

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

ANA LUIZA MELO RODRIGUES

**TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS NO CONTROLE DE DRENAGEM EM BACIAS
HIDROGRÁFICAS URBANAS: DIAGNÓSTICO, VIABILIDADE E MODELAGEM**

VIÇOSA – MINAS GERAIS

2020

ANA LUIZA MELO RODRIGUES

**TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS NO CONTROLE DE DRENAGEM EM BACIAS
HIDROGRÁFICAS URBANAS: DIAGNÓSTICO, VIABILIDADE E MODELAGEM**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Demetrius David da Silva

Coorientador: Frederico Carlos Martins de
Menezes Filho

VIÇOSA – MINAS GERAIS

2020

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

R696t
2020
Rodrigues, Ana Luiza Melo, 1994-
Técnicas compensatórias no controle de drenagem em
bacias hidrográficas urbanas : diagnóstico, viabilidade e
modelagem / Ana Luiza Melo Rodrigues. – Viçosa, MG, 2020.
109 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Demetrius David da Silva.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Águas pluviais - Modelos matemáticos. 2. Bacias
hidrográficas urbanas. 3. escoamento urbano. I. Universidade
Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. II. Título.

CDD 22 ed. 628.21

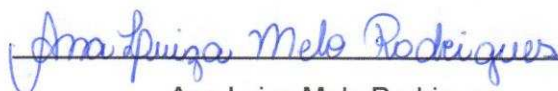
ANA LUIZA MELO RODRIGUES

**TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS NO CONTROLE DE DRENAGEM EM
BACIAS HIDROGRÁFICAS URBANAS: DIAGNÓSTICO, VIABILIDADE E
MODELAGEM**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

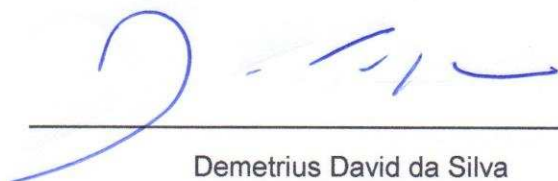
APROVADA: 19 de fevereiro de 2020

Assentimento:



Ana Luiza Melo Rodrigues

Autora



Demetrius David da Silva

Orientador

**A Deus, minha família, meu
namorado, meus amigos e a
todos que contribuíram para
a realização deste trabalho.**

AGRADECIMENTOS

A presente dissertação de mestrado não poderia ter acontecido sem o apoio de várias pessoas. Em primeiro lugar, não posso deixar de agradecer ao meu orientador e reitor, Demetrius e ao meu coorientador e eterno professor Frederico, por toda a paciência, empenho e sentido prático com que sempre me orientaram neste trabalho e em todos aqueles que realizei que me permitiram chegar aqui. Muito obrigada por me ter corrigido quando necessário sem nunca me desmotivar. Ao Vinícius, que foi fundamental para execução deste trabalho. Desejo igualmente agradecer a todos os meus colegas do Centro e Referências em Recursos Hídricos cujo apoio, amizade e ensinamentos estiveram presentes em todos os momentos. A Secretaria de Obras e Serviços Urbanos da Prefeitura Municipal de Viçosa pela ajuda prestada na coleta de informações para este trabalho.

Também gostaria de agradecer ao meu namorado Otávio, que desde o início não poupou esforços para me incentivar a encarar este desafio, e durante todo esse tempo foi e continua sendo meu porto seguro. Agradeço à minha família que me forneceu uma base sólida para que eu pudesse me desenvolver e florescer.

Agradeço a todos meus professores, desde meu início escolar, vocês atuaram como fonte de conhecimento e inspiração. Vocês me ensinaram a ter curiosidade, a confrontar meus ensinamentos e buscar sempre mais.

A Deus, pela dádiva da vida e por me permitir realizar tantos sonhos nesta existência. Obrigado por me permitir errar, aprender e crescer.

Por fim, a todos aqueles que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização desta dissertação, o meu sincero muito obrigada.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

RODRIGUES, Ana Luiza Melo, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2020. **Técnicas compensatórias no controle de drenagem em bacias hidrográficas urbanas: diagnóstico, viabilidade e modelagem.** Orientador: Demetrius David da Silva. Coorientador: Frederico Carlos Martins de Menezes Filho.

A falta de planejamento no uso e ocupação do solo pode ser observada na história de desenvolvimento da maioria das cidades brasileiras. A urbanização, sem o devido planejamento, propicia o aumento do escoamento superficial ocasionando vazões acentuadas responsáveis por eventos catastróficos cada vez mais frequentes. O sistema clássico de drenagem, amplamente adotado no Brasil, busca a rápida remoção do escoamento superficial das áreas urbanas, sem considerar a conservação da água e solo. Visando reduzir os problemas causados pela urbanização desordenada, técnicas compensatórias de drenagem têm sido utilizadas de forma complementar ao sistema clássico. As técnicas compensatórias são compostas por infraestruturas verdes que atuam na redução da geração do escoamento superficial. O objetivo deste trabalho foi avaliar o cenário atual de drenagem e o impacto da utilização de técnicas compensatórias na redução do volume escoado superficialmente em uma microbacia urbana. A bacia do córrego da Conceição, área de estudo, no município de Viçosa-MG, assim como outras, apresenta problemas recorrentes de alagamentos devido ao crescimento urbano sem planejamento. Realizou-se o levantamento *in loco* e o georreferenciamento das estruturas que compõem o sistema de drenagem. Foram identificadas características da rede de micro e macrodrenagem contemplando: bocas de lobo que precisam de limpeza ou manutenção; instabilidade de encostas, presença de resíduos sólidos, e lançamentos clandestinos de esgoto doméstico. O *software Storm Water Management Model*, SWMM foi utilizado para modelagem da drenagem da bacia hidrográfica de estudo. Conjuntamente foi proposta uma metodologia para priorização das áreas mais suscetíveis à geração, transporte e acumulação de escoamento superficial. A partir destas áreas, dispôs-se da alocação das técnicas compensatórias integradas à paisagem urbana, utilizando uma combinação de mapas topográficos, uso do solo e zoneamento do município. As técnicas propostas foram: células de biorretenção, jardins de chuva, telhado verde, pavimento

permeável e plantio de vegetação nativa. Os resultados mostraram que, no cenário atual, das 67 sub-bacias estudadas 42 apresentaram pontos de alagamento. Com a proposta de implementação de técnicas compensatórias em 54,2% da área da bacia, o número de sub-bacias com pontos de alagamento reduziu para 28. A técnica compensatória mais sugerida foi o plantio de vegetação nativa, ocupando 36,9% da área total da bacia de estudo, seguida por: célula de biorretenção (8,2%), telhado verde (3,6%), jardim de chuva (3,0%) e pavimento permeável (2,5%). A metodologia de priorização e alocação de técnicas compensatórias favoreceu áreas de cabeceira da bacia em estudo, contribuindo para a conservação e manutenção de nascentes, além de favorecer a redução do volume de escoamento superficial no início do sistema de drenagem. Mesmo para as sub-bacias onde os pontos de alagamento persistiram, houve redução do volume de escoamento superficial. Conclui-se que a metodologia de diagnóstico proposta permite a identificação das principais irregularidades do sistema de drenagem, e se apresenta como uma base de dados de fácil atualização, sendo uma ferramenta útil à gestão municipal. A priorização de áreas e alocação de técnicas compensatórias constitui-se como uma ferramenta útil para melhoria do manejo de águas pluviais na bacia e visa promover um uso mais eficiente dos recursos.

Palavras-chave: Áreas prioritárias. Gestão de águas pluviais. Modelagem hidrológica. SWMM.

ABSTRACT

RODRIGUES, Ana Luiza Melo, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2020. **Best Management Practices for stormwater control in urban catchments: diagnostic, feasibility and modelling.** Adviser: Demetrius David da Silva. Co-adviser: Frederico Carlos Martins de Menezes Filho.

The lack of land use planning can be found in the development history of most Brazilian cities. Urbanization increases runoff, which ends up in high peak flows that are responsible for catastrophic events each day more frequent. The classic urban drainage system, widely used in Brazil, seeks to remove the runoff from urban areas, regardless of water and soil conservation. To mitigate the problems caused by disordered urbanization, best management practices have been used along with the classic urban drainage system. The best management practices are green infrastructures that act on reducing the runoff's formation. Therefore, this work's goal was to assess the current urban drainage scenario and the impact of using best management practices in reducing the runoff volume in a small urbanized catchment. The study area was the Conceição river catchment, in Viçosa-MG. This catchment, just like many others, has frequent flood events due to rapid and unplanned urbanization. It was carried out an on-site survey and georeferencing of the drainage system structures. Characteristics of the minor and major drainage systems were identified regarding inlets in need of cleaning or maintenance, slope instability, solid waste presence, and clandestine discharge of domestic sewage. The Storm Water Management Model software, SWMM, was used to model the drainage of the study catchment. It was also proposed a methodology to prioritize areas that are more susceptible to runoff generation, transport and accumulation. From these areas, it was suggested the allocation of best management practices integrated into the urban landscape using a combination of topographic maps, land use, and the city's zoning. The studied practices were: bioretention cells, rain gardens, green roofs, permeable pavements, and native vegetation landscaping. The results showed that in the current scenario, from the 67 sub-catchments studied, 42 had flooding points. After the placement of the best management practices, in 54.2% of the catchment area, the number of sub-catchments with flooding points reduced to 28. The practice most suggested was native vegetation landscaping, occupying 36.9% of the total area of

the study catchment followed by bioretention cells (8.2%), green roofs (3.6%), rain gardens (3.0%) and permeable pavement (2,5%). The methodology for prioritizing and allocating best management practices favored the upper areas of the catchment, thus contributing to the conservation and maintenance of springs, as well as helping to reduce the runoff volume at the beginning of the drainage system. Even in the sub-catchments where flooding points remained, there was a reduction in the flooded volume. Hence, it is possible to conclude that the proposed diagnostic methodology allows the identification of the main irregularities of the urban drainage system, as well as presenting itself as an easily updatable database, being a useful tool for the city's management. The prioritization of areas and allocation of best management practices is shown to be a tool for improving the drainage situation of a catchment as a whole and aims to promote a more efficient resource allocation.

Keywords: Hydrological modelling. Priority areas. SWMM. Urban water management.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 2-1. Esquema conceitual de uma célula de biorretenção. | 21 |
| Figura 2-2.. Figura esquemática de um Jardim de chuva. | 22 |
| Figura 2-3 Trincheira de Infiltração..... | 24 |
| Figura 2-4. Esquema de um pavimento permeável. | 24 |
| Figura 2-5 Esquema de um reservatório individual | 25 |
| Figura 2-6. Comparação entre telhado com cobertura vegetal e um convencional. . | 26 |
| Figura 2-7. Modelo conceitual de geração do escoamento superficial. | 30 |
| Figura 2-8. Modelo conceitual de uma célula de biorretenção pelo SWMM | 31 |
| Figura 4-1. Estrutura organizacional do trabalho..... | 34 |
| Figura 5-1. Área de estudo, bacia do Córrego da Conceição. | 48 |
| Figura 5-2.Divisão bacia do córrego da Conceição em 67 sub-bacias para simulação no SWMM. | 53 |
| Figura 5-3. Sistema de drenagem inserido no SWMM. | 55 |
| Figura 5-4. Localização e estado de manutenção das bocas de lobo presentes na bacia do córrego da Conceição..... | 57 |
| Figura 5-5. Situação da macrodrenagem da bacia do córrego da Conceição. | 59 |
| Figura 5-6. Hietograma do evento de chuva utilizado na modelagem com o SWMM | 60 |
| Figura 5-7. Trechos que apresentaram falhas no sistema de drenagem na bacia do Córrego da Conceição, seja por alagamentos (pontos) ou por serem incapazes de conduzir a vazão de montante. | 60 |
| Figura 5-8. Mapa de diagnóstico da bacia do córrego da Conceição. | 63 |
| Figura 6-1. Bacia do Córrego da Conceição. | 81 |
| Figura 6-2. Divisão bacia do córrego da Conceição em sub-bacias e rede de drenagem para simulação no SWMM. | 87 |
| Figura 6-3. Mapas de susceptibilidade à geração, transporte e acúmulo de escoamento superficial na bacia do córrego da Conceição..... | 91 |
| Figura 6-4. Alocação das técnicas compensatórias na bacia do córrego da Conceição..... | 92 |
| Figura 6-5. Sub-bacias com alagamento no cenário atual e com a aplicação de técnicas compensatórias na bacia do córrego da Conceição | 95 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 5-1. Tabela elaborada para fins de levantamento das informações sobre bocas de lobo em campo. | 49 |
| Tabela 5-2. Tabela elaborada para fins de levantamento das informações sobre a macrodrenagem. | 50 |
| Tabela 5-3. Valores de CN para bacias com ocupação urbana para solo tipo A. | 51 |
| Tabela 6-1. Base de dados utilizada para elaboração do estudo | 82 |
| Tabela 6-2. Indicadores e pesos utilizados na determinação das áreas mais susceptíveis ao escoamento superficial | 83 |
| Tabela 6-3. Características das técnicas compensatórias..... | 86 |
| Tabela 6-4. Parâmetros de entrada utilizados no SWMM | 88 |
| Tabela 6-5. Características das técnicas compensatórias inseridas no SWMM para fins de simulação de cenário..... | 89 |
| Tabela 6-6. Áreas ocupadas por técnicas compensatórias na bacia do córrego da Conceição..... | 92 |
| Tabela 6-7. Resultados do SWMM considerando o cenário atual e o cenário com a adoção de técnicas compensatórias na bacia do córrego da Conceição | 94 |

SUMÁRIO

| | | |
|---------|---|----|
| 1 | INTRODUÇÃO GERAL | 14 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 17 |
| 2.1 | A drenagem urbana | 17 |
| 2.2 | Necessidade da elaboração de diagnósticos da drenagem urbana .. | 18 |
| 2.3 | Tipos de intervenção na drenagem urbana | 19 |
| 2.4 | Técnicas compensatórias de drenagem | 20 |
| 2.5 | Modelagem hidrológica | 27 |
| 2.5.1 | O <i>Storm Water Management Model</i> (SWMM) e sua aplicação | 28 |
| 2.5.1.1 | Métodos utilizados pelo SWMM para modelagem | 29 |
| 2.5.1.2 | Condução do escoamento superficial..... | 30 |
| 2.5.1.3 | Representação das técnicas compensatórias | 31 |
| 2.5.1.4 | Chuva de projeto..... | 32 |
| 3 | OBJETIVOS | 33 |
| 3.1 | Objetivo geral..... | 33 |
| 3.2 | Objetivos específicos | 33 |
| 4 | ESTRUTURA DO TRABALHO..... | 34 |
| 4.1 | Artigo 1: Metodologia para diagnóstico de sistemas de drenagem urbana | 34 |
| 4.2 | Artigo 2: Metodologia para alocação de técnicas compensatórias de drenagem integradas à paisagem urbana | 35 |
| | REFERÊNCIAS | 36 |
| 5 | ARTIGO 1: METODOLOGIA PARA DIAGNÓSTICO DE SISTEMAS DE DRENAGEM URBANA..... | 44 |
| 5.1 | Resumo | 44 |
| 5.2 | Abstract | 45 |
| 5.3 | Introdução | 46 |

| | | |
|---------|---|----|
| 5.4 | Metodologia..... | 47 |
| 5.4.1 | Área de estudo..... | 47 |
| 5.4.2 | Elaboração do diagnóstico do sistema de drenagem de uma bacia urbanizada..... | 48 |
| 5.4.2.1 | Levantamento das estruturas de microdrenagem da bacia | 48 |
| 5.4.2.2 | Levantamento das estruturas de macrodrenagem da bacia | 49 |
| 5.4.3 | Simulação do escoamento superficial com o modelo <i>Storm Water Management Model</i> , SWMM | 50 |
| 5.4.3.1 | Divisão da área em sub-bacias..... | 52 |
| 5.4.3.2 | Área, declividade média e largura da bacia | 52 |
| 5.4.3.3 | Parâmetros relativos às áreas permeáveis e impermeáveis | 54 |
| 5.4.3.4 | Modelagem da rede de drenagem | 54 |
| 5.4.3.5 | Chuva de projeto..... | 55 |
| 5.4.4 | Priorização das sub-bacias para intervenção..... | 56 |
| 5.5 | Resultados e discussão | 56 |
| 5.5.1 | Diagnóstico do sistema de drenagem..... | 57 |
| 5.5.2 | Simulação do escoamento superficial com o SWMM | 58 |
| 5.6 | Conclusões | 64 |
| | REFERÊNCIAS | 66 |
| | APÊNDICE A – CARACTERÍSTICAS DAS SUB-BACIAS..... | 72 |
| | APÊNDICE B – RESULTADOS DO SWMM..... | 74 |
| 6 | ARTIGO 2: METODOLOGIA PARA ALOCAÇÃO DE TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS DE DRENAGEM INTEGRADAS À PAISAGEM URBANA ... | 76 |
| 6.1 | Resumo | 76 |
| 6.2 | Abstract | 77 |
| 6.3 | Introdução | 78 |
| 6.4 | Metodologia..... | 80 |
| 6.4.1 | Área de estudo..... | 80 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 6.4.2 | Implantação de técnicas compensatórias e base de dados | 81 |
| 6.4.3 | Definição de áreas suscetíveis à geração, transporte e acúmulo de escoamento superficial | 82 |
| 6.4.3.1 | Obtenção de áreas permeáveis e impermeáveis | 85 |
| 6.4.4 | Alocação das técnicas compensatórias | 85 |
| 6.4.5 | Verificação da eficiência da alocação das técnicas compensatórias | 86 |
| 6.4.6 | Chuva de projeto..... | 89 |
| 6.5 | Resultados | 90 |
| 6.6 | Conclusões | 96 |
| | REFERÊNCIAS | 98 |
| | APÊNDICE A – ÁREAS OCUPADAS POR TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS EM CADA SUB-BACIA..... | 105 |
| | APÊNDICE B – RESULTADOS DA MODELAGEM DO SWMM COM E SEM O USO DE TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS..... | 107 |
| 7 | CONCLUSÃO GERAL | 109 |

1 INTRODUÇÃO GERAL

A urbanização é um fenômeno crescente e quando aliada a falta de planejamento faz com que haja um aumento desordenado de áreas impermeabilizadas em decorrência de novas ruas, calçadas, telhados, entre outros (ARAGÃO et al., 2017; MENEZES FILHO; TUCCI, 2012). No processo de urbanização é usual que loteamentos sejam criados com infraestrutura inadequada e sem controle sobre a impermeabilização do solo (MIGUEZ; REZENDE; VERÓL, 2015; YANG et al., 2014).

Os elevados picos de vazões, responsáveis por causar enchentes e alagamentos, podem ter origem natural ou antrópica. Algumas bacias possuem propensão natural a altos picos de vazão, devido a seu relevo, cobertura vegetal, capacidade de drenagem, formato e características climáticas. Já as condições antrópicas são: a urbanização, obras hidráulicas, desmatamento, manejo inadequado do solo, dentre outras (TUCCI; HESPANHOL; NETTO, 2001).

O sistema de drenagem convencional, também chamado de infraestrutura cinza, tem objetivo de coletar e transportar rapidamente o escoamento superficial decorrente das águas precipitadas. Este sistema deriva da concepção higienista, originada entre o século XIX e XX, que busca por meio da drenagem convencional atuar na redução de doenças de veiculação hídrica no meio urbano (SILVEIRA, 1998). Neste contexto, os sistemas convencionais de drenagem, formados por bocas de lobo e galerias pluviais, são infraestruturas essenciais para o funcionamento das cidades, por conduzirem o escoamento superficial para outras áreas (MIKOVITS et al., 2017). Conforme acentua Canholi (2014), a drenagem urbana, sob a concepção higienista, é uma questão de alocação de espaço, pois as estruturas criadas apenas deslocam o escoamento de montante para jusante, fazendo com que as áreas a jusante lidem com volumes de escoamento cada vez maiores.

Desde 2007, o sistema de drenagem é considerado por lei parte do saneamento básico brasileiro (BRASIL, 2007) e segundo a pesquisa nacional de saneamento básico feita em 2008 e divulgada em 2010 pelo IBGE, 94,46% dos municípios brasileiros são atendidos por esse serviço. Contudo, o sistema não é eficiente na maioria dos municípios. Segundo o mesmo censo, 51,30% dos

municípios relatam possuir problemas com inundações e alagamentos. Destes, 60,70% informaram haver ocupação urbana em áreas naturalmente inundáveis (IBGE, 2010).

Em muitos municípios, o sistema de drenagem ainda é elaborado de forma emergencial, não sendo considerado durante a expansão do município (TASCA et al., 2017). Devido a esta falta de planejamento, quando executados, não há registros dos sistemas convencionais de drenagem (TASCA; POMPÊO; FINOTTI, 2018).

Além da falta de registros e estudos prévios, também atuam como agravantes dos problemas de inundações urbanas: a falta de manutenção, obstrução de bocas de lobo e galerias por resíduos sólidos, presença de efluentes domésticos nas galerias e ocupações irregulares nos leitos dos rios (YAZDANFAR; SHARMA, 2015). A pesquisa nacional de saneamento básico feita em 2008 pelo IBGE mostrou que o fator agravante de inundações mais relatado foi a obstrução de bocas de lobo (IBGE, 2010). Neste contexto, faz-se necessário intervenções no sistema, seja para manutenção, desobstrução ou adoção de outras técnicas para controle do escoamento.

As intervenções comumente adotadas são de caráter estrutural, visando o aumento da capacidade hidráulica do sistema de micro e macrodrenagem. Contudo estas medidas não são sustentáveis a longo prazo, pois agem apenas no controle dos efeitos e não na causa do aumento do escoamento superficial (MIGUEZ; REZENDE; VERÓL, 2015). É necessário considerar o sistema de drenagem juntamente com o planejamento urbano embasando-se em critérios ambientais sociais e econômicos, criando assim paisagens hidrologicamente funcionais (KONG et al., 2017; TAVANTI; BARBASSA, 2012).

Buscando atuar na solução do problema de drenagem, ou seja, reduzir o aumento do escoamento superficial causado pelo constante aumento de áreas impermeáveis, têm-se utilizado técnicas compensatórias de drenagem. Estas técnicas visam a redução do escoamento superficial e vazões de pico a partir do aumento de áreas de infiltração (LI et al., 2017). Segundo Eckart; Mcphee; Bolisetti, (2017) em regiões densamente urbanizadas é mais viável uma readequação do sistema de drenagem com o uso de técnicas compensatórias. Além disso, Lee et al., (2012) e Melekpour et al. (2017), relatam que o melhor custo benefício está na

associação da drenagem convencional com o emprego de técnicas compensatórias inseridas no planejamento urbano.

Em áreas urbanizadas é favorável a aplicação de técnicas compensatórias de forma distribuída, ou seja, integradas à paisagem urbana (ZELLNER et al., 2016), pois assim atuam na fonte de geração de escoamento (LOPERFIDO et al., 2014; YANG et al., 2014). Apesar dos benefícios gerados pelo emprego de técnicas compensatórias, seu estudo e adoção no Brasil ainda é escasso (MACEDO et al., 2017; MACEDO; LAGO; MENDIONDO, 2019), o que torna o seu estudo de extrema importância.

Em um cenário de recursos financeiros limitados, para que as intervenções sejam mais efetivas (KAYKHOSRAVI et al., 2019; WANG et al., 2017b), deve-se haver um diagnóstico das condições atuais de uma bacia, a fim de se identificar irregularidades e determinar áreas que necessitam de intervenção mais imediata. O estudo da identificação de áreas prioritárias no controle do escoamento superficial não é algo recente, contudo a maioria dos estudos existentes foram realizados em bacias predominantemente rurais, sendo escassos os estudos que abordem bacias urbanas, bem como a alocação de técnicas compensatórias nestas áreas prioritárias (ECKART; MCPHEE; BOLISSETTI, 2017; FENG; BURIAN; POMEROY, 2016; LAGADEC et al., 2016; LEE et al., 2012; LIU et al., 2016b; MARTIN-MIKLE et al., 2015; MIKOVITS; RAUCH; KLEIDORFER, 2018; ZELLNER et al., 2016).

Em virtude do aumento do escoamento superficial pela falta de planejamento urbano, da ineficiência do sistema de drenagem convencional e da ausência de um planejamento ambiental, surge a necessidade de estudos que busquem analisar as condições atuais de uma bacia urbana e proponham medidas que atuem na fonte dos problemas. Por isso, este trabalho buscou avaliar o cenário atual de drenagem e o impacto da utilização de técnicas compensatórias na redução do volume escoado superficialmente em uma microbacia urbana.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A drenagem urbana

O sistema convencional de drenagem urbana é formado por um conjunto de bocas de lobo, que captam o escoamento superficial e o conduz as galerias. Estas, por sua vez direcionam o escoamento superficial ao seu exutório, que pode ser cursos d'água naturais, lagos, solos bastante permeáveis ou até mesmo o oceano (RIGHETTO, 2009). A drenagem urbana possui dois níveis, a microdrenagem e a macrodrenagem. A primeira é composta por sarjetas, bocas de lobo e galerias, enquanto a segunda é caracterizada pelos escoamentos em fundos de vale canais naturais e ou artificiais (PORTO et al., 2012).

Por definição, a drenagem urbana é um conjunto de medidas que buscam minimizar os riscos e diminuir os prejuízos causados por inundações, possibilitando o desenvolvimento urbano de forma harmônica, articulada e sustentável (PORTO et al., 2012). Contudo, este é um setor por muitas vezes negligenciado na formação e crescimento de muitos municípios brasileiros. Muitas são as cidades que se expandiram sem a presença de infraestrutura básica e saneamento ambiental, incluindo-se o sistema de drenagem (MARIA; FARIA; STEPHAN, 2014; MIGUEZ; REZENDE; VERÓL, 2015).

No Brasil, o planejamento dos sistemas de drenagem urbana ainda é recente (AURÉLIO; CRUZ; TUCCI, 2008), sendo considerado parte integrante do saneamento ambiental somente em 2007 (BRASIL, 2007). O Brasil ainda não possui normas e sistematização do dimensionamento do sistema convencional de drenagem (MENEZES FILHO; COSTA, 2012). Muitos municípios não possuem um departamento responsável pelo setor de drenagem urbana. Desta forma, o sistema de drenagem se desenvolveu de forma emergencial, sem registros, sendo até inexistente em alguns loteamentos.

Na maioria dos municípios brasileiros, o sistema de drenagem clássico se concentra na fase higienista, visando o controle quantitativo do escoamento superficial. Esta prática, de rápida remoção do escoamento superficial de áreas urbanas (SILVEIRA, 1998), provoca alterações no ciclo hidrológico, acelerando e aumentando os picos de vazão no exutório da bacia (SOUZA; CRUZ; TUCCI, 2012).

Além disso, as estruturas que compõem o sistema de drenagem são onerosas e perdem sua eficiência hidráulica ao longo do tempo, pois novas áreas são impermeabilizadas, que por sua vez geram novos incrementos no escoamento superficial (BELL et al., 2016; KONG et al., 2017; MIGUEZ; REZENDE; VERÓL, 2015). Sendo assim, para que o sistema de drenagem convencional cumpra seu papel na drenagem urbana, intervenções serão sempre necessárias.

Atualmente, uma nova vertente na drenagem urbana é a combinação do sistema convencional de drenagem com o emprego de técnicas compensatórias. As técnicas compensatórias, ou infraestruturas verdes, surgiram a partir de uma visão ambiental do manejo de águas pluviais. Estas técnicas visam retornar o comportamento hidrológico anterior à urbanização de uma bacia hidrográfica, a partir do favorecimento da infiltração (LI et al., 2017).

2.2 Necessidade da elaboração de diagnósticos da drenagem urbana

O diagnóstico consiste em uma importante ferramenta para o planejamento e a gestão ambiental (BRASIL, 2006), pois permite analisar de forma detalhada as mudanças ocorridas em uma bacia hidrográfica e identificar os problemas e áreas prioritárias para intervenção. O diagnóstico das infraestruturas de drenagem existentes permite identificar as condições atuais do sistema de drenagem do município, a fim de determinar sua capacidade de transporte do escoamento superficial (BASTOS et al., 2009).

