelson Piquet e como exutório o Centro Olímpico da Universidade de Brasília – C.O, abrangendo quadras comerciais, residenciais, setor de oficinas, escolas e universidades.

A bacia do C.O foi estudada e calibrada por Costa (2013), e cedida pela autora para execução da simulação quanto à implementação dos telhados verdes, objetivo central deste projeto. Além de ser uma bacia já calibrada, é uma região próxima à Estação Experimental da Biologia, onde foram instaladas as unidades pilotos de telhado verde (figura 4.2).

A caracterização da área escolhida para aplicação do modelo foi feita por Costa (2013) através do levantamento de dados geográficos, a partir de mapas geoprocessados de uso e ocupação do solo, de pedologia e de comportamento do relevo na região; além de dados climatológicos, para avaliar a situação da drenagem pluvial da área, e também dados de caracterização física e socioeconômica, através de visitas ao local.

Foram geradas, ao todo, 46 sub-bacias unidas por 62 condutos e 62 junções, direcionadas a um único ponto de saída. Assim como as sub-bacias, cada conduto e junção apresentam suas características próprias para cada local com a seção transversal ou elevação diferente (COSTA, 2013). A bacia do C.O apresenta 15,3 km de comprimento, declividade média de 2,84%, sendo 1140m a cota do ponto mais elevado e 1000m a cota do exutório.

De acordo com Costa (2013), a área, a declividade média da bacia e as áreas impermeáveis foram calculadas em um programa SIG, já a largura de escoamento, por ser difícil de calcular sem os dados completos da rede, foi calibrada posteriormente. O coeficiente de Manning adotado foi 0,0115, enquanto que o de permeabilidade foi de 0,14. Para a capacidade de armazenamento em depressões nas áreas impermeáveis utilizou-se o valor de 1,57, enquanto que nas áreas permeáveis foi de 6,35. Ainda de acordo com Costa (2013), esses valores foram adotados seguindo a recomendação do manual do programa

Como já visto na seção 4.1, o clima predominante na região é o tropical sazonal, de inverno seco. A estação climatológica Caesb Hidrologia (1547029), operada pela Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal – Caesb, localiza-se próxima à cabeceira da bacia do C.O e pode representar o comportamento do regime de chuva da região, por meio de seu histórico pluviométrico (figura 4.10).

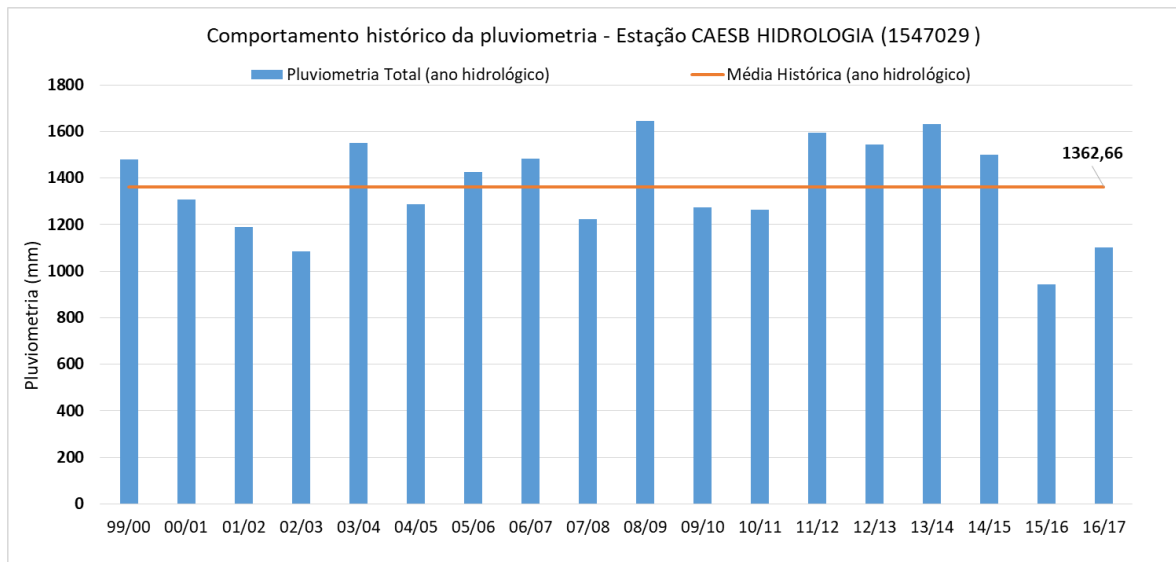


Figura 4.10: Série histórica pluviométrica da estação Caesb Hidrologia (Dados atlas Caesb, 2018).

Precipitação

A simulação no PCSWMM foi feita através de um modelo de precipitação baseada na curva de Intensidade – Duração – Frequência (IDF) encontrada no Plano Diretor de Drenagem Urbana do Distrito Federal - PDDU (GDF, 2009), representada na equação 4.7. A precipitação deve ser determinada para um tempo de retorno escolhido e para duração correspondente ao tempo de duração da chuva.

$$I = \frac{1574,70 * T^{0,207}}{(t + 11)^{0,884}} \quad \text{(Equação 4.7)}$$

Onde;

T = tempo de retorno em anos (recomendação de 10 anos);

t = tempo de duração da chuva (min);

I = intensidade da chuva (mm/h).

Na análise de intensidades máximas, o tempo de retorno é interpretado como o número médio de anos durante o qual espera-se que a precipitação analisada seja igualada

ou superada. Correlacionando intensidades e durações das chuvas, verifica-se que quanto mais intensa for uma precipitação, menor será sua duração.

A metodologia utilizada para organização da precipitação calculada foi a de Blocos Alternados, com uma duração da chuva de 24 horas e discretização em intervalos de 5 minutos, totalizando 1440 minutos. Os tempos de retorno utilizados foram de 1 ano, 2 anos, 10 anos (padrão recomendado pelo PDDU) e 100 anos, como mostra o hietograma de projeto (figura 4.11).

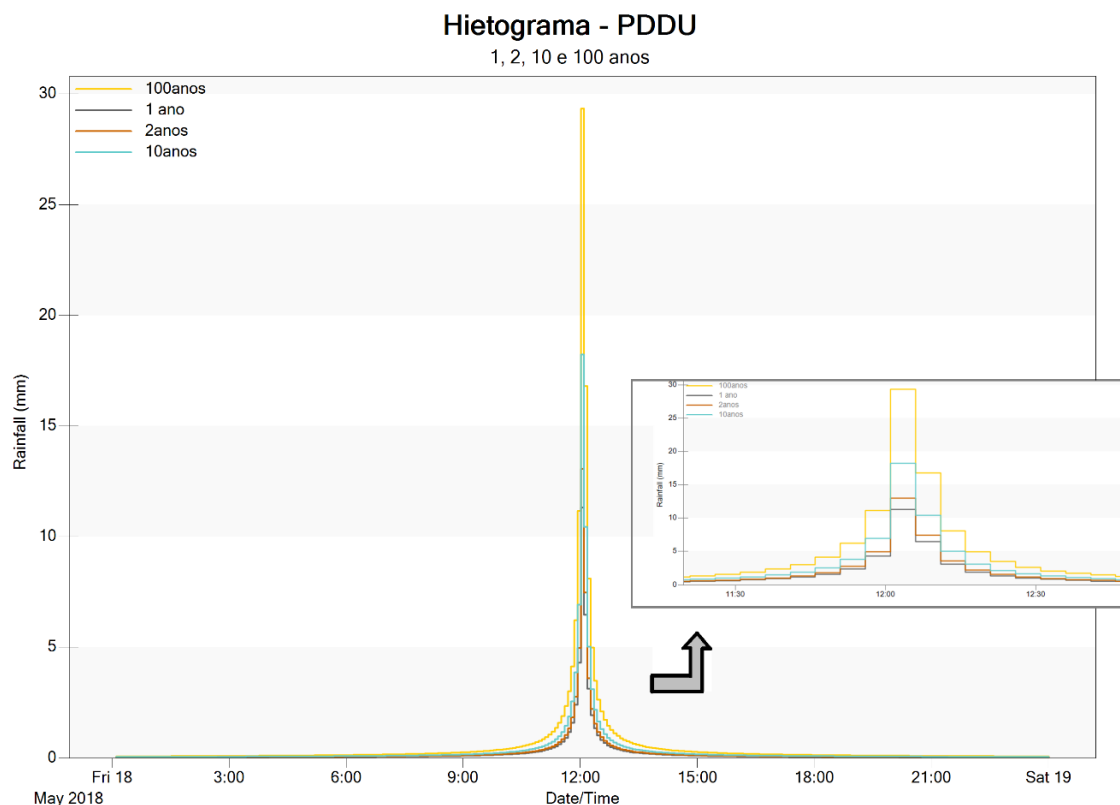


Figura 4.11: Hietograma de projeto, Tempo de retorno de 1, 2, 10 e 100 anos (2018).

Alguns parâmetros como evapotranspiração, variações de temperatura e velocidade dos ventos são desconsiderados, pelo fato da precipitação ser de curta duração.

Além das chuvas de projeto, utilizou-se para simulação um evento de chuva real (19/01/2013) obtido através de três pluviógrafos distribuídos na bacia do C.O, utilizado também por Costa (2013) para a calibração desta. Segundo a autora, o critério de escolha da localização dos instrumentos foi o posicionamento na bacia, como também a facilidade de acesso para a manutenção e coleta de dados (figura 4.12).

Os pontos de medição de chuva são a ETA Brasília, de responsabilidade da Caesb; quadra residencial SQN 106 e Universidade de Brasília, prédio SG 12, sendo os dois últimos alocados em cima de telhados. Dos três pluviógrafos, apenas o localizado na ETA Brasília

apresenta discretização de 10 minutos, sendo que os demais apresentam discretização dos dados de 5 minutos.



Figura 4.12: Postos pluviométricos inseridos no modelo e as sub-bacias que os englobam (adaptado; COSTA, 2013).

Além do tempo de retorno que informa quão significativo foi o evento, é importante também analisar a intensidade e duração das chuvas, visto que esses fenômenos promovem impactos no escoamento superficial. Na tabela 4.1 encontra-se o resumo desses parâmetros para os eventos analisados neste projeto.

Tabela 4.1: Resumo dos parâmetros dos eventos utilizados na modelagem.

Evento	Intensidade (mm/h)	Tempo de retorno (anos)
Chuva real	26,0	0,09
Chuva de projeto 1	53,4	1
Chuva de projeto 2	61,6	2
Chuva de projeto 3	86,0	10
Chuva de projeto 4	138,5	100

Infiltração

A mudança do tipo de uso e cobertura do solo, consequência do desenvolvimento urbano, traz mudanças significativas na dinâmica da drenagem. Esses impactos podem ser determinados através de modelos matemáticos como o *Soil Conservation Service* – SCS, cujo parâmetro principal é o CN (Curva-Número); visto que o método relaciona a capacidade

máxima de absorção do solo com condições de cobertura e o tipo do solo tanto para bacias rurais quanto para as bacias urbanas.

A utilização do parâmetro CN em simulações de escoamento é de suma importância, apesar de suas limitações, para a quantificação dos impactos gerados pelos deflúvios e também para a avaliação do comportamento de poluentes difusos, quando aliado a parâmetros físico-químicos específicos da região (SILVA e LIMA, 2016).

Rede de drenagem

No Distrito Federal compete à Companhia Urbanizadora da Nova Capital do Brasil (Novacap) a responsabilidade por administrar as execuções de obras e a gestão das redes de drenagem (COSTA, 2013). Para avaliação da drenagem e do impacto dos telhados verdes na mesma, foi traçada a rede de macrodrenagem para a região de estudo. Para isso, Costa (2013) levantou 70 pontos referente à localização e às características dos poços de visita, como elevação, número, tipos e diâmetros das entradas.

Além do resultado comparativo dos hidrogramas sem e com a incorporação dos telhados, é possível obter, através do SWMM, o impacto, na rede de drenagem, de tal mudança proposta.

Cenários

Como já visto em seções anteriores, o crescimento urbano, muitas vezes, impacta negativamente o funcionamento do sistema de drenagem, com aumentos de picos de vazão e frequência de inundações. Nesta etapa do projeto o objetivo é avaliar, por meio da modelagem hidrológica, se há minimização desses impactos com a substituição de telhados convencionais por telhados verdes na área urbana da bacia em estudo.

A área escolhida para aplicação do modelo, dentro do Distrito Federal, foi a bacia do C.O por ser, além de uma área essencialmente urbana, ideal para aplicação dos telhados verdes, como uma região que apresenta alagamentos pontuais. Para analisar os efeitos da adoção de medidas compensatórias na drenagem urbana foram idealizados três cenários.

O primeiro cenário, nomeado cenário simplificado, consiste na implementação de unidades de telhado verde com área fixa de 1000 m² por unidade. Ele foi pensado a fim de revelar uma ideia geral a respeito do impacto deste controle LID para diferentes eventos de

chuva. Adotou-se uma quantidade máxima de 10 unidades de telhado verde para cada sub-bacia, totalizando até 10000 m² de área constituída de LID, por sub-bacia.

Vale ressaltar que a quantidade de telhados verdes, não pode resultar em área superior à área impermeável. Nas sub-bacias cuja área impermeável é inferior à área estipulada, colocou-se a quantidade máxima de telhado verde suportada pela mesma.

O segundo cenário, nomeado cenário possível, consiste em uma análise mais específica da área propícia à implantação de telhados verdes em cada sub-bacia. Neste, foi calculada a área dos telhados de casas e prédios, supondo implementação do controle LID em todos os telhados convencionais existentes.

O terceiro cenário, nomeado cenário mais provável, apresenta uma situação menos utópica com a implementação de telhados verdes em metade da área possível de ser implantada, ou seja 50% da área considerada no cenário 2.

Todos os cenários serão comparados com o cenário base que representa o cenário atual da bacia sem inserção de controles LID por telhados verdes. Foram analisadas as seguintes características da rede: a vazão de pico, o volume total escoado, o número de poços de visita extravasados, o tempo máximo de poços de extravasados e o volume total inundado.

Todos os cenários foram modelados para uma chuva real; cujo tempo de retorno é de 0,09 anos; e para as chuvas de projeto com tempo de retorno de 1 ano, 2 anos e 10 anos. Apenas o primeiro cenário foi modelado para uma chuva de projeto cujo tempo de retorno é de 100 anos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 – MONITORAMENTO DO TELHADO VERDE

5.1.1 – Dados quantitativos da água drenada das unidades piloto

A princípio, a vegetação escolhida para o projeto era o capim brinco de princesa. No entanto, pela pouca quantidade de mudas adquiridas, até o 07 de fevereiro de 2018 essa espécie não havia se desenvolvido bem; desta forma optou-se por substituí-la pela grama Esmeralda.

Considerou-se o início do monitoramento efetivo para obtenção dos dados, a partir do plantio da grama Esmeralda, ou seja, dia 08 de fevereiro de 2018. Para auxílio na adaptação da vegetação, foi realizada irrigação de 10 litros de água em cada unidade piloto de telhado verde, caso houvesse período maior que um dia sem eventos de chuva. Esse procedimento se deu até dia 03 de abril de 2018, quando se verificou a estabilidade da vegetação; dando uma pausa às irrigações, que voltariam a ser realizadas apenas no período de seca.