Neste sentido, a identificação de áreas em que o sistema de drenagem é ineficiente é de suma importância para definição dos locais que necessitam de intervenção, visto a escassez de recursos (BASTOS et al., 2009; TASCA et al., 2017; TASCA; POMPÊO; FINOTTI, 2018). O conhecimento das características da bacia, como relevo, uso do solo, tipo de solo e das estruturas de drenagem instaladas, possibilita que sejam identificadas áreas onde o sistema não é capaz de conduzir o escoamento, bem como áreas críticas para o controle do escoamento superficial (BECK et al., 2017; LAGADEC et al., 2016). Em paralelo, o georreferenciamento das estruturas de drenagem permite ao gestor localizar estas áreas no ambiente urbano, possibilitando uma análise mais complexa do entorno e áreas de contribuição, uso do solo e topografia (SINGH; GUPTA; SINGH, 2014). Desta forma, o diagnóstico contribui para que as intervenções feitas promovam

melhores resultados e, portanto, um melhor custo-benefício (KAYKHOSRAVI et al., 2019; MARTIN-MIKLE et al., 2015).

2.3 Tipos de intervenção na drenagem urbana

As intervenções no sistema de drenagem podem ser estruturais ou não estruturais. As medidas não estruturais (normativas) se baseiam em regulamentações do uso do solo, construções à prova de enchentes, seguro de enchentes, previsão e alerta de inundação (SILVA, 2007). Estas medidas visam minimizar os riscos de inundações e os prejuízos decorrentes, possibilitando o desenvolvimento urbano de forma sustentável (TUCCI, 2005). Porém, para que as medidas não estruturais tenham efeito, é necessário que haja uma política adequada na criação das medidas bem como em sua fiscalização.

O Plano Diretor de Drenagem Urbana, PDDU, é uma medida não estrutural, que tem por objetivo promover a gestão das águas pluviais urbanas (TUCCI, 2005). Nele prevê-se a convivência harmoniosa com os eventos críticos de chuva, através do planejamento dos diferentes espaços urbanos, estabelecendo critérios de uso e ocupação do solo e valorização dos mecanismos naturais de escoamento por políticas de preservação. Apesar de fundamental, apenas 30% dos municípios brasileiros atendidos pelo sistema de drenagem possuem legislação específica (IBGE, 2010).

Já as intervenções estruturais se baseiam na adequação de diâmetros da rede de drenagem e construção de estruturas para amortecimento dos picos de vazão. Neste sentido, a adoção somente de intervenções estruturais no sistema convencional de drenagem tornou-se insustentável, por não ser capaz de acompanhar a expansão urbana, necessitando sempre de aumentar sua capacidade hidráulica, além de ser um tipo de intervenção onerosa (BELL et al., 2016; MIGUEZ; REZENDE; VERÓL, 2015).

Visando atender às crescentes demandas na drenagem urbana, cada vez mais têm-se utilizado de técnicas compensatórias de drenagem, chamadas de infraestruturas verdes ou também conhecidas como técnicas de desenvolvimento de baixo impacto – LID (*Low Impact Development*), ou ainda, melhores práticas de manejo – BMP (*Best Management Practices*) (ECKART; MCPHEE; BOLISSETTI, 2017; FLETCHER et al., 2015). O uso das técnicas compensatórias visa reduzir a

quantidade e melhorar a qualidade do escoamento superficial, buscando replicar o comportamento hidrológico de pré-desenvolvimento (LI et al., 2017). Estas estruturas adicionam áreas de armazenamento que permitem a infiltração, evapotranspiração e até reaproveitamento da água do escoamento, no intuito de compensar a perda de áreas naturais (FENG; BURIAN; POMEROY, 2016).

Gallet (2011) complementa que as técnicas compensatórias, em especial as de biorretenção, são capazes de combater as ilhas de calor e melhorar a paisagem municipal. Além disso, segundo Dong, Guo e Zeng (2017), o melhor custo benefício está na associação da drenagem convencional com a infraestrutura verde. Lee et al., (2012) e Melekpour et al. (2017) também ressaltam a melhoria no custo benefício com o emprego de técnicas compensatórias aliadas ao planejamento urbano. Segundo Eckart; Mcphee; Bolisetti, (2017) em regiões densamente urbanizadas é mais viável uma readequação do sistema de drenagem com o uso de técnicas compensatórias de drenagem.

2.4 Técnicas compensatórias de drenagem

As técnicas compensatórias de drenagem são, em sua maioria, estruturas implantadas na superfície, de pequena profundidade, cujo objetivo é reduzir a formação do escoamento superficial pelo favorecimento da infiltração. Podem ser instaladas em áreas como canteiros centrais, passeios, estacionamentos, jardins, terrenos esportivos e áreas verdes em geral (SILVA, 2007).

As técnicas compensatórias podem ser aplicadas a qualquer nível de controle de drenagem: distribuída, microdrenagem ou macrodrenagem (LI et al., 2017). Contudo, as medidas aplicadas de forma distribuída atuam na fonte da geração, transporte ou acúmulo de escoamento, além de demandarem menos espaço, facilitando sua adoção em áreas urbanas e, por isso, são consideradas mais adequadas para readequação de espaços densamente urbanizados (LOPERFIDO et al., 2014; YANG et al., 2014; ZELLNER et al., 2016).

Neste contexto as técnicas de mais fácil integração à paisagem urbana são: células de biorretenção, jardins de chuva, trincheiras de infiltração, pavimento permeável, reservatórios individuais, telhados verdes e plantio de vegetação nativa (BAPTISTA; NASCIMENTO; BARRAUD, 2011; LIU et al., 2017; MARTIN-MIKLE et al., 2015; ZIMMERMAN; BRENNER; ABELLA, 2019). Contudo, Zimmerman;

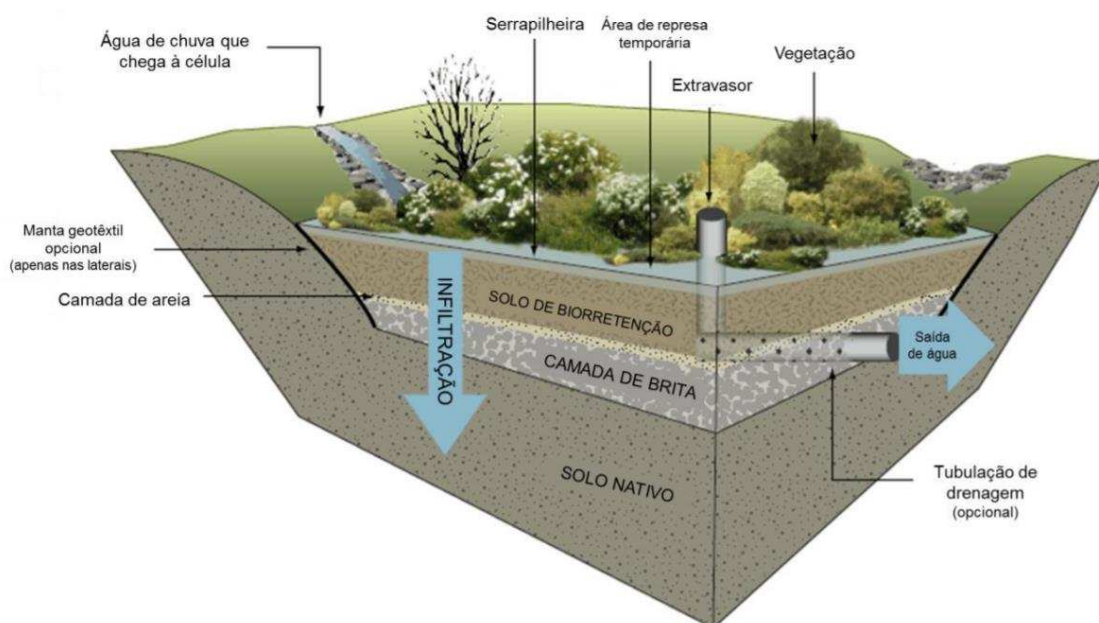
Brenner; Abella, (2019) afirmam que técnicas compensatórias que abranjam áreas comuns são mais aceitas e utilizadas do que técnicas individuais.

Célula de biorretenção

Células de biorretenção são estruturas que possuem uma depressão rasa vegetada e uma camada para armazenamento de água. Tais estruturas permitem o armazenamento do escoamento superficial, a infiltração e a evapotranspiração (FENG; BURIAN; POMEROY, 2016; ROSSMAN; EMERITUS; EPA, 2015).

As células de biorretenção são dimensionadas para receber o escoamento de pequenas áreas. É recomendado o plantio de uma faixa de vegetação no entorno da célula de biorretenção para a retenção de sedimentos. Drenos subjacentes para outros dispositivos podem ser adicionados quando a infiltração não é algo desejado, seja pela proximidade de infraestruturas sensíveis ou em áreas onde o escoamento superficial possui alta carga de poluentes (SOUZA; CRUZ; TUCCI, 2012). Na Figura 2-1 está representado um esquema conceitual de uma célula de biorretenção.

Figura 2-1. Esquema conceitual de uma célula de biorretenção.



Fonte: Rosa, (2017)

Além de ajudar na redução do escoamento superficial, segundo Hamel; Daly; Fletcher, (2015) as células de biorretenção também são capazes de melhorar a qualidade da água, através da retenção de poluente, e reduzem a erosão das margens de córregos (WINSTON; DORSEY; HUNT, 2016). No estudo realizado por James et al., (2012), foi encontrado que o uso de células de biorretenção reduziu o

volume de escoamento superficial e a vazão de pico. Neste estudo, comparou-se o uso de células de biorretenção em bacias com diferentes usos do solo. Na bacia cujo uso era predominantemente impermeável, também houve redução do escoamento, porém esta redução foi menor do que em uma bacia com diferentes usos do solo. Resultados semelhantes também foram encontrados por Jia et al., (2012). Já Duan; Li; Yan, (2016) que afirmam que melhores resultados podem ser encontrados se duas ou mais técnicas compensatórias forem combinadas e aplicadas por toda a bacia de estudo.

Jardim de chuva

Jardins de chuva são uma das formas mais simples de biorretenção. Consistem em depressões vegetadas que recebem o escoamento superficial e permitem a infiltração. Como observado por Gallet (2011), apresentam melhor performance se compostos por plantas de longas raízes como gramas nativas. São tipicamente pequenos sistemas que atendem reduzidas áreas como telhados, entradas de garagem ou estacionamentos. É apresentado na Figura 2-2 o esquema de um jardim de chuva.

Figura 2-2.. Figura esquemática de um Jardim de chuva.



Fonte: Castagna, (2016)

Além de serem capazes de armazenar superficialmente e infiltrar a precipitação, também são agradáveis esteticamente e ajudam a combater ilhas de calor (DALEY, 2003). Sua eficiência está diretamente ligada com a estrutura do solo para drenagem. Em locais com solos com baixa taxa de infiltração pode-se adotar a utilização de sub-drenos, a fim acelerar a drenagem (CANHOLI, 2014). São ideais

para promover a infiltração, retenção de poluentes e quando construídos em sequência, ou de forma a desconectar as áreas impermeáveis, atuam no controle da vazão (KONG et al., 2017).

O estudo realizado por Li; Li; Li, (2016) mostra que a utilização de jardins de chuva reduziu o pico de vazão e o escoamento superficial e sua concentração de poluentes. Contudo estes efeitos reduzem com o aumento do período de retorno da precipitação. Também foi encontrado neste estudo, que a área superficial do jardim de chuva possui maior impacto na regulação da vazão do que a utilização de sub-drenos. O mesmo resultado foi encontrado por Melo et al., (2014) em um estudo experimental com o uso de jardins de chuva no Recife/PE. Em um outro estudo experimental feito em Cincinnati/EUA, durante o período de quatro anos de monitoramento, os jardins de chuva instalados foram capaz de reter totalmente o escoamento de 90% das precipitações ocorridas, e para os eventos que produziram escoamento superficial, o pico do vazão foi atrasado (SHUSTER et al., 2017).

Trincheira de infiltração

As trincheiras de infiltração são depressões lineares tipicamente instaladas dentro ou próximas de áreas pavimentadas como pátios de estacionamento ou ao longo de ruas e calçadas. Estas estruturas possuem um papel muito importante na retenção de poluentes que são normalmente carregados pelo escoamento superficial de áreas impermeáveis (BAPTISTA; NASCIMENTO; BARRAUD, 2011).

São construídas valas preenchidas com material granular e protegidas contra a colmatação com uma manta geotêxtil e dispendo-se quando necessário de um extravasor para transbordamentos (SILVA; POLETO, 2017). Podem garantir além da infiltração, somente a evapotranspiração. É apresentado na Figura 2-3 um exemplo de trincheira de infiltração.

No estudo de uma trincheira de infiltração experimental por 26 meses, Maniquiz, Lee, Kim, (2010) observaram que esta técnica possui boa capacidade de retenção de poluentes, sólidos suspensos e até metais pesados. Também contribuiu para recarga do lençol freático, pois foi capaz de armazenar e infiltrar totalmente o escoamento superficial causado por uma precipitação de até 10mm com baixa intensidade. Contudo, não atuou no controle de picos de vazão. Um resultado semelhante foi encontrado por Liao et al., (2013) na redução da eficiência de retenção de escoamento superficial com o aumento do período de retorno.

Figura 2-3 Trincheira de Infiltração

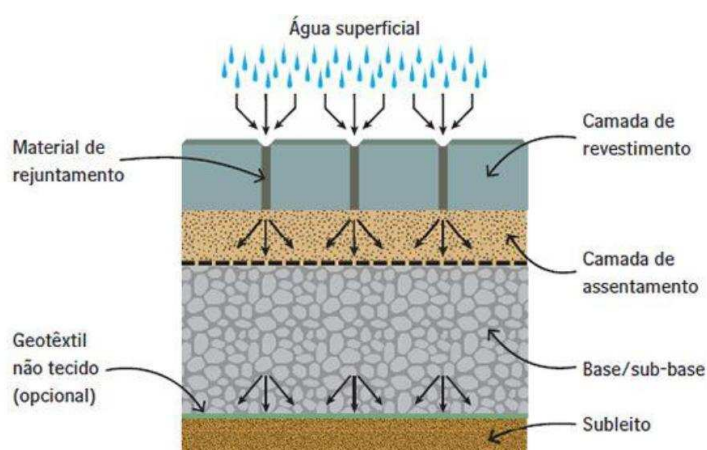


Fonte: Silva, Poleto, (2017)

Pavimento permeável

Pavimentos permeáveis são dispositivos que reduzem o escoamento superficial por meio da infiltração e, ou, armazenamento de água. São formados por duas camadas distintas, uma composta de agregados graúdos e outra de agregados miúdos. A capacidade de armazenamento de um pavimento permeável é determinada pela profundidade da camada de agregados graúdos (TUCCI; GOLDENFUM; ARAUJO, 2000). Geralmente são aplicados em locais de baixo tráfego e áreas de estacionamento e em solos com boa capacidade de infiltração e baixas declividades (WANG et al., 2017b). Na Figura 2-4 está representado o esquema de um pavimento permeável.

Figura 2-4. Esquema de um pavimento permeável.



Fonte: Rosa, (2017)

Harada; Ichikawa, (1994) analisaram o desempenho dos pavimentos porosos, em função da sua composição, na redução dos picos de vazão. Em média houve

uma redução do volume de escoamento superficial de 58%, e uma redução média da vazão de 22%. No estudo feito por Jato-Espino et al., (2016) a utilização de pavimentos permeáveis foi capaz de reduzir o volume de escoamento superficial e retardar a vazão de pico mesmo para chuvas acima dos tempos de retorno usuais (2, 5 e 10). Já no estudo realizado por Liu; Chen; Peng, (2015) na adoção de pavimentos permeáveis com capacidade de armazenamento de 1 a 10mm, em 50% das áreas impermeáveis, foi observado que o coeficiente de escoamento reduziu de 0,71 para 0,44.

Reservatórios individuais

Os reservatórios individuais são dispositivos que armazenam a água coletada nos telhados. O escoamento superficial gerado nos telhados escoam para as calhas que conduzem o escoamento ao reservatório. Os reservatórios podem ser instalados de forma superficial ou subterrânea, sendo importante garantir o fácil acesso para manutenção (BALLARD et al., 2015). Um esquema da instalação de um reservatório individual está representado na Figura 2-5. A água armazenada nos reservatórios individuais pode ser reaproveitada para usos não potáveis (JENNINGS et al., 2013).

Figura 2-5 Esquema de um reservatório individual



Fonte: Rosa, (2017)

Os reservatórios individuais são uma das técnicas compensatórias individuais mais populares. Contudo para que tenham sua efetividade garantida, dependem da conscientização de seus proprietários, pois, uma vez cheios não contribuem para a redução do escoamento superficial (JENNINGS et al., 2013). Porém, caso sejam

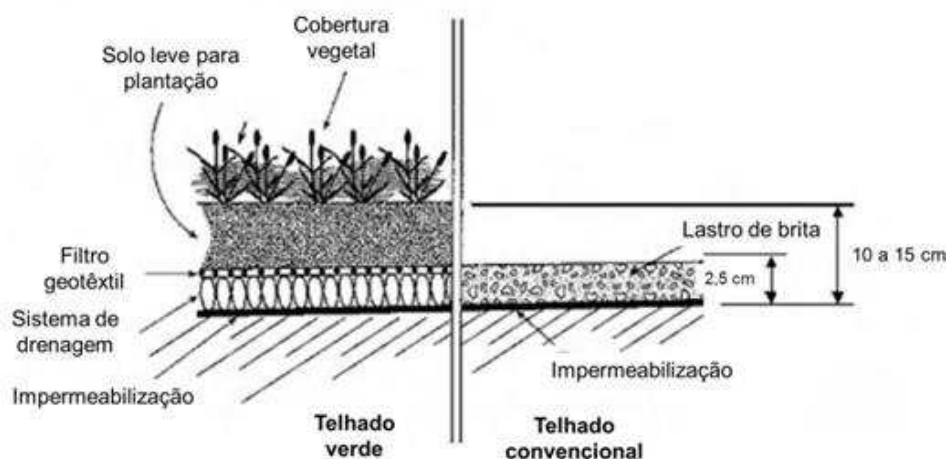
operados corretamente, segundo Liao et al., (2013), em um estudo para uma chuva com o período de retorno de um ano e duração de 60 minutos, os reservatórios individuais reduziram o escoamento superficial em até 77,87%.

Telhado verde

Telhados verdes possuem uma camada de solo com vegetação que permite o armazenamento de água, atuando somente na chuva que cai diretamente sobre o telhado (ROSSMAN; EMERITUS; EPA, 2015).

As vantagens da utilização destes dispositivos são: a melhoria da eficiência energética, da qualidade do ar, estética, redução de temperatura e barulho e controle de águas pluviais (CHARALAMBOUS et al., 2019; SOUZA; CRUZ; TUCCI, 2012). Segundo Wang et al., (2017b) ,o uso de telhados verdes não é recomendado para áreas residenciais, devido à dificuldade de instalação nas edificações já existentes. Contudo, os telhados verdes se apresentam como uma boa solução para regiões com baixa disponibilidade de espaço (BALLARD et al., 2015). A Figura 2-6 apresenta um esquema do funcionamento de um telhado verde em comparação com um telhado convencional.

Figura 2-6. Comparação entre telhado com cobertura vegetal e um convencional.



Fonte: Rosa, (2017)

Um estudo feito por Charalambous et al., (2019), apresenta que em um período de 15 meses um telhado verde experimental foi capaz de reter em média 77% da precipitação. Apesar de o mesmo estudo afirmar que telhados verdes não são a melhor opção para redução do escoamento superficial, seus benefícios ambientais incentivam seu uso. Tais benefícios são a redução da temperatura

interna dos edifícios, aumento da humidade do ar, redução de CO₂, redução de ilhas de calor, melhoria no microclima e bem-estar dos residentes (CASCONE et al., 2018).

Plantio de vegetação nativa

O plantio de vegetação nativa é recomendado para áreas onde a declividade do terreno não permite a instalação de outras técnicas compensatórias de drenagem (WANG et al., 2017b). É recomendado a utilização de vegetação nativa pela sua adaptação aos condicionantes locais, minimizando esforços para sua manutenção. Também é recomendável a diversificação das espécies em decorrência de suas diferentes funcionalidades em relação a interceptação de água, retenção de sedimentos e nutrientes (SOUZA; CRUZ; TUCCI, 2012; ZALEWSKI; SANTIAGO-FANDINO; NEATE, 2003).

Feng, Burian, Pomeroy, (2016), ao substituir 54% das áreas impermeáveis por vegetação nativa, houve um aumento de 23% da evapotranspiração e redução de 7% do escoamento superficial. Loperfido et al., (2014) ao comparar o desempenho de técnicas compensatórias em quatro bacias hidrográficas, concluiu que os melhores resultados foram encontrados ao combinar o uso de técnicas compensatórias distribuídas e integradas à paisagem urbana com o aumento de áreas cobertas por vegetação nativa.

2.5 Modelagem hidrológica

Os modelos hidrológicos são uma representação de algum processo natural com o objetivo de entendê-lo e buscar respostas para os diferentes problemas encontrados. Os modelos hidrológicos possibilitam representar o comportamento de bacias hidrográficas e permitem o estudo de condições diferentes das observadas (TUCCI, 1998). Atualmente, diversos modelos hidrológicos têm sido aplicados na simulação de vazões e estudo de diferentes cenários, como: *Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS), *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), *Model for Urban Sewers* (MOUSE), *Storm Water Management Model* (SWMM), *Stormwater Investment Strategy Evaluation* (StormWise) entre outros (ECKART; MCPHEE; BOLISSETTI, 2017; FORMIGA et al., 2016; USACE, 2000).

Cada modelo tem suas características específicas de aplicação, escalas e premissas (MOHD SIDEK et al., 2016), por isso a escolha de um modelo deve ser

feita com base na aplicação desejada, o local de estudo e a base de dados disponíveis. Dos modelos citados os que são utilizados para áreas urbanas e permitem a modelagem de técnicas compensatórias são: SWMM, MOUSE e StormWise (ECKART; MCPHEE; BOLISETTI, 2017; JAIN et al., 2016). Destes, somente o SWMM é de acesso livre, o que facilita seu uso em outros locais (ECKART; MCPHEE; BOLISETTI, 2017).

O SWMM é um modelo de transformação chuva-vazão desenvolvido para áreas urbanas, que permite a modelagem dos componentes estruturais do sistema de drenagem e de técnicas compensatórias (RABORI; GHAZAVI; REVESHTY, 2017). Uma das vantagens na escolha do SWMM é sua ampla utilização em todo o mundo, o que comprova sua aplicabilidade em diferentes condições climáticas, uso do solo e relevo (ZHANGSUI; LIZHE, 2019).

2.5.1 O Storm Water Management Model (SWMM) e sua aplicação

O SWMM consiste em um modelo dinâmico de chuva-vazão amplamente utilizado no mundo (WANG et al., 2017a), capaz de simular o escoamento superficial em áreas urbanas além de outras aplicabilidades como projetos de sistemas de microdrenagem urbana, incluindo: bacias de contribuição, sarjetas, galerias e bacias de retenção ou amortecimento de cheias e técnicas compensatórias de drenagem (JANG et al., 2007; MIKOVITS et al., 2017; ROSSMAN; EMERITUS; EPA, 2015; YAO; WEI; CHEN, 2016). Sua capacidade de modelar o regime de vazões fornece informações úteis relativas ao projeto e desempenho de estruturas de drenagem, sejam elas estruturas cinzas ou verdes (FLETCHER; ANDRIEU; HAMEL, 2013). Mesmo na ausência de calibração o SWMM é capaz de produzir resultados próximos aos dados observados (JANG et al., 2007).

O SWMM opera com base nos dados físicos da bacia de estudo e dados de precipitação, sendo capaz de quantificar o escoamento superficial formado e seu transporte através de galerias, estações de tratamento e estruturas de armazenamento e infiltração. A variabilidade espacial é feita através da divisão da área de estudo em várias sub-bacias menores e homogêneas, cada uma contendo áreas permeáveis e impermeáveis. (ROSSMAN; EMERITUS; EPA, 2015).

O SWMM divide o sistema de drenagem em quatro módulos, sendo (ROSSMAN; EMERITUS; EPA, 2015):

- a) Atmosfera: representado pelas estações pluviométricas ou pluviográficas. Representa a entrada de dados climáticos no programa.
- b) Superfície do solo: representado pelas sub-bacias hidrográficas. Recebe a precipitação fornecida e a transforma em infiltração e ou escoamento superficial. Para cada sub-bacia deve ser fornecida a área permeável (onde é permitida a infiltração e ou armazenamento) e área impermeável (onde é possível armazenamento quando especificado).
- c) Recarga: recebe os valores de infiltração fornecidos pelo compartimento de superfície do solo e transfere parte desta infiltração via escoamento subsuperficial para o compartimento de transporte.
- d) Transporte: representado por canais, galerias, estações elevatórias, reguladores de vazão e estações de armazenamento/tratamento. Recebe o escoamento superficial. Sua modelagem é feita através de condutos e junções.

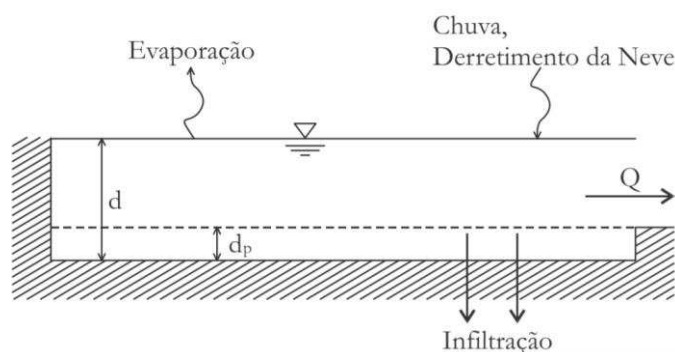
No SWMM também é possível adicionar as seguintes técnicas compensatórias de drenagem: células de biorretenção, jardins de chuva, telhados verdes, valetas de infiltração, pavimento permeável; cisternas; desconexão de telhados e valetas vegetadas.

2.5.1.1 Métodos utilizados pelo SWMM para modelagem

Escoamento superficial

A obtenção do escoamento superficial é feita considerando um balanço hídrico (Figura 2-7). A bacia é considerada como um reservatório não linear. A entrada de água no sistema é feita a partir da precipitação e contribuição de sub-bacia a montante. As saídas ocorrem pela infiltração, evaporação e escoamento superficial. O modelo considera que a bacia é capaz de armazenar um determinado volume de água e o escoamento superficial só ocorre quando esta capacidade é superada (JAIN et al., 2016; ROSSMAN; EMERITUS; EPA, 2015).

Figura 2-7. Modelo conceitual de geração do escoamento superficial.



Fonte: Rossman, (2010)

Infiltração

A infiltração pode ser contabilizada no SWMM pelos métodos de Horton, Horton modificado, Green Ampt, Green Ampt Modificado e Número da Curva (ROSSMAN; EMERITUS; EPA, 2015). Muitos trabalhos adotam o método do Número da Curva do NRCS (*Natural Resources Conservation Service*) devido a sua ampla utilização e facilidade na obtenção dos dados, quando comparado aos outros métodos de infiltração (BABAEI; GHAZAVI; ERFANIAN, 2018; PALLA; GNECCO; LA BARBERA, 2018; RABORI; GHAZAVI; REVESHTY, 2017).

Evaporação

Em modelagens contínuas o cálculo da evapotranspiração potencial (ETP) pode ser feito utilizando a equação de Penman-Monteith, sendo que os parâmetros como albedo são variados para representar cada técnica compensatória. Contudo, para simulação de um único evento crítico, a evaporação pode ser desconsiderada. Isto é justificado pois, em um evento de precipitação intensa a umidade relativa do ar é elevada, tornando os valores evaporação desprezíveis (PRUSKI; BRANDÃO; SILVA, 2004).