O monitoramento foi realizado a partir da verificação de nível da mangueira graduada em cada uma das bombonas. Os dados obtidos durante o período de monitoramento são apresentados na tabela 5.2. Além disso; com auxílio do pluviômetro localizado na estação ETE Norte da CAESB, a aproximadamente 1,3 km das unidades piloto; foi possível obter os dados de chuva para o período de monitoramento (tabela 5.1). Com isso, é possível observar que os dados encontrados para lâmina de água do telhado convencional estão condizentes aos dados medidos na ETE Norte. A diferença observada nos valores de pluviometria mensal acumulada deve-se, provavelmente, à distância entre a unidade piloto de telhado convencional e o pluviômetro da ETE.

Tabela 5.1: Comparação de dados pluviométricos ETE Norte e lâmina de água armazenada na bombona do telhado convencional.

Pluviometria Acumulada (mm)							
fev/18 (a partir de 08/02)		mar/18		abr/18		mai/18	
ETE NORTE	Lâmina telhado	ETE NORTE	Lâmina telhado	ETE NORTE	Lâmina telhado	ETE NORTE	Lâmina telhado
201,4	127,4	99,1	131,3	198,6	197,5	7,1	6,4

Tabela 5.2: Dados quantitativos do volume drenado e do coeficiente de escoamento (Coef. Esc) para cada unidade piloto de telhado verde (TV) e para o telhado convencional (TC).

Data	Telhado Convencional (L)	TV 10 (L)	Coef Esc (TV 10)	TV 15 (L)	Coef Esc (TV 15)	TV 20 (L)	Coef Esc (TV 20)
08/02/2018	38,00	22,00	0,58	20,00	0,53	21,50	0,57
09/02/2018	43,00	36,00	0,84	19,00	0,44	37,00	0,86
12/02/2018	0,61	0,20	0,33	0,18	0,30	0,00	0,00
13/02/2018	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19/02/2018	2,14	1,00	0,47	1,50	0,70	3,90	1,82
21/02/2018	25,00	15,00	0,60	16,00	0,64	14,00	0,56
23/02/2018	16,00	15,00	0,94	16,00	1,00	15,60	0,98
24/02/2018	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
26/02/2018	50,00	34,00	0,68	34,00	0,68	33,00	0,66
27/02/2018	16,00	12,00	0,75	12,00	0,75	12,00	0,75
02/03/2018	3,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
05/03/2018	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,50
08/03/2018	11,00	0,00	0,00	0,90	0,08	0,00	0,00
11/03/2018	23,00	7,00	0,30	7,50	0,33	7,90	0,34
14/03/2018	55,00	26,00	0,47	26,00	0,47	24,00	0,44
15/03/2018	4,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19/03/2018	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
22/03/2018	58,00	51,00	0,88	48,00	0,83	48,00	0,83
25/03/2018	39,00	37,00	0,95	36,00	0,92	35,00	0,90
02/04/2018	106,18	84,32	0,79	82,26	0,77	90,36	0,85
04/04/2018	36,00	35,00	0,97	33,00	0,92	33,00	0,92
06/04/2018	29,00	19,00	0,66	17,00	0,59	15,00	0,52
08/04/2018	64,00	63,00	0,98	60,00	0,94	62,00	0,97
09/04/2018	30,00	30,00	1,00	30,00	1,00	30,00	1,00
16/04/2018	21,00	3,00	0,14	2,00	0,10	2,00	0,10
24/04/2018	4,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30/04/2018	6,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
04/05/2018	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
21/05/2018	9,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total dos volumes drenados no período monitorado (L)	693,88	490,52	-	461,34	-	485,26	-
Volume retido	0%	29%		34%		30%	
Coef Esc. médio	-	0,43		0,41		0,47	

A eficiência de retenção de água pela vegetação e substrato da unidade piloto de telhado verde de 15 cm (34% do volume retido) foi maior que a eficiência observada pelas unidades piloto de telhado verde com 20 cm de substrato (30% do volume retido) e com 10 cm de substrato (29% do volume retido).

Mesmo que em alguns momentos, os volumes drenados pela unidade piloto de 15 cm de substrato tenham sido maiores (21/02, 23/02 e 08/03), em geral essa unidade piloto demonstrou maior capacidade de retenção de água. Um fator que pode explicar a melhor

eficiência dessa unidade em relação às outras, deve-se à adaptação da vegetação às condições ambientais que se deu de forma mais rápida.

Como todas as unidades piloto foram submetidas às mesmas condições ambientais e do solo, pode ser que as placas de grama da unidade piloto de 15 cm de substrato tenham sido distribuídas de forma mais uniforme, mostrando um desenvolvimento melhor da vegetação com folhas mais largas e também florescimento de outras espécies como destacado na figura 5.1. Isso pode ter contribuído para a interceptação da precipitação e para o consequente aumento da retenção de água na unidade piloto.

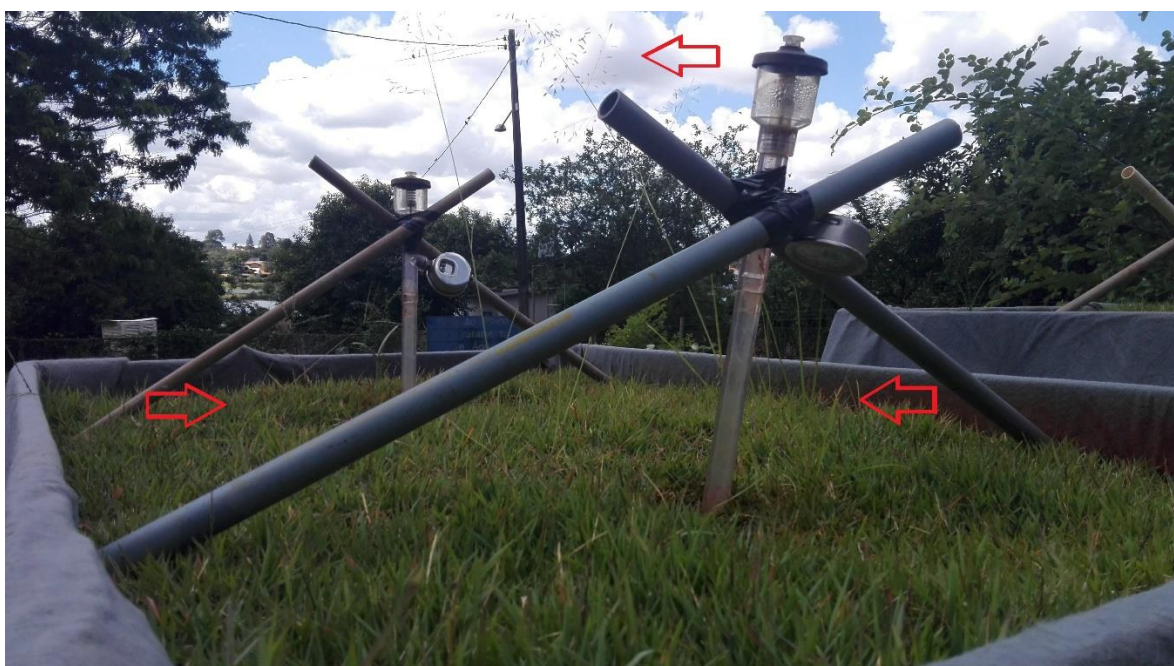


Figura 5.1: Desenvolvimento da vegetação da unidade piloto com 15 cm de substrato (2018).

Comparando os valores obtidos para a retenção do volume de água nas unidades piloto, observa-se que foram inferiores àqueles apresentados por Salerno (2017). Para a unidade piloto de telhado verde com 20 cm de substrato, houve retenção de 57% do volume, enquanto que para a unidade piloto de 10 cm de substrato a retenção do volume foi 45%. A vegetação avaliada também foi a grama esmeralda, submetidas às mesmas condições de preparação do solo e localizadas no mesmo lugar, Estação Experimental da Biologia.

Além disso, os coeficientes de escoamento encontrados por Salerno (2017) foram de 0,41 e 0,33 para os telhados verdes com substrato de 10 e 20 cm de substrato. Neste projeto, os valores foram de 0,43 e 0,47, respectivamente, para as mesmas profundidades de substrato.

Um dos motivos que explicam a diminuição da retenção de volume da água nas unidades piloto deste projeto em relação ao de Salerno (2017) é o fato do substrato ter ficado exposto por mais de um mês com as mudas do capim brinco de princesa (figura 5.2). Em pequena quantidade, as mudas não ofereceram proteção ao substrato possibilitando, aos poucos, sua compactação em função do impacto das gotas de água.

Esse fator pode ter sido determinante para redução da eficiência das unidades piloto de telhado verde, visto que neste período elas receberam 285,33 litros de volume precipitado (obtido pela verificação da bombona da unidade piloto de telhado convencional). Com a compactação da camada superficial do solo, há produção de uma fina camada mais densa que altera suas propriedades físicas.



Figura 5.2: Condição do solo na época de desenvolvimento da vegetação brinco de princesa (2018).

Analisando alguns eventos apresentados na tabela 5.2, é possível verificar que a umidade do solo influencia diretamente na eficiência de retenção de água nos telhados verdes. Quando os eventos de chuva são próximos entre si, o volume escoado pela unidade piloto de telhado convencional e os volumes drenados pelas unidades piloto de telhado verde são bem semelhantes (23/02, 25/03, 04/04 e 08/04).

É válido analisar os resultados obtidos no dia 09/04, quando o volume armazenado nas bombonas foi o mesmo para todas as unidades piloto. Mesmo considerando o erro na medição, observa-se que os telhados verdes não armazenaram água da chuva em suas camadas, tendo em vista que o solo já estava bastante úmido devido ao evento de chuva no dia anterior que registrou 64 litros na bombona do telhado convencional. No entanto, depois que a umidade do substrato diminuiu, os telhados verdes voltam a reter água em suas camadas (15/03 e 06/04).

No estudo de Fujiwara e Santos (2016), avaliou-se o comportamento da grama batatais através de ensaio da capacidade de retenção com medida da umidade do solo e entrada controlada de água. A porcentagem de retenção foi de 31,2% no ensaio com umidade do solo em 22,22%, e de 13,7% no ensaio com umidade de 25,85%. Observou-se também, que o escoamento demorava mais para se iniciar, nos ensaios com umidades do solo baixas.

5.1.2 – Análise do balanço hídrico da cobertura verde

Tendo em vista a necessidade de conhecer o quanto de água foi armazenada nas coberturas verdes, o balanço hídrico foi realizado. A perda por evapotranspiração da vegetação foi desconsiderada, visto que a Estação Climatológica Automática da Universidade de Brasília, que obteria os dados, ainda não estava devidamente instalada.

Com os dados obtidos a partir do monitoramento da umidade do solo, foi possível calcular o volume de água requerido pela vegetação durante o período de monitoramento (08/02 a 11/06/2018). Esse volume somado às precipitações dos eventos registrados nas unidades piloto e ao volume total irrigado antes da instalação dos tensiômetros para o desenvolvimento da vegetação, compõem a entrada de água no sistema.

A saída de água do sistema consiste apenas no volume drenado pelas unidades piloto de telhado verde durante o período monitorado, tendo em vista a dificuldade em obter dados de evapotranspiração da grama esmeralda.

Os resultados do balanço hídrico (figura 5.3) mostram que o telhado verde de 20 cm de substrato armazenou maior quantidade de água devido a sua espessura e à necessidade hídrica superior às demais estruturas piloto de telhado verde.

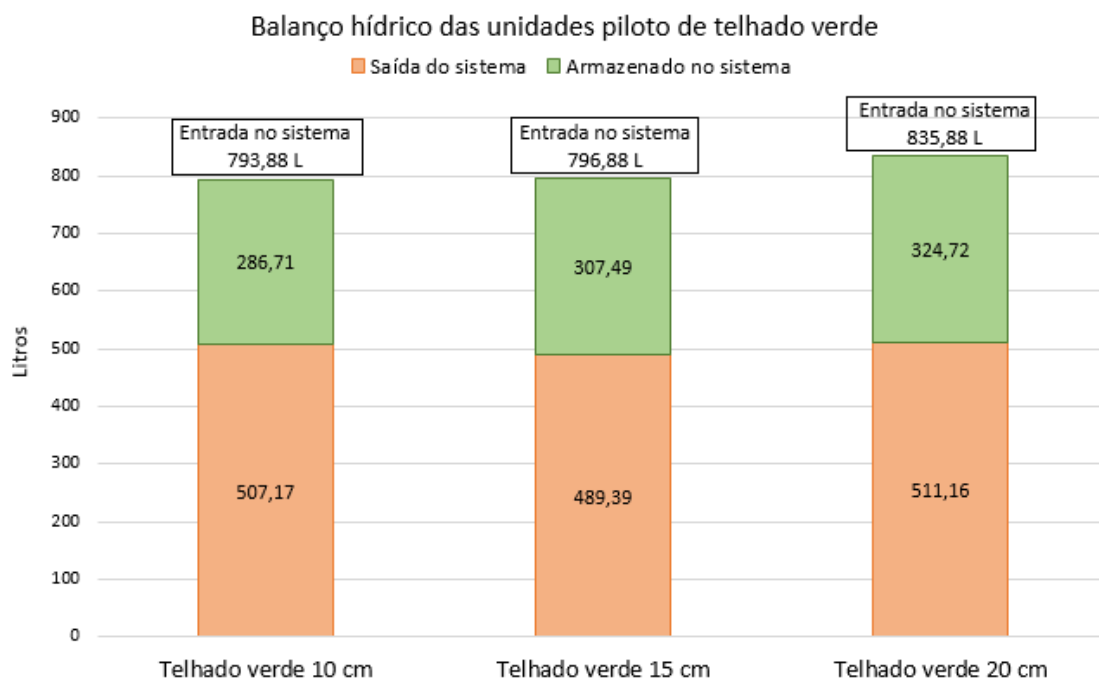


Figura 5.3: Resultados do balanço hídrico das unidades piloto de telhados verdes (2018).

5.1.3 – Monitoramento da umidade do solo

A irrigação das unidades piloto de telhado verde para adaptação da grama Esmeralda foi interrompida no dia 03 de abril de 2018, tendo em vista o bom desenvolvimento da vegetação; sendo retomada apenas no período seco 03 de maio de 2018, e continuada até o término do estudo, 11 de junho de 2018. No entanto, nesta nova etapa de irrigação, utilizou-se um novo volume de água, calculado através da curva de retenção de água para o solo das unidades piloto.

A escolha dos valores da curva de retenção de água no solo foi feita a partir dos pontos passíveis de serem analisados pelo equipamento disponível na empresa de análise química Solo Química. Escolheu-se os valores extremos de menor e maior pressão e um valor intermediário, dando origem à curva de tensão x umidade para o solo em estudo (figura 5.4).

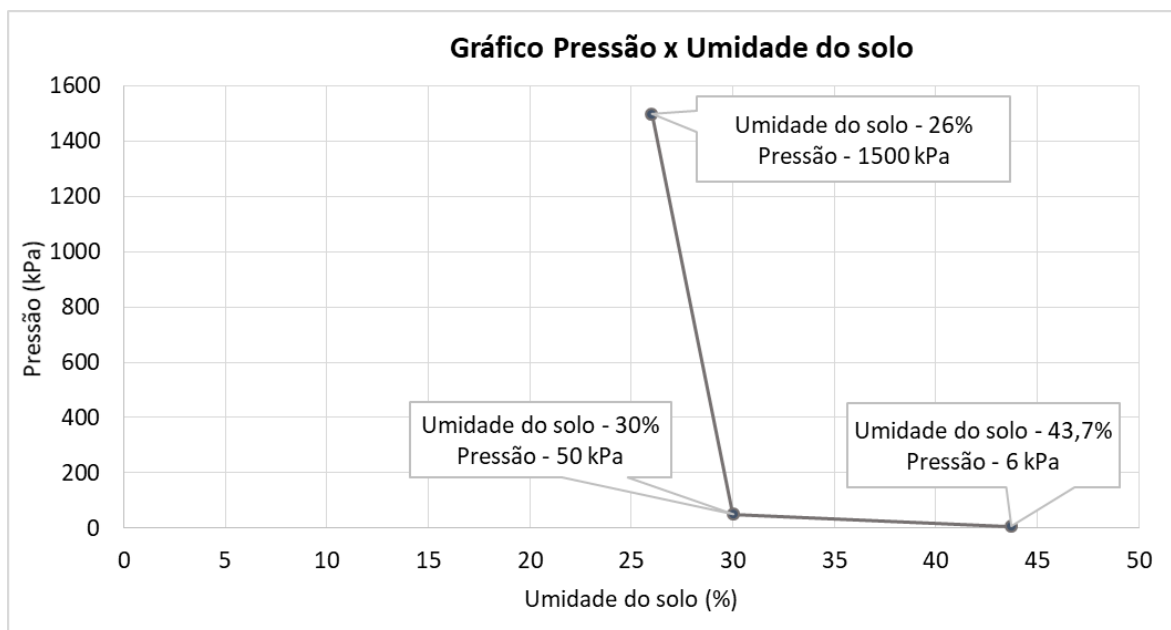


Figura 5.4: Curva de retenção de água no solo (2018).

Com os resultados obtidos na curva de retenção de água no solo, foi possível calcular a lâmina de água que a vegetação necessita para diminuir a sua tensão, com base nas orientações da Embrapa (2005). Utiliza-se como base da irrigação, um valor pré-estabelecido da tensão da água no solo, que está diretamente relacionada ao teor de umidade do solo.

Sabendo que quanto mais seco o solo maior será a tensão com que a água é retida, e que para cada valor da tensão, há um respectivo valor da umidade do solo, pode-se analisar a curva de retenção de água no solo. No primeiro ponto da curva (figura 5.4), de maior tensão, observa-se uma umidade do solo de 26%, ou seja, 260 mm de água por metro de profundidade do solo. Para o segundo ponto da curva, cuja a tensão é 50 kPa, a umidade é igual a 30% ou 300 mm de água por metro de profundidade do solo. Já para o terceiro ponto da curva, cuja tensão é 6 kPa, há maior valor de umidade, 43,7% (437 mm/m).

Para o cálculo da lâmina a ser aplicada na irrigação, fez-se a diferença dos teores de umidade das respectivas tensões de capacidade de campo e de 50 kPa, de acordo com a curva de retenção de água obtida para tal solo. Sendo assim, transformou-se a diferença de umidade (%) em mm/m e multiplicou-se pela profundidade de maior atividade das raízes, no caso 0,10; 0,15 e 0,20 m. Dessa forma, foi obtida a lâmina a ser aplicada quando a vegetação exigiu irrigação.

Para a irrigação dos telhados verdes de 10, 15 e 20 cm de profundidade de solo, foram encontradas lâminas de 1,37; 2,055 e 2,74 mm, respectivamente. A multiplicação desta

lâmina pela a área de cada unidade piloto de telhado verde (1,5 m²), dá origem ao volume a ser irrigado diariamente de 2, 06; 3,08 e 4,11 litros, respectivamente.

Com a instalação dos tensiômetros, pôde-se observar a necessidade de irrigação, assim como sua frequência nas unidades piloto de telhado verde. Diariamente, foram verificadas as leituras nos manômetros, sendo que valores maiores ou iguais a 50 kPa, indicavam a necessidade de irrigação.

Reichardt (1990, *apud* Salerno, 2017) indica como 50 kPa o momento que a grama esmeralda deve ser irrigada, com valores superiores a 60 kPa sendo os mais críticos, umidade da tensão crítica. Como o plantio é em telhados verdes, essa vegetação não é considerada de valor comercial e por se tratar de uma cultura mais tolerante ao déficit hídrico, permite a tensão estar próxima e até um pouco acima dos 50 kPa.

Após a instalação dos tensiômetros, deve-se verificar seu funcionamento. Caso o instrumento necessite constantemente de reabastecimento no tubo de acrílico, provavelmente, estará com algum problema de vazamento de água ou de vazamento na cápsula porosa através de rachaduras. Dos seis tensiômetros instalados nas unidades piloto de telhado verde, apenas três apresentaram bom funcionamento (um tensiômetro em cada unidade piloto), sendo que os demais foram descartados por apresentarem vazamento nas cápsulas de cerâmica. O monitoramento diário dos tensiômetros está representado na figura 5.5, sendo que a linha amarela representa o limite acima do qual deve-se regar a unidade piloto de telhado verde.

Pode-se observar, na figura 5.5, alguns momentos em que o tensiômetro do telhado verde 15 cm apresenta pressões muito baixas em relação aos demais (25/05, 26/05, 31/05, 01/06, 07/06 a 11/06/2018), mostrando o mau funcionamento da cerâmica que, provavelmente, estava com rachaduras.

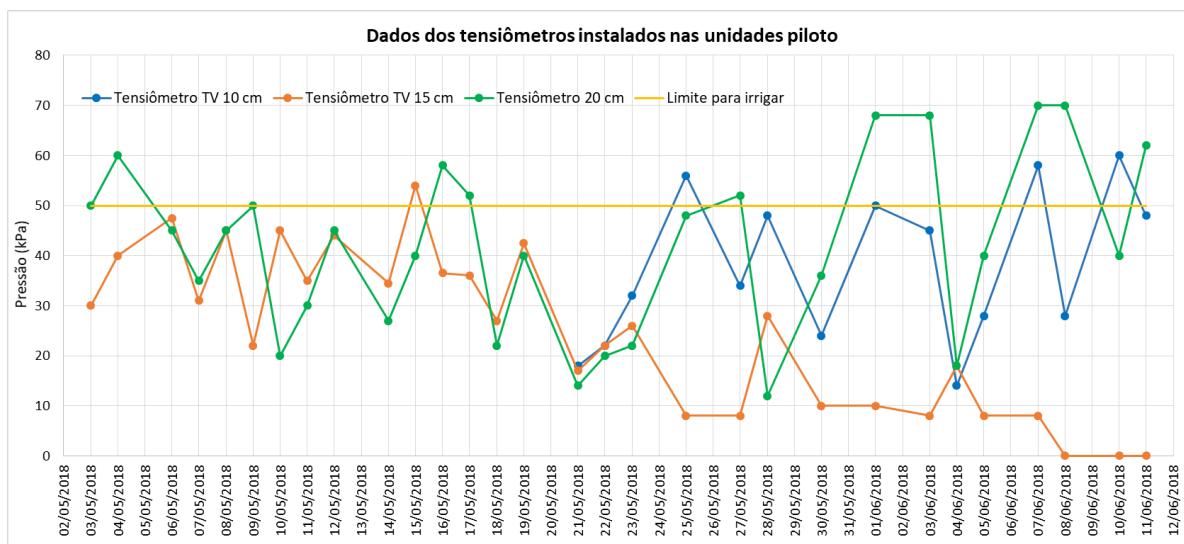


Figura 5.5: Dados de monitoramento dos tensiômetros instalados nas três unidades piloto de telhado verde (2018).

5.2 – MODELAGEM DOS TELHADOS VERDES NOS SISTEMAS DE DRENAGEM URBANA

5.2.1 - Avaliação dos impactos de telhados verdes na drenagem urbana por meio da modelagem hidráulica – hidrológica

Este trabalho tem como um dos objetivos, avaliar o papel dos telhados verdes, como medida de Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto, no controle do escoamento superficial, se inseridos nas edificações de forma ampla nos espaços urbanos. Neste sentido, a aplicação do modelo hidrológico-hidráulico apresentado, o SWMM, permite avaliar o impacto que os telhados verdes podem exercer no controle das enchentes, e em áreas mais consolidadas no espaço territorial da bacia hidrográfica.

Para simulação dos dados no PCSWMM optou-se pelo modelo de Chuva/vazão e fluxo; pelo método de infiltração SCS, devido à disponibilidade dos dados; e pelo modelo de transporte da onda dinâmica, por levar em consideração todos os componentes da equação de Saint-Venant, tornando a simulação mais real e precisa.

A modelagem hidráulica e hidrológica utilizando o programa computacional PCSWMM foi realizada na bacia do C.O. A etapa de inserção dos dados de entrada referentes às características físicas da bacia no modelo e sua calibração, para o evento específico do dia 19/01/2013, foi realizada por Costa (2013). No processo de calibração foram alterados parâmetros como o número de Manning no canal, largura, declividade e a porcentagem de área impermeável da sub-bacia. Segundo Costa (2013), este último

parâmetro é o mais sensível, e apesar de ser um parâmetro físico, foi ajustado devido as incertezas quanto ao grau de permeabilidade da classificação do uso e ocupação do solo.

O resultado da calibração foi satisfatório, como mostra a figura 5.6, visto que os hidrogramas da vazão observada e da vazão calculada pelo programa estão semelhantes. Na subida do hidrograma, percebe-se que o tempo se encontra coerente no início, ocorrendo um retardo próximo ao pico, fato que pode ser atribuído à entrada das águas provenientes da chuva registrada pelo pluviômetro central na sub-bacia. Já a descida do hidrograma encontra-se no tempo correto, sendo um pouco superestimada ao final da simulação, onde as vazões calculadas são maiores que as observadas (COSTA, 2013).



Figura 5.6: Gráfico dos resultados da Vazão observada (Qobs) e da vazão calculada (Qcal) (COSTA, 2013).

5.2.2 – Inserção das unidades de desenvolvimento de baixo impacto na bacia de estudo

Área ocupada pelos telhados verdes

Existem duas maneiras de introduzir controles por dispositivos de baixo impacto, a primeira seria colocar um ou mais controles em uma sub-bacia existente, já a segunda, seria criar uma nova sub-bacia exclusivamente para o controle. O método de inserção utilizado neste projeto foi o primeiro; sendo que, desta forma os controles trabalham em paralelo, ou seja, a saída de um controle não pode servir como entrada para outro controle.

Também, após colocar os controles na sub-bacia, há necessidade de ajustes nas propriedades relativas ao percentual de áreas impermeáveis e à largura do escoamento para

compensar a área total da sub-bacia que passa a ser ocupada pelos controles (figura 5.7). Após a adição do controle, a porcentagem de área impermeável deverá ser modificada para a porcentagem de área impermeável restante na porção da sub-bacia não ocupada pelo controle.

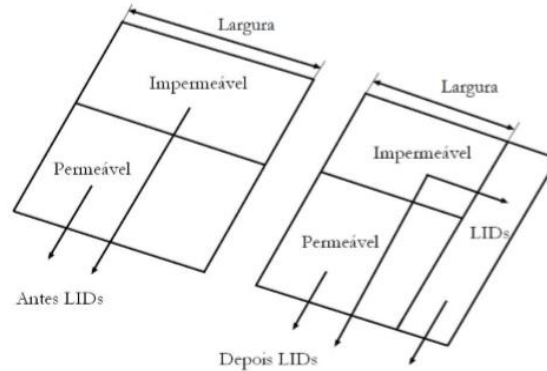


Figura 5.7: Ajuste dos parâmetros da sub-bacia após a introdução de controles por dispositivos de baixo impacto-LIDs (ROSSMAN, 2010).

Tendo em vista que o telhado verde é um controle de desenvolvimento urbano de baixo impacto que só pode ser colocado em telhados de edificações, ou seja, em áreas impermeáveis; há dois casos em que é necessário recalcular a porcentagem de área impermeável após a inserção dos telhados verdes.

- No primeiro caso (figura 5.8-a), há inserção de telhados verdes em parte da área impermeável da sub-bacia, logo, a nova área impermeável é calculada de acordo com a equação 5.1.

$$nova \% \text{ área impermeável} = \frac{\text{área impermeável sem LID}}{\text{área total da sub-bacia sem LID}} * 100\% \quad (\text{Equação 5.1})$$

- No segundo caso, a inserção de telhados verdes acontece em toda a área impermeável da bacia (figura 5.8-b). Sendo assim, a nova porcentagem de área impermeável é 0%.

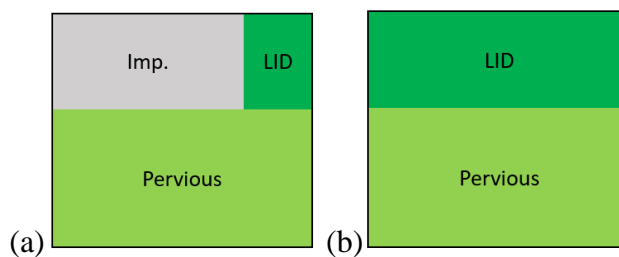


Figura 5.8: Representação da implementação de LID em áreas impermeáveis (2018).

Para cada cenário e sub-bacia, calculou-se a nova porcentagem de área impermeável a ser aplicada, a fim de se obter resultados mais precisos e corretos a respeito do efeito da inserção de telhados verdes na Bacia do C.O. As figuras 5.9 e 5.10 apresentam, respectivamente, os mapas da porcentagem de área impermeável original para o cenário base; e da porcentagem de área impermeável calculada para o cenário 2, com inserção de telhados verdes em todos os telhados convencionais de cada sub-bacia.



Figura 5.9: Mapa % de área impermeável para o cenário base (2018).