2.5.1.2 Condução do escoamento superficial

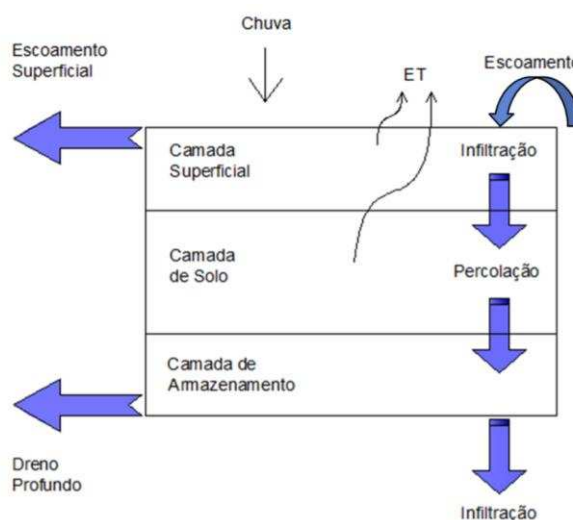
Determinado o volume de escoamento superficial gerado em cada sub-bacia, o SWMM calcula o seu transporte. O SWMM utiliza as equações de Saint Venant para cálculo do transporte do escoamento superficial nas galerias e leitos naturais. Estas equações descrevem o escoamento superficial em rios e canais, pelas equações de conservação de massa e quantidade de movimento (PORTO et al., 2012). As equações de Saint Venant permitem que simplificações sejam feitas, das

quais os modelos de escoamento são derivados (TUCCI, 1998). Pode-se utilizar três modelos hidráulicos de transporte: vazão constante, onda cinemática e onda dinâmica. Todos os métodos utilizam a equação de Manning para relacionar vazão com profundidade de escoamento e declividade. Quando o conduto é pressurizado, o modelo utiliza a equação de Hazen-Williams ou a de Darcy-Weisbach para cálculo da perda de carga (ROSSMAN; EMERITUS; EPA, 2015).

2.5.1.3 Representação das técnicas compensatórias

Para representação das técnicas compensatórias, o SWMM as divide em diferentes camadas (Figura 2-8), para as quais são definidas as características gerais (espessura, volume de vazios, condutividade hidráulica, rugosidade, entre outras). Para cada técnica fornecida pelo modelo é permitida uma combinação diferente de camadas (ROSSMAN; EMERITUS; EPA, 2015).

Figura 2-8. Modelo conceitual de uma célula de biorretenção pelo SWMM



Fonte: Rossman, (2010)

Há duas formas de se adicionar técnicas compensatórias no SWMM (FENG; BURIAN; POMEROY, 2016). A primeira permite alterar o uso de uma sub-bacia já existente e adicionar vários tipos de técnicas, atuando em paralelo. A segunda forma, cria uma sub-bacia exclusivamente para cada técnica compensatória., o que permite a alocação em série das mesmas, e que outras sub-bacias deságuem na sub-bacia com técnicas compensatórias (ROSSMAN; EMERITUS; EPA, 2015).

2.5.1.4 Chuva de projeto

No SWMM é possível simular condições contínuas ou eventos isolados (BANDA; KASITU, 2018). Para projetos de drenagem recomenda-se utilizar uma chuva de projeto com um período de retorno adequado. Apesar de no Brasil não existir normas específicas para projetos de drenagem, Canholi, (2014) e Porto et al., (2012) aconselham a utilização de períodos de retorno para projetos de microdrenagem de 2 a 10 anos.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

Avaliar o cenário atual de drenagem e o impacto da utilização de técnicas compensatórias na redução da lâmina escoada superficialmente em uma microbacia urbana.

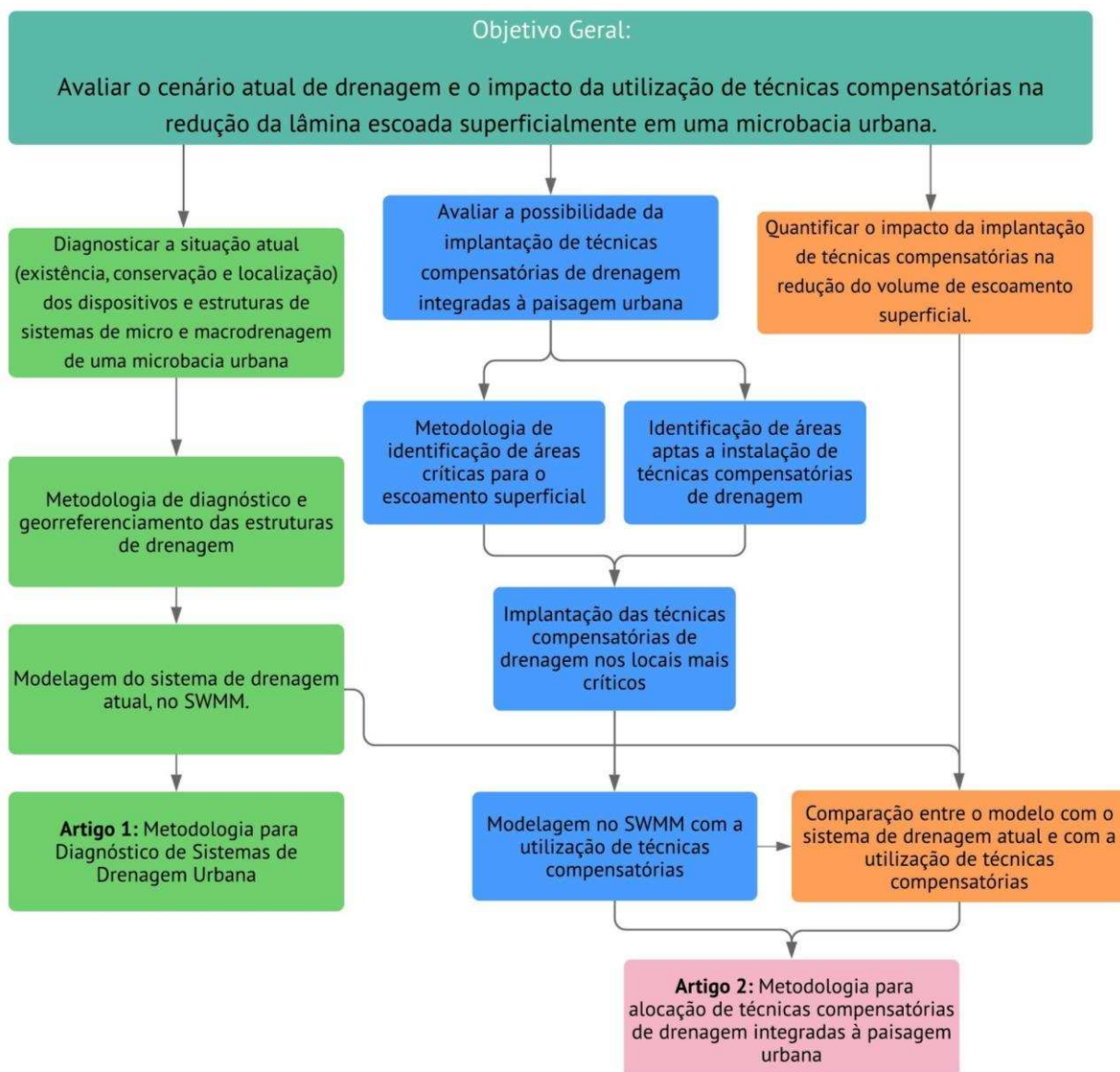
3.2 Objetivos específicos

- Diagnosticar a situação atual (existência, conservação e localização) dos dispositivos e estruturas de sistemas de micro e macrodrenagem de uma microbacia urbana
- Avaliar a possibilidade da implantação de técnicas compensatórias de drenagem integradas à paisagem urbana; e
- Quantificar o impacto da implantação de técnicas compensatórias na redução do volume de escoamento superficial.

4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho foi dividido em dois artigos que abordam os aspectos descritos na introdução e nos objetivos. A estrutura deste trabalho está representada na Figura 4-1.

Figura 4-1. Estrutura organizacional do trabalho



Fonte: Autora

4.1 Artigo 1: Metodologia para diagnóstico de sistemas de drenagem urbana

Este artigo propõe uma metodologia de diagnóstico da situação atual de drenagem urbana referente a uma microbacia urbana, avaliando a existência,

conservação, localização dos dispositivos de micro e macrodrenagem, bem como sua propensão a enchentes.

Devido à falta de informações acerca do sistema de drenagem, foi realizado um levantamento em campo para georreferenciamento da micro e macrodrenagem. Identificou-se as características da rede de microdrenagem, pontos na macrodrenagem relativos à instabilidade de encostas, presença de resíduos sólidos, esgoto doméstico e as áreas de preservação permanente. Este primeiro artigo apresenta uma base de dados atual do sistema de drenagem. Nesta base de dados é possível realizar as modificações na situação das estruturas, caso intervenções sejam feitas, sendo um forte aliado à gestão de águas pluviais urbanas.

O modelo SWMM foi utilizado para simular o escoamento superficial causado por uma chuva de projeto, identificando assim pontos onde ocorrem alagamentos. Através da metodologia desenvolvida foi possível determinar áreas que possuem algum tipo de inadequação de drenagem e determinar as sub-bacias que possuem maior potencial para sobrecarregar o sistema de drenagem.

4.2 Artigo 2: Metodologia para alocação de técnicas compensatórias de drenagem integradas à paisagem urbana

Metodologias para priorização de áreas para alocação de técnicas compensatórias são fundamentais para uma alocação eficiente de recursos. Apesar dos benefícios gerados pelo emprego de técnicas compensatórias serem amplamente conhecidos, sua adoção ainda é incipiente, e são poucos os trabalhos realizados em áreas urbanas. Este artigo apresenta uma metodologia para priorização de áreas críticas ao escoamento superficial e alocação de técnicas compensatórias de drenagem. Neste foram identificadas áreas mais susceptíveis à geração, transporte e acumulação do escoamento superficial.

O impacto da aplicação de técnicas compensatórias em uma microbacia urbanizada também foi avaliado. Assim como no primeiro artigo, foi utilizado o modelo SWMM para simular o escoamento superficial causado por uma chuva de projeto. O SWMM também possibilitou a comparação da lâmina escoada com e sem o uso de técnicas compensatórias, bem como a identificação dos pontos de alagamento.

REFERÊNCIAS

ARAGÃO, R. DE et al. Impacto do uso do solo pelo aumento da densidade populacional sobre o escoamento numa área urbana do Nordeste Brasileiro via geotecnologias e modelagem hidrológica. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n. 2, p. 543–557, 2017.

AURÉLIO, M.; CRUZ, S.; TUCCI, C. E. M. Avaliação dos Cenários de Planejamento na Drenagem Urbana. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 13, p. 59–71, 2008.

BABAEI, S.; GHAZAVI, R.; ERFANIAN, M. Urban flood simulation and prioritization of critical urban sub-catchments using SWMM model and PROMETHEE II approach. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 105, p. 3–11, 1 jun. 2018.

BALLARD, B. W. et al. **The SuDS Manual C753**. 5. ed. London: CIRIA, 2015.

BANDA, D.; KASITU, R. Modeling of storm water runoff for Kitwe CBD drainage system using SWMM software. **Rwanda Journal of Engineering, Science, Technology and Environment**, v. 1, n. 1, p. 1–7, 2018.

BAPTISTA, M. B.; NASCIMENTO, N. DE O.; BARRAUD, S. **Técnicas compensatórias em drenagem urbana**. Porto Alegre: ABRH, 2011.

BASTOS, R. K. X. et al. **Plano Municipal de Saneamento Básico**. Viçosa - MG: Prefeitura Municipal de Viçosa, SAAE, UFV, 2009.

BECK, N. G. et al. An urban runoff model designed to inform stormwater management decisions. **Journal of Environmental Management**, v. 193, p. 257–269, 2017.

BELL, C. D. et al. Hydrologic response to stormwater control measures in urban watersheds. **Journal of Hydrology**, v. 541, p. 1488–1500, 2016.

BRASIL. **Lei nº 11.445**, 2007. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm>. Acesso em: 9 jan. 2020

BRASIL, M. **Guia para a elaboração de planos municipais de saneamento**. Brasília/SNSA: Ministério das Cidades, 2006.

CANHOLI, A. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

CASCONE, S. et al. A comprehensive study on green roof performance for retrofitting existing buildings. **Building and Environment**, v. 136, p. 227–239, 15 maio 2018.

CASTAGNA, G. **Drenagem urbana: Como desafogar as cidades**, FLUXUS, Design Ecológico, São Paulo, Fiesp e Ciesp, 2016. Disponível em: <<http://fluxus.eco.br/>>

CHARALAMBOUS, K. et al. Stormwater retention and reuse at the residential plot level-green roof experiment and water balance computations for long-term use in Cyprus. **Water (Switzerland)**, v. 11, n. 5, p. 1–11, 2019.

DALEY, R. M. **A Guide to Stormwater Best Management Practices City of Chicago A Guide to Stormwater Best Management Practices**. Chicago: City of Chicago, 2003

DONG, X.; GUO, H.; ZENG, S. Enhancing future resilience in urban drainage system: Green versus grey infrastructure. **Water Research**, v. 124, p. 280–289, nov. 2017.

DUAN, H.-F.; LI, F.; YAN, H. Multi-Objective Optimal Design of Detention Tanks in the Urban Stormwater Drainage System: LID Implementation and Analysis. **Water Resources Management**, v. 30, n. 13, p. 4635–4648, 25 out. 2016.

ECKART, K.; MCPHEE, Z.; BOLISSETTI, T. Performance and implementation of low impact development – A review. **Science of the Total Environment**, v. 607–608, p. 413–432, 2017.

FENG, Y.; BURIAN, S.; POMEROY, C. Potential of green infrastructure to restore predevelopment water budget of a semi-arid urban catchment. **Journal of Hydrology**, v. 542, p. 744–755, 2016.

FLETCHER, T. D. et al. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. **Urban Water Journal**, v. 12, n. 7, 2015.

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

FORMIGA, K. T. M. et al. Calibração do Storm Water Management Model (SWMM) utilizando algoritmos evolucionários multiobjetivo. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 21, n. 4, p. 11, 2016.

GALLET, D. The Value of Green Infrastructure: A Guide to Recognizing Its Economic, Environmental and Social Benefits. **Proceedings of the Water Environment Federation**, v. 2011, n. 17, p. 924–928, 1 jan. 2011.

HAMEL, P.; DALY, E.; FLETCHER, T. D. Which baseflow metrics should be used in assessing flow regimes of urban streams? **Hydrological Processes**, v. 29, n. 20, p. 4367–4378, 30 set. 2015.

HARADA, S.; ICHIKAWA, A. Performance of the Drainage Infiltration Strata: Statistical and Numerical Analysis. **Water Science Technology**, v. 29, n. 1, p. 255–265, 1994.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, **Pesquisa Nacional De Saneamento Básico, 2008**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.

JAIN, G. V. et al. Estimation of sub-catchment area parameters for Storm Water Management Model (SWMM) using geo-informatics. **Geocarto International**, v. 31, n. 4, p. 462–476, 20 abr. 2016.

JAMES, M. B.; DYMOND, R. L. Bioretention Hydrologic Performance in an Urban Stormwater Network. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 17, n. 3, p. 431–436, 2012.

JANG, S. et al. Using SWMM as a tool for hydrologic impact assessment. **Desalination**, v. 212, n. 1–3, p. 344–356, 25 jun. 2007.

JATO-ESPINO, D. et al. Coupling GIS with Stormwater Modelling for the Location Prioritization and Hydrological Simulation of Permeable Pavements in Urban Catchments. **Water**, v. 8, n. 10, p. 451, 14 out. 2016.

JENNINGS, A. A. et al. Rain Barrel–Urban Garden Stormwater Management Performance. **Journal of Environmental Engineering**, v. 139, n. 5, p. 757–765, maio 2013.

JIA, H. et al. Planning of LID-BMPs for urban runoff control: The case of Beijing Olympic Village. **Separation and Purification Technology**, v. 84, p. 112–119, 9 jan. 2012.

KAYKHOSRAVI, S. et al. The Low-Impact Development Demand Index: A New Approach to Identifying Locations for LID. n. Lid, p. 11–15, 2019.

KONG, F. et al. Modeling stormwater management at the city district level in response to changes in land use and low impact development. **Environmental Modelling & Software**, v. 95, p. 132–142, 2017.

LAGADEC, L.-R. et al. Description and evaluation of a surface runoff susceptibility mapping method. **Journal of Hydrology**, v. 541, p. 495–509, 2016.

LEE, J. G. et al. A watershed-scale design optimization model for stormwater best management practices. **Environmental Modelling and Software**, v. 37, p. 6–18, 2012.

LI, C. et al. Can stormwater control measures restore altered urban flow regimes at the catchment scale? **Journal of Hydrology**, v. 549, p. 631–653, 1 jun. 2017.

LI, J.; LI, Y.; LI, Y. SWMM-based evaluation of the effect of rain gardens on urbanized areas. **Environmental Earth Sciences**, v. 75, n. 17, p. 14, 2016.

LIAO, Z. L. et al. Analysis on LID for highly urbanized areas' waterlogging control: Demonstrated on the example of Caohejing in Shanghai. **Water Science and Technology**, v. 68, n. 12, p. 2559–2567, 2013.

LIU, W.; CHEN, W.; PENG, C. Influences of setting sizes and combination of green infrastructures on community's stormwater runoff reduction. **Ecological Modelling**, v. 318, p. 236–244, 2015.

LIU, Y. et al. Optimal selection and placement of BMPs and LID practices with a rainfall-runoff model. **Environmental Modelling and Software**, v. 80, p. 281–296, 2016.

LIU, Y. et al. A review on effectiveness of best management practices in improving hydrology and water quality: Needs and opportunities. **Science of the Total Environment**, v. 601–602, p. 580–593, 2017.

LOPERFIDO, J. V. et al. Effects of distributed and centralized stormwater best management practices and land cover on urban stream hydrology at the catchment scale. **Journal of Hydrology**, v. 519, p. 2584–2595, 27 nov. 2014.

MACEDO, M. B. et al. Learning from the operation, pathology and maintenance of a bioretention system to optimize urban drainage practices. **Journal of Environmental Management**, v. 204, p. 454–466, 2017.

MACEDO, M. B.; LAGO, C. A. F.; MENDIONDO, E. M. Stormwater volume reduction and water quality improvement by bioretention: Potentials and challenges for water security in a subtropical catchment. **Science of The Total Environment**, v. 647, p. 923–931, jan. 2019.

MALEKPOUR, S. et al. Preparing for disruptions: A diagnostic strategic planning intervention for sustainable development. **Cities**, v. 63, p. 58–69, 1 mar. 2017.

MANQUIZ, M. C.; LEE, S. Y.; KIM, L. H. Long-term monitoring of infiltration trench for nonpoint source pollution control. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 212, n. 1–4, p. 13–26, out. 2010.

MARIA, A. C. DE S.; FARIA, T. C. D. A.; STEPHAN, I. I. C. Um retrato da evolução urbana de Viçosa-MG: impactos da federalização da UFV sobre a cidade (1969-2014). **Revista Brasileira de Planejamento e Desenvolvimento**, v. 3, n. 1, p. 37–54, 2014.

MARTIN-MIKLE, C. J. et al. Identifying priority sites for low impact development (LID) in a mixed-use watershed. **Landscape and Urban Planning**, v. 140, p. 29–41, 2015.

MELO, T. DOS A. T. DE et al. Jardim de chuva: sistema de biorretenção para o manejo das águas pluviais urbanas. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 4, p. 147–165, 2014.

MENEZES FILHO, F. C. M. DE;; COSTA, A. R. DA. Verificação Do Dimensionamento Das Galerias De Águas Pluviais Em Uma Sub - Bacia Do Córrego Botafogo Na Cidade De Goiânia - Go **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 1, n. 4, p. 1–11, 2012.

MENEZES FILHO, F. C. M. DE; TUCCI, C. E. M. Alteração na relação entre densidade habitacional e área impermeável: Porto Alegre-RS. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 9, n. 1, p. 49–55, 2012.

MIGUEZ, M. G.; REZENDE, O. M.; VERÓL, A. P. City Growth and Urban Drainage Alternatives: Sustainability Challenge. **Journal of Urban Planning and Development**, v. 141, n. 3, p. 4014026, set. 2015.

MIKOVITS, C. et al. Decision Support for Adaptation Planning of Urban Drainage Systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 143, n. 12, p. 4017069, dez. 2017.

MIKOVITS, C.; RAUCH, W.; KLEIDORFER, M. Importance of scenario analysis in urban development for urban water infrastructure planning and management. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 68, p. 9–16, 1 mar. 2018.

MOHD SIDEK, L. et al. Urban Stormwater Management Model and Tools for Designing Stormwater Management of Green Infrastructure Practices. **International Conference on Advances in Renewable Energy and Technologies (ICARET 2016)**, n. 32, p. 19, 2016.

PALLA, A.; GNECCO, I.; LA BARBERA, P. Assessing the hydrologic performance of a green roof retrofitting scenario for a small urban catchment. **Water**, v. 10, n. 8, 2018.

PORTO, R. et al. Drenagem Urbana. In: UFRGS/ABRH (Ed.). . **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2012. p. 943.

PRUSKI, F. F.; BRANDÃO, V. DOS S.; SILVA, D. D. DA. **Escoamento superficial**. 2. ed. Viçosa - MG: UFV, 2004.

RABORI, A. M.; GHAZAVI, R.; REVESHTY, M. A. Sensitivity analysis of SWMM model parameters for urban runoff estimation in semi-arid area. **Journal of Biodiversity and Environmental Sciences**, v. 10, n. 5, p. 284–294, 2017.

RIGHETTO, A. M. **Manejo De Águas Pluviais Urbanas**. Rio de Janeiro: PROSAB, 2009.

ROSA, D. W. B. **Resposta hidrológica de uma bacia hidrográfica urbana à implantação de técnicas compensatórias de drenagem urbana-Bacia do Córrego do Leiteão, Belo Horizonte**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2017.

ROSSMAN, L. A. **EPA SWMM 5.0 Modelo de Gestão de Drenagem Urbana** Universidade Federal da Paraíba, UFPB Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento, , 2010. Disponível em: <http://www.lenhs.ct.ufpb.br/html/downloads/swmm/SWMM_2012.pdf>

ROSSMAN, L. A.; EMERITUS, E. S.; EPA, U. S. E. P. A. **Storm Water Management Model User's Manual**. Cincinnati: Office of Research and Development - Water Supply and Water Resources Division, 2015.

SHUSTER, W. et al. Factors Contributing to the Hydrologic Effectiveness of a Rain Garden Network (Cincinnati OH USA). **Infrastructures**, v. 2, n. 3, p. 11, 6 set. 2017.

SILVA, K. A. DA. **Análise da eficiência de métodos de controle de enchentes na atenuação de picos de cheias utilizando o modelo computacional SWMM – Storm Water Management Model**. (Dissertação de Mestrado) Universidade Federal de Goiás, 2007.

SILVA, K. C. DA; POLETO, C. Drenagem Urbana Sustentável: Aspectos Hidrológicos, Influência dos Sedimentos e o Reequilíbrio dos Ciclos Naturais. **II Congresso Internacional de Hidrossedimentologia**, v. Anais, p. 6, 2017.

SILVEIRA, A. L. L. Hidrologia urbana no Brasil. In: **Braga B., Tucci CEM y Tozzi M**. 1ª.ed. ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 1998.

SINGH, P.; GUPTA, A.; SINGH, M. Hydrological inferences from watershed analysis for water resource management using remote sensing and GIS techniques. **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences**, v. 17, p. 111–121, 2014.

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

TASCA, F. A. et al. O papel da drenagem urbana na prevenção de desastres hidrológicos na bacia hidrográfica do rio Itajaí Açu. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 1, n. 69, p. 129–142, 2017.

TASCA, F. A.; POMPÊO, C. A.; FINOTTI, A. R. Evolução da gestão da drenagem urbana na bacia hidrográfica do rio Itajaí Açu. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade GeAS**, v. 7, n. 2, p. 264–283, 2018.

TAVANTI, D. R.; BARBASSA, A. P. Análise dos Desenvolvimentos Urbanos de Baixo Impacto e Convencional. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 4, p. 17–28, 2012.

TUCCI, C. E. M. **Modelagem Hidrológica**. 1 Edição ed. Porto Alegre: Editora da Universidade UFRGS, 1998.

TUCCI, C. E. M. **Gestão de Águas Pluviais Urbanas**. Rio Grande do Sul: Ministério das Cidades - Global Water Partnership - World Bank - Unesco, 2005.

TUCCI, C. E. M.; HESPANHOL, I.; NETTO, O. DE M. C. **Gestão da Água no Brasil**. Brasília - DF: UNESCO, 2001.

TUCCI, C.; GOLDENFUM, J.; ARAUJO, P. Avaliação Da Eficiência Dos Pavimentos Permeáveis Na Redução De Escoamento Superficial. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 5, n. 3, p. 21–29, 2000.

USACE. **Hydrologic Modeling System HEC-HMS Technical Reference Manual CPD-74B**, 2000. Disponível em: <[http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS_Technical_Reference_Manual_\(CPD-74B\).pdf](http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS_Technical_Reference_Manual_(CPD-74B).pdf)>. Acesso em: 15 out. 2018

WANG, M. et al. A framework to support decision making in the selection of sustainable drainage system design alternatives. **Journal of Environmental Management**, v. 201, p. 145–152, 2017a.

WANG, Y. et al. A Diagnostic Decision Support System for BMP Selection in Small Urban Watershed. **Water Resources Management**, v. 31, n. 5, p. 1649–1664, 9 mar. 2017b.

WINSTON, R. J.; DORSEY, J. D.; HUNT, W. F. Quantifying volume reduction and peak flow mitigation for three bioretention cells in clay soils in northeast Ohio. **Science of The Total Environment**, v. 553, p. 83–95, 15 maio 2016.

YANG, J. et al. Hydrologic response of a tropical watershed to urbanization. **Journal of Hydrology**, v. 517, p. 538–546, 2014.

YAO, L.; WEI, W.; CHEN, L. How does imperviousness impact the urban rainfall-runoff process under various storm cases? **Ecological Indicators**, v. 60, p. 893–905, 2016.

YAZDANFAR, Z.; SHARMA, A. Urban drainage system planning and design - Challenges with climate change and urbanization: A review. **Water Science and Technology**, v. 72, n. 2, p. 165–179, 2015.

ZALEWSKI, M.; SANTIAGO-FANDINO, V.; NEATE, J. Energy, water, plant interactions: “Green feedback” as a mechanism for environmental management and control through the application of phytotechnology and ecohydrology. **Hydrological Processes**, v. 17, n. 14, p. 2753–2767, 2003.

ZELLNER, M. et al. Exploring the effects of green infrastructure placement on neighborhood-level flooding via spatially explicit simulations. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 59, p. 116–128, 2016.

ZHANGSUI; LIZHE. Simulation of Urban Rainstorm Waterlogging and Pipeline Network Drainage Process Based on SWMM. **IOP Conference Series: Journal of Physics**, v. 1213, p. 52061, 2019.

ZIMMERMAN, R.; BRENNER, R.; ABELLA, J. L. Green infrastructure financing as an imperative to achieve green goals. **Climate**, v. 7, n. 3, p. 1–20, 2019.

5 ARTIGO 1: METODOLOGIA PARA DIAGNÓSTICO DE SISTEMAS DE DRENAGEM URBANA

5.1 Resumo

A impermeabilização desordenada do solo é responsável pela redução da infiltração, redução do tempo de concentração do escoamento e aumento das vazões de pico, tornando as inundações um problema cada vez mais frequente em áreas urbanizadas. A falta de planejamento do setor de drenagem é um fator comum à diversas cidades brasileiras. Neste contexto, são necessárias intervenções e, para garantia da efetividade das ações, torna-se fundamental o conhecimento das características da bacia. Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi propor uma metodologia de diagnóstico da situação atual (existência, conservação e localização) dos dispositivos e estruturas de sistemas de micro e macrodrenagem de uma microbacia urbana, bem como sua propensão à enchentes. Para isto, realizou-se o georreferenciamento das estruturas de micro e macrodrenagem. Foram identificadas as características da rede de drenagem, pontos na macrodrenagem relativos à instabilidade de encostas, presença de resíduos sólidos e esgoto e as áreas de preservação permanente. Também foi utilizado o modelo SWMM, *Storm Water Management Model*, que permitiu simular o escoamento superficial causado por uma chuva de projeto, identificando assim pontos onde ocorrem alagamentos. Das 67 sub-bacias estudadas, 42 apresentaram pontos de alagamentos. Através da metodologia proposta foi possível determinar áreas que possuem algum tipo de inadequação de drenagem e determinar as sub-bacias que possuem maior potencial para sobrecarregar o sistema de drenagem, no caso as sub-bacias localizadas nas áreas de cabeceira da bacia, que caso sejam objeto de intervenção, podem amenizar os impactos ao longo de toda a bacia. A metodologia proposta se apresentou eficaz para identificar pontos críticos para intervenções no sistema de drenagem urbana da bacia hidrográfica.