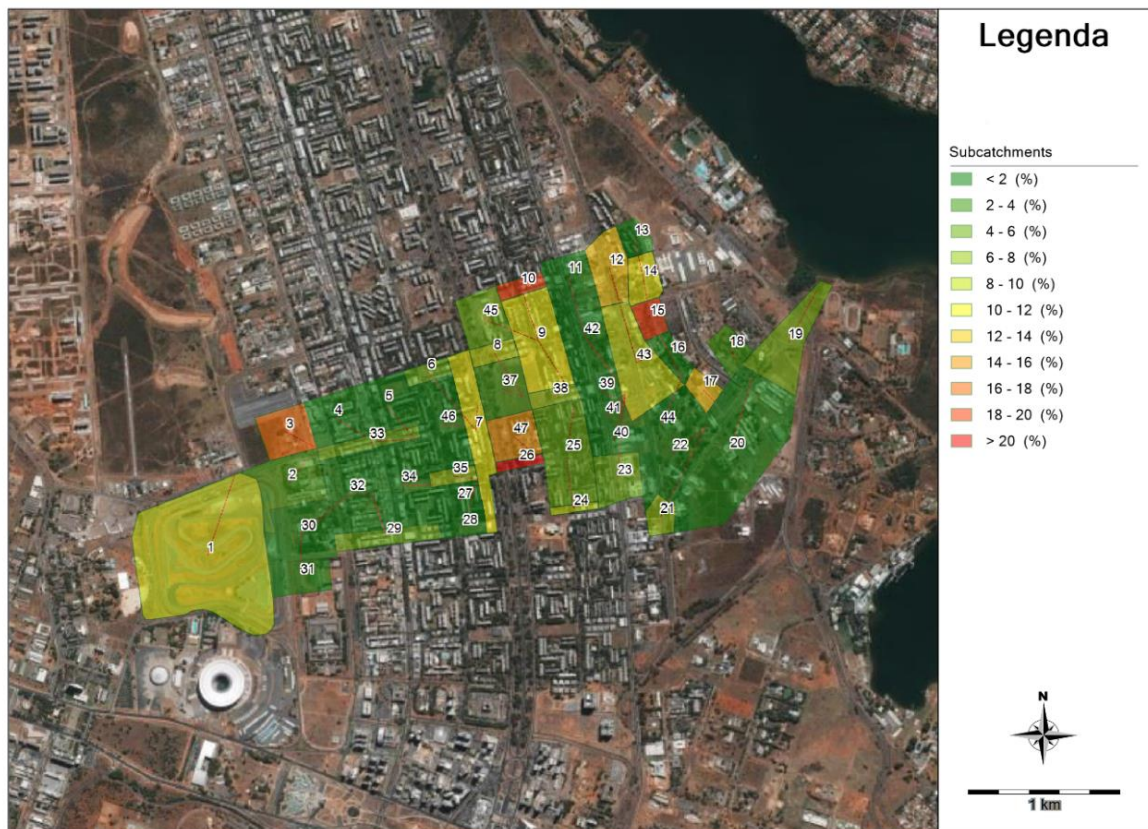


Figura 5.10: Mapa % de área impermeável para o cenário 2 (2018).

Observa-se que com a inserção dos telhados verdes, por ser um controle LID viável apenas em áreas impermeáveis, houve diminuição em toda a bacia do C.O em relação à porcentagem desta. Enquanto no cenário base muitas sub-bacias apresentam porcentagem de área impermeável de 20 a 30%, no cenário 2 apenas três sub-bacias possuem esse valor superior a 20 %.

Características dos telhados verdes adotados no modelo

Durante a simulação, o modelo realiza o balanço hídrico, determinando o que escoar e o que é armazenado em cada camada. O desempenho hidrológico de uma unidade LID é então representado através de resoluções de equações simples de balanço de massa, que expressam a mudança no volume de água em cada camada ao longo do tempo.

Em contraste com o escoamento, que só persiste por um tempo um pouco mais longo do que o evento de chuva, a água armazenada nas unidades LIDs persiste por vários dias. Esse tempo prolongado pode ajudar na prevenção de inundações, quando ocorrem sucessivos eventos de chuva.

Cada camada de representação do telhado verde, no programa, exige parâmetros que são apresentados na tabela 5.3. Assim como os respectivos valores utilizados para os mesmos, referentes às unidades piloto de telhado verde existentes na Estação Experimental da Biologia, objeto de estudo deste trabalho.

Tabela 5.3: Dados de caracterização das camadas de telhado verde no SWMM.

	PARÂMETRO	VALOR	ORIGEM DOS DADOS
SUPERFÍCIE	Profundidade de armazenamento (mm)	5,08	Recomendação do manual do PCSWMM para grama
	Fração do volume da cobertura vegetal	0,1	Recomendação do manual do PCSWMM para crescimento vegetativo muito denso
	Rugosidade Superficial	0,15	Recomendação do manual do PCSWMM para grama
	Declividade da superfície (%)	7,5	Declividade das unidades piloto experimentais de telhado verde
SOLO	Espessura (mm)	100, 150 e 200	Profundidades referentes às três unidades piloto experimentais de telhado verde
	Porosidade (fração)	0,68	Porosidade do solo das unidades piloto experimentais de telhado verde, fornecida pela empresa de análise química Solo Química
	Capacidade de campo (fração)	0,437	Capacidade de campo do solo das unidades piloto experimentais de telhado verde, fornecida pela empresa de análise química Solo Química
	Ponto de murcha (fração)	0,26	Ponto de murcha do solo das unidades piloto experimentais de telhado verde, fornecido pela empresa de análise química Solo Química
	Condutividade hidráulica (mm/h)	114	Condutividade hidráulica do solo das unidades piloto experimentais de telhado verde, fornecida pela empresa de análise química Solo Química
	Gradiente da curva de condutividade hidráulica	5,94	Declividade da curva de condutividade hidráulica calculada através da recomendação do manual
	Sucção capilar (mm)	290,07	Recomendação do manual de acordo com o solo estudado
DRENAGEM	Espessura da camada drenante (mm)	30	Altura da argila expandida
	Índice de vazio	0,6	Valor adotado
	Rugosidade	0,05	Recomendada pelo manual para o cascalho

Depois de inserir as propriedades do telhado verde, é necessário especificar como o controle LID será implantado dentro da sub-bacia por meio do editor de uso de LID (figura 5.11). Os principais campos de entrada são os seguintes: nome do controle LID previamente definido para ser usado na sub-bacia, o número de unidades de LID de mesmo tamanho implantado na bacia e a área de cada unidade de controle. Com essas informações, o programa já calcula a quantidade da área total da sub-bacia dedicada à LID.

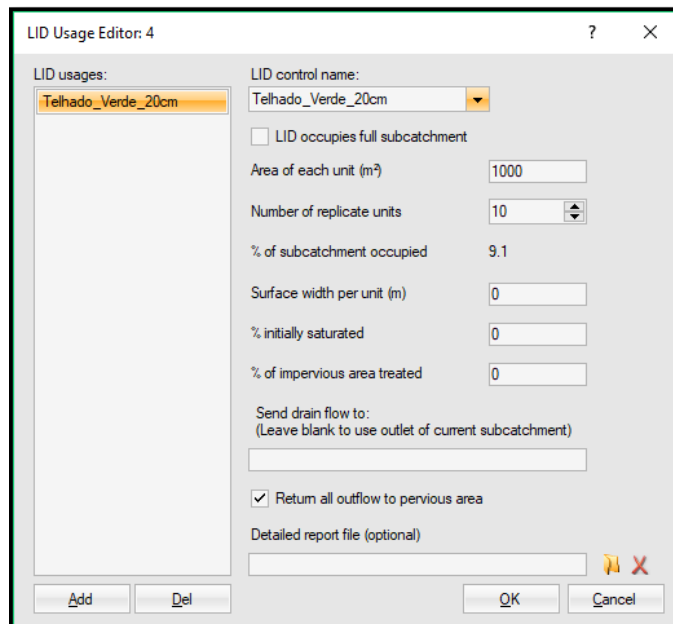


Figura 5.11: Editor de uso de controles LID (2018).

Além disso, são necessários outros parâmetros que dependem do tipo de LID que está sendo inserida no modelo (figura 5.11). No caso do telhado verde, a largura superior do escoamento superficial é igual a zero, pois esse parâmetro se aplica somente aos controles LID que utilizam o escoamento superficial para transportar água fora da unidade, como pavimentos permeáveis.

A porcentagem inicialmente saturada se trata do percentual em que o solo da unidade é inicialmente preenchido com água (0% de saturação corresponde ao teor de umidade do ponto de murcha permanente, 100% de saturação é o teor de umidade igual à porosidade). A zona de armazenamento do solo abaixo da unidade LID é assumida completamente seca.

O percentual de área impermeável da parcela sem LID na sub-bacia, cuja vazão é tratada pelo controle LID, também é zero para as unidades de telhado verde, visto que este trata apenas a chuva direta.

Por fim, tem-se a opção de enviar o escoamento para a área permeável, que deve ser selecionada quando a LID em questão for o telhado verde. Essa opção faz com que a descarga da LID seja devolvida à área permeável da sub-bacia, em vez de ir para a saída da sub-bacia.

5.2.3 – Análise dos cenários

A eficiência da implementação de telhados verdes na bacia em estudo foi analisada por meio da criação de cenários, de acordo com o tempo de retorno da chuva real e das chuvas de projeto. Na figura 5.12 encontra-se o resumo das principais características consideradas em cada cenário.

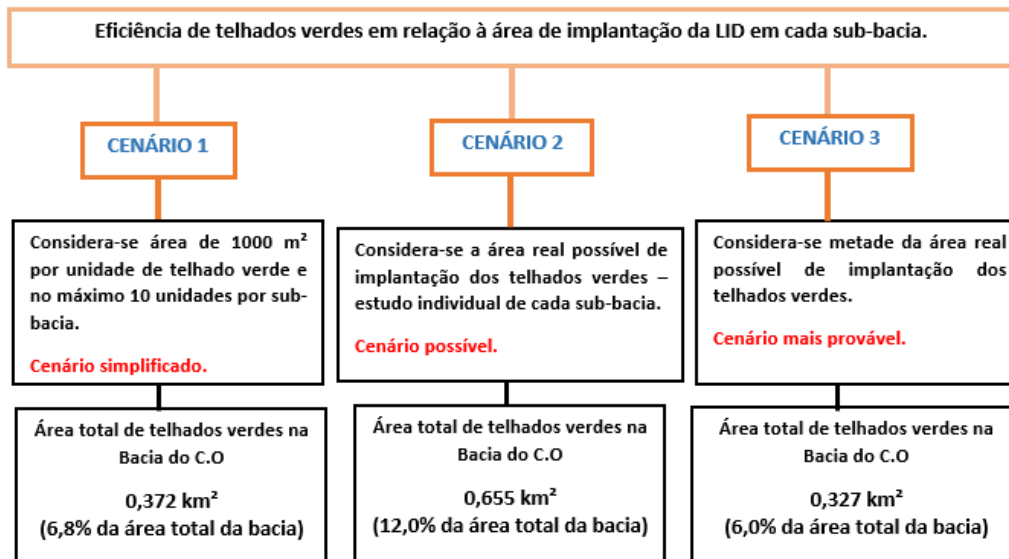


Figura 5.12: Fluxograma dos cenários considerados no projeto (2018).

A primeira simulação realizada foi para a chuva real, também utilizada para calibração do modelo por Costa (2013), cujo tempo de retorno é de 0,09 anos, tendo como base a equação de intensidade, duração e frequência do PDDU. O hidrograma resultante é apresentado na figura 5.13.

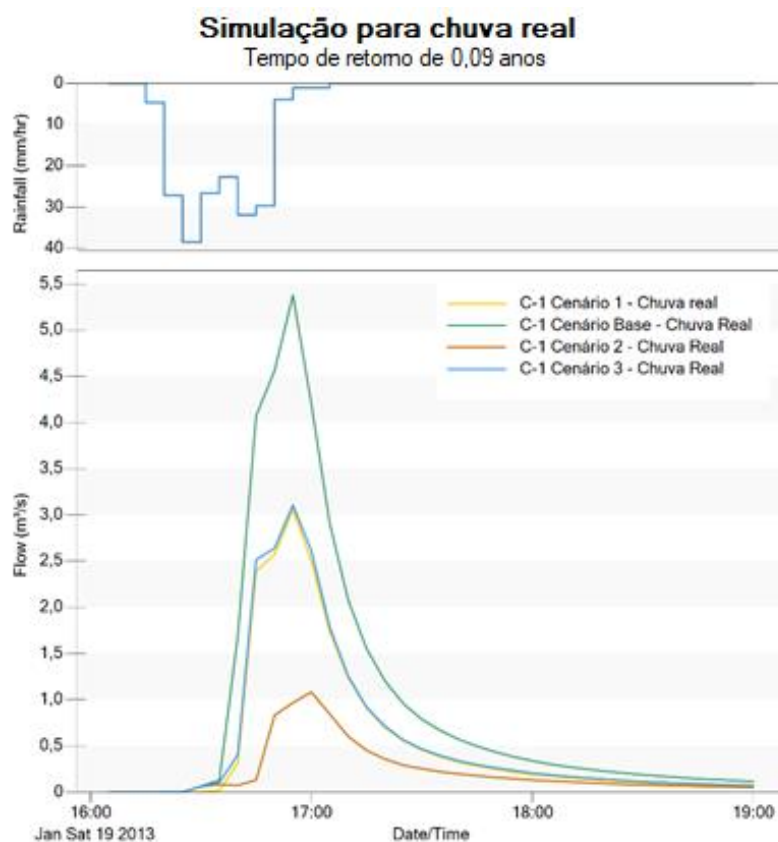


Figura 5.13: Hidrograma gerado para os cenários de base, 1, 2 e 3 referente à chuva real (TR=0,09 anos).

A partir da simulação, percebe-se que a vazão de pico gerada no cenário base é superior, como já esperado, tendo em vista a aplicação do controle LID de telhado verde nos demais cenários. Quanto ao tempo de duração do escoamento, uma pequena alteração foi observada nos cenários 1 e 3, sendo que o retardo mais significativo do escoamento foi visto no cenário 2, por este possuir maior área de aplicação de telhados verdes.

A tabela 5.4 resume os resultados obtidos para a simulação em relação aos parâmetros escolhidos, que representam as principais características do escoamento da região em um evento de chuva.

Tabela 5.4: Resultados obtidos na simulação referente à chuva real (TR=0,09 anos).

Parâmetro	Cenário Base	Cenário 1		Cenário 2		Cenário 3		
		Valor	Redução	Valor	Redução	Valor	Redução	
Chuva real	Vazão de pico (m ³ /s)	5,38	3,06	43,1%	1,08	79,9%	3,11	42,2%
	Volume total no exutório (m ³)	10430	5811	44,3%	2403	77,0%	6100	41,5%
	Velocidade máxima (m/s)	6,28	5,27	16,0%	3,56	43,3%	5,21	17,0%
	Volume total inundado (m ³)	0	0	-	0	-	0	-
	Poços de Visita inundados	0	0	-	0	-	0	-
	% Poços de Visita inundados	0	0	-	0	-	0	-
	Tempo máximo de inundação (min)	0	0	-	0	-	0	-

Para a chuva real, com tempo de retorno de 0,09 anos, o cenário 2 apresentou 79,9% de redução da vazão de pico em relação ao cenário base. Observa-se que os resultados estão condizentes em relação à redução do valor do parâmetro analisado e a área total de aplicação do telhado verde, sendo grandezas diretamente proporcionais.

No entanto, em relação à velocidade máxima, o cenário 1 apresentou uma porcentagem de redução menor, mesmo tendo maior área de controle LID que o cenário 3. Partiu-se então para análise da velocidade média, constatando que a redução do cenário 1 foi de 20,1% e do cenário 3 foi de 17,5%, em relação ao cenário base.

Para este evento de chuva, não foram verificados pontos de inundação tanto no cenário base, como nos três cenários de adoção de medidas de controle LID por telhado verde. Ou seja, os poços de visita não apresentaram transbordamento e inundação da área ao seu redor. No entanto, foram identificados alguns condutos com sobrecarga no cenário base (C-36, C-41 e C-46) e nos cenários com inserção de telhado verde (C-36 e C-46).

Salienta-se que os resultados obtidos estão condizentes com a literatura. Segundo Palla *et al.* (2008), os telhados verdes são capazes de deter significativamente o escoamento pluvial, e com o auxílio do SWMM para calibrar eventos de chuva real na bacia hidrográfica

de Colle Ometti, foram analisados cenários em relação a área ocupada pelos telhados verdes. Para inserção de telhados verdes em 10% dos telhados existentes na bacia, obteve-se 5% de redução na vazão de pico; e para 100% de substituição por telhados verdes, a vazão de pico reduziu-se 51%.

Outro estudo realizado em escala de bacia com evento de chuva real é apresentado por Nunes *et al.* (2017). Foram simuladas três sub-bacias da bacia do rio Morto, nas quais houve 100% de substituição dos telhados convencionais por telhados verdes. Os resultados mostraram redução da vazão de pico de 7,8%, 11,1% e 4,1% nas três sub-bacias, sendo a redução mínima do volume escoado de 3% e máxima 9%. O cenário com a inserção de telhados verdes de forma conjunta nas sub-bacias levou à redução da vazão de pico no exutório da bacia do rio Morto da ordem de 1,0%.

A seguir, serão analisados os resultados obtidos para a chuva de projeto do PDDU para tempo de retorno de 1 ano (tabela 5.5), assim como o hidrograma resultante desta simulação (figura 5.14).

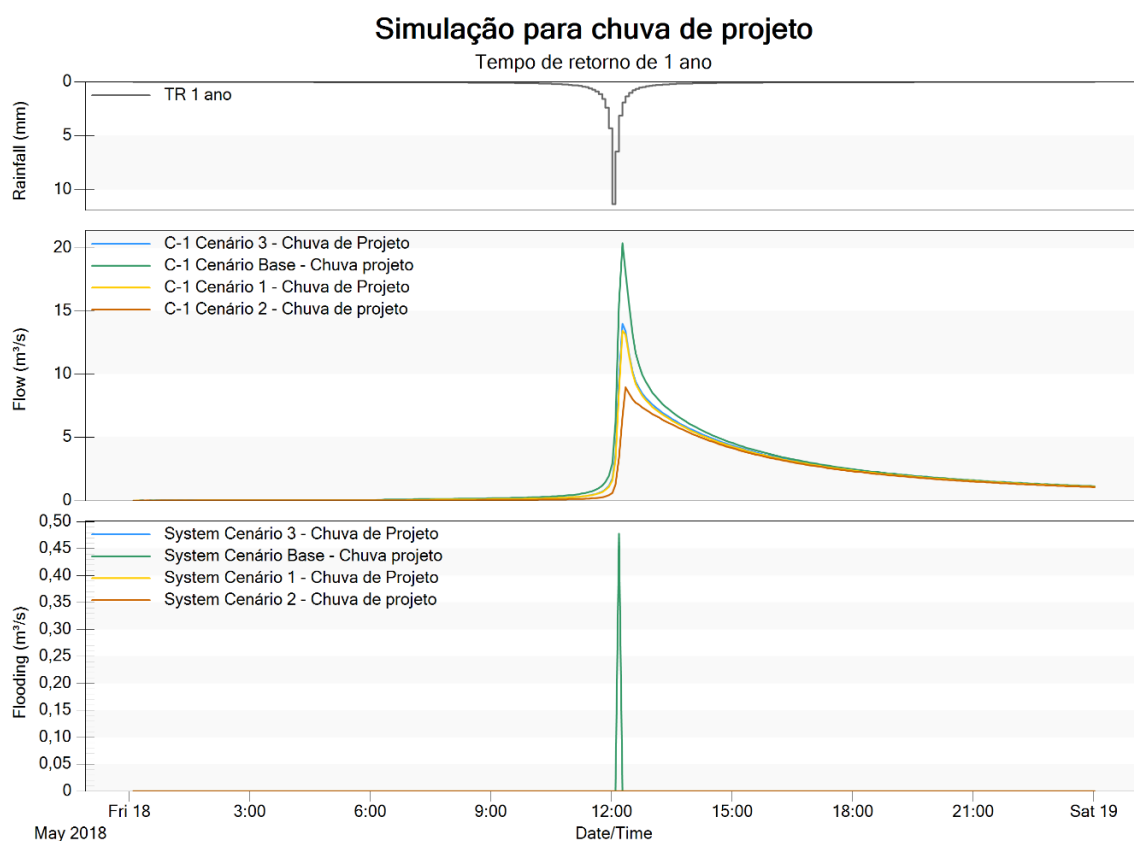


Figura 5.14: Hidrogramas gerados para os cenários de base, 1, 2 e 3 referente à chuva de projeto do PDDU (TR=1 ano).

Para o tempo de retorno de 1 ano, observa-se que o comportamento dos cenários 1 e 3 são bem semelhantes, sendo que um escoamento está sobreposto ao outro no hidrograma.

Além disso, a diferença entre o início da subida da vazão dos cenários com o controle LID em relação ao cenário base, foi menor para este tempo de retorno. A vazão dos cenários 1, 3 e base começa a elevar-se praticamente no mesmo momento, seguida pouco tempo depois pela vazão do cenário 2.

Tabela 5.5: Resultados obtidos na simulação referente à chuva de projeto do PDDU (TR=1 ano)

Parâmetro	Cenário Base	Cenário 1		Cenário 2		Cenário 3		
		Valor	Redução	Valor	Redução	Valor	Redução	
Chuva projeto TR 1 ano	Vazão de pico (m ³ /s)	20,37	13,42	34,1%	8,98	55,9%	13,98	31,4%
	Volume total no exutório (m ³)	166900	145200	13,0%	130500	21,8%	148000	11,3%
	Velocidade máxima (m/s)	9,33	8,31	11,0%	7,39	20,8%	8,41	9,9%
	Volume total inundado (m ³)	143,40	27	81,2%	32	77,7%	44	69,3%
	Poços de Visita inundados	4	2	50,0%	2	50,0%	2	50,0%
	% Poços de Visita inundados	6%	3%	50,0%	3%	50,0%	3%	50,0%
	Tempo máximo de inundação (min)	5,40	1,8	66,7%	2,4	55,6%	4,2	22,2%

De acordo com os resultados da tabela 5.5, houve redução de 55,9% da vazão de pico do cenário 2 em relação ao cenário base, sendo este valor inferior ao encontrado no evento de chuva real (79%), cujo tempo de retorno era menor. Comparando a redução do volume total no exutório, a diferença é ainda mais significativa. Para a chuva real, a redução chegou a 77% comparando o cenário 2 com o cenário base, enquanto que para a chuva de projeto com TR de um ano, a redução foi de apenas 21,8% para o volume total no exutório.

Além disso, pode-se observar que houve redução de 50% no número de poços de visita (PV) inundados, e que nos três cenários com controle LID a redução do volume total inundado foi superior a 60%.

No cenário base, quatro poços de visita foram inundados, sendo eles PV-26, PV-27, PV-31 e PV-311. Com a inserção do controle LID de telhado verde, nos três cenários, os PVs 26 e 27 já não apresentaram mais inundação. Apesar disso, o volume total inundado e o tempo máximo de inundação foram maiores no cenário 2 do que no cenário 1 (tabela 5.5).

Os poços de visita que continuaram inundados, o PV-31 e o PV-311, estão localizados na cabeceira da bacia do C.O, ou seja, recebem a parte drenada basicamente pelo autódromo (figura 5.15). Tendo em vista, que no cenário 2 a área de implantação dos telhados verdes foi analisada de acordo com a existência dos telhados convencionais, e que nesta sub-bacia há apenas alguns prédios e a arquibancada do autódromo, é de se esperar

que o volume drenado seja maior neste cenário em relação ao cenário 1, pois o armazenamento nos telhados verdes é muito baixo.

Já no cenário 1, por ser simplificado, foram colocadas 10 unidades de telhados verdes nesta sub-bacia com uma área fixa de 1000 m² cada, independente se existiam ou não telhados convencionais. Desta forma, o escoamento da sub-bacia 1 foi menor em relação ao cenário 2 por haver maior quantidade de telhados verdes e conseqüentemente, mais armazenamento.

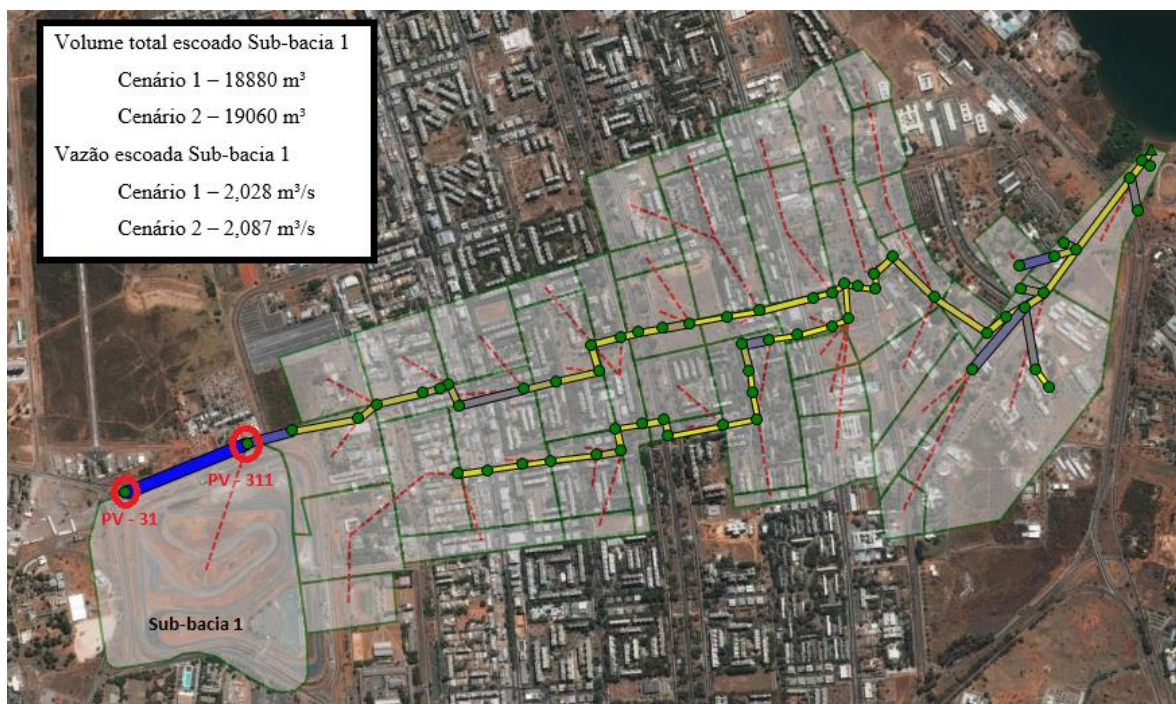


Figura 5.15: Representação dos poços de visita inundados e do escoamento gerado pela sub-bacia 1 para os cenários 1 e 2, chuva de projeto (TR=1 ano).

O Plano Diretor de Drenagem Urbana recomenda que para projetos de microdrenagem em áreas residenciais, comerciais e áreas de prédios públicos, o tempo de retorno utilizado para a chuva de projeto seja de 2 a 5 anos. Tendo isso em vista, escolheu-se também o tempo de retorno de 2 anos para simulação dos cenários em estudo, cujos resultados são apresentados na tabela 5.6 e os hidrogramas na figura 5.16.

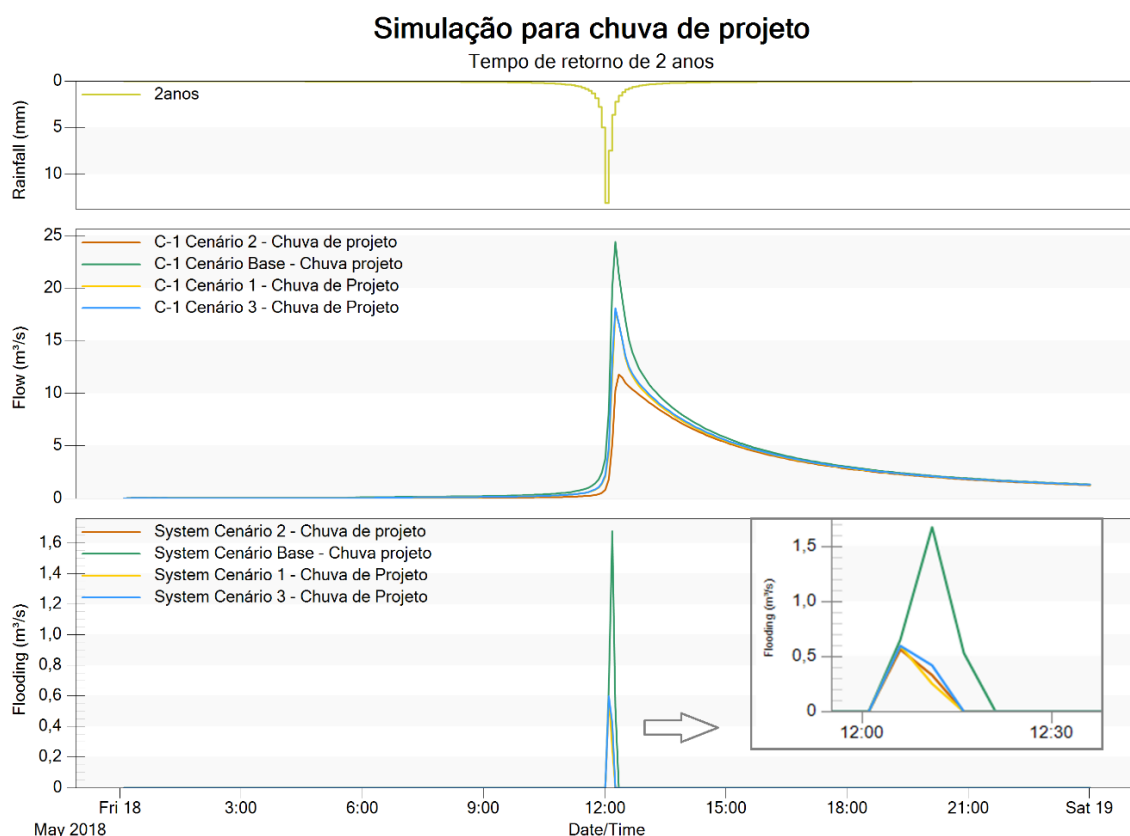


Figura 5.16: Hidrogramas gerados para os cenários de base, 1, 2 e 3 referente à chuva de projeto do PDDU (TR=2 anos).

Pode-se observar na figura 5.16 que o volume total inundado para o tempo de retorno de 2 anos da chuva de projeto do PDDU foi maior que nos eventos anteriores, justamente pela chuva ser mais intensa. No hidrograma da vazão no exutório da bacia, o comportamento do escoamento nos cenários 1 e 3 são semelhantes, sendo um sobreposto ao outro.

É possível perceber que com o aumento do tempo de retorno da chuva, menor é a diferença entre a subida do escoamento para o pico da vazão do cenário base em relação aos demais cenários.