Palavras-chave: Áreas prioritárias, Drenagem urbana, Intervenção, Planejamento urbano.

5.2 Abstract

The disordered impermeabilization of the soil is responsible for reducing the infiltration, the time of concentration and for increasing the peak flows, making flooding an increasingly frequent problem in urbanized areas. The lack of planning in the urban drainage sector is common in several Brazilian cities. Thus, interventions are necessary and, to ensure the effectiveness of the actions, it is paramount to know the characteristics of the catchment. Therefore, this work's goal was to propose a methodology for diagnosing the current situation of an urban catchment, evaluating minor and major drainage systems concerning the existence, conservation, location of its components, as well as the catchment flooding propensity. It was performed the georeferencing of minor and major drainage structures. It was identified the characteristics of the urban drainage system and points in the major drainage related to slope instability, solid waste's and sewage's presence and areas of permanent preservation. The SWMM model, Storm Water Management Model, was also used. It allowed simulating the runoff caused by a design rainfall, thus identifying points where flooding occurs. Among the 67 sub-catchments studied, 42 showed flooding points. The proposed methodology made it possible to determine places that have some kind of drainage inadequacy, as well as, to determine the sub-catchments that have the greatest potential to overload the urban drainage system, in this case, the sub-catchments located in the upper areas of the catchment. Interventions made in these areas might mitigate the impacts throughout the entire catchment. The proposed methodology proved to be effective in identifying critical points for interventions in the urban drainage system of the river catchment.

Key-words: Interventions; Priority areas; Urban drainage; Urban planning.

5.3 Introdução

A alteração da paisagem natural pela urbanização impacta a hidrologia de uma bacia, pelo aumento do escoamento superficial, e redução da recarga do lençol freático e da evapotranspiração (FENG; BURIAN; POMEROY, 2016). O aumento do escoamento superficial contribui para a ocorrência de frequentes inundações, que impedem o tráfego, geram perdas econômicas, proliferação de vetores e até a perdas de vidas humanas (GRECCO et al., 2012; QIAO; KRISTOFFERSSON; RANDRUP, 2018; YAO; WEI; CHEN, 2016).

Desde o século XIX a drenagem é projetada conforme a visão sanitária, cujo objetivo é conduzir o escoamento superficial para fora da área urbana o mais rapidamente possível (SILVEIRA, 1998). Neste contexto, os sistemas convencionais de drenagem, formados por bocas de lobo e galerias pluviais, são infraestruturas essenciais para o funcionamento das cidades, por conduzirem o escoamento superficial para outras áreas (MIKOVITS et al., 2017). Contudo, devido ao aumento da complexidade da paisagem urbana, o manejo de águas pluviais exige uma compreensão mais profunda do seu comportamento hidrológico dentro de bacias urbanas (YAO; WEI; CHEN, 2016).

A falta de planejamento no crescimento das cidades (MIGUEZ; REZENDE; VERÓL, 2015; YANG et al., 2014) permitiu que fossem criados loteamentos com infraestrutura inadequada e altas taxas de impermeabilização do solo. Em muitos municípios, o sistema de drenagem ainda é elaborado de forma emergencial, não sendo considerado durante a expansão do município (TASCA et al., 2017). Devido a esta falta de planejamento, quando executados, não há registros dos sistemas convencionais de drenagem (TASCA; POMPÊO; FINOTTI, 2018).

Além da falta de registros e estudos prévios, também atuam como agravantes dos problemas de inundações urbanas as ocupações irregulares nos leitos dos rios, a falta de manutenção dos componentes do sistema de drenagem, e a obstrução de bocas de lobo e galerias por resíduos sólidos e presença de efluentes domésticos nas galerias (YAZDANFAR; SHARMA, 2015). Neste contexto, faz-se necessário intervenções no sistema, seja para manutenção, desobstrução ou adoção de outras técnicas para controle do escoamento. Contudo, a falta de um diagnóstico preciso

das condições atuais da bacia apresenta-se como empecilho para tais intervenções (TASCA et al., 2017).

O conhecimento das características da bacia, como relevo, uso do solo, tipo de solo e das estruturas de drenagem instaladas permite que sejam identificadas áreas onde o sistema não é capaz de conduzir o escoamento (BECK et al., 2017; LAGADEC et al., 2016). Neste contexto, o georreferenciamento das estruturas de drenagem permite ao gestor facilmente localizar estas áreas no ambiente urbano, permitindo uma análise mais complexa do entorno e áreas de contribuição, uso do solo e topografia (SINGH; GUPTA; SINGH, 2014). A identificação destas áreas é de suma importância para definição dos locais que necessitam de intervenção, visto a escassez de recursos (BASTOS et al., 2009; KAYKHOSRAVI et al., 2019).

Visando facilitar o processo de tomada de decisão por parte dos gestores, este artigo tem como objetivo apresentar uma metodologia de diagnóstico dos sistemas de drenagem para bacias hidrográficas urbanizadas, visando a criação de um banco de dados sobre o sistema de drenagem do município e identificação de locais que necessitam de intervenção.

5.4 Metodologia

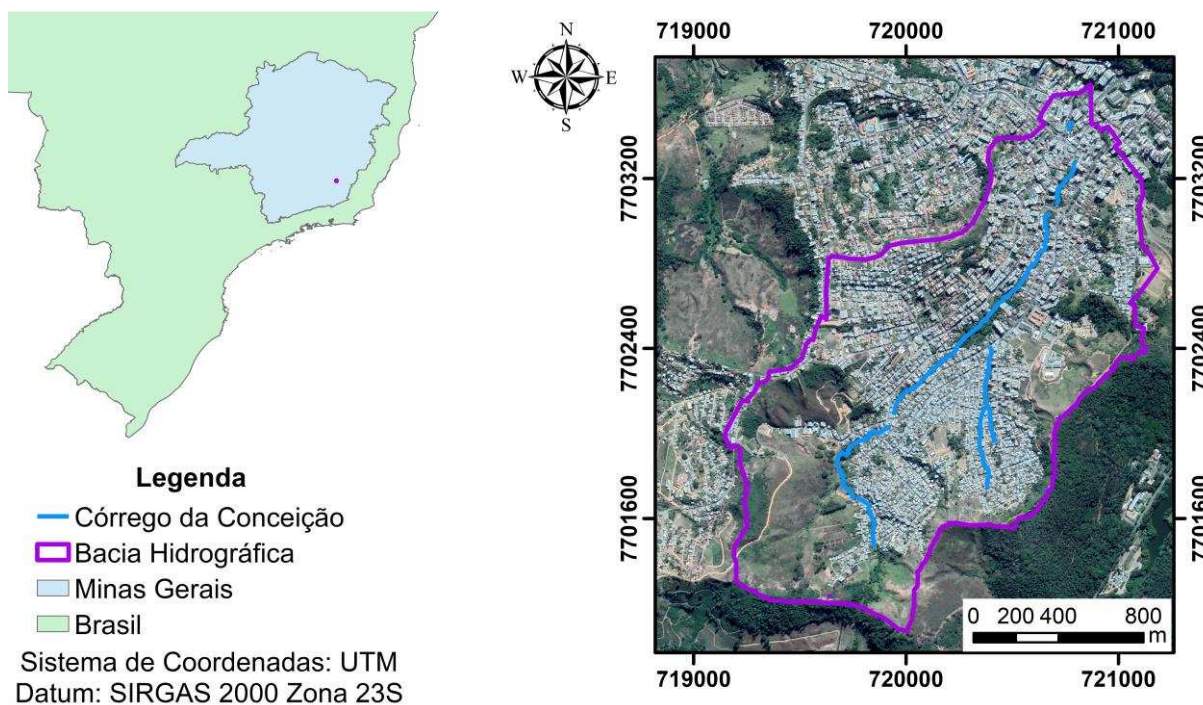
5.4.1 Área de estudo

Localizado na Zona da Mata de Minas Gerais, o município de Viçosa-MG é um dos mais importantes da região (BARROS; MARQUES, 2007), com altitude média de 649 m e área total de 299,42 km². O relevo da região é tido como forte ondulado e montanhoso (EMBRAPA, 1979), sendo conhecido como “mar de morros”. O solo da região é predominantemente Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico tipo A (EMBRAPA, 2001; FEAM et al., 2010). A população estimada de Viçosa em 2019 foi de 78.846 pessoas, com uma densidade demográfica de 241,2 hab/km² (IBGE, 2019).

O córrego da Conceição (Figura 5-1), com 2,17km de extensão, drena boa parte da área urbana de Viçosa, formando uma bacia de drenagem com área aproximada de 271,8ha, e contribuindo expressivamente para a formação do ribeirão São Bartolomeu. A bacia do córrego da Conceição tem sofrido grande pressão decorrente da urbanização, já que nela está inserido o bairro mais populoso de

Viçosa (BASTOS et al., 2009). Apresenta problemas similares ao de diversas bacias brasileiras, com áreas altamente impermeabilizadas decorrentes do processo de urbanização desordenado, agravado por obras públicas feitas de forma emergencial e sem planejamento (ARAGÃO et al., 2017; MARIA; FARIA; STEPHAN, 2014).

Figura 5-1. Área de estudo, bacia do Córrego da Conceição.



Fonte: Autora

5.4.2 Elaboração do diagnóstico do sistema de drenagem de uma bacia urbanizada

5.4.2.1 Levantamento das estruturas de microdrenagem da bacia

O levantamento inicial foi feito com o auxílio das imagens do *Google Street View* (GOOGLE, 2011, 2017). Estas imagens permitiram que as ruas do município fossem percorridas de forma rápida, a fim de se ter um diagnóstico prévio da situação do arruamento e da presença de estruturas de drenagem.

Tendo sido identificada a possível presença de bocas de lobo em determinado local da bacia, um diagnóstico de campo foi executado, a fim de se obter a localização exata e o estado de conservação das estruturas. Após coletados e georreferenciados, estes pontos foram transferidos para um sistema de informações geográficas (SIG). O arruamento foi obtido através dos dados

fornecidos pelo IBGE (2010). Também foi utilizado o mapa com o arruamento de Viçosa disponibilizado pela prefeitura, no intuito de complementar os dados fornecidos pelo IBGE.

No levantamento das bocas de lobo utilizou-se a Tabela 5-1, na qual as bocas de lobo foram caracterizadas em simples, combinada e com grelha, além da quantidade de bocas de lobo presente em cada ponto de captação, da verificação da presença de ligação clandestina de esgoto doméstico, da existência de sarjeta e de sua situação em relação ao estado de conservação. Posteriormente, foram analisados o posicionamento das bocas de lobo, o espaçamento entre elas e sua densidade.

Tabela 5-1. Tabela elaborada para fins de levantamento das informações sobre bocas de lobo em campo.

| Diagnóstico de bocas de lobo | | | | | | | |
|------------------------------|------|--------|---------------------|---------|-------------|----------|-------|
| Rua: | | | | | | Bairro: | |
| ID | Tipo | Quant. | Ligação clandestina | Sarjeta | Localização | Situação | Fotos |

Fonte: Autora

A identificação das galerias foi feita a partir da ligação dos pontos de bocas de lobo, de forma manual, seguindo sempre o sentido da declividade e passando pelo arruamento. Nesta etapa, houve o auxílio da Secretaria de Obras e Serviços Urbanos da Prefeitura Municipal de Viçosa, setor responsável pela drenagem. Como não havia registros das obras de drenagem realizadas, o levantamento de dados foi feito através de entrevistas com os funcionários que participaram destas obras. Nos trechos de galeria onde não foi possível constatar seu diâmetro, foi considerado o diâmetro de 400mm, por ser o menor diâmetro comercial recomendado para projetos de drenagem (PORTO et al., 2012; SUDERHSA, 2002) e, também por ser comumente adotado no município.

5.4.2.2 Levantamento das estruturas de macrodrenagem da bacia

A avaliação da situação do córrego da Conceição foi feita de forma presencial, nas partes não encobertas do córrego, sempre que o acesso foi possível. Também foram avaliadas as condições das nascentes existentes, bem como das áreas de preservação permanente. A Tabela 5-2 foi utilizada na análise da macrodrenagem, sendo levantadas as informações relacionadas a: leito natural ou

canalizado, estabilidade da encosta, situação da vegetação à sua margem, presença de resíduos sólidos, lançamentos de esgoto doméstico e presença de pontos de estrangulamento.

Tabela 5-2. Tabela elaborada para fins de levantamento das informações sobre a macrodrenagem.

| Diagnóstico de macrodrenagem | | | | | | | | |
|------------------------------|-------|--------------|--------|-------|--------|-----------------|---------|-------|
| Rua: | | | | | | | Bairro: | |
| Localização | Leito | Est. Encosta | Margem | R. S. | Esgoto | Estrangulamento | Obs. | Fotos |

Est. Encosta: estabilidade da encosta; R.S.: resíduos sólidos; Obs.: observação

Fonte: Autora

5.4.3 Simulação do escoamento superficial com o modelo *Storm Water Management Model, SWMM*

O SWMM é um modelo hidrológico/hidráulico capaz de, a partir de uma chuva de projeto, transformar chuva em vazão e contabilizar a lâmina de escoamento superficial gerada. O SWMM é recomendado para modelagem hidrológica de bacias urbanizadas, já que é capaz de verificar a eficiência do sistema de drenagem, permitindo identificar locais passíveis de alagamentos (FLETCHER; ANDRIEU; HAMEL, 2013; JANG et al., 2007; MIKOVITS et al., 2017; YAO; WEI; CHEN, 2016). Um dos motivos que justificou a adoção deste modelo, além de sua ampla adoção em outras localidades com diferentes condições climáticas, topográficas e uso do solo. Segundo Jang et al., (2007) o SWMM é capaz de gerar resultados próximos aos dados observados mesmo na impossibilidade de calibração.

O modelo SWMM, versão 5.1, baseia-se em um balanço hídrico, onde considera que a bacia hidrográfica atua como um reservatório não linear (LI; LI; LI, 2016). A entrada de água no sistema é feita a partir da precipitação. As saídas ocorrem pela infiltração, evaporação e escoamento superficial (LI et al., 2016). O modelo considera que a bacia é capaz de armazenar um determinado volume de água e o escoamento superficial só ocorre quando esta capacidade é superada (JAIN et al., 2016). O modelo é baseado na equação de Manning como mostrada na Equação 5-1 (ROSSMAN; EMERITUS; EPA, 2015).

$$Q = \frac{W}{n} (d - d_p)^{\frac{5}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (5 - 1)$$

Em que: Q é a vazão escoada superficialmente (m^3/s); W é a largura da bacia (m); n é o coeficiente de rugosidade de Manning ($s/m^{1/3}$); d é a lâmina de água (m); d_p é a capacidade máxima de acumulação de água (m); S é a declividade (%).

Em relação à rugosidade, utilizou-se os valores propostos por Ven Te Chow (JOBSON; FROEHLICH, 1988) seguindo também as recomendações de Pruski et al., (2004), Li et al., (2016) e Jain et al., (2016).

A infiltração foi calculada através do método do número da curva, CN, baseando-se nos trabalhos feitos por Palla, Gnecco e La Barbera (2018), Babaei, Ghazavi e Erfanian (2018) e Rabori, Ghazavi, Reveshty (2017). O valor de CN foi determinado com base na tabela proposta por Tucci, (2012) para bacias urbanas e suburbanas. Considerou-se somente a condição de umidade antecedente CUA III, a fim de simular condições críticas para o escoamento, já que esta condição considera que o solo está saturado, tendo assim sua capacidade de infiltração reduzida favorecendo o escoamento superficial (PRUSKI, 2009; TUCCI, 2012; ZHANG; SHUSTER, 2014). Os valores propostos e utilizados estão apresentados na Tabela 5-3. Como o solo da bacia é Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico tipo A, característico por apresentar boa estrutura e elevada capacidade de infiltração (LORENTZ et al., 2016), foi considerado como tipo A para escolha do CN.

Tabela 5-3. Valores de CN para bacias com ocupação urbana para solo tipo A.

| Utilização ou cobertura do solo | CUA II | CUA III - Valores utilizados |
|---|---------------|---|
| Pastagens ou terrenos em más condições | 68 | 83,8 |
| Arruamentos e estradas e com drenagem de águas pluviais | 98 | 99,2 |

Fonte: Adaptado de Tucci, (2012)

Para cálculo da propagação de cheias foi utilizado o método da onda dinâmica, que é um método hidráulico baseado nas equações de continuidade e de Saint-Venant, que apresenta bons resultados para a propagação de cheias em rios e condutos (BARATI; RAHIMI; AKBARI, 2012). Além disso, este método é também comumente utilizado no SWMM, pois possibilita o cálculo de fenômenos como remanso e pressurização de conduto (ROSSMAN; EMERITUS; EPA, 2015). Este

método também foi utilizado por Bisht et al., (2016), Palla, Gnecco e La Barbera (2018) e Wang et al., (2016).

O SWMM é dividido em três principais componentes de entrada para descrever a superfície: sub-bacias, junções e condutos. No SWMM as sub-bacias desaguam, cada uma, para um único ponto, chamado de junção, e estes por sua vez conduzem o escoamento através de condutos até o ponto de deságue final (BISHT et al., 2016).

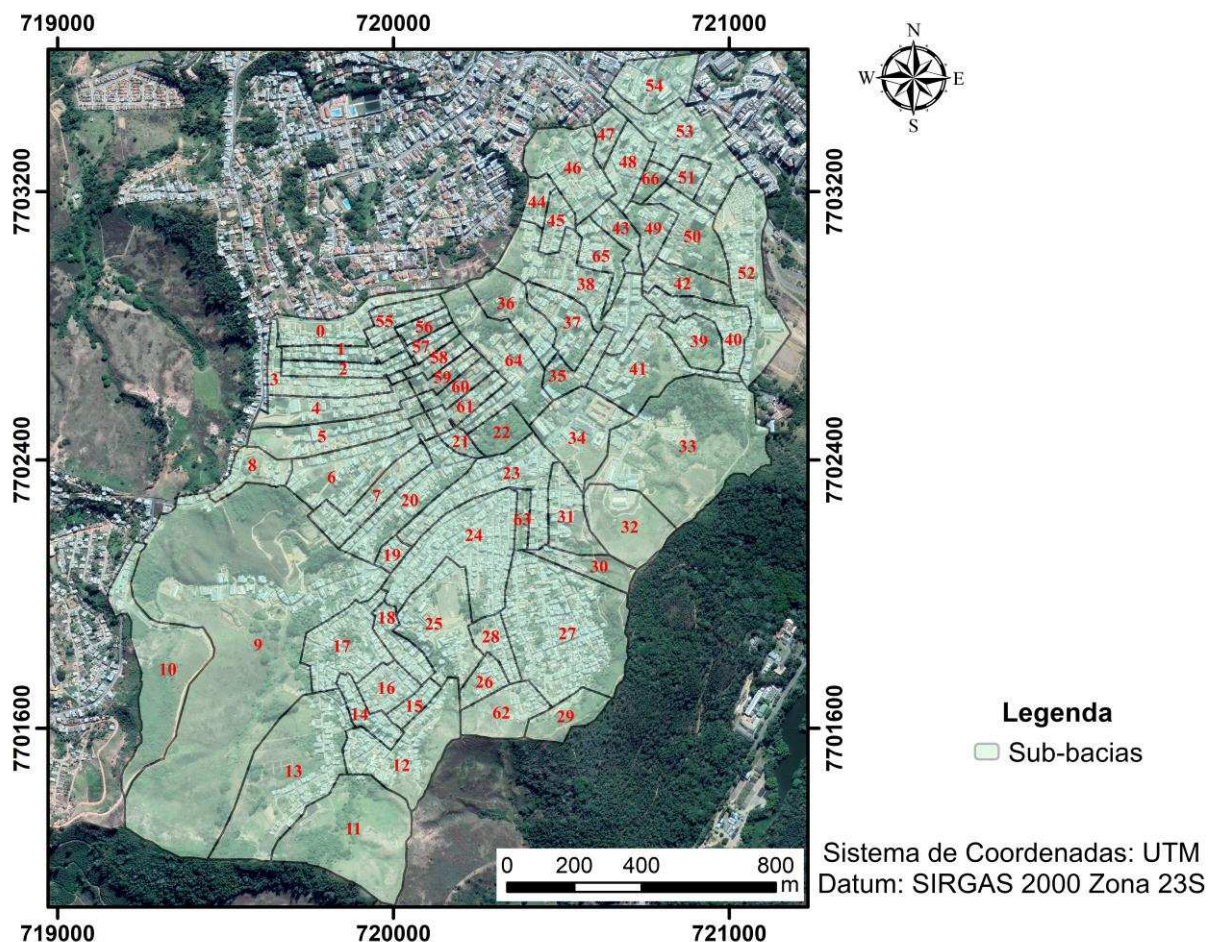
5.4.3.1 Divisão da área em sub-bacias

As bacias urbanas são formadas por um conjunto de sub-bacias com características distintas. O denso arruamento altera o caminho natural que a água percorreria na bacia (KONG et al., 2017). Portanto, para melhor simular as condições da bacia, deve-se procurar dividi-la em sub-bacias com características homogêneas (PALLA; GNECCO; LA BARBERA, 2018). Deve-se, também, considerar o sistema de drenagem existente na bacia, pois este é o responsável por captar a água da superfície e conduzi-la até o exutório (BISHT et al., 2016). Neste trabalho, seguindo as recomendações acima citadas, a bacia do córrego da Conceição foi dividida em 67 sub-bacias considerando a rede de drenagem, a topografia e o uso do solo (Figura 5-2) (BABAEI; GHAZAVI; ERFANIAN, 2018; ZHANGSUI; LIZHE, 2019). Para cada sub-bacia foram levantados os parâmetros descritos na sequência, os quais estão apresentados no Apêndice A.

5.4.3.2 Área, declividade média e largura da bacia

Os parâmetros de área e declividade média da bacia foram obtidos através do modelo digital de elevação, MDE, oriundo do satélite IKONOS com resolução espacial de 5m. Devido ao processo de urbanização das bacias hidrográficas, o sentido natural de escoamento é influenciado pelo arruamento executado nas bacias, fazendo com que as sub-bacias completamente urbanizadas fossem delimitadas manualmente (KONG et al., 2017).

Figura 5-2. Divisão bacia do córrego da Conceição em 67 sub-bacias para simulação no SWMM.



Fonte: Autora

A largura da bacia é um parâmetro que exerce grande influência no tempo de concentração da bacia (BISHT et al., 2016). Como a largura transversal ao escoamento é um parâmetro difícil de se mensurar, foi utilizado uma largura representativa para cada bacia, sendo determinada pela Equação 5-2 (KOURTIS; KOPSIAFTIS; TSIHRINTZIS, 2017; ROSA; CLAUSEN; DIETZ, 2015; YAO; WEI; CHEN, 2016), a qual considera que a bacia se assemelha a um retângulo, relacionando a largura com a área da bacia e com o talvegue.

$$W = \frac{A}{L} \quad (5 - 2)$$

Em que: A é a área da bacia (m²) e L é o comprimento do talvegue (m).

5.4.3.3 Parâmetros relativos às áreas permeáveis e impermeáveis

A imagem utilizada para determinação das áreas permeáveis e impermeáveis foi obtida no banco de dados do Ministério do Meio Ambiente para o ano de 2015 (dado mais recente disponível), através do satélite Rapideye (MMA, 2015). A imagem foi classificada em duas categorias, áreas permeáveis e impermeáveis, sendo utilizado o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) para identificação da vegetação (MARTIN-MIKLE et al., 2015) e, conseqüentemente, de áreas permeáveis. No intuito de avaliar a qualidade da classificação da imagem foram verificados 100 pontos distribuídos aleatoriamente na área de estudo para cálculo do índice Kappa (COHEN, 1960), o qual verifica a concordância entre duas variáveis categóricas. Um Kappa igual a 1 representa perfeita concordância, enquanto um Kappa igual a 0, representa uma concordância por coincidência (EL BAROUDY, 2016; RWANGA; NDAMBUKI, 2017).

Definidas as áreas impermeáveis em cada sub-bacia estas foram divididas em duas categorias: áreas que possuem a capacidade de armazenar água em depressões do relevo e áreas que não acumulam água. Para esta divisão foi considerado que as áreas impermeáveis constituídas por edificações em geral escoam a água rapidamente, sendo, então, consideradas como áreas impermeáveis incapazes de armazenar água (JAIN et al., 2016).

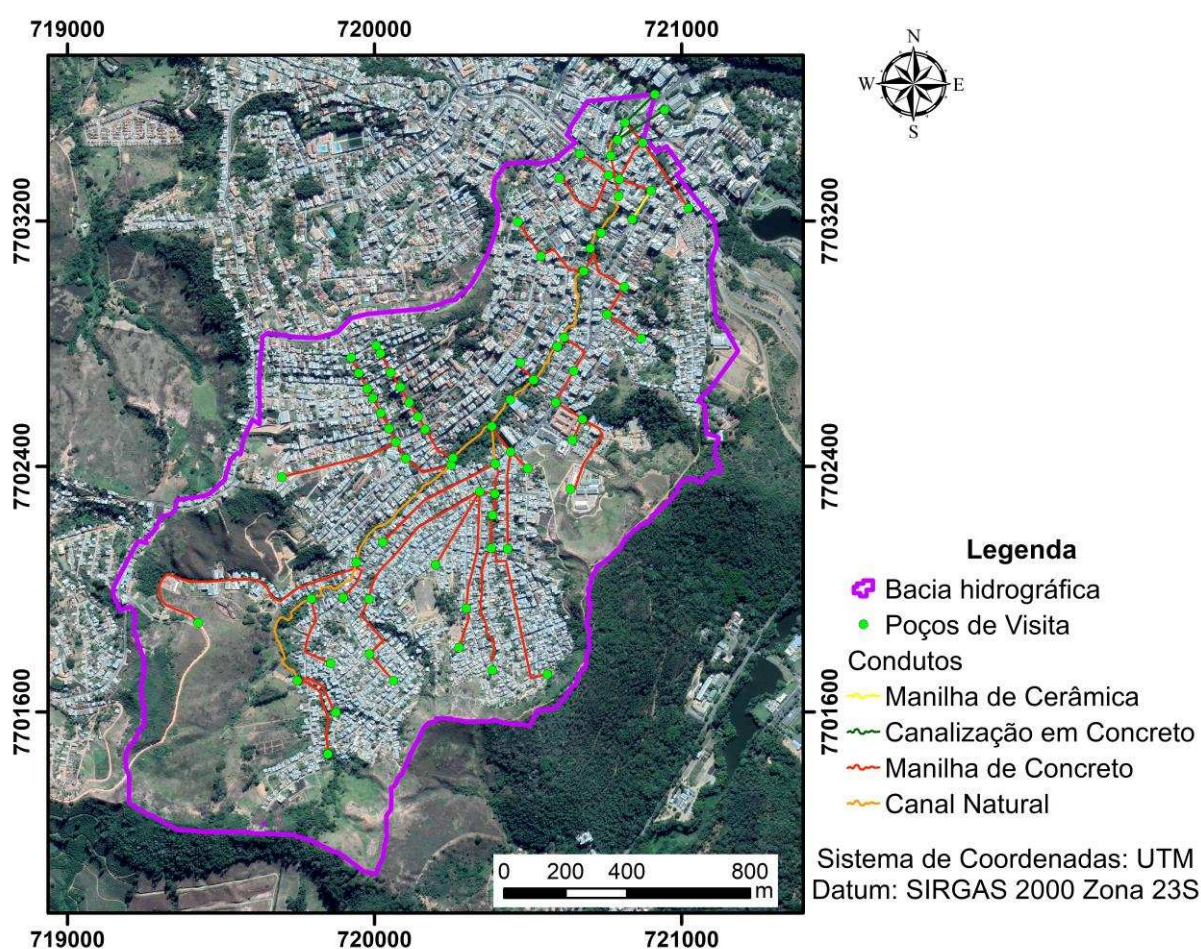
A determinação da capacidade de armazenar água em depressões do relevo para áreas permeáveis e impermeáveis foi feita com base no método do número da curva. Para os dois tipos de uso foi calculado o valor referente às abstrações iniciais (Ia) propostas no método CN, que corresponde a 20% da infiltração potencial (PRUSKI; BRANDÃO; SILVA, 2004; USDA, 1972). Sendo assim, o valor de 9,82mm foi utilizado para áreas permeáveis e o valor de 0,41mm para as áreas impermeáveis. Estes valores se aproximam dos valores sugeridos no manual do SWWM 5.1 elaborado por Rossman, Emeritus; EPA, (2015).

5.4.3.4 Modelagem da rede de drenagem

Com a rede de micro e macrodrenagem georreferenciadas inseriu-se as junções, que correspondem, neste caso, os poços de visita, e os condutos, que correspondem às galerias. Devido à proximidade entre algumas bocas de lobo na

bacia de estudo, nem todas foram inseridas na modelagem. Utilizou-se as bocas de lobo em posições mais críticas do sistema de drenagem, como início do sistema e no encontro de galerias. A organização do sistema de drenagem é apresentada na Figura 5-3. Juntamente com os dados levantados em campo e os obtidos em ambiente SIG, preencheu-se os parâmetros de entrada do SWMM. Os dados utilizados foram: formatos e dimensões das galerias e canais, comprimentos e rugosidade em função do material. Para os poços de visitas utilizados foram também inseridas suas cotas.

Figura 5-3. Sistema de drenagem inserido no SWMM.



Fonte: Autora

5.4.3.5 Chuva de projeto

No SWMM é possível simular condições contínuas ou eventos isolados (BANDA; KASITU, 2018). Neste trabalho simulou-se um único evento, utilizando dados da estação pluviográfica 86824 do Instituto Nacional de Meteorologia, INMET,

localizada no município de Viçosa, com dados de precipitação horária a partir de 2005. Para escolha da chuva de projeto estabeleceu-se uma série anual de intensidades máximas de precipitação com duração de uma hora. A partir desta série, determinou-se a intensidade de precipitação correspondente a um período de retorno de 5 anos, que é o valor recomendado para projetos de drenagem que abrangem áreas comerciais (CANHOLI, 2014; PORTO et al., 2012). A fim de simular o evento de precipitação completo, e não somente uma hora de evento, foram utilizados todos os dados do dia em que o evento de intensidade de precipitação correspondente ao período de 5 anos ocorreu, ou seja, as 24 horas do dia disponibilizadas a cada hora pela estação 86824.

5.4.4 Priorização das sub-bacias para intervenção

Para a priorização das sub-bacias que necessitam de intervenção, fez-se um cruzamento de todos os problemas identificados. Os pontos considerados para priorização das bacias foram: áreas de cabeceira; baixa densidade de bocas de lobo (BOTELHO, 2017); distâncias inadequadas entre bocas de lobo (TUCCI, 2005); bocas de lobo que precisam de adequação (manutenção e limpeza); e presença de lançamento irregular de esgoto. A cada um destes critérios foi atribuído um ponto e os critérios aplicados em cada sub-bacia. Assim, foi possível identificar as sub-bacias com maior número de problemas registrados e, também, que possuem um maior potencial para enchentes. Após a contabilização das irregularidades, as bacias foram divididas em três quantis de priorização: alta, média e baixa, baseado na pontuação de cada bacia (ALWATHAF; MANSOURI, 2011).

5.5 Resultados e discussão

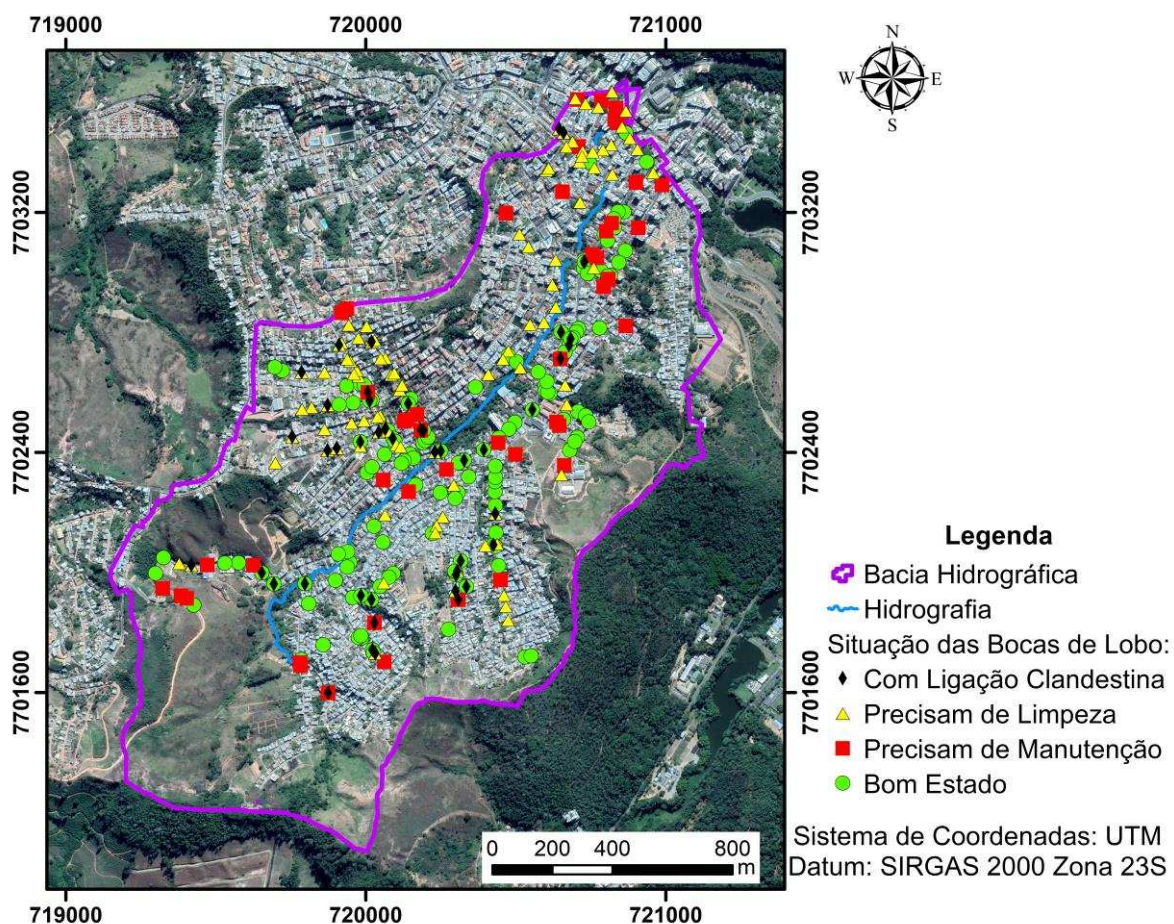
Assim como em outras bacias altamente urbanizadas, a bacia do córrego da Conceição registra uma grande quantidade de eventos de enchentes. A alta impermeabilização e o córrego praticamente todo ocupado em sua extensão faz com que um pequeno incremento de sua vazão resulte em um grande aumento do nível da água, que, em muitos casos, chega a invadir a residência dos moradores. Também, como em outros municípios, evidencia-se a ausência de informações sobre os sistemas de drenagem implantados, sendo que seus dados não foram registrados ou foram perdidos e hoje as informações que se tem dessas redes são

obtidas junto a antigos trabalhadores ou outras pessoas que participaram dessas obras. As ruas são pavimentadas de forma irregular, sem o devido abaulamento das mesmas pela inexistência de declividade transversal, de modo que o escoamento não se direcione às sarjetas e por conseguinte às galerias de águas pluviais.

5.5.1 Diagnóstico do sistema de drenagem

Realizou-se o levantamento total de 443 bocas de lobo posicionadas em 272 locais da bacia. As informações referentes às condições de cada boca de lobo estão dispostas na Figura 5-4. Em relação ao estado em que se encontravam essas bocas de lobo, 40% destas apresentavam boas condições de manutenção e limpeza, 42% necessitavam de limpeza e desobstrução e 18% precisavam de manutenção devido ao entupimento de sua entrada ou estavam danificadas.

Figura 5-4. Localização e estado de manutenção das bocas de lobo presentes na bacia do córrego da Conceição.



Fonte: Autora

Observou-se, também, a utilização da rede de drenagem para lançamento de esgoto doméstico, através de ligações clandestinas, em 21% das bocas de lobo. O esgoto que deveria ser captado pela rede específica para tratamento ou lançamento em áreas fora da cidade, quando conduzido para galerias de águas pluviais reduz a capacidade da rede de drenagem, pois esta deveria encontrar-se completamente vazia para receber o escoamento superficial. Além disso o lançamento de esgoto na rede pluvial também reduz a qualidade da água dos rios. Também há um problema em relação à localização das bocas de lobo, que foram implantadas de forma inadequada nas ruas, sem a presença de declividade transversal nas vias. Ainda foram encontradas bocas de lobo que foram construídas em um sobressalto, ou em decorrência de alterações feitas pelos próprios moradores, que não interceptam a água que escoam pelas vias.

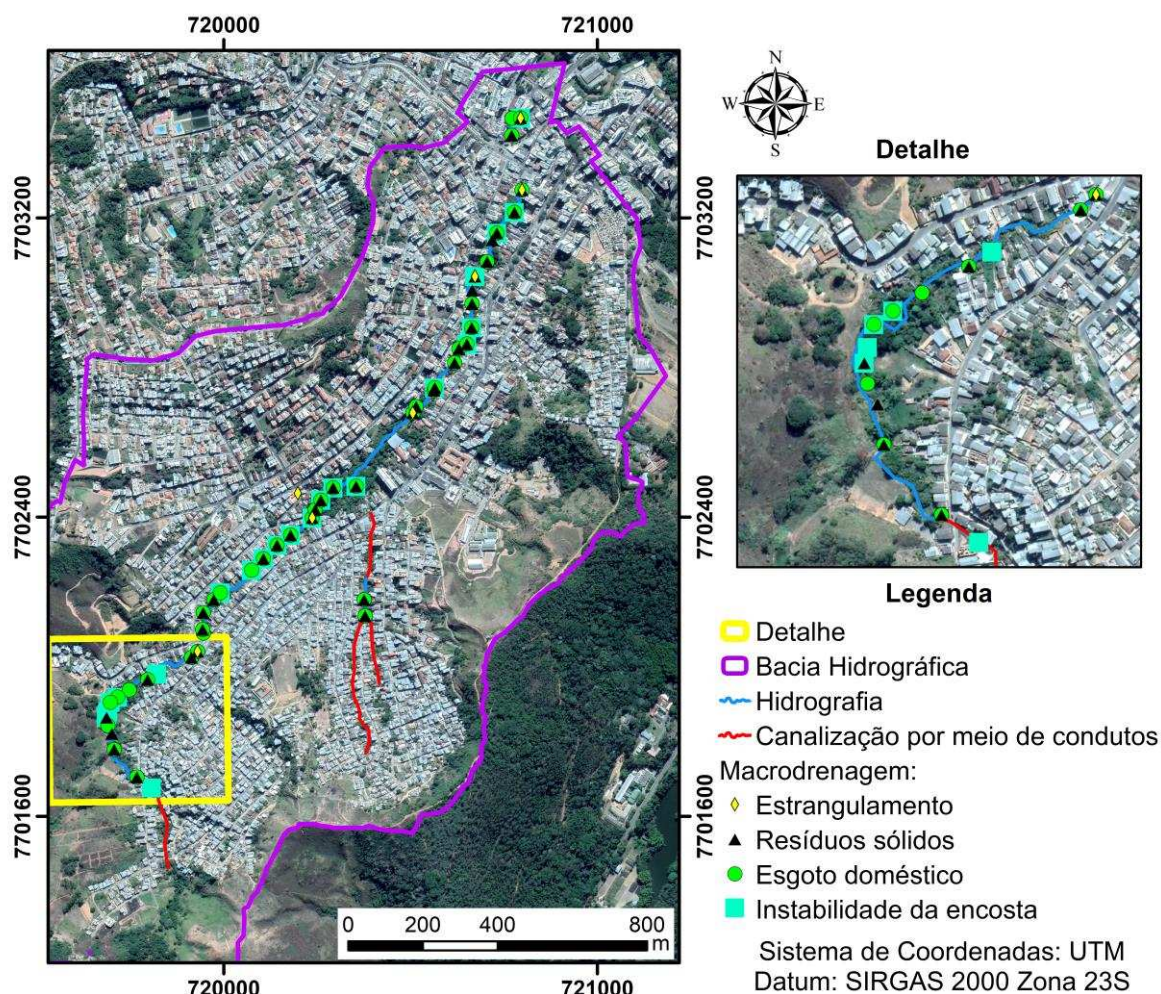
A partir das visitas *in loco* ao longo do córrego da Conceição, realizou-se a coleta de informações relacionadas à macrodrenagem, conforme Tabela 5-2, em 54 pontos ao longo do leito do córrego, comprovando-se alguns dados não satisfatórios em relação ao curso d'água e à vegetação ripária. Somente oito pontos possuíam vegetação ripária nas margens do córrego. Contudo, nenhum dos pontos levantados ao longo do córrego da Conceição está em acordo com o novo Código Florestal brasileiro (BRASIL, 2012). Em sete locais, a presença de vegetação às margens do córrego é inexistente.

Na Figura 5-5, estão apresentados os 54 pontos coletados. O córrego conta com seis pontos de estrangulamento nos quais o mesmo passa por canais fechados, ocorrendo acúmulo de água e inundações frequentes. Lançamentos de esgoto foram encontrados em 41 pontos e resíduos sólidos em 38 pontos. Em 26 pontos verificou-se também a baixa estabilidade das encostas.

5.5.2 Simulação do escoamento superficial com o SWMM

Para a classificação da imagem Rapideye, foram consideradas como permeável, áreas com NDVI maior que 0,11, sendo este o valor que melhor representou as condições da bacia. Obteve-se um Kappa estimado de 0,7, o que corresponde a uma concordância substancial (FIGUEIREDO; VIEIRA, 2007; FREITAS, JR.; RIBEIRO, 2014).

Figura 5-5. Situação da macrodrenagem da bacia do córrego da Conceição.

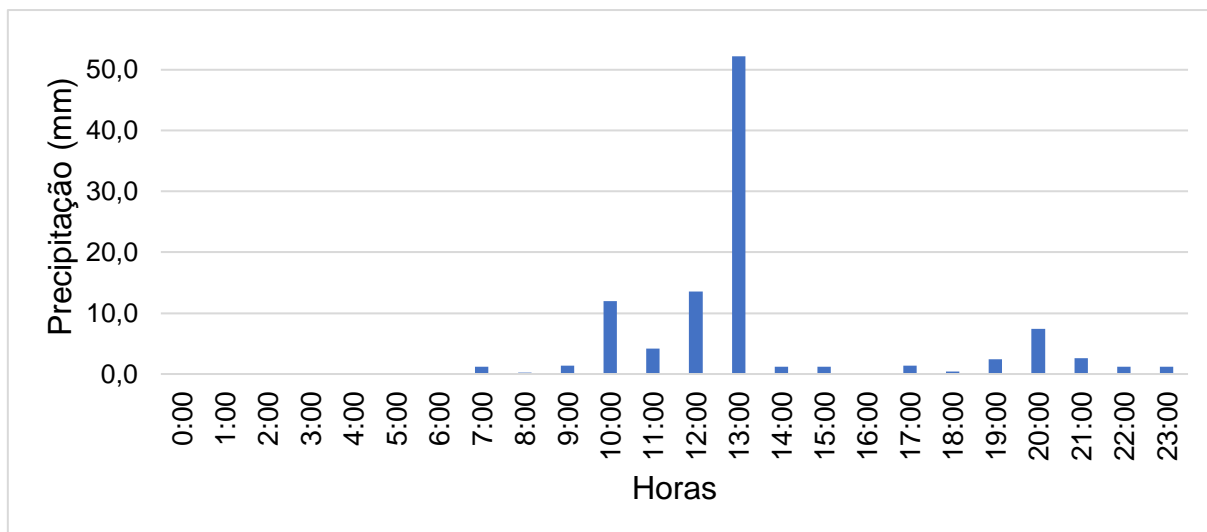


Fonte: Autora

Utilizando o software SWMM levantou-se os pontos na drenagem cujo dimensionamento não está adequado para drenar o escoamento superficial causado pela chuva de projeto utilizada. Para a simulação utilizou-se uma chuva com intensidade máxima com duração de uma hora e período de retorno de 5 anos, correspondente a 52,20 mm/h. A fim de modelar todo o evento de chuva em que esta intensidade ocorreu, utilizou-se todo o período de 24 horas, sendo esta disponibilizada e inserida no SWMM de hora em hora, com base nas informações oriundas da estação meteorológica 86824, totalizando lâmina precipitada de 103,80 mm neste evento. O hietograma de projeto está apresentado na Figura 5-6. Após a simulação foram determinados os pontos de alagamento das bocas de lobo e quais condutos não suportaram a vazão que receberam, os quais estão apresentados na

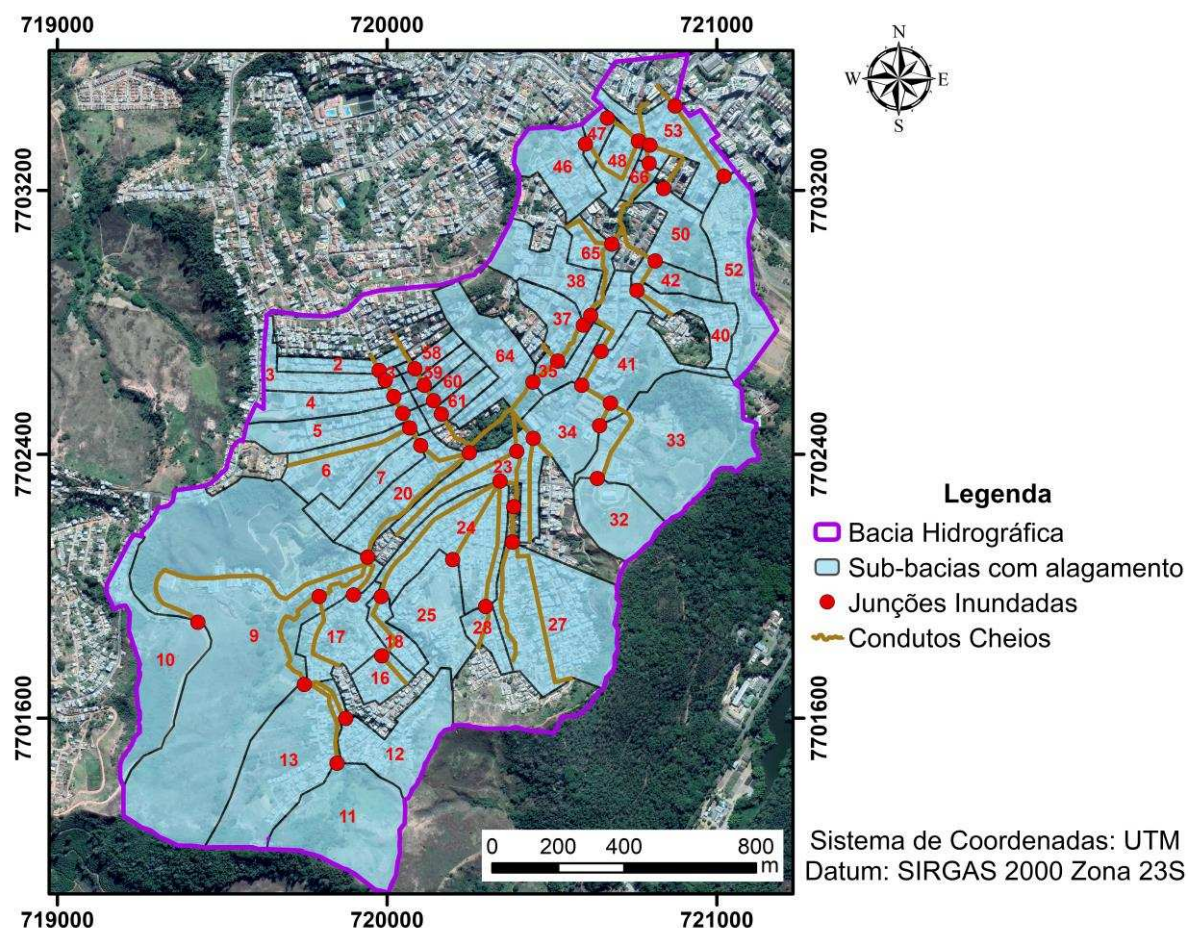
Figura 5-7. Os resultados do SWMM para cada sub-bacia estão apresentados no Apêndice B.

Figura 5-6. Hietograma do evento de chuva utilizado na modelagem com o SWMM



Fonte: Autora

Figura 5-7. Trechos que apresentaram falhas no sistema de drenagem na bacia do Córrego da Conceição, seja por alagamentos (pontos) ou por serem incapazes de conduzir a vazão de montante.



Fonte: Autora

Um dos resultados fornecidos pelo SWMM é o coeficiente de escoamento, C , a partir do balanço hídrico em cada bacia. O C é determinado pela relação entre a lâmina total de escoamento e a lâmina total precipitada (ROSA; CLAUSEN; DIETZ, 2015; ROSSMAN; EMERITUS; EPA, 2015). Os resultados apresentados no Apêndice B mostram que o C variou de 0,57 a 0,99. Das 67 sub-bacias simuladas, 42 apresentaram alagamentos em seus respectivos exutórios, correspondendo a 62,7% das sub-bacias analisadas. Destaca-se que as áreas identificadas no SWMM correspondem a muitos lugares comumente alagados dentro da bacia em estudo, conforme constatado através de conversas com os moradores e funcionários da prefeitura.

Este elevado número de pontos alagados possui várias explicações. A primeira delas se dá pela existência de galerias com dimensões inadequadas. Tal fato pode acontecer por incorreto dimensionamento ou por alteração das condições consideradas no projeto, possivelmente por um aumento excessivo das áreas impermeáveis. Tal fato é explicado por Miguez, Rezende, Veról (2015), que afirmam

que o sistema clássico de drenagem é insustentável pelo fato de não ser capaz de acompanhar a expansão urbana, necessitando sempre de intervenções que aumentem sua capacidade hidráulica.

A segunda possível explicação decorre das altas declividades encontradas na bacia do córrego da Conceição. Mesmo as sub-bacias que apresentam em sua maioria áreas permeáveis (sub-bacias 9, 10, 11, 12, 13, 32 e 33), por se localizarem em regiões de cabeceira, com declividades que variam entre 25,2 a 37,0%, contribuem com grande vazão de escoamento superficial em seus exutórios. Destaca-se que nestas sub-bacias encontram-se os menores valores de C, porém devido a sua alta declividade, ocorre concentração muito grande de escoamento, fazendo com que a rede de drenagem existente não seja capaz de comportar este volume (BABAEI; GHAZAVI; ERFANIAN, 2018).

Ressalta-se ainda que estas sub-bacias, mesmo com grande área permeável, contribuem com grande vazão para os pontos a jusante, o que gera um efeito cascata em toda a rede de drenagem, visto que no município de Viçosa, segundo os dados levantados *in loco* e juntamente com a prefeitura, não há aumento dos diâmetros da rede de drenagem ao longo do trecho. Dos seis pontos de estrangulamentos encontrados no levantamento *in loco*, apenas um não apresentou condição de alagamento, contudo a galeria que se conecta a este ponto teve sua capacidade máxima atingida, atuando assim como conduto forçado.

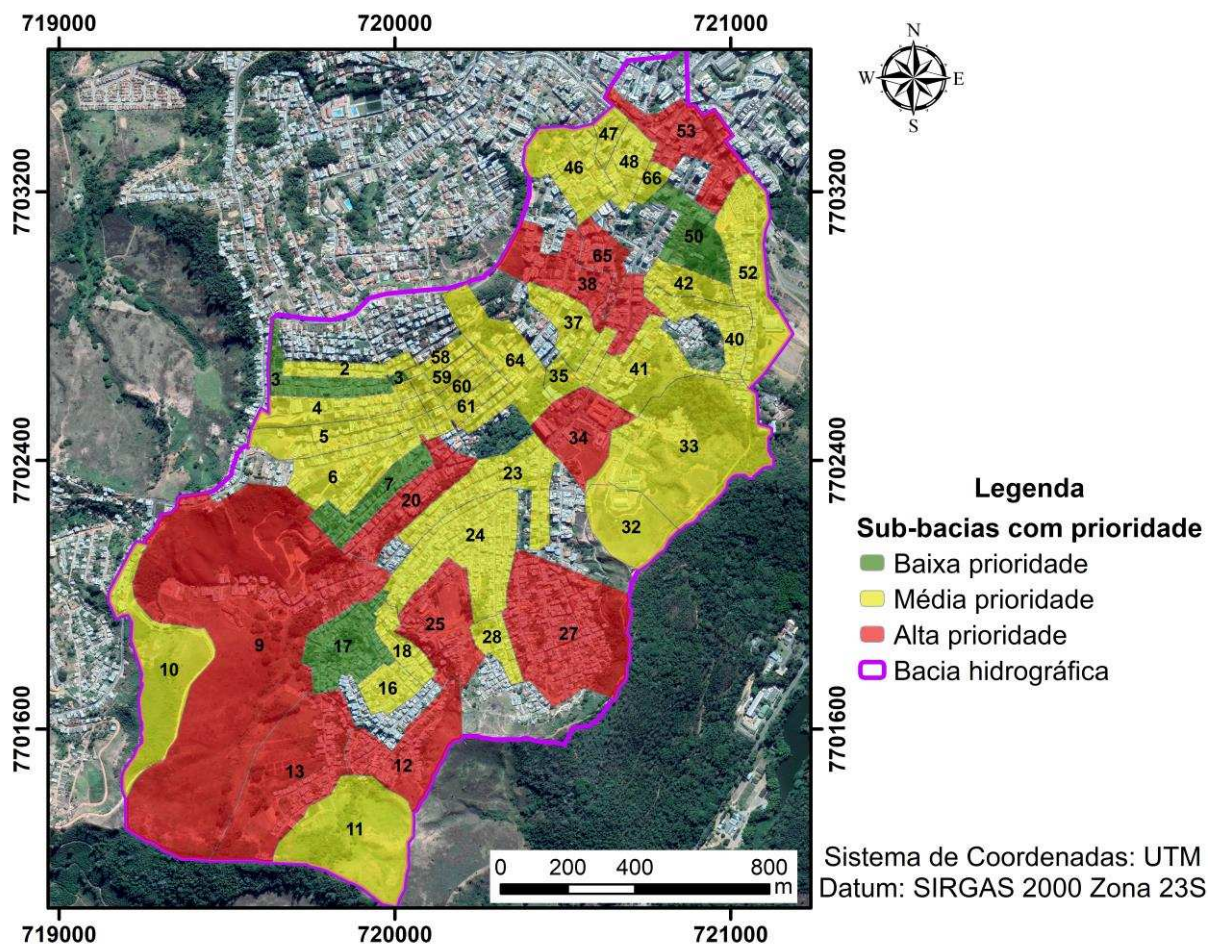
Em relação às galerias, dos 75 trechos simulados, 68 em algum momento da simulação atuaram como conduto forçado, ou seja, tiveram sua capacidade máxima atingida. Este alto número de galerias incapazes de conduzir o escoamento superficial adequadamente é alvo de preocupação. Nota-se na Figura 5-7 que a maioria dos trechos ineficientes inicia ainda próximo das áreas de cabeceira da bacia, resultando conseqüentemente em um efeito cascata na rede, incapacitando os trechos seguintes.