Tabela 5.6: Resultados obtidos na simulação referente à chuva de projeto do PDDU (TR=2 anos)

Parâmetro	Cenário Base	Cenário 1		Cenário 2		Cenário 3		
		Valor	Redução	Valor	Redução	Valor	Redução	
Chuva projeto TR 2 anos	Vazão de pico (m³/s)	24,41	17,63	27,8%	11,77	51,8%	18,11	25,8%
	Volume total no exutório (m³)	208500	184100	11,7%	166900	20,0%	187200	10,2%
	Velocidade máxima (m/s)	9,77	8,97	8,2%	8,02	17,9%	9,05	7,4%
	Volume total inundado (m³)	857,6	253,1	70,5%	268,6	68,7%	305,1	64,4%
	Poços de Visita inundados	7	2	71,4%	2	71,4%	3	57,1%
	% Poços de Visita inundados	11%	3%	71,4%	3%	71,4%	5%	57,1%
	Tempo máximo de inundação (min)	10,8	8,4	22,2%	9	16,7%	9,6	11,1%

Analisando a vazão de pico, o cenário 2 apresentou redução de 51,8% referente ao cenário base e, como era de se esperar uma redução menor em relação à chuva com tempo de retorno de 1 ano (55,9%). Para os parâmetros de volume total inundado e tempo máximo de inundação, o cenário 2 resultou em valores de redução inferiores, comparando-se à redução do cenário 1, os dois referentes ao cenário base. Tal fator se deve à característica da sub-bacia 1 ser uma região que não possui muita área apta à instalação dos telhados verdes, como explicado anteriormente para o evento de tempo de retorno de 1 ano.

Os poços de visita inundados para o cenário base foram os PVs 8, 25, 26, 27, 28, 31 e 311; sendo que para os cenários 1, 2 e 3, o número de PVs inundados reduziu 71,4%, restando apenas os PVs 31 e 311, localizados na sub-bacia 1, do autódromo.

Para projetos de drenagem urbana em áreas comerciais e avenidas, o Plano Diretor de Drenagem Urbana recomenda utilizar o tempo de retorno de 5 a 10 anos, e para macrodrenagem a recomendação é de 10 a 25 anos. Tendo isso em vista, optou-se também por simular os cenários para o tempo de retorno de 10 anos; cujos resultados são apresentados na tabela 5.7 e na figura 5.17 através dos hidrogramas gerados.

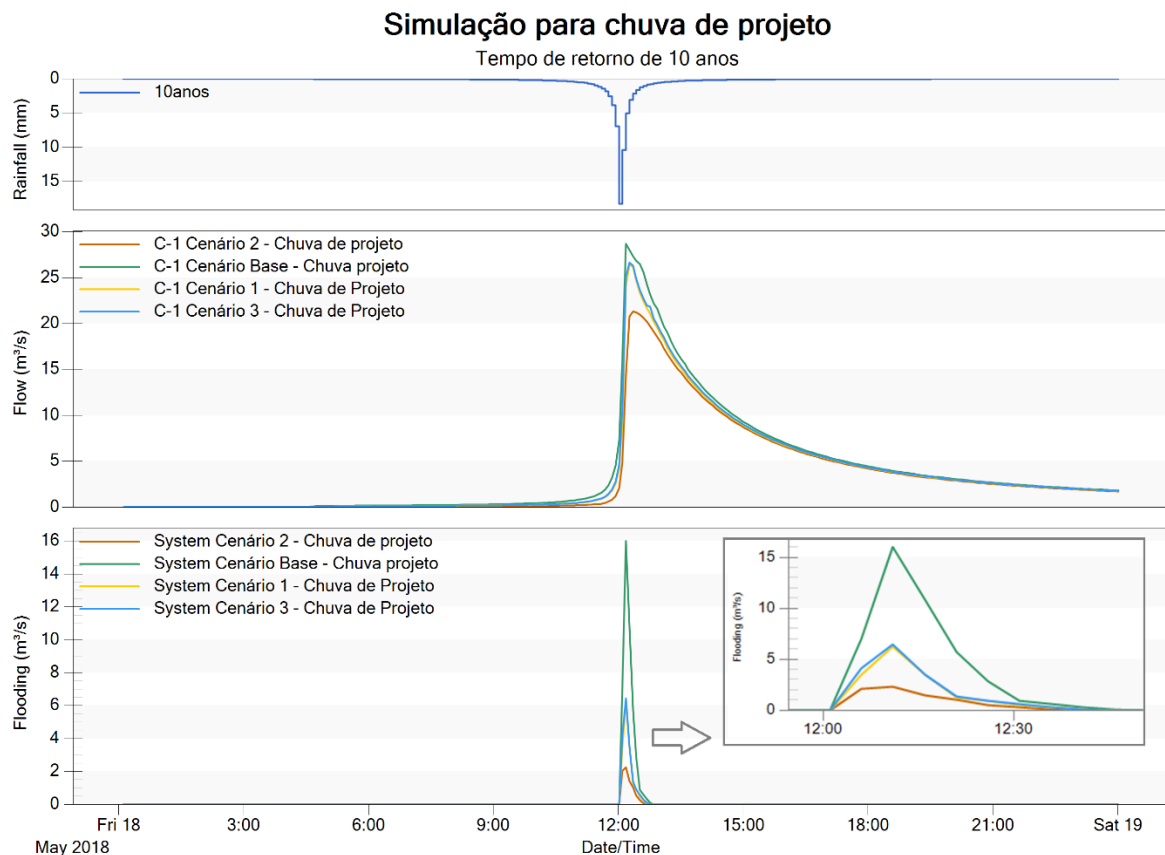


Figura 5.17: Hidrogramas gerados para os cenários de base, 1, 2 e 3 referente à chuva de projeto do PDDU (TR=10 anos).

Para a chuva de projeto com tempo de retorno de 10 anos, a rede de drenagem analisada foi insuficiente para o escoamento. Mesmo já havendo extravasamento de poços de visita para tempos de retorno de 1 e 2 anos, nesta simulação os valores aumentaram significativamente. O volume total inundado passou de 857,6 m³ no cenário base para tempo de retorno de 2 anos para 13270 m³ no tempo de retorno de 10 anos, havendo redução significativa de 82,9% para o cenário 2 em relação ao cenário base para esse último tempo de retorno.

Tabela 5.7: Resultados obtidos na simulação referente à chuva de projeto do PDDU (TR=10 anos)

Parâmetro	Cenário Base	Cenário 1		Cenário 2		Cenário 3		
		Valor	Redução	Valor	Redução	Valor	Redução	
Chuva projeto TR 10 anos	Vazão de pico (m ³ /s)	28,71	26,39	8,1%	21,34	25,7%	26,63	7,2%
	Volume total no exutório (m ³)	327400	301100	8,0%	278900	14,8%	305500	6,7%
	Velocidade máxima (m/s)	10,16	9,96	2,0%	9,45	7,0%	9,98	1,8%
	Volume total inundado (m ³)	13270	4812	63,7%	2274	82,9%	5183	60,9%
	Poços de Visita inundados	10	7	30,0%	4	60,0%	9	10,0%
	% Poços de Visita inundados	16%	11%	30,0%	6%	60,0%	15%	10,0%
	Tempo máximo de inundação (min)	43,8	36,6	16,4%	34,2	21,9%	37,8	13,7%

Parte do volume que deveria escoar pela rede permaneceu na superfície e para algumas sub-bacias, uma porcentagem considerável dos poços de visita extravasou. Para o cenário base, há 16% dos poços de visita inundados e no cenário 2, que apresentou maior redução, esse valor passou a ser 6%.

Os poços de visita inundados para o cenário base foram os PVs 8, 26, 27, 28, 29, 31, 36, 46, 57 e 311, enquanto que para o cenário 2 apenas quatro desses continuaram inundando, os PVs 26, 27, 31 e 311, justamente pelo escoamento da sub-bacia 1.

Ao analisar o perfil no qual se encontra os poços de visita inundados, percebe-se que a linha piezométrica de fluxo reduz consideravelmente com a adoção dos telhados verdes (figura 5.18).

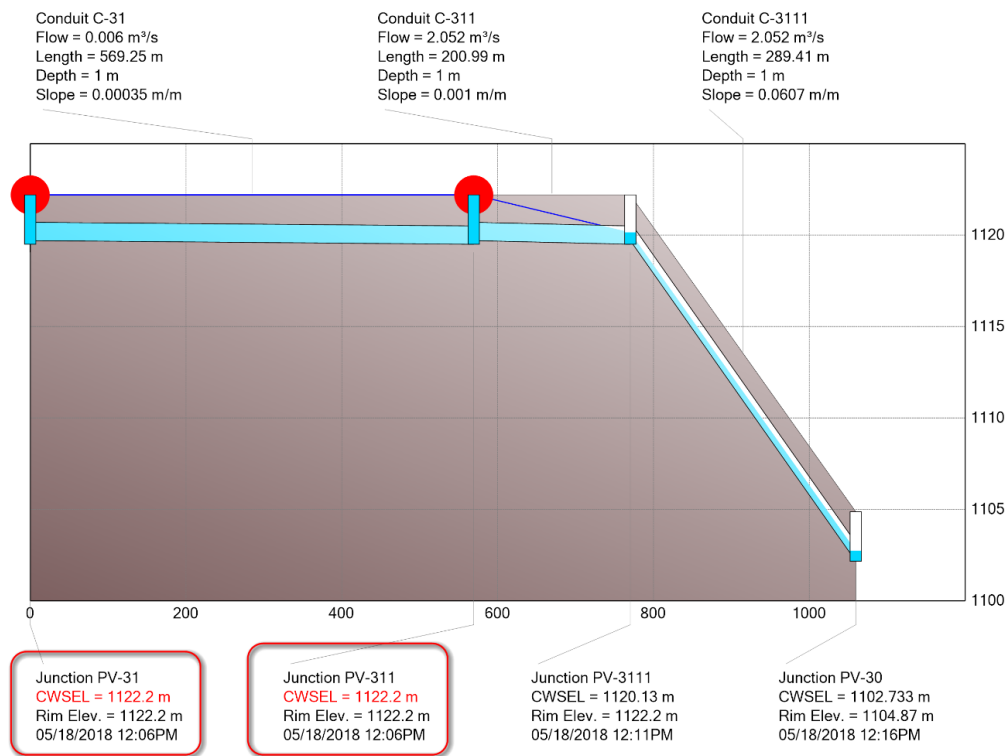


Figura 5.18: Perfil de drenagem para o cenário base e cenário 2, indicando os poços de visita 31 e 311 para evento com TR=10 anos.

Fileni (2017) utilizou a mesma equação da curva IDF, do Plano Diretor de Drenagem Urbana e com o tempo de retorno de 10 anos, simulou diversos cenários no PCSWMM para adoção de medidas compensatórias de drenagem urbana na região de Ceilândia – DF. Para um cenário com aplicação de pavimento permeável e bacias de quantidade no final da rede, a redução da vazão de pico em relação ao cenário atual simulado por Fileni (2017), apresentou valor mínimo de 83% (bacia cuja área é 1,41 km²) e valor máximo de 88% (bacia cuja área é de 0,22 km²).

Para o mesmo tempo de retorno a simulação para o cenário 2, com implantação de unidades de controle LID de telhado verde, resulta em uma redução de 25,7% em relação ao cenário base. Mesmo a área de estudo sendo diferente nos dois projetos em questão, é possível perceber que a adoção de telhados verdes é uma alternativa viável e efetiva. No entanto, para eventos de chuva intensos, esta técnica não traz significativa redução da vazão de pico, sendo necessária aplicação em conjunto com outras medidas de controle, como os pavimentos permeáveis.

Outro exemplo de modelagem de telhado de verde através do SWMM é observado no estudo de Saddi e Moura (2010) em um loteamento popular em Goiânia. Na situação simulada, um lote teria sua vazão de pico reduzida em 36,36% com implantação de telhados

verdes, e que para todo o condomínio este pico sofreria uma redução de 20%; mostrando então outra vertente de análise do impacto de telhados verdes, em escala de lote.

Por fim, foi analisada a chuva de projeto para tempo de retorno de 100 anos. Segundo o Plano Diretor de Drenagem Urbana, quando existir risco de vida humana deve-se buscar definir um programa de defesa civil e alerta além de utilizar o limite de 100 anos para o projeto de drenagem urbana. Mesmo não sendo este o caso da bacia do C.O, decidiu-se simular somente o cenário 1 para TR=100 anos, a fim de verificar se há alterações no escoamento quando a chuva é muito intensa, estando os telhados verdes provavelmente já saturados. Os resultados da simulação são apresentados na tabela 5.8 e na figura 5.19.

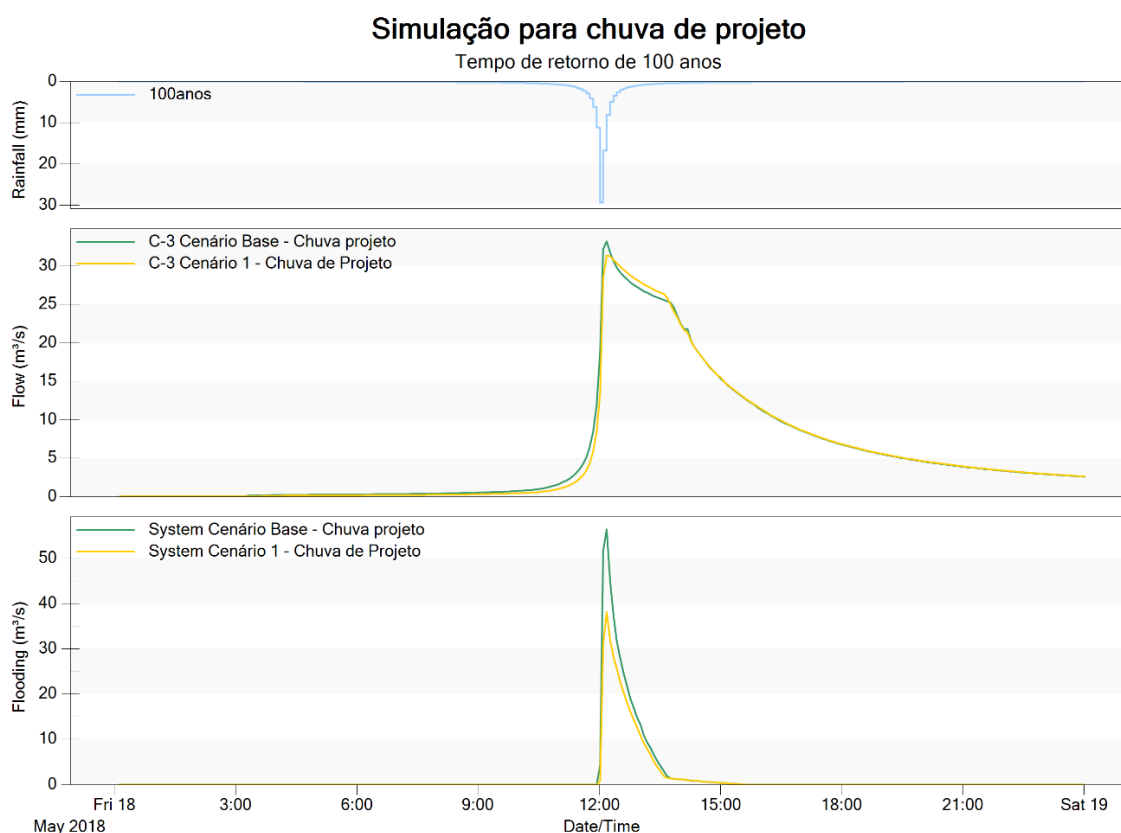


Figura 5.19: Hidrogramas gerados para os cenários de base, 1, 2 e 3 referente à chuva de projeto do PDDU (TR=100 anos).

Tendo em vista a alta intensidade da chuva, era esperado que os hidrogramas se comportassem de forma semelhante tanto para o cenário 1, com telhados verdes, como para o cenário base. A redução da vazão de pico com a inserção dos telhados verdes foi apenas 6,7% (tabela 5.8), sendo que o volume total no exutório reduziu em 2,0%, tornando-se uma diferença insignificante.