Em relação às bocas de lobo encontradas nas sub-bacias que apresentam pontos de alagamento, apenas as sub-bacias 2, 4, 5, 9, 16, 23, 28, 35, 48, 50, 61 apresentaram ao menos um par de bocas de lobo a cada 800m², segundo recomendação de Botelho, (2017). Ou seja, a maior concentração de bocas de lobo dentro da bacia não garante sua efetividade. É necessário verificar, também, se as distâncias entre as bocas de lobo estão dentro da faixa recomendada por Tucci,

(2005), no valor de 60 metros, quando não se avalia a capacidade das sarjetas. Neste critério, somente 16 das 67 bacias apresentam espaçamento adequado, sendo que destas 16, 10 apresentaram casos de alagamento mesmo com o espaçamento adequado.

É importante atentar também para o fato que dos 46 pontos de boca de lobo que necessitam manutenção, 34 se encontram nas sub-bacias que apresentaram pontos de alagamento. Já dos 96 pontos de boca de lobo que necessitam de limpeza, 77 também se encontram em áreas com pontos de alagamento. Além disso, dos 46 pontos identificados com ligação clandestina de esgoto doméstico, 35 também estavam nas sub-bacias com pontos de alagamento. Isso se apresenta como um agravante ainda maior para a situação da bacia, pois mesmo considerando as bocas de lobo em condições adequadas, houve o alagamento destas áreas. Caso não haja a manutenção destas condições adversas, os problemas de enchente da bacia tendem a se agravar.

Por fim, após o cruzamento de todos os problemas identificados através desta metodologia, pôde-se elaborar um mapa (Figura 5-8) que apresenta as sub-bacias com maior número de problemas registrados conforme o item 5.4.4. Nota-se que das 10 sub-bacias com alta prioridade, quatro estão localizadas em áreas de cabeceira, o que mostra o acúmulo de irregularidades logo no início do sistema de drenagem. As outras seis bacias com alta prioridade se encontram em áreas densamente urbanizadas que recebem grandes volumes de escoamento que se somam aos lançamentos de esgoto irregulares. Das 42 sub-bacias com pontos de alagamento, 28 foram classificadas como média prioridade e apenas quatro com baixa prioridade. Figura 5-8. Mapa de diagnóstico da bacia do córrego da Conceição.



Fonte: Autora

5.6 Conclusões

Com base nos resultados obtidos no presente trabalho pode-se concluir que:

- A metodologia proposta se apresentou eficaz e permitiu identificar pontos críticos para o sistema de drenagem urbana da bacia hidrográfica, mesmo com a escassez de dados relacionados ao sistema de drenagem;
- A modelagem no SWMM apresentou resultados satisfatórios para fins de identificação dos pontos alagados, que corresponderam aos locais usualmente reportados pelos habitantes do município.
- Com o levantamento dos componentes da rede de micro e macrodrenagem, também foi possível identificar os pontos em que é necessário manutenção ou alguma intervenção por parte dos órgãos responsáveis.

- A modelagem com o SWMM e a priorização das sub-bacias permitiu identificar as sub-bacias que possuem pontos de alagamentos e maior potencial para sobrecarregar o sistema de drenagem.

REFERÊNCIAS

- ALWATHAF, Y.; MANSOURI, B. EL. Assessment of Aquifer Vulnerability Based on GIS and ARCGIS Methods: A Case Study of the Sana'a Basin (Yemen). **Journal of Water Resource and Protection**, v. 3, n. 12, p. 845–855, 2011.
- ARAGÃO, R. DE et al. Impacto do uso do solo pelo aumento da densidade populacional sobre o escoamento numa área urbana do Nordeste Brasileiro via geotecnologias e modelagem hidrológica. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n. 2, p. 543–557, 2017.
- BABAEI, S.; GHAZAVI, R.; ERFANIAN, M. Urban flood simulation and prioritization of critical urban sub-catchments using SWMM model and PROMETHEE II approach. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 105, p. 3–11, 1 jun. 2018.
- BANDA, D.; KASITU, R. Modeling of storm water runoff for Kitwe CBD drainage system using SWMM software. **Rwanda Journal of Engineering, Science, Technology and Environment**, v. 1, n. 1, p. 1–7, 2018.
- BARATI, R.; RAHIMI, S.; AKBARI, G. H. Analysis of dynamic wave model for flood routing in natural rivers. **Water Science and Engineering**, v. 5, n. 3, p. 243–258, 2012.
- BARROS, A. DE F.; MARQUES, É. T. Análise da expansão urbana do município de Viçosa-MG utilizando sistema de informações geográficas (SIG). **Geografia e Pesquisa**, v. 1, n. 1, p. 110–139, 2007.
- BASTOS, R. K. X. et al. **Plano Municipal de Saneamento Básico**. Viçosa - MG: Prefeitura Municipal de Viçosa, SAAE, UFV, 2009.
- BECK, N. G. et al. An urban runoff model designed to inform stormwater management decisions. **Journal of Environmental Management**, v. 193, p. 257–269, 2017.
- BISHT, D. S. et al. Modeling urban floods and drainage using SWMM and MIKE URBAN: a case study. **Natural Hazards**, v. 84, p. 749–776, 2016.
- BOTELHO, M. H. C. **Águas de chuva: engenharia das águas pluviais nas cidades**. 4 ed. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2017.
- BRASIL. **Lei nº 12.651/2012, de 25 de maio da Casa Civil**BRASIL, 2012. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm>. Acesso em: 29 jan. 2019

CANHOLI, A. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

COHEN, J. A Coefficient of Agreement for Nominal Scales. **Educational and Psychological Measurement**, v. 20, n. 1, p. 37–46, 1960.

EL BAROUDY, A. A. Mapping and evaluating land suitability using a GIS-based model. **Catena**, v. 140, p. 96–104, 1 maio 2016.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Agropecuária, **Mapa de Solos do Brasil. Escala 1:5.000.000**. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/Ambdata/mapa_solos.php>.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Agropecuária, Sumula da X Reunião Técnica de Levantamentos de Solos (SNLCS, Série Miscelânea, 1). **Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos**, 1979.

FEAM et al. **Mapa de solos do Estado de Minas Gerais**. Base de dados. Disponível em: <<http://www.feam.br/noticias/1/949-mapas-de-solo-do-estado-de-minas-gerais>>.

FENG, Y.; BURIAN, S.; POMEROY, C. Potential of green infrastructure to restore predevelopment water budget of a semi-arid urban catchment. **Journal of Hydrology**, v. 542, p. 744–755, 2016.

FIGUEIREDO, G. C.; VIEIRA, C. A. O. Estudo do comportamento dos índices de Exatidão Global, Kappa e Tau, comumente usados para avaliar a classificação de imagens do sensoriamento remoto. **Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, n. 1995, p. 5755–5762, 2007.

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

FREITAS, JR., R. L. DE; RIBEIRO, G. P. Avaliação de classificação de imagens para mapeamento digital do Parque Nacional da Serra dos Órgãos (PARNASO). **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 66, n. 6, p. 1203–1213, 2014.

GOOGLE. **Google Street View**, Viçosa-MG, Google Earth Pro, 2011. Disponível em: <<https://www.google.com.br/earth/download/gep/agree.html>>

GOOGLE. **Google Street View**, Viçosa-MG, Google Earth Pro, 2017. Disponível em: <<https://www.google.com.br/earth/download/gep/agree.html>>

GRECCO, L. B. et al. Influência da seleção de variáveis hidrológicas no projeto de sistemas urbanos de macrodrenagem - Estudos de caso para o município de Vitória-ES. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 4, p. 197–206, 2012.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, **Malha de setores censitários - censo de 2010**, IBGE, 2010. Disponível em: <ftp://geofpt.ibge.gov.br/recortes_para_fins_estatisticos/malha_de_setores_censitarios/censo_2010/base_de_faces_de_logradouros/MG/>

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, **Panorama de Viçosa**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/vicosa/panorama>>. Acesso em: 2 dez. 2019.

JAIN, G. V. et al. Estimation of sub-catchment area parameters for Storm Water Management Model (SWMM) using geo-informatics. **Geocarto International**, v. 31, n. 4, p. 462–476, 20 abr. 2016.

JANG, S. et al. Using SWMM as a tool for hydrologic impact assessment. **Desalination**, v. 212, n. 1–3, p. 344–356, 25 jun. 2007.

JOBSON, H. E.; FROEHLICH, D. **Basic Hydraulic Principles of open-channel flow**. Reston, VA: U. S. Geological Survey, 1988.

KAYKHOSRAVI, S. et al. The Low-Impact Development Demand Index : A New Approach to Identifying Locations for LID. n. Lid, p. 11–15, 2019.

KONG, F. et al. Modeling stormwater management at the city district level in response to changes in land use and low impact development. **Environmental Modelling & Software**, v. 95, p. 132–142, 2017.

KOURTIS, I. M.; KOPSIAFTIS, G.; TSIHRINTZIS, V. A. Calibration and validation of SWMM model in two urban catchments in Athens, Greece. **15th International Conference on Environmental Science and Technology**, p. 1–6, 2017.

LAGADEC, L.-R. et al. Description and evaluation of a surface runoff susceptibility mapping method. **Journal of Hydrology**, v. 541, p. 495–509, 2016.

LI, J.; LI, Y.; LI, Y. SWMM-based evaluation of the effect of rain gardens on urbanized areas. **Environmental Earth Sciences**, v. 75, n. 17, p. 14, 2016.

LI, M. et al. Parameter Uncertainty Analysis of SWMM Based on the Method of GLUE. **7th International Conference on Biology, Environment and Chemistry**, v. 98, n. 11, p. 1–6, 2016.

LORENTZ, J. F. et al. Multicriteria analysis applied to landslide susceptibility mapping. **Natural Hazards**, v. 83, n. 1, p. 41–52, 22 ago. 2016.

MARIA, A. C. DE S.; FARIA, T. C. D. A.; STEPHAN, I. I. C. Um retrato da evolução urbana de Viçosa-MG: impactos da federalização da UFV sobre a cidade (1969-2014). **Revista Brasileira de Planejamento e Desenvolvimento**, v. 3, n. 1, p. 37–54, 2014.

MARTIN-MIKLE, C. J. et al. Identifying priority sites for low impact development (LID) in a mixed-use watershed. **Landscape and Urban Planning**, v. 140, p. 29–41, 2015.

MIGUEZ, M. G.; REZENDE, O. M.; VERÓL, A. P. City Growth and Urban Drainage Alternatives: Sustainability Challenge. **Journal of Urban Planning and Development**, v. 141, n. 3, p. 4014026, set. 2015.

MIKOVITS, C. et al. Decision Support for Adaptation Planning of Urban Drainage Systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 143, n. 12, p. 4017069, dez. 2017.

MMA, M. DO M. A. **Catálogo de imagens de satélite Rapideye do Ministério do Meio Ambiente**MMA, , 2015. Disponível em: <Geocatalogo.mma.gov.br>

PALLA, A.; GNECCO, I.; LA BARBERA, P. Assessing the hydrologic performance of a green roof retrofitting scenario for a small urban catchment. **Water**, v. 10, n. 8, 2018.

PORTO, R. et al. Drenagem Urbana. In: UFRGS/ABRH (Ed.). . **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2012. p. 943.

PRUSKI, F. F. (ED. . **Conservação de solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica**. 2. ed. Viçosa - MG: Universidade Federal de Viçosa, 2009.

PRUSKI, F. F.; BRANDÃO, V. DOS S.; SILVA, D. D. DA. **Escoamento superficial**. 2. ed. Viçosa - MG: UFV, 2004.

QIAO, X.-J.; KRISTOFFERSSON, A.; RANDRUP, T. B. Challenges to implementing urban sustainable stormwater management from a governance perspective: A literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 196, p. 943–952, set. 2018.

RABORI, A. M.; GHAZAVI, R.; REVESHTY, M. A. Sensitivity analysis of SWMM model parameters for urban runoff estimation in semi-arid area. **Journal of Biodiversity and Environmental Sciences**, v. 10, n. 5, p. 284–294, 2017.

ROSA, D. J.; CLAUSEN, J. C.; DIETZ, M. E. Calibration and Verification of SWMM for Low Impact Development. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 51, n. 3, p. 746–757, 2015.

ROSSMAN, L. A.; EMERITUS, E. S.; EPA, U. S. E. P. A. **Storm Water Management Model User's Manual**. Cincinnati: Office of Research and Development - Water Supply and Water Resources Division, 2015.

RWANGA, S. S.; NDAMBUKI, J. M. Accuracy Assessment of Land Use/Land Cover Classification Using Remote Sensing and GIS. **International Journal of Geosciences**, v. 8, p. 611–622, 2017.

SILVEIRA, A. L. L. Hidrologia urbana no Brasil. In: **Braga B., Tucci CEM y Tozzi M.** 1ª.ed. ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 1998.

SINGH, P.; GUPTA, A.; SINGH, M. Hydrological inferences from watershed analysis for water resource management using remote sensing and GIS techniques. **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences**, v. 17, p. 111–121, 2014.

SUDERHSA, Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, **Manual de Drenagem Urbana: Região Metropolitana de Curitiba/PR**. Curitiba: Programa de Saneamento Ambiental da Região Metropolitana de Curitiba, 2002.

TASCA, F. A. et al. O papel da drenagem urbana na prevenção de desastres hidrológicos na bacia hidrográfica do rio Itajaí Açu. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 1, n. 69, p. 129–142, 2017.

TASCA, F. A.; POMPÊO, C. A.; FINOTTI, A. R. Evolução da gestão da drenagem urbana na bacia hidrográfica do rio Itajaí Açu. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade GeAS**, v. 7, n. 2, p. 264–283, 2018.

TUCCI, C. E. M. **Gestão de Águas Pluviais Urbanas**. Rio Grande do Sul: Ministério das Cidades - Global Water Partnership - World Bank - Unesco, 2005.

TUCCI, E. M. Escoamento Superficial. In: UFRGS/ABRH (Ed.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2012. p. 943.

USDA, S. National Engineering Handbook, Hydrology, Section 4. **United States Department of Agriculture, Soil Conservation Service (Chapters 4–10)**, 1972.

WANG, M. et al. Assessing cost-effectiveness of bioretention on stormwater in response to climate change and urbanization for future scenarios. **Journal of Hydrology**, v. 543, p. 423–432, 1 dez. 2016.

YANG, J. et al. Hydrologic response of a tropical watershed to urbanization. **Journal of Hydrology**, v. 517, p. 538–546, 2014.

YAO, L.; WEI, W.; CHEN, L. How does imperviousness impact the urban rainfall-runoff process under various storm cases? **Ecological Indicators**, v. 60, p. 893–905, 2016.

YAZDANFAR, Z.; SHARMA, A. Urban drainage system planning and design - Challenges with climate change and urbanization: A review. **Water Science and Technology**, v. 72, n. 2, p. 165–179, 2015.

ZHANG, Y.; SHUSTER, W. Impacts of Spatial Distribution of Impervious Areas on Runoff Response of Hillslope Catchments: Simulation Study. **Journal of Hydrology Engineering**, v. 19, n. 6, p. 1089–1100, 2014.

ZHANGSUI; LIZHE. Simulation of Urban Rainstorm Waterlogging and Pipeline Network Drainage Process Based on SWMM. **IOP Conference Series: Journal of Physics**, v. 1213, p. 52061, 2019.

APÊNDICE A – Características das sub-bacias

| Características das Sub-bacias | | | | | | |
|--------------------------------|-----------------|-------------|-----------------|------------------|--------------------|-------|
| Sub-bacia | Área Bacia (ha) | Largura (m) | Declividade (%) | A. Permeável (%) | A. Impermeável (%) | CN |
| 0 | 3,18 | 71,79 | 16,42 | 28,88 | 71,12 | 94,75 |
| 1 | 1,77 | 61,45 | 34,63 | 26,02 | 73,98 | 95,19 |
| 2 | 1,96 | 61,47 | 29,59 | 25,50 | 74,50 | 95,27 |
| 3 | 2,80 | 50,82 | 25,47 | 31,05 | 68,95 | 94,42 |
| 4 | 3,42 | 80,17 | 24,33 | 33,76 | 66,24 | 94,00 |
| 5 | 4,24 | 86,57 | 27,57 | 51,98 | 48,02 | 91,19 |
| 6 | 5,31 | 135,70 | 28,20 | 36,86 | 63,14 | 93,52 |
| 7 | 3,05 | 72,22 | 24,28 | 23,66 | 76,34 | 95,56 |
| 8 | 2,02 | 58,19 | 21,82 | 48,93 | 51,07 | 91,66 |
| 9 | 43,46 | 411,08 | 31,16 | 88,31 | 11,69 | 85,60 |
| 10 | 8,22 | 150,28 | 24,22 | 78,22 | 21,78 | 87,15 |
| 11 | 9,86 | 233,72 | 32,80 | 98,61 | 1,39 | 84,01 |
| 12 | 6,22 | 135,49 | 36,98 | 56,46 | 43,54 | 90,51 |
| 13 | 11,18 | 186,52 | 25,19 | 76,12 | 23,88 | 87,48 |
| 14 | 1,56 | 58,88 | 19,66 | 10,45 | 89,55 | 97,59 |
| 15 | 0,94 | 71,98 | 25,74 | 18,43 | 81,57 | 96,36 |
| 16 | 1,90 | 93,70 | 17,68 | 19,38 | 80,62 | 96,21 |
| 17 | 4,69 | 108,84 | 19,55 | 27,65 | 72,35 | 94,94 |
| 18 | 1,76 | 61,02 | 24,69 | 17,47 | 82,53 | 96,51 |
| 19 | 0,66 | 69,03 | 14,52 | 26,04 | 73,96 | 95,19 |
| 20 | 4,43 | 90,55 | 8,48 | 29,80 | 70,20 | 94,61 |
| 21 | 0,66 | 40,79 | 5,73 | 25,96 | 74,04 | 95,20 |
| 22 | 1,71 | 104,52 | 2,16 | 94,96 | 5,04 | 84,58 |
| 23 | 5,68 | 110,26 | 13,66 | 18,96 | 81,04 | 96,28 |
| 24 | 8,25 | 158,28 | 28,40 | 18,99 | 81,01 | 96,27 |
| 25 | 5,85 | 177,60 | 29,12 | 42,09 | 57,91 | 92,72 |
| 26 | 1,29 | 73,69 | 37,46 | 42,33 | 57,67 | 92,68 |
| 27 | 12,78 | 237,57 | 25,42 | 40,91 | 59,09 | 92,90 |
| 28 | 1,61 | 75,90 | 24,18 | 41,12 | 58,88 | 92,87 |
| 29 | 2,21 | 95,33 | 39,96 | 80,31 | 19,69 | 86,83 |
| 30 | 1,86 | 65,75 | 34,25 | 65,93 | 34,07 | 89,05 |
| 31 | 2,82 | 107,81 | 29,03 | 41,18 | 58,82 | 92,86 |
| 32 | 4,52 | 168,93 | 36,22 | 84,29 | 15,71 | 86,22 |
| 33 | 14,67 | 298,23 | 28,15 | 75,71 | 24,29 | 87,54 |
| 34 | 4,88 | 144,75 | 12,33 | 37,89 | 62,11 | 93,36 |
| 35 | 1,79 | 72,65 | 4,91 | 37,76 | 62,24 | 93,39 |

| Sub-bacia | Área Bacia (ha) | Largura (m) | Declividade (%) | A. Permeável (%) | A. Impermeável (%) | CN |
|------------------|------------------------|--------------------|------------------------|-------------------------|---------------------------|-----------|
| 36 | 3,27 | 111,90 | 31,32 | 50,53 | 49,47 | 91,42 |
| 37 | 2,71 | 110,97 | 17,51 | 36,48 | 63,52 | 93,58 |
| 38 | 6,84 | 134,96 | 20,56 | 25,87 | 74,13 | 95,22 |
| 39 | 2,11 | 113,88 | 46,93 | 69,00 | 31,00 | 88,57 |
| 40 | 2,86 | 62,60 | 22,46 | 29,67 | 70,33 | 94,63 |
| 41 | 5,10 | 127,91 | 27,51 | 47,43 | 52,57 | 91,90 |
| 42 | 2,03 | 69,86 | 24,32 | 50,42 | 49,58 | 91,43 |
| 43 | 1,49 | 90,59 | 8,80 | 26,75 | 73,25 | 95,08 |
| 44 | 1,00 | 79,06 | 17,48 | 42,50 | 57,50 | 92,65 |
| 45 | 1,27 | 61,77 | 24,42 | 15,03 | 84,97 | 96,89 |
| 46 | 4,66 | 167,42 | 18,64 | 39,99 | 60,01 | 93,04 |
| 47 | 1,07 | 65,65 | 17,42 | 6,18 | 93,82 | 98,25 |
| 48 | 2,30 | 139,58 | 15,20 | 6,51 | 93,49 | 98,20 |
| 49 | 1,76 | 84,03 | 4,82 | 29,40 | 70,60 | 94,67 |
| 50 | 3,73 | 112,17 | 20,70 | 48,34 | 51,66 | 91,76 |
| 51 | 1,04 | 94,19 | 11,80 | 12,26 | 87,74 | 97,31 |
| 52 | 6,64 | 105,71 | 14,84 | 30,28 | 69,72 | 94,54 |
| 53 | 5,65 | 156,37 | 7,76 | 8,88 | 89,69 | 97,81 |
| 54 | 3,02 | 106,14 | 6,78 | 17,31 | 82,69 | 96,53 |
| 55 | 1,70 | 88,19 | 18,99 | 16,52 | 83,48 | 96,66 |
| 56 | 0,90 | 55,72 | 32,60 | 39,36 | 60,64 | 93,14 |
| 57 | 0,88 | 54,26 | 30,58 | 16,66 | 83,34 | 96,63 |
| 58 | 1,02 | 61,12 | 25,64 | 22,96 | 77,04 | 95,66 |
| 59 | 1,11 | 61,32 | 24,50 | 40,00 | 60,00 | 93,04 |
| 60 | 1,29 | 67,42 | 20,30 | 41,05 | 58,95 | 92,88 |
| 61 | 1,48 | 72,65 | 16,65 | 24,03 | 75,97 | 95,50 |
| 62 | 3,12 | 160,57 | 41,83 | 70,55 | 29,45 | 88,34 |
| 63 | 0,74 | 41,64 | 5,00 | 83,96 | 16,04 | 86,27 |
| 64 | 5,86 | 142,26 | 22,60 | 43,28 | 56,72 | 92,54 |
| 65 | 2,02 | 136,40 | 13,13 | 35,92 | 64,08 | 93,67 |
| 66 | 0,75 | 56,55 | 6,84 | 72,54 | 27,46 | 88,03 |

APÊNDICE B – Resultados do SWMM

| Resultados do SWMM | | | | | |
|--------------------|------------------------|-----------------------|--------------------|----------------------|--------------------------------|
| Sub-bacia | Total Precipitado (mm) | Total Infiltrado (mm) | Total Escoado (mm) | Pico de vazão (m³/s) | Coefficiente de escoamento (C) |
| S0 | 103,80 | 3,59 | 96,78 | 0,46 | 0,932 |
| S1 | 103,80 | 2,97 | 98,09 | 0,26 | 0,945 |
| S2 | 103,80 | 2,92 | 98,08 | 0,28 | 0,945 |
| S3 | 103,80 | 4,07 | 96,10 | 0,40 | 0,926 |
| S4 | 103,80 | 4,77 | 95,21 | 0,49 | 0,917 |
| S5 | 103,80 | 10,32 | 87,49 | 0,59 | 0,843 |
| S6 | 103,80 | 5,57 | 94,14 | 0,76 | 0,907 |
| S7 | 103,80 | 2,54 | 98,53 | 0,44 | 0,949 |
| S8 | 103,80 | 4,54 | 96,60 | 0,29 | 0,931 |
| S9 | 103,80 | 26,64 | 64,89 | 4,54 | 0,625 |
| S10 | 103,80 | 21,47 | 73,07 | 0,83 | 0,704 |
| S11 | 103,80 | 32,65 | 59,29 | 1,14 | 0,571 |
| S12 | 103,80 | 11,87 | 85,60 | 0,86 | 0,825 |
| S13 | 103,80 | 16,11 | 78,22 | 1,47 | 0,754 |
| S14 | 103,80 | 0,59 | 102,06 | 0,23 | 0,983 |
| S15 | 103,80 | 1,58 | 100,46 | 0,14 | 0,968 |
| S16 | 103,80 | 1,73 | 100,07 | 0,27 | 0,964 |
| S17 | 103,80 | 3,35 | 97,04 | 0,68 | 0,935 |
| S18 | 103,80 | 1,43 | 100,50 | 0,25 | 0,968 |
| S19 | 103,80 | 2,97 | 98,27 | 0,10 | 0,947 |
| S20 | 103,80 | 3,81 | 96,19 | 0,64 | 0,927 |
| S21 | 103,80 | 2,96 | 97,96 | 0,10 | 0,944 |
| S22 | 103,80 | 30,42 | 61,31 | 0,19 | 0,591 |
| S23 | 103,80 | 1,70 | 99,67 | 0,82 | 0,960 |
| S24 | 103,80 | 1,71 | 99,83 | 1,19 | 0,962 |
| S25 | 103,80 | 7,03 | 91,98 | 1,26 | 0,886 |
| S26 | 103,80 | 7,06 | 92,45 | 0,18 | 0,891 |
| S27 | 103,80 | 6,71 | 92,33 | 1,82 | 0,889 |
| S28 | 103,80 | 6,73 | 92,77 | 0,23 | 0,894 |
| S29 | 103,80 | 22,48 | 72,61 | 0,29 | 0,700 |
| S30 | 103,80 | 15,85 | 80,73 | 0,25 | 0,778 |
| S31 | 103,80 | 6,74 | 92,72 | 0,40 | 0,893 |
| S32 | 103,80 | 24,51 | 69,96 | 0,58 | 0,674 |
| S33 | 103,80 | 20,38 | 74,35 | 1,90 | 0,716 |
| S34 | 103,80 | 5,85 | 93,60 | 0,70 | 0,902 |
| S35 | 103,80 | 5,82 | 93,54 | 0,26 | 0,901 |

| Sub-bacia | Total Precipitado (mm) | Total Infiltrado (mm) | Total Escoado (mm) | Pico de vazão (m³/s) | Coefficiente de escoamento (C) |
|------------------|-------------------------------|------------------------------|---------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|
| S36 | 103,80 | 9,89 | 88,39 | 0,46 | 0,852 |
| S37 | 103,80 | 5,37 | 94,56 | 0,39 | 0,911 |
| S38 | 103,80 | 2,95 | 97,75 | 0,99 | 0,942 |
| S39 | 103,80 | 17,19 | 79,27 | 0,29 | 0,764 |
| S40 | 103,80 | 3,80 | 96,56 | 0,41 | 0,930 |
| S41 | 103,80 | 8,66 | 89,88 | 0,72 | 0,866 |
| S42 | 103,80 | 9,68 | 88,65 | 0,29 | 0,854 |
| S43 | 103,80 | 3,15 | 97,75 | 0,21 | 0,942 |
| S44 | 103,80 | 7,26 | 92,11 | 0,14 | 0,887 |
| S45 | 103,80 | 1,13 | 101,11 | 0,18 | 0,974 |
| S46 | 103,80 | 6,42 | 93,02 | 0,66 | 0,896 |
| S47 | 103,80 | 0,26 | 102,87 | 0,16 | 0,991 |
| S48 | 103,80 | 0,31 | 102,74 | 0,33 | 0,990 |
| S49 | 103,80 | 3,64 | 96,81 | 0,25 | 0,933 |
| S50 | 103,80 | 8,98 | 89,48 | 0,53 | 0,862 |
| S51 | 103,80 | 2,24 | 100,35 | 0,15 | 0,967 |
| S52 | 103,80 | 3,86 | 96,19 | 0,95 | 0,927 |
| S53 | 103,80 | 0,54 | 101,76 | 0,82 | 0,980 |
| S54 | 103,80 | 1,43 | 100,27 | 0,44 | 0,966 |
| S55 | 103,80 | 1,39 | 100,63 | 0,25 | 0,969 |
| S56 | 103,80 | 6,18 | 93,65 | 0,13 | 0,902 |
| S57 | 103,80 | 1,39 | 100,72 | 0,13 | 0,970 |
| S58 | 103,80 | 2,39 | 99,09 | 0,15 | 0,955 |
| S59 | 103,80 | 6,42 | 93,23 | 0,16 | 0,898 |
| S60 | 103,80 | 6,72 | 92,78 | 0,18 | 0,894 |
| S61 | 103,80 | 2,58 | 98,70 | 0,21 | 0,951 |
| S62 | 103,80 | 17,99 | 78,26 | 0,42 | 0,754 |
| S63 | 103,80 | 24,44 | 69,42 | 0,09 | 0,669 |
| S64 | 103,80 | 7,35 | 91,58 | 0,83 | 0,882 |
| S65 | 103,80 | 5,30 | 94,75 | 0,29 | 0,913 |
| S66 | 103,80 | 18,92 | 76,80 | 0,10 | 0,740 |

6 ARTIGO 2: METODOLOGIA PARA ALOCAÇÃO DE TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS DE DRENAGEM INTEGRADAS À PAISAGEM URBANA

6.1 Resumo

As técnicas compensatórias de drenagem são técnicas que buscam replicar o comportamento hidrológico de pré-desenvolvimento, a partir do favorecimento da infiltração, reduzindo assim o escoamento superficial. Contudo, sua adoção ainda é escassa. Dessa forma, esse trabalho visa propor uma metodologia para priorização de áreas para fins de alocação de técnicas compensatórias de drenagem, a fim de combater os efeitos negativos da urbanização. A priorização de áreas foi feita para se definir quais áreas mais necessitam de intervenção, melhorando assim, a alocação de recursos. Foi proposto a alocação de células de biorretenção, jardins de chuva, pavimento permeável, telhado verde e plantio de vegetação nativa. O modelo *Storm Water Management Model (SWMM)* foi utilizado para avaliar o impacto da adoção das medidas. A bacia em estudo apresentou 94% de sua área com susceptibilidade alta e média à geração do escoamento. Ao todo, foram implantadas técnicas em 54,2% da bacia, sendo o plantio de vegetação nativa a técnica mais utilizada. Apesar da aplicação das técnicas compensatórias, ainda pôde-se encontrar pontos de alagamento na bacia, contudo houve uma redução destes pontos de 42 para 28. Em relação à lâmina de escoamento, a mesma foi reduzida de 85 para 23mm, enquanto a infiltração aumentou de 12 para 38mm. Conclui-se que a alocação das técnicas propostas apresentou boa aplicabilidade e favoreceu as áreas de cabeceira da bacia, permitindo que os gestores municipais tomem medidas que visem a sustentabilidade e segurança hídrica, bem como sirva de base para trabalhos futuros e aplicações em outras bacias hidrográficas urbanizadas.