Tabela 5.8: Resultados obtidos na simulação referente à chuva de projeto do PDDU (TR=100 anos).

	Parâmetro	Cenário Base	Cenário 1	
			Valor	Redução
Chuva propor TR 100 anos	Vazão de pico (m ³ /s)	35,13	32,79	6,7%
	Volume total no exutório (m ³)	514100	503900	2,0%
	Velocidade máxima (m/s)	10,64	10,48	1,5%
	Volume total inundado (m ³)	128800	97530	24,3%
	Poços de Visita inundados	23	16	30,4%
	% Poços de Visita inundados	37%	26%	30,4%
	Tempo máximo de inundação (min)	222	222	0,0%

5.2.4 – Análise da espessura do substrato de telhados verdes

Tendo em vista a parte experimental deste projeto com o monitoramento das unidades piloto de telhado verde, decidiu-se analisar para o tempo de tempo de retorno de 1 ano, o comportamento desse controle LID para as profundidades de 10, 15 e 20 cm de substrato.

O desempenho dos controles LID de uma sub-bacia se reflete pela sua influência sobre o escoamento superficial, a infiltração e a evaporação apresentados no relatório do SWMM para a sub-bacia em estudo. No entanto, no relatório do estado existe uma seção dedicada ao resumo do desempenho de controles LIDs, que fornece um balanço hídrico completo para cada controle LID. Os componentes desse balanço são as vazões afluentes ao controle, a infiltração, a evaporação, o escoamento superficial, a vazão subtraída pelo dreno profundo e a água armazenada no início e no final do cálculo. Cada componente é expresso em milímetros sobre a área do controle LID.

Considerando as camadas que compõem os telhados verdes e que a evaporação foi desconsiderada pelo fato da simulação ser a curto prazo, foram analisados os resultados obtidos para a sub-bacia 4. Para o telhado verde de 20 cm de profundidade de substrato, o armazenamento final obtido foi de 112,55 mm. No telhado verde de 15 cm, o armazenamento final foi de 99,55 mm. E por fim, para o telhado verde de 10 cm, houve 86,55 mm de armazenamento final.

Os resultados obtidos condizem com os dados experimentais de Salerno (2017), visto que o telhado verde de 20 cm pode armazenar maior quantidade de água, dependendo de vários fatores como umidade, vegetação e inclinação da estrutura. Outros resultados estão na figura 5.20.

Comportamento dos telhados verdes

10, 15 e 20 cm de espessura de substrato

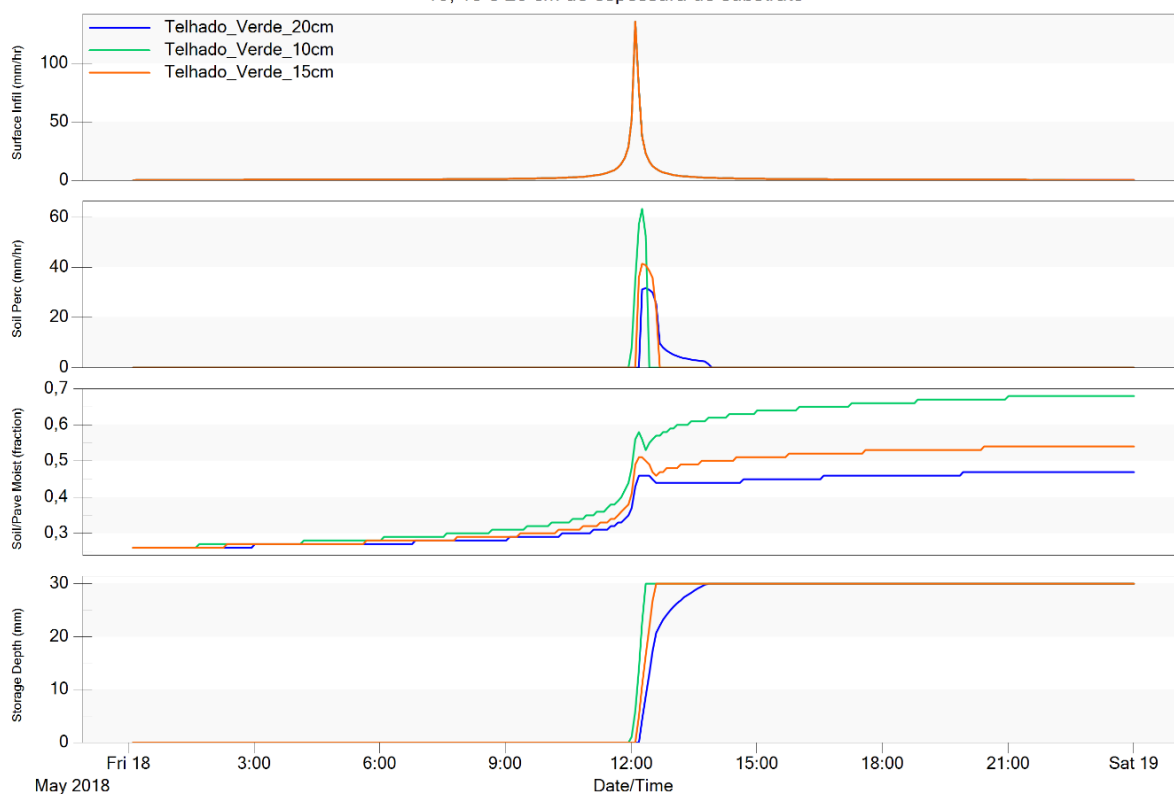


Figura 5.20: Comportamento dos telhados verdes de 10, 15 e 20 cm de profundidade de substrato.

O primeiro gráfico da figura 5.20 refere-se à infiltração na superfície que é igual para as três variações de telhado verde, visto que a simulação foi feita com o mesmo evento de chuva de projeto de 1 ano de tempo de retorno. O segundo gráfico mostra a taxa de percolação no solo em mm/h, ou seja, por apresentar menor profundidade de solo, o telhado verde de 10 cm apresenta maior taxa de percolação que também ocorre de forma mais rápida em relação aos outros dois telhados verdes.

O terceiro gráfico demonstra a umidade do solo para as três variações de telhado verde sendo que, quanto menor a espessura do solo mais úmido ele se encontra. O último gráfico relaciona a profundidade armazenada de água em mm, visto que todas as unidades atingem 30 mm de armazenamento, ou seja, a espessura da camada drenante. Vale ressaltar que para o telhado verde de 20 cm, o armazenamento máximo leva mais tempo para ser atingido.

5.2.5 – Influência dos telhados verdes em escala de sub-bacia

Neste tópico serão apresentados os resultados obtidos para determinadas sub-bacias, com o intuito de avaliar o impacto deste controle LID em uma escala menor do que a vista até o momento. Escolheu-se três sub-bacias com áreas semelhantes e porcentagens de área ocupada por telhado verde bem distintas. A análise foi feita para a chuva de projeto com tempo de retorno de 1 ano, considerando o cenário 2.

Tabela 5.9: Características das sub-bacias

Parâmetro	Sub-bacia 4		Sub-bacia 44		Sub-bacia 37	
	Cenário base	Cenário 2	Cenário base	Cenário 2	Cenário base	Cenário 2
Área total (m ²)	110.466,47	110.466,47	110.429,34	110.429,34	113.160,97	113.160,97
Área ocupada por telhados verdes (m ²)	-	27.163,70	-	13.579,66	-	213,09
Área ocupada por telhados verdes	-	24,59%	-	12,30%	-	0,19%
Área impermeável	24,59%	0,00%	2,98%	2,79%	11,16%	0,00%
Vazão máxima escoamento (m ³ /s)	0,89	0,20	0,42	0,12	0,19	0,18
Volume total escoado (m ³)	4.195,00	2.522,00	3.347,00	2.591,00	3.332,00	3.319,00
Coefficiente de escoamento	0,63	0,38	0,50	0,39	0,49	0,49

Pode-se observar através da tabela 5.9, que a sub-bacia 4 por ser uma região residencial, possui maior área apta à aplicação de telhados verdes e com isso, houve grande redução da vazão de pico (77%), assim como do coeficiente de escoamento superficial que passou de 0,63 para 0,38.

Na região da sub-bacia 44, há várias ruas asfaltadas e apenas alguns prédios residenciais, sendo assim a área de implantação de telhados verdes foi menor e com a existência ainda de áreas impermeáveis. A vazão de pico reduziu em 71, 4% e o coeficiente de escoamento passou de 0,5 para 0,39.

Na região da sub-bacia 37 há predominância de áreas verdes, sendo assim, houve pouca inserção de telhados verdes e por ser majoritariamente permeável, a sub-bacia apresentou coeficiente de escoamento de 0,49.

Na figura 5.21 observa-se que com a inserção de telhados verdes, as sub-bacias 4 e 44 tiveram sua vazão de pico próxima à da sub-bacia 37. Vale ressaltar que esta medida de controle LID, mesmo amenizando os impactos da excessiva impermeabilização do solo, não

substitui de forma alguma a capacidade de infiltração e amortecimento do escoamento que as áreas verdes naturais da bacia oferecem.

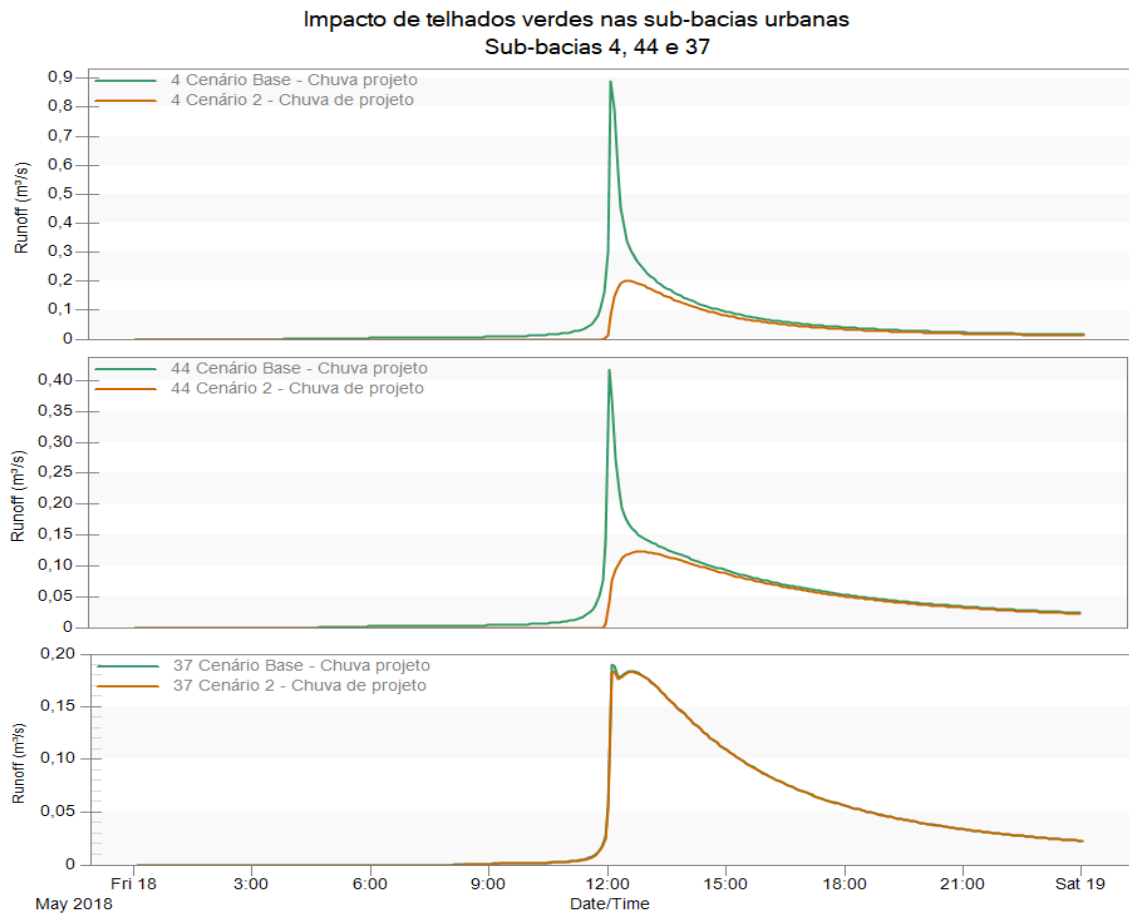


Figura 5.21: Impacto de telhados verdes em escala de sub-bacia urbana.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Por meio do monitoramento e modelagem de telhados verdes, verificou-se a viabilidade desta técnica de desenvolvimento de baixo impacto em relação à minimização dos impactos gerados pela impermeabilização excessiva do solo, aplicada às condições climáticas do Distrito Federal.

As unidades piloto de telhados verdes foram monitoradas por 4 meses, mostrando eficiência de retenção de água de 29% para a unidade piloto de 10 cm de substrato; 30% para a unidade com 20 cm de substrato e 34% para a unidade de 15 cm de substrato. Sendo que esta última, mostrou melhor desenvolvimento da vegetação em relação às demais.

Constatou-se que mesmo com compactação do substrato, a eficiência das unidades piloto de telhado verde foi satisfatória e que o volume de água drenado por cada unidade é suficiente para sua manutenção no período de seca. É importante ressaltar a necessidade do monitoramento das estruturas por um longo período de tempo. Tendo em vista avaliar o comportamento das raízes da vegetação em relação a perfurações no geotêxtil, como também à preservação da estrutura quanto a infiltrações e desgastes.

O SWMM foi utilizado com sucesso para modelar diretamente o controle LID de telhado verde. Cada controle é representado como um objeto LID exclusivo com seu próprio conjunto de propriedades. Esses objetos foram colocados em determinadas áreas de cada sub-bacia de forma replicada ou individualmente. Modelos de balanço hídrico dependentes do tempo foram usados para descrever o desempenho hidrológico de cada unidade LID, consistindo em combinações de camadas de superfície, solo e armazenamento submetidas a processos hidrológicos como infiltração, percolação, evapotranspiração, e escoamento superficial.

A modelagem hidrológica permitiu avaliar o comportamento da rede de drenagem no cenário base, sem inserção de telhados verdes, e em cenários com ampla adoção deste controle LID. Além disso, foram obtidos resultados para evento de chuva real e eventos de chuvas de projetos com tempos de retorno de 1, 2, 10 e 100 anos.

Os resultados obtidos foram satisfatórios, considerando os processos de calibração e verificação da bacia. Foi possível verificar através de diversos cenários que o telhado verde, como técnica de drenagem sustentável, contribui para atenuação do pico de vazão na saída da rede de drenagem.

Salienta-se que mesmo sendo uma tecnologia útil para prevenção de fenômenos de inundação de áreas urbanas, apenas a implantação em grande escala de coberturas verdes

não resolve os problemas do escoamento urbano; devendo ser inserida em conjunto com outras medidas compensatórias de drenagem urbana como os pavimentos permeáveis e trincheiras de infiltração.