Palavras-chave: Áreas prioritárias; Desenvolvimento de baixo impacto; Drenagem urbana; Melhores práticas de manejo

6.2 Abstract

Best management practices in urban drainage are practices that seek to replicate the pre-development hydrological behavior, by increasing of infiltration, thus reducing runoff. However, its use is still scarce. This work presented a methodology for prioritizing areas to allocate best management practices that can counteract the negative effects of urbanization. The prioritization of areas identified areas that most demand intervention, improving the use of the resources. It was proposed the allocation of bioretention cells, rain gardens, permeable pavement, green roof, and native vegetation landscaping. The Storm Water Management Model (SWMM) was used to assess the impact of the adopted practices. The study catchment showed 94% of its area with high and medium susceptibility to runoff generation. The best management practices were adopted in 54.2% of the catchment area. The native vegetation landscaping was the most used practice. Despite the use of the best management practices, some flooding points remained in the catchment. However, the flooding points decreased from 42 to 28. The runoff's depth reduced from 85 to 23mm, while the infiltration depth increased from 12 to 38mm. It can be concluded that the allocation of the proposed practices showed good applicability and favored the upper areas of the catchment. This work also allows local managers to take measures aiming the sustainability and water security, as well as serve as a basis for future work and applications in other urban catchments.

Key-words: Best management practices; Low impact development; Priority areas; Urban drainage.

6.3 Introdução

A crescente urbanização faz com que haja um acentuado aumento das áreas impermeabilizadas em decorrência de novas ruas, calçadas, telhados, entre outros (ARAGÃO et al., 2017). Em todo o mundo, muitas são as cidades que se expandiram sem a presença de infraestrutura básica e saneamento ambiental, incluindo-se o sistema de drenagem. O sistema de drenagem convencional ou infraestrutura cinza baseia-se no dimensionamento de condutos e canalização de cursos d'água a fim de conduzir rapidamente o escoamento de um lugar para outro, não resolvendo o problema (CANHOLI, 2014; MIGUEZ; REZENDE; VERÓL, 2015; SILVEIRA, 1998). Este deslocamento do escoamento superficial de montante para jusante faz com que volumes de escoamento cada vez maiores cheguem nas áreas de jusante (BELL et al., 2016).

Nos últimos anos muito tem-se falado sobre a utilização de técnicas compensatórias de drenagem ou infraestruturas verdes a fim de combater os aspectos negativos da urbanização (DUAN; LI; YAN, 2016; EGER; CHANDLER; DRISCOLL, 2017; HOANG; FENNER, 2016). Aliado ao 11º objetivo para o desenvolvimento sustentável proposto pelas Nações Unidas: tornar cidades, mais seguras, resilientes e sustentáveis (UN, 2015), as técnicas compensatórias têm sido cada vez mais utilizadas (ECKART; MCPHEE; BOLISSETTI, 2017).

Estas técnicas buscam replicar o comportamento hidrológico de pré-desenvolvimento, a partir da redução do escoamento superficial, promovendo o amortecimento das vazões de pico e facilitando a infiltração e consequente recarga do lençol freático (LI et al., 2017; YAZDANFAR; SHARMA, 2015). Gallet (2011) complementa que as técnicas compensatórias são capazes de combater as ilhas de calor e melhorar a paisagem municipal. Além disso, segundo Dong, Guo e Zeng (2017) e Eckart; McPhee; Bolisetti, (2017), o melhor custo benefício está na associação da drenagem convencional com a infraestrutura verde. Lee et al., (2012) e Malekpour et al. (2017) também ressaltam a melhoria no custo benefício com o emprego de técnicas compensatórias aliadas ao planejamento urbano. As principais técnicas compensatórias utilizadas são os células de biorretenção, jardins de chuva, os pavimentos permeáveis e os telhados verdes (PAUS; BRASKERUD, 2014).

As técnicas compensatórias possuem três escalas espaciais de aplicação: lote, individual, sub-bacias ou microdrenagem e em nível de bacias ou macrodrenagem (LI et al., 2017). Desta forma, a escolha das medidas utilizadas pode variar com a escala adotada. Contudo, sabe-se que medidas que atuam de forma distribuídas, ou seja, atuam na fonte da geração, transporte ou acúmulo de escoamento são mais adequadas (LOPERFIDO et al., 2014; YANG et al., 2014). Outro fator que favorece o uso de estruturas distribuídas é a menor demanda por espaço, favorecendo sua aplicação em regiões densamente urbanizadas (ZELLNER et al., 2016).

A priorização de áreas para instalação de técnicas compensatórias é de fundamental importância quando os recursos são limitados (KAYKHOSRAVI et al., 2019; WANG et al., 2017b). Atualmente, existem diversos estudos que tratam sobre a identificação de áreas prioritárias para instalação de técnicas compensatórias, contudo estes estudos são, em sua maioria, para bacias hidrográficas com predominância de áreas agrícolas, utilizam bases de dados de difícil acesso em outros países, além de não considerarem as características específicas de cada técnica compensatória (ECKART; MCPHEE; BOLISSETTI, 2017; LAGADEC et al., 2016; LIU et al., 2016a; MARTIN-MIKLE et al., 2015; MIKOVITS et al., 2017). Por outro lado, também existem estudos em relação à identificação de áreas aptas a instalação de técnicas compensatórias de drenagem que não consideram a necessidade do local em receber uma técnica compensatória (FENG; BURIAN; POMEROY, 2016; LEE et al., 2012; LIU et al., 2016b; ZELLNER et al., 2016). Neste estudo, buscou-se aliar a priorização de áreas que contribuam para o escoamento superficial com a alocação de técnicas compensatórias, em nível de bacia, utilizando uma base de dados de acesso livre, a fim de garantir a replicabilidade do trabalho em outros locais.

Apesar dos benefícios gerados pelo emprego de técnicas compensatórias, como o amortecimento da vazão de pico, o aumento do escoamento de base e a melhoria da paisagem urbana, sua adoção no Brasil ainda é escassa, o que torna o seu estudo de extrema importância. Por isso, o objetivo deste trabalho é estabelecer uma metodologia para alocação de técnicas compensatórias de drenagem integradas à paisagem urbana, definindo áreas prioritárias e estruturas que melhor se adequam a estas áreas.

6.4 Metodologia

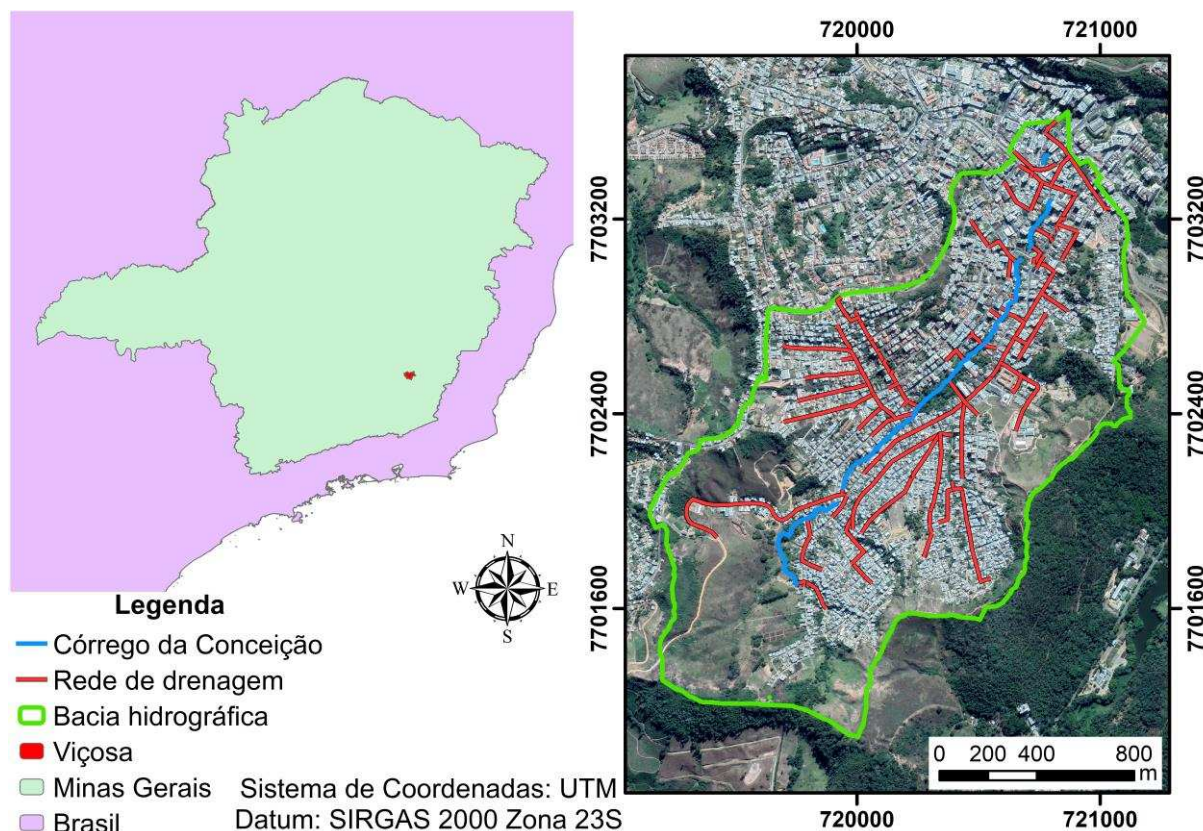
6.4.1 Área de estudo

O estudo foi realizado no município de Viçosa, Minas Gerais, que assim como a maioria das cidades brasileiras destaca-se pela urbanização desordenada. A partir da década de 70 do século passado, houve um crescimento expressivo da população urbana da cidade, tanto pela migração da população rural quanto de pessoas de outros municípios atraídos pela Universidade Federal de Viçosa, UFV, acarretando na expansão acelerada de loteamentos, edifícios e condomínios fechados (MARIA; FARIA; STEPHAN, 2014).

A bacia do córrego da Conceição, área de estudo, encontra-se inteiramente dentro da cidade de Viçosa (Figura 6-1). A área de drenagem do presente estudo possui 271,8ha, a bacia do córrego da Conceição encontra-se altamente urbanizada, sem preservação da mata ciliar, com trechos canalizados e diversos pontos de estrangulamento da rede de drenagem, mostrando a falta de um planejamento integrado. A ocupação irregular aliada ao subdimensionamento dos sistemas de drenagem da bacia, propiciam e tornam mais frequentes problemas como deslizamentos, assoreamentos, desabamentos e inundações.

O relevo da região é tido como forte ondulado e montanhoso (EMBRAPA, 1979). O solo da região é predominantemente composto por Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico tipo A (EMBRAPA, 2001; FEAM et al., 2010). O clima, segundo classificação Köppen, é Cwa, clima subtropical úmido com inverno seco e verão quente (ALVARES et al., 2013).

Figura 6-1. Bacia do Córrego da Conceição.



Fonte: Autora

6.4.2 Implantação de técnicas compensatórias e base de dados

As técnicas compensatórias consideradas neste trabalho foram: células de biorretenção, jardins de chuva, pavimentos permeáveis, plantio de vegetação nativa e telhados verdes. Cada uma dessas estruturas citadas são indicadas para determinado local em função da declividade, disponibilidade de espaço e zoneamento do município (WANG et al., 2017b). Devido à grande quantidade de fatores e restrições relacionadas à aplicação e alocação destas estruturas, a análise espacial foi adotada (LORENTZ et al., 2016; WANG et al., 2017a), tendo sido feita no *software* ArcGIS 10.3 a partir da combinação dos mapas apresentados na Tabela 6-1. Em cada mapa foram aplicadas as restrições descritas nas Tabela 6-2 Tabela 6-3, e posteriormente foi feita a sobreposição de todos os mapas, a fim de determinar a susceptibilidade dos locais ao escoamento e, conseqüentemente, os locais aptos a receberem as técnicas compensatórias. Ressalta-se que as bases de dados citadas são de livre obtenção, possibilitando, assim, a replicabilidade do presente trabalho.

Tabela 6-1. Base de dados utilizada para elaboração do estudo

| Base de Dados | Fonte |
|----------------------|--|
| Mapa de solos | (FEAM et al., 2010) |
| Relevo | Obtido através do satélite IKONOS 5x5m |
| Imagem Rapideye | (MMA, 2015) 5x5m |
| Arruamento | (IBGE, 2010) |
| Zoneamento | (VIÇOSA, 2000) |

Fonte: Autora

A escolha das áreas para implantação de técnicas compensatórias deve primeiramente considerar as áreas mais críticas quanto a produção do escoamento superficial, a fim de promover melhores resultados e, portanto, um melhor custo-benefício (KAYKHOSRAVI et al., 2019). A localização das áreas críticas foi elaborada a partir da identificação das áreas suscetíveis à geração, transporte e acumulação de escoamento superficial. Estas áreas foram definidas levando em consideração fatores fisiográficos (área de drenagem, perímetro e declividade) e edáficas do local (condutividade hidráulica e capacidade de armazenamento de água) (MARTIN-MIKLE et al., 2015).

6.4.3 Definição de áreas suscetíveis à geração, transporte e acúmulo de escoamento superficial

A definição de áreas suscetíveis foi baseada na metodologia proposta por Lagadec et al. (2016) e Martin-Mikle et al., (2015). Cada mapa de susceptibilidade foi gerado a partir da combinação de fatores, como mostrado na Tabela 6-2. Cada indicador foi classificado em categorias, sendo os valores mais próximos de 1 considerados mais suscetíveis. Para cada pixel de cada mapa temático (Tabela 6-1), foram atribuídos os valores conforme apresentado na Tabela 6-2 foram atribuídos. Ao final, estes mapas foram sobrepostos e os valores de cada pixel somados. Posteriormente, cada mapa de susceptibilidade (geração, transporte e acumulação) foi dividido em três categorias: alta, média e baixa. Para a divisão destas categorias foi feita a classificação em quantis (ALWATHAF; MANSOURI, 2011).

Tabela 6-2. Indicadores e pesos utilizados na determinação das áreas mais susceptíveis ao escoamento superficial

| Mapa | Indicador | Critério | Peso |
|-------------------|--|--|---|
| Geração | Permeabilidade | Considera a capacidade de cada tipo de solo em infiltrar a água, conforme grupos de solo definidos pelo SCS-USDA (USDA, 1972) | A e B – 0 C e D – 1 |
| | Profundidade | Considera a capacidade de armazenamento de água no perfil de solo (SARTORI; LOMBARDI NETO; GENOVEZ, 2005). | Profundos e estruturados – 0 Rasos e podzólicos – 1 |
| | Declividade e capacidade de saturação do solo. | Avalia a capacidade de cada área de se saturar completamente e gerar escoamento superficial (LAGADEC et al., 2016; MARTIN-MIKLE et al., 2015). | Declividade < t1 – 0 Declividade > t1 – 1 Equação 6-1 |
| | Uso do solo | Considera as áreas permeáveis e impermeáveis (LAGADEC et al., 2016). | Áreas permeáveis – 0 Áreas impermeáveis – 1 |
| Transporte | Geração | Considera que se uma área é possivelmente geradora de escoamento superficial pode, também, o transferir para outras áreas (LAGADEC et al., 2016). | Baixa susceptibilidade – 0 Alta susceptibilidade – 1 |
| | Declividade | Considera que quanto maior a declividade maior a capacidade de transporte do escoamento superficial. Faixa de valores estabelecida pela EMBRAPA, (1979). | Plano e suave ondulado (0-8%) – 0 Ondulado (8-20%) – 0,5 Forte-ondulado, montanhoso e forte montanhoso (>20%) – 1 |
| | Concavidade | Considera que a concavidade do terreno influencia no transporte do escoamento superficial Adaptado de LAGADEC et al. (2016) e (UFV; UFMG; RENOVA, 2018). | Côncavo e Divergente – 0 Côncavo e Convergente – 0,5 Convexo e Divergente – 0,5 Convexo e Convergente – 1 |
| | Uso do Solo | Considera que áreas impermeáveis são mais susceptíveis ao transporte do escoamento superficial (LAGADEC et al., 2016). | Áreas permeáveis – 0 Áreas impermeáveis – 1 |
| | Ruas | Considera que o transporte do escoamento superficial acontece preferencialmente pelas vias (ZELLNER et al., 2016). | Fora das ruas – 0 Ruas – 1 |

| | | | |
|-------------------|----------------------|--|---|
| Acumulação | Geração | Considera que se uma área é possivelmente geradora de escoamento superficial pode, também, o acumular (LAGADEC et al., 2016). | Baixa susceptibilidade – 0 Alta susceptibilidade – 1 |
| | Declividade | Considera que quanto menor a declividade maior a capacidade de acumulação do escoamento superficial. Faixa de valores estabelecida pela EMBRAPA, (1979). | Forte-ondulado, montanhoso e forte montanhoso (>20%) – 0 Ondulado (8-20%) – 0,5 Plano e suave ondulado (0-8%) – 1 |
| | Concavidade | Considera que a concavidade do terreno influencia na acumulação de do escoamento superficial. Adaptado de LAGADEC et al. (2016) e (UFV; UFMG; RENOVA, 2018). | Convexo e Divergente – 0 Convexo e Convergente – 0,5 Côncavo e Divergente – 0,5 Côncavo e Convergente – 1 |
| | Uso do Solo | Considera que áreas impermeáveis são mais susceptíveis a acumular o escoamento superficial, por não infiltrarem (LAGADEC et al., 2016). | Áreas permeáveis – 0 Áreas impermeáveis – 1 |
| | Área de contribuição | Considera que quanto maior a área de contribuição, maior a possibilidade de acumulação do escoamento superficial (LAGADEC et al., 2016). | Baixo (<0,5ha) – 0 Alto (≥0,5ha) – 1 |

Fonte: Autora

A Equação 6-1 representa a capacidade de determinado local em acumular água, denominado de índice topográfico (BEVEN; KIRKBY, 1979; MANFREDA et al., 2014). Quanto maiores os valores de t_1 , mais suscetível ao acúmulo de água é a área.

$$t_1 = \ln \frac{\alpha}{tg\beta} \quad (6 - 1)$$

Sendo: t_1 o índice topográfico; α a área de drenagem dividida pelo seu perímetro (m); β a declividade (rad).

Para a determinação do índice topográfico o Modelo Digital de Elevação, MDE, foi hidrologicamente condicionado, a fim de representar a drenagem da bacia e remover depressões espúrias (BAENA et al., 2004; SINGH; GUPTA; SINGH, 2014). Posteriormente, cada pixel do MDE foi convertido em pontos para cálculo da área de drenagem de cada pixel. Com a área e o perímetro de cada bacia de

drenagem, o fator α pôde ser calculado para cada pixel, tornando possível a aplicação da Equação 6-1.

6.4.3.1 Obtenção de áreas permeáveis e impermeáveis

Para obtenção do uso do solo na bacia em estudo, foi utilizada a imagem do satélite Rapideye (MMA, 2015). Para a classificação foi utilizado o *Normalized Difference Vegetation Index*, NDVI (MARTIN-MIKLE et al., 2015; MOMENI et al., 2016), que é capaz de identificar a vegetação de uma imagem, sendo então utilizado para separação entre áreas permeáveis e impermeáveis (HU et al., 2016). Também utilizou-se para classificação o arruamento do município de Viçosa, disponibilizado pelo IBGE (IBGE, 2010) e pela Secretaria de Obras e Serviços Urbanos da Prefeitura Municipal de Viçosa. O índice Kappa (COHEN, 1960) foi utilizado como métrica para avaliar a qualidade da classificação da imagem. O índice Kappa, varia de 0 a 1, e é utilizado para avaliar a concordância de variáveis categóricas, sendo 1 perfeita concordância e 0 concordância por coincidência (EL BAROUDY, 2016; RWANGA; NDAMBUKI, 2017).

6.4.4 Alocação das técnicas compensatórias

Cada técnica compensatória possui suas particularidades de aplicação. Portanto, a alocação das técnicas foi feita conforme as características apresentadas na Tabela 6-3. Definida a aptidão do local para receber a técnica compensatória, foi verificada a necessidade do local em receber uma técnica compensatória através dos mapas de susceptibilidade (KAYKHOSRAVI et al., 2019; MARTIN-MIKLE et al., 2015). Desta forma, foram utilizadas as áreas definidas no item 6.4.3 com susceptibilidade alta e média.

Tabela 6-3. Características das técnicas compensatórias.

| Técnica | Declividade (%) | Zona ² | Classe de Uso | Local | Área prioritária |
|------------------------------------|---------------------|-------------------|----------------------------------|---|-------------------------------------|
| Célula de Biorretenção | <5 ¹ | R C | Permeável | A menos de 30m das ruas e mais de 30m da hidrografia ¹ | Geração Acumulação |
| Jardim de Chuva | 5-20 ² | R C | Permeável | A mais de 30m da hidrografia ¹ | Geração Acumulação |
| Telhado Verde | - | C | Impermeável Privada ² | - | Geração |
| Pavimento Permeável | <5 ^{1 e 2} | | Impermeável | Calçadas (Ruas) (buffer 2m) ³ | Geração Transporte |
| Plantio de Vegetação Nativa | >20 ² | R C | Permeável | - | Geração Transporte Acumulação |

R: Zona residencial; C: Zona comercial; ¹ (JATO-ESPINO et al., 2016); ² (WANG et al., 2017b); ³ (VIÇOSA, 2004).

Fonte: Autora

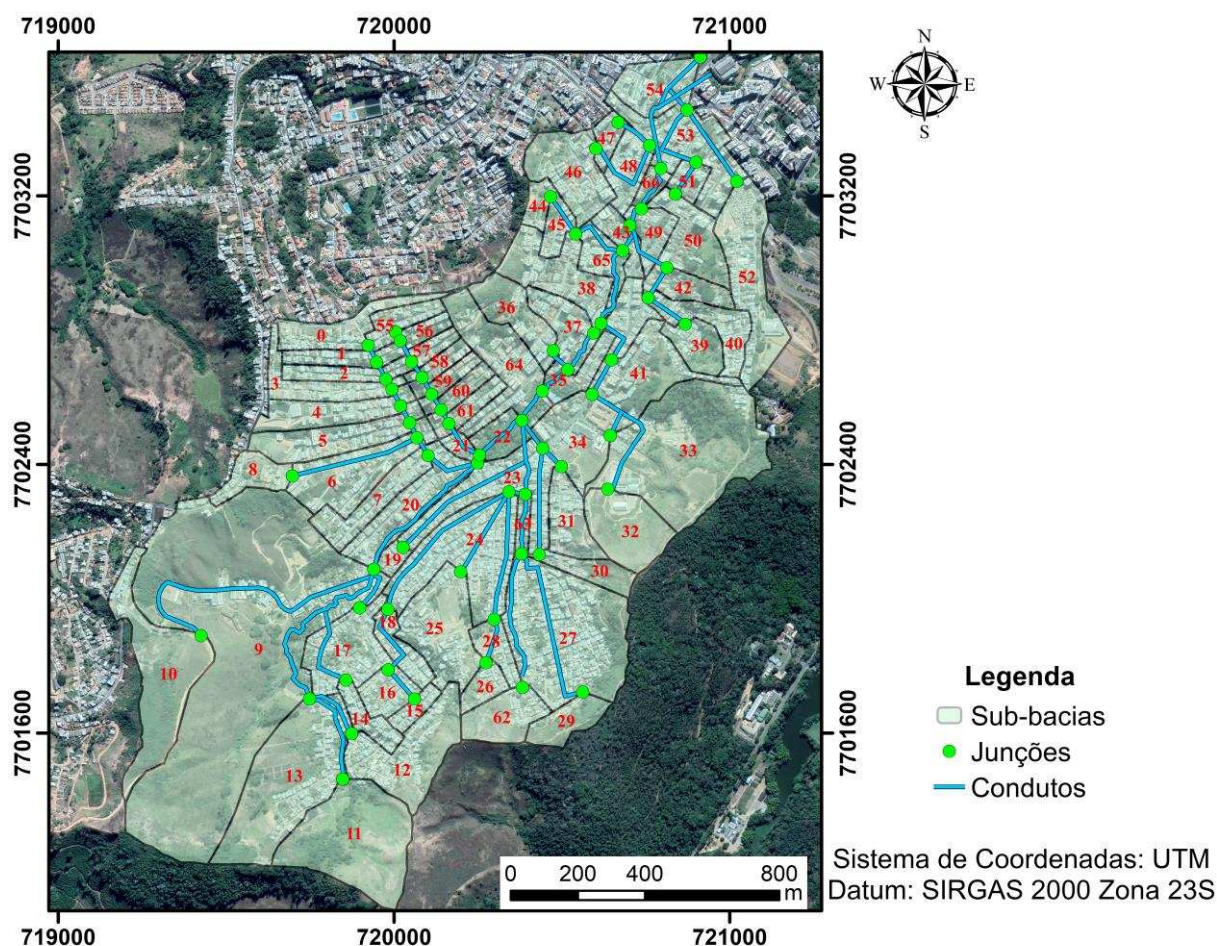
6.4.5 Verificação da eficiência da alocação das técnicas compensatórias

Para verificar a eficiência da alocação das técnicas compensatórias de drenagem foi utilizado o *Storm Water Management Model*, SWMM, na sua versão 5.1. Este modelo baseia-se em um balanço hídrico, que considera a bacia hidrográfica como um reservatório não linear (LI; LI; LI, 2016), resolvendo a equação de Manning (ROSSMAN; EMERITUS; EPA, 2015) e utilizando o método da onda dinâmica para fins de propagação de cheias, (BARATI; RAHIMI; AKBARI, 2012; BISHT et al., 2016). A entrada de água no sistema é feita a partir da precipitação e contribuição da sub-bacia a montante. As saídas ocorrem pela infiltração, evaporação e escoamento superficial (LI et al., 2016). O método do número da curva foi utilizado para cálculo da infiltração (BABAEI; GHAZAVI; ERFANIAN, 2018; PALLA; GNECCO; LA BARBERA, 2018; RABORI; GHAZAVI; REVESHTY, 2017).