O cenário 2, com substituição completa dos telhados convencionais por telhados verdes, demonstrou os maiores valores para redução da vazão de pico em relação ao cenário base, sem telhados verdes, chegando a 79,9% para o evento de chuva real. Já o cenário 3, considerado o mais provável por apresentar a metade da área de implantação do controle LID do cenário anterior, com uma ocupação de 6% da bacia por telhado verde, apresentou redução de 42,2% na vazão de pico.

Vale ressaltar que a inserção dos telhados verdes diminuiu em todos os cenários a quantidade de poços de visita inundados, principalmente nas sub-bacias que possuem maior área impermeável constituída por telhados convencionais. Além disso, é notório que este controle LID torna-se mais eficiente para chuvas com pequenos tempos de retorno, ou seja, chuvas ordinárias. A partir do tempo de retorno de 10 anos, perde sua eficiência nos sistemas de drenagem devido à saturação do solo de suas camadas de armazenamento.

Esta técnica é uma boa alternativa para ser inserida em uma política adequada de planejamento de uso e ocupação da terra para novos assentamentos considerando seus benefícios ambientais tanto do ponto de vista hidrológico, como térmico e paisagístico.

Recomenda-se a continuação do monitoramento dos protótipos a fim de analisar as estruturas a longo prazo, durante todo o período de seca e chuva. Vale ressaltar a importância de se utilizar outros métodos de monitoramento da umidade do solo, além dos tensiômetros.

Para a aplicação das coberturas verdes no Distrito Federal, aconselha-se que a metodologia explanada neste projeto seja administrada com uma vegetação típica do cerrado, para verificar sua adaptação em relação à grama esmeralda.

Para trabalhos futuros sugere-se que a evapotranspiração seja considerada na modelagem, a fim de se obter maior precisão no efeito de retenção de água em termos de redução do volume escoado; e que haja também análise do desempenho térmico a partir da cobertura verde implantada, assim como análise da qualidade da água drenada pelas estruturas e alternativas para viabilizar seu aproveitamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, A. P. C. S.; SQUIZZATO, R.; CONSTANZI, R.; BALDIN, M. G.; PUZZI, L. C. M. (2014). **Balanço Hídrico de Sistema Modular para Telhado Verde**. 18. ed. Goiânia: Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer. 10 v.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 15527. (2007). **Água de chuva - Aproveitamento de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis – Requisitos**. Rio de Janeiro.

ATLAS CAESB. Mapa de Hidrometeorologia. Disponível em: <<https://atlas.caesb.df.gov.br/Hidrometeorologia/>> Acesso em: 07 jun. 2018.

BAHIENSE, J. M. (2013). **Avaliação de técnicas compensatórias em drenagem urbana baseadas no conceito de desenvolvimento de baixo impacto, com o apoio de modelagem matemática**. 144 f. Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

BALDESSAR, S. M. N. (2012). **Telhado Verde e sua contribuição na redução da vazão da água pluvial escoada**. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia da Construção Civil, Departamento de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

BRASIL. (2007). Lei nº 11445, de 5 de janeiro de 2007. **Diretrizes nacionais para o saneamento básico**.

BRASIL. (2017). Lei Distrital nº 5965, de 16 de agosto de 2017. **Programa IPTU Verde**.

BRASIL. (2006). Ministério das Cidades. **Programa drenagem urbana sustentável**. Manual para apresentação de propostas. 23 f.

BUDEL, M. A. (2014). **Estudo comparativo da qualidade da água de chuva coletada em cobertura convencional e em telhado verde**. 128 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil em Recursos Hídricos e Saneamento pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba.

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

CASTRO, A. S. (2011). **Uso de pavimentos permeáveis e coberturas verdes no controle quali-quantitativo do escoamento superficial urbano**. 161 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

CASTRO, L. M. A. (2007). **Proposição de metodologia para a avaliação dos efeitos da urbanização nos corpos de água**. 321 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

CIPOLLA, S. S; MAGLIONICO, M; STOJKOV, I. (2016). **A long-term hydrological modelling of na extensive green roof by means of SWMM**. Ecological Engineering. Elsevier, p. 876-887, abril, 2016.

COSTA, M. E. L. (2013). **Monitoramento e Modelagem de águas de drenagem urbana na bacia do Lago Paranoá**. 197 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília, Brasília.

COUTINHO, L. M. **Aspectos do Cerrado – Clima**. Disponível em: <http://eco.ib.usp.br/cerrado/aspectos_clima.htm> Acesso em 26 out. 2017.

DAVALO, M. J. (2013). **Curva de retenção de água no solo estimado pelo método da câmara de Richards e psicrômetro**. 48 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de ciências agrárias e veterinárias. Universidade Estadual Paulista. 2013.

DYM, C. L. (1980). **Principles of Mathematical Modeling**. 2 ed. New York: Academic Press.

ECOTELHADO. Disponível em < <https://ecotelhado.com/produto/ecotelhado-telhado-verde/>> Acesso em: 21 out. 2017.

ECOTELHADO. **Sistema da ecotelhado é exemplo de sustentabilidade em Brasília**. Disponível em <<https://ecotelhado.com/sistema-da-ecotelhado-e-exemplo-de-sustentabilidade-em-brasilia/>> Acesso em 26 out. 2017.

EMBRAPA. (1997). **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 212 p. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Ministério da Agricultura e do Abastecimento. 2. Ed. Rio de Janeiro.

EMBRAPA. (2005). **Sistema de Produção de Uva de Mesa no Norte do Paraná**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Manejo de Irrigação: Sistema de Produção.

FERREIRA, C. A; MORUZZI, R, B. (2007). **Considerações sobre a aplicação do telhado verde para captação de água de chuva em sistemas de aproveitamento para fins não potáveis**. p 1027-1036. IV Encontro nacional e II encontro latino-americano sobre edificações e comunidades sustentáveis. Campo Grande, Mato Grosso do Sul.

FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J. (2000). **Hidrogeologia: Conceitos e aplicações**. 404 p. 2. ed. Fortaleza: Cprm - Serviço Geológico do Brasil.

FILENI, F. (2017). **Modelagem quantitativa da drenagem urbana e proposições de drenagem sustentável para a região de Ceilândia - DF**. 93 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília.

FUJIWARA, F. L. A; SANTOS, L S. (2016). **Avaliação da tecnologia de telhados verdes em escala piloto e estimativa de retenção de água em edificações prediais em Brasília/DF**. 64 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília.

GEOPORTAL. Disponível em <<https://www.geoportal.segeth.df.gov.br/mapa/>> Acesso em 20 jun. 2018.

GOMES, H. P; SALVINO, M. M; SILANS, A. P; ALMEIDA, C.N; SILVA, G. N. S. (2012). **EPA SWMM 5.0 Modelo de Gestão de Drenagem Urbana**: Manual do usuário. Disponível em: <http://www.lenhs.ct.ufpb.br/html/downloads/swmm/SWMM_2012.pdf>. Acesso em: 29 set. 2017.

GOVERNO DO DISTRITO FEDERAL – GDF. (2009). Secretaria de Estado de Obras. **Plano Diretor de Drenagem Urbana do Distrito Federal**. Brasília, Concremat Engenharia, v. 2, 2009.

HATHAWAY, A. M; HUNT, W. F; JENNINGS, G. D. (2008). **A field study of green roof hydrologic and water quality performance**. American Society of Agricultural and Biological Engineers, Raleigh, v. 51, p. 37-44.

INMET. Disponível em <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>> Acesso em 29 out. 2017.

INSTITUTO CIDADE JARDIM. **Um gigante verde em Brasília – telhado verde 3300 m²**. Disponível em: <<https://institutocidadejardim.wordpress.com/2015/12/31/um-gigante-verde-em-brasilia-telhado-verde-3300m2/>> Acesso em 21 out. 2017.

INSTITUTO CIDADE JARDIM. **Telhado verde e energia solar fotovoltaica: juntos e 8,3% mais eletricidade**. Disponível em: <<https://institutocidadejardim.wordpress.com/2016/01/11/telhado-verde-e-energia-solar-fotovoltaica-juntos-e-83-mais-eletricidade/>> Acesso em 21 out. 2017.

INSTITUTO CIDADE JARDIM. **Programas de incentivo turbinam o mercado de telhados verdes na América do Norte em 2016**. Disponível em: <<http://institutocidadejardim.com.br/2017/09/13/programas-de-incentivo-turbinam-o-mercado-de-telhados-verdes-na-america-do-norte-em-2016/>> Acesso em 26 out. 2017.

INSTITUTO CIDADE JARDIM. **Village Mall – Rio de Janeiro**. Disponível em: <http://www.studiocidadejardim.com.br/cases/RoomsListItem0_hvis0iyt667_0/Village-Mall-Rio-de-Janeiro> Acesso em 26 out. 2017.

IPCC. (2014). **Climate Change 2014: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p. 2014.

JOBIM, A. L. (2013). **Diferentes tipos de telhados verdes no controle quantitativo da água pluvial**. 76 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, RS.

LAROCHE, D. (2004). **Les Toits Verts aujourd’hui: c’est construire Le Montréal de Demain**. Montréal, 2004.

LORENZINI NETO, F. (2014). **Modelagem de telhado verde: uma análise da eficiência no controle do escoamento pluvial em diferentes escalas**. 137 f. Dissertação (Mestrado) -

Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

LYCÉE FRANÇAIS FRANÇOIS MITTERRAND. Disponível em: <<http://www.lyceefrancaisbrasil.com/historique>> Acesso em 21 out. 2017.

MANUAL DE DRENAGEM URBANA. (2017). Secretaria do Planejamento Estratégico, Estado do Paraná, Município de Toledo, Vol. 1. Agosto, 2017.

MARQUELLI, W. A. (2008). **Tensiômetros para o controle de irrigação em hortaliças**. Circular Técnica. Embrapa Hortaliças.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Disponível em <<http://www.mma.gov.br/agua/recursos-hidricos/aguas-subterraneas/ciclo-hidrologico>> Acesso em 24 out. 2017.

MOURA, P. M. (2004). **Contribuição para a avaliação global de sistemas de drenagem urbana**. 146 f. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

NUNES, D. M; FONSECA, P. L; SILVA, L. P. (2017). **Avaliação do papel dos telhados verdes no desenho e desenvolvimento urbano de baixo impacto ambiental e no controle de enchentes na cidade do Rio de Janeiro**. Labor e Engenho, Campinas, SP, v. 11, n. 3, p. 374-393, jul./set. 2017.

NOVACAP. (2012). **Termo de referência e especificações para elaboração de projetos de sistema de drenagem pluvial no Distrito Federal**. Outubro/ 2012.

PALLA, A; BERRETA, L. G; LANZA, L. G; BARBERA, P. (2008). **Modelling storm water control operated by green roofs at the urban catchment scale**. 11^a Conferência Internacional de Drenagem Urbana.

PALMEIRA, A. N. (2016). **Balço de energia em telhado verde**. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

PANZIERA, A. G; CALIL, V. S; AMARAL, F. D; SWAROWSKY, A. (2015). **Desempenho de diferentes tipos de telhado verde no conforto térmico urbano na cidade de Santa Maria, RS**. Disciplinarum Scientia: Naturais e Tecnológicas, Santa Maria, v. 16, n. 3, p.445-457, mar. 2015.

PINTO, N. L. S; HOLTZ, A. C. T; MARTINS, J. A; GOMIDE, F. L. S. (1976). **Hidrologia Básica**. São Paulo: Blucher. 212 p.

POUEY, M. T. F. (1998). **Estudo experimental do desempenho térmico de coberturas planas – vegetação e terraço**. 166 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em engenharia civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

REICHARDT, K. (1978). **A água na produção agrícola**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil. 119 p.

- REICHARDT, K. (1990). **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Editora Manole. 188p.
- RIOS, M. N. S; RIBEIRO, J. F. (2014). **Enraizamento de estacas de cinco espécies de mata de galeria em diferentes épocas do ano**. Enciclopédia Biosfera: Centro Científico Conhecer, Goiânia, v. 10, n. 18, p.1524-1536, jan. 2014.
- ROSSETI, K. A. C; NOGUEIRA, M. C. J. A; CALLEJAS, I. J. A; DURANTE, L. C; KUHNEN, I. A; NOGUEIRA, J. S. (2014). **Efeitos de telhados vegetados no conforto térmico de pedestres, simulação pelo software ENVI-MET**. Encontro nacional de tecnologia do ambiente construído. Maceió, Alagoas. Novembro, 2014.
- ROSSMAN, L. A. (2010). **Storm Water Management Model User's Manual Version 5.0**. Cincinnati: U. S. Environmental Protection Agency, 2010a.
- ROSSMAN, L. A. (2010). **Modeling Low Impact Development Alternatives with SWMM**. Journal of Water Management Modeling. CHI Journal. 2010b.
- ROSSMAN, L. A. (2016). **Storm Water Management Model Reference Manual – Volume I: Hydrology (Revised)**. Cincinnati. U.S. Environmental Protection Agency (EPA). 2016.
- SADDI, K. G; MOURA, R. O. (2010). **Coberturas verdes: análise do impacto de sua implantação sobre a redução do escoamento superficial**. 73 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia.
- SALERNO, A. G. (2017). **Estudo em escala piloto da viabilidade do emprego de telhados verdes no Distrito Federal por meio da avaliação quali-quantitativa da água efluente**. 93 f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília.
- SEGETH. **Geoportal**. Disponível em: <<https://www.geoportal.segeth.df.gov.br/mapa/#>> Acesso em 28 nov. 2017.
- SHERRAD, J. A; JACOBS, J. M. (2012). **Vegetated roof water-balance model: Experimental and models results**. Journal of Hidrologic engineering. v. 17, p 858-868, ago. 2012.
- SILVA, F. T. A; LIMA, L. D. (2016). **Drenagem urbana: o impacto do surgimento de novos loteamentos no escoamento superficial – setor de habitações coletivas noroeste**. 116 f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília.
- SOUSA, S. P. C. (2016). **Avaliação do impacto da urbanização sobre o escoamento superficial por meio de simulação hidrológica**. 72 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, Paraíba.
- SOUZA, C. F; CRUZ, M. A. S; TUCCI, C. E. M. (2012). **Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto: Planejamento e Tecnologias Verdes para a Sustentabilidade das Águas Urbanas**. Rbrh – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Rio Grande do Sul, v. 17, n. 2, p.9-18, jun. 2012.

- TUCCI, C. E. M. (2003). **Drenagem Urbana**. São Paulo: Ciência e Cultura, v. 55, 2003.
- TUCCI, C. E. M. (2002). **Gerenciamento da Drenagem Urbana**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v.7, n.1, p. 5-27, 2002.
- TUCCI, C. E. M. (2005). **Gestão de águas pluviais urbanas: saneamento para todos**. Brasília: Programa de Modernização do Setor Saneamento - Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental - Ministério das Cidades, 197 p. 2005a.
- TUCCI, C. E. M. (2009). **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: Abrh. 946 p. 2009.
- TUCCI, C. E. M. (2007). **Inundações Urbanas**. 1 ed. Porto Alegre, ABRH, 2007.
- TUCCI, C. E. M. (2005). **Modelos Hidrológicos**. 2 ed. Editora da Universidade – UFRG, 680 p. 2005b.
- YAZAKI, L. F. O; MONTENEGRO, M. H. F; COSTA, J. (2018). **Manual de drenagem e manejo de águas pluviais urbanas do Distrito Federal (ADASA)**. Brasília, DF; Adasa, Unesco. 329 p. 2018.