Para representação da superfície, o SWMM utiliza sub-bacias, junções e condutos. No SWMM a precipitação que não infiltra é armazenada nas depressões do microrrelevo ou se torna escoamento superficial (ROSSMAN; EMERITUS; EPA, 2015). Este escoamento gerado na sub-bacias é conduzido para um único ponto, a junção. Esta, por sua vez, conduz o escoamento através de condutos até o ponto de deságue final (BISHT et al., 2016). Para melhor simular as condições da bacia,

dividiu-se a área de estudo em 67 em sub-bacias (Figura 6-2) com características homogêneas que representam o seu sistema de drenagem (BABAEI; GHAZAVI; ERFANIAN, 2018; PALLA; GNECCO; LA BARBERA, 2018; ZHANGSUI; LIZHE, 2019). O sistema de drenagem existente na bacia deve ser considerado, pois é o responsável por captar a água da superfície e conduzi-la até o exutório (BISHT et al., 2016).

Figura 6-2. Divisão bacia do córrego da Conceição em sub-bacias e rede de drenagem para simulação no SWMM.



Fonte: Autora

Os parâmetros utilizados para modelagem da condição atual da bacia no SWMM são apresentados na

Tabela 6-4.

Tabela 6-4. Parâmetros de entrada utilizados no SWMM

| Parâmetro | Método de obtenção |
|---|--|
| Área e declividade média | MDE IKONOS |
| Largura | Largura da bacia obtida pela relação entre a área da bacia dividida pelo comprimento do talvegue (KOURTIS; KOPSIAFTIS; TSIHRINTZIS, 2017; ROSA; CLAUSEN; DIETZ, 2015; YAO; WEI; CHEN, 2016). |
| Áreas permeáveis e impermeáveis | Rapideye (MMA, 2015) |
| Número da Curva | (TUCCI, 2012; USDA, 1972) |
| Rugosidade | Rugosidade proposta por Ven Te Chow (JOBSON; FROEHLICH, 1988) |
| Capacidade de armazenamento de água no microrrelevo | Considerado como as abstrações iniciais do método do número da curva (PRUSKI; BRANDÃO; SILVA, 2004). |
| Áreas impermeáveis incapazes de armazenar água | Considerada a área ocupada por edificações em geral, pois estas buscam escoar a água rapidamente (JAIN et al., 2016). |
| Dados referentes aos condutos e junções | Levantamento em campo e juntamente com a prefeitura de Viçosa. |

Fonte: Autora

Para o cenário simulado com alocação de técnicas compensatórias foi necessário inserir em cada sub-bacia quais as técnicas que foram aplicadas, bem como a área ocupada pelas mesmas. O SWMM considera que as técnicas trabalham em paralelo, ou seja, com todas as técnicas atuando simultaneamente (ROSSMAN; EMERITUS; EPA, 2015). Os parâmetros utilizados estão expressos na Tabela 6-5. Tais parâmetros foram obtidos com base nos trabalhos de Chui; Liu; Zhan, (2016); Davis et al., (2009); Kong et al., (2017); Li; Li; Li, (2016); Lorentz et al., (2016); Paus; Braskerud, (2014); Rossman; Emeritus; EPA, (2015).

Apesar da sua importância, o plantio de vegetação nativa não é uma das técnicas compensatórias disponíveis no SWMM. Para sua consideração, os parâmetros do número da curva e abstrações iniciais foram recalculados considerando-se que as áreas permeáveis que eram compostas por pastagens ou terrenos em más condições, com o plantio de vegetação nativa seriam consideradas como florestais com cobertura boa, segundo tabela proposta por Tucci, (2012) para bacias urbanas e suburbanas.

Tabela 6-5. Características das técnicas compensatórias inseridas no SWMM para fins de simulação de cenário

| Tipo de técnica compensatória | Célula de biorretenção | Jardim de chuva | Telhado verde | Pavimento Permeável |
|--|-------------------------------|------------------------|----------------------|----------------------------|
| Superfície | | | | |
| Profundidade de armazenamento (mm) | 150,00 | 350,00 | 25,00 | 0,00 |
| Cobertura Vegetal (fração) | 0,10 | 0,20 | 0,10 | 0,00 |
| Rugosidade Superficial (n Manning) | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,01 |
| Declividade Superficial da técnica compensatória (%) | 0,00 | 0,00 | 1,00 | - |
| Solo | | | | |
| Espessura da camada de solo (mm) | 200,00 | 150,00 | 150,00 | - |
| Porosidade (Fração Volumétrica) | 0,50 | 0,50 | 0,50 | - |
| Pavimento | | | | |
| Espessura do pavimento (mm) | - | - | - | 150,00 |
| Índices de Vazios (Vazios /Sólidos) | - | - | - | 0,40 |
| Superfície Impermeável (Fração) | - | - | - | 0,30 |
| Permeabilidade do pavimento (mm/h) | - | - | - | 72,00 |
| Armazenamento | | | | |
| Altura da camada de armazenamento (mm) | 500,00 | - | - | 300,00 |
| Índices de Vazios (Vazios /Sólidos) | 0,75 | - | - | 0,40 |
| Taxa de Filtração (mm/h) | 750,00 | - | - | 750,00 |
| Camada drenante | | | | |
| Altura (mm) | - | - | 75,00 | - |
| Índices de Vazios (Vazios /Sólidos) | - | - | 0,50 | - |
| Rugosidade (n Manning) | - | - | 0,10 | - |

Fonte: Autora

6.4.6 Chuva de projeto

Foi feita a simulação de único evento no SWMM. Os dados foram obtidos da estação pluviográfica 86824 do Instituto Nacional de Meteorologia, INMET, localizada no município de Viçosa. Essa estação fornece os dados de precipitação horária desde de 2005. Foi utilizado uma chuva de projeto com intensidade máxima de precipitação correspondente ao um período de retorno de 5 anos, que é o valor recomendado para projetos de drenagem que abrangem áreas comerciais (CANHOLI, 2014). Para isso, os dados da estação 86824 foram agrupados em uma série anual de intensidades máximas de precipitação com duração de uma hora. Para simular o evento de precipitação completo, foram utilizadas todas as

intensidades de precipitação com uma hora de duração ocorridas no dia do evento escolhido.

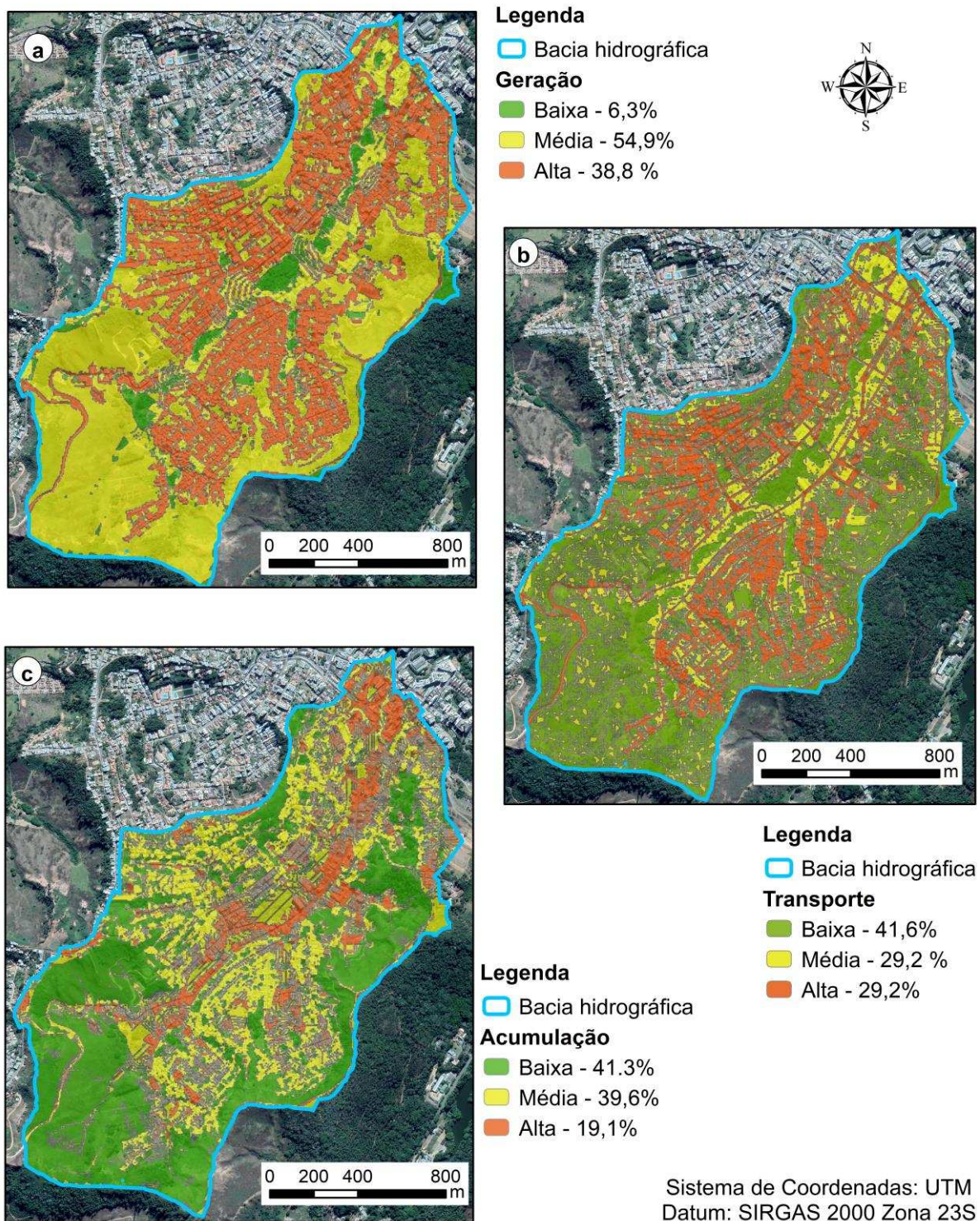
6.5 Resultados

Na classificação do uso do solo da imagem Rapideye (MMA, 2015) as áreas com NDVI maior que 0,11, foram consideradas permeáveis, sendo este o valor que melhor se adequou à bacia, assim como no estudo feito por Di et al., (2018). Obteve-se um Kappa estimado de 0,7, correspondente a uma concordância substancial (FIGUEIREDO; VIEIRA, 2007; FREITAS, JR.; RIBEIRO, 2014).

Nota-se na Figura 6-3 os mapas de susceptibilidade à geração, transporte e acúmulo de escoamento superficial. Estes mapas foram divididos em três categorias de susceptibilidade: alta, média e baixa. A bacia do córrego da Conceição, por suas altas declividades e elevada taxa de impermeabilização, apresentou 93,7% de sua área com susceptibilidades média e alta à geração do escoamento. Para o transporte e acúmulo de escoamento superficial, as susceptibilidades alta e média se mostram bem próximas, com 58,4% da área da bacia para transporte e 58,7% para acúmulo de escoamento. Mesmo que menores, estes valores mostram que mais da metade da bacia encontra-se com riscos de erosão e desmoronamentos, causados pela alta e média susceptibilidade ao transporte e riscos de alagamentos (PRUSKI, 2009).

Em relação ao mapa de susceptibilidade à geração de escoamento superficial, as áreas com maior propensão são as áreas impermeáveis, com enfoque no arruamento. As ruas também apresentaram maior susceptibilidade ao transporte. Isso é explicado pelo fato de o arruamento criar caminhos preferenciais que favorecem o escoamento superficial (KONG et al., 2017; ZELLNER et al., 2016). Este resultado evidencia ainda mais o impacto da urbanização sobre a geração de escoamento superficial (WANG et al., 2017b). Nota-se que as áreas de cabeceira, apesar de permeáveis, possuem média susceptibilidade a geração do escoamento em virtude das altas declividades, o que desfavorece a infiltração e, conseqüentemente, a recarga do lençol freático e contribui para a concentração do escoamento nas áreas mais baixas da bacia de estudo.

Figura 6-3. Mapas de susceptibilidade à geração, transporte e acúmulo de escoamento superficial na bacia do córrego da Conceição.



Fonte: Autora

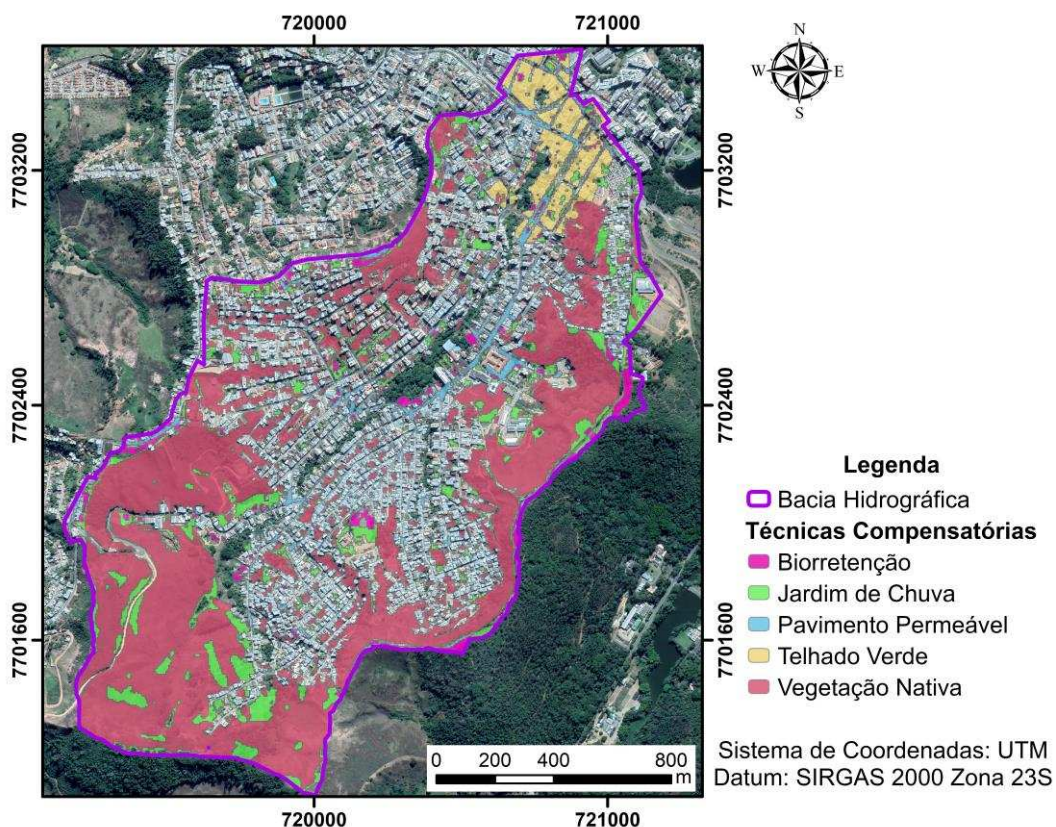
A alocação das técnicas compensatórias está apresentada na Figura 6-4. As áreas ocupadas por cada técnica compensatória estão apresentadas na Tabela 6-6 e em cada sub-bacia no Apêndice A. Com a adoção das técnicas compensatórias houve uma cobertura de 54,2% da área total da bacia, sendo o plantio de vegetação nativa a principal técnica, com 36,9% de cobertura na bacia.

Tabela 6-6. Áreas ocupadas por técnicas compensatórias na bacia do córrego da Conceição

| | Área (ha) | Porcentagem em relação a área total da bacia (%) | |
|---|---|--|--------------|
| Área total da bacia | 271,8 | 100,0% | |
| Área permeável | 142,35 | 52,4% | |
| Área impermeável | 129,42 | 47,6% | |
| Técnicas compensatórias | Célula de biorretenção | 22,21 | 8,2% |
| | Jardim de chuva | 8,17 | 3,0% |
| | Pavimento permeável | 6,85 | 2,5% |
| | Telhado verde | 9,72 | 3,6% |
| | Plantio de vegetação nativa | 100,25 | 36,9% |
| | Total | 147,21 | 54,2% |
| | Técnicas compensatórias que ocupam áreas permeáveis | 130,63 | 48,1% |
| Técnicas compensatórias que ocupam áreas impermeáveis | 16,58 | 6,1% | |

Fonte: Autora

Figura 6-4. Alocação das técnicas compensatórias na bacia do córrego da Conceição



Fonte: Autora

Apesar de ser alta a porcentagem para readequação da bacia com o uso técnicas compensatórias (54,2%), essa elevada porcentagem de readequação com o uso de técnicas compensatórias também foi encontrada por Feng; Burian; Pomeroy, (2016) na readequação de um cenário urbanizado com o uso de técnicas compensatórias. 48,1% das técnicas compensatórias propostas são implantadas em áreas permeáveis da bacia em estudo, facilitando a adequação da bacia (ECKART; MCPHEE; BOLISSETTI, 2017). Com a alocação das técnicas compensatórias proposta por este estudo, 70,4% das áreas permeáveis receberiam o plantio de vegetação nativa. Assim como neste estudo, no trabalho realizado por Wang et al., (2017b) o plantio de vegetação nativa foi a técnica mais recomendada. Isso também se explica pela limitação da aplicação das outras técnicas compensatórias em função de grande parte da bacia ter declividades superiores a 20%, favorecendo o plantio de vegetação nativa. Em relação as técnicas compensatórias que foram instaladas em áreas impermeáveis, estas representam apenas 6,1% da área total da bacia.

Nas áreas de cabeceira da bacia e próximo aos divisores de águas ocorre a maior concentração de técnicas compensatórias, com destaque para o plantio de

vegetação nativa aliada com jardins de chuva que favorecem a infiltração (Figura 6-4). Essa alocação, além de favorecer a redução do escoamento superficial, favorece a infiltração em regiões de cabeceira, sendo o ideal para recuperação e manutenção das nascentes existentes e conservação do solo, reduzindo também o risco de erosão e deslizamentos (PRUSKI, 2009). Outro fator que contribuiu para uma maior concentração das técnicas nesta região é a maior disponibilidade de áreas permeáveis, visto que a ocupação urbana se concentra mais na parte central e baixa da bacia.

Para verificação da eficiência da implantação de técnicas compensatórias foi modelado no SWMM o cenário atual e o cenário com a adoção das técnicas compensatórias. Os resultados relativos a toda a bacia em estudo estão apresentados na Tabela 6-7 e para cada sub-bacia no Apêndice B.

Tabela 6-7. Resultados do SWMM considerando o cenário atual e o cenário com a adoção de técnicas compensatórias na bacia do córrego da Conceição

| Cenário | Precipitação (mm) | Infiltração (mm) | Escoamento superficial (mm) | Armazenamento (mm) |
|------------------------------------|--------------------------|-------------------------|------------------------------------|---------------------------|
| Atual | 104 | 12 | 85 | 7 |
| Com técnicas compensatórias | 104 | 38 | 22 | 44 |

Fonte: Autora

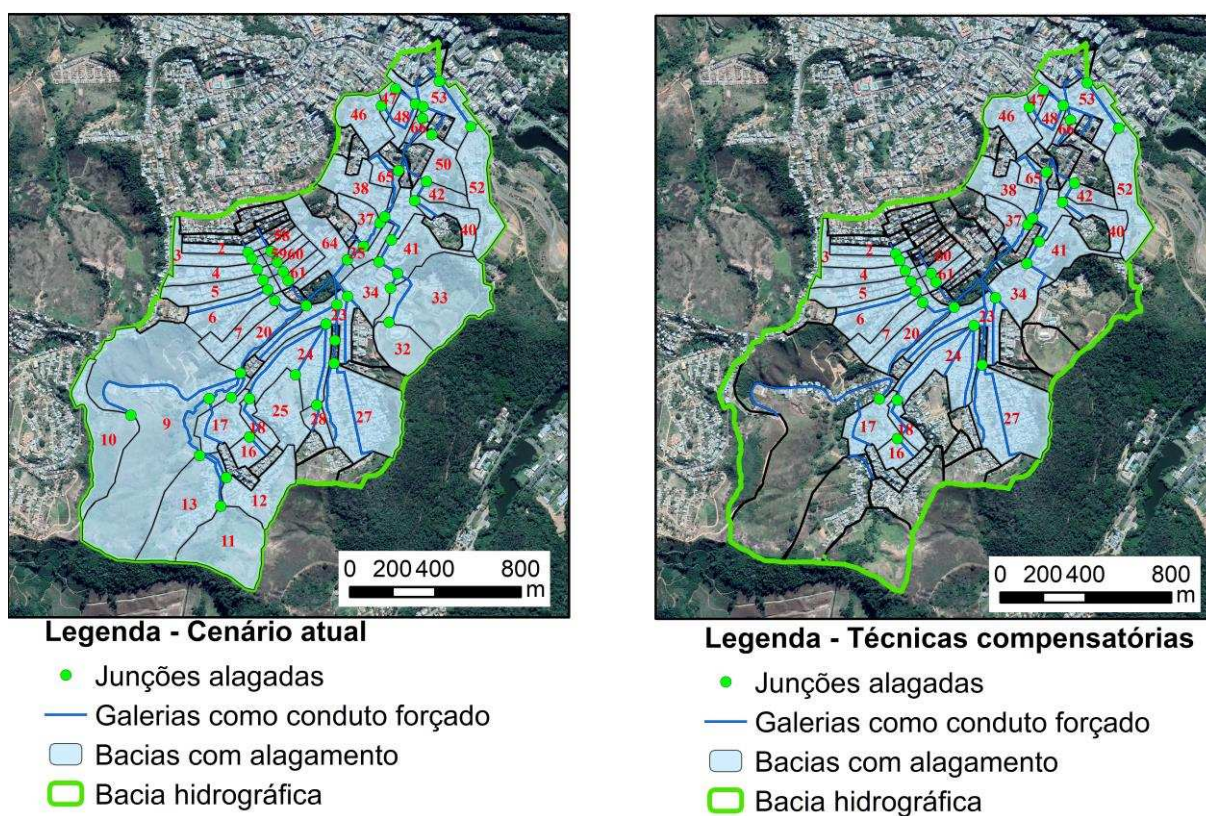
Neste estudo, assim como nos trabalhos de Bell et al., (2016); Li et al., (2017); Loperfido et al., (2014), os resultados do SWMM mostraram que a aplicação de técnicas compensatórias reduz a lâmina de escoamento superficial e aumenta a infiltração e o armazenamento de água dentro da bacia. O armazenamento de água na bacia ocorre por meio de interceptação pela vegetação e acúmulo de água na camada superficial do solo e no microrrelevo.

Na Figura 6-5, estão apresentadas as sub-bacias que apresentaram pontos de alagamento em seu exutório no cenário atual e com o uso de técnicas compensatórias. Os resultados mostraram que no cenário atual 42 das 67 sub-bacias apresentam alagamentos, sendo que destas várias se encontram em áreas de cabeceira. Após aplicação das técnicas compensatórias houve uma redução nos

pontos de alagamento, que passaram a ocorrer em 28 sub-bacias. Contudo, mesmo para os pontos em que o alagamento persistiu, houve redução do volume de alagamento que variou de 23% a 99%, reduzindo substancialmente o impacto dos mesmos.

Desta forma, fica evidente que com a adoção de técnicas compensatórias, mesmo em regiões já densamente urbanizadas e sem planejamento, é possível estabelecer uma condição hidrológica intermediária entre o pré e pós-desenvolvimento (BHASKAR; HOGAN; ARCHFIELD, 2016; LI et al., 2017). Nas bacias onde as reduções foram menores, também foi menor o uso de técnicas compensatórias, devido à disponibilidade de espaço e condições da bacia. Outros estudos encontraram resultados semelhantes a este, ou seja, houve uma redução parcial do escoamento superficial (HOGAN et al., 2014; LI; LI; LI, 2016; WINSTON; DORSEY; HUNT, 2016).

Figura 6-5. Sub-bacias com alagamento no cenário atual e com a aplicação de técnicas compensatórias na bacia do córrego da Conceição



Fonte: Autora

É necessário também analisar o efeito que algumas sub-bacias de cabeceira possuem sobre toda a bacia. As bacias 0 e 1 (Figura 6-2), apesar de não possuírem pontos alagados em nenhum dos cenários, contribuem com escoamento superficial para as bacias a jusante, fazendo todas apresentarem pontos de alagamento. No cenário com o uso de técnicas compensatórias houve uma redução no escoamento superficial de 20% na bacia 1. Vale destacar que na bacia 1 foi possível alocar técnicas compensatórias em apenas 25% da área da bacia, sendo o plantio de vegetação nativa a única técnica de possível aplicação em decorrência das altas declividades e zoneamento da bacia.

Os motivos que podem explicar o fato de algumas bacias ainda apresentarem pontos de alagamento são a alta taxa de urbanização e as declividades elevadas. Este é o caso da sub-bacia 47, que apresentou a maior lâmina de escoamento no cenário atual. No cenário com o uso de técnicas compensatórias, foi proposta uma readequação de 10% da sub-bacia com as técnicas propostas neste estudo. Apesar desta sub-bacia continuar apresentando pontos de alagamento, houve uma redução de 40% da lâmina de escoamento superficial nesta bacia. Em casos como este, em que a bacia possui baixa disponibilidade de espaço, o uso de técnicas compensatórias individuais que visem desconectar as áreas impermeáveis podem ajudar (KONG et al., 2017).

A efetividade das técnicas compensatórias na bacia está relacionada às condições da bacia e a seu nível de urbanização (GIRI et al., 2014). O cenário proposto apesar de não mitigar todos os pontos de alagamentos se mostra promissor, pois foi capaz de reduzir a quantidade e volume de escoamento dos pontos com alagamentos. Outro aspecto que poderá ser feito é o aumento da capacidade de armazenamento das estruturas, que possui grande influência na redução do escoamento superficial. Esta pode ser uma opção para as bacias onde os pontos de alagamento ainda persistiram juntamente com o incentivo a adoção de reservatórios individuais.

6.6 Conclusões

Este trabalho apresentou uma metodologia para priorização de áreas e alocação de técnicas compensatórias de drenagem. Também foi avaliado o impacto da aplicação destas técnicas em uma bacia urbanizada. As principais conclusões são:

- A priorização das áreas críticas ao escoamento superficial se apresentou adequada, sendo sensível às características da urbanização, como o arruamento, que atua como caminhos preferenciais para o escoamento. A metodologia foi capaz de identificar áreas que ao receberem intervenção poderão apresentar melhores resultados.
- A metodologia de alocação das técnicas compensatórias também se mostrou adequada, sendo capaz de propor a alocação das técnicas em espaços apropriados e de forma integrada à paisagem urbana, otimizando as áreas permeáveis.
- A técnica compensatória mais utilizada foi o plantio de vegetação nativa, sendo sugerida em sua maioria nas áreas de cabeceira da bacia onde podem apresentar um maior impacto para conservação do solo e água e favorecer a manutenção das nascentes através do aumento das áreas de recarga. A preferência pelas áreas de cabeceira também se apresenta favorável por reduzir o acúmulo do escoamento no início da rede, evitando a geração de vários pontos de alagamentos a jusante.
- Apesar da não eliminação total do escoamento superficial mesmo após o uso de técnicas compensatórias e ainda persistir pontos de alagamento dentro da bacia, estes tiveram seu volume reduzido, mostrando que a alocação das estruturas teve um impacto positivo sobre a drenagem da bacia.

REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

ALWATHAF, Y.; MANSOURI, B. EL. Assessment of Aquifer Vulnerability Based on GIS and ARCGIS Methods: A Case Study of the Sana'a Basin (Yemen). **Journal of Water Resource and Protection**, v. 3, n. 12, p. 845–855, 2011.

ARAGÃO, R. DE et al. Impacto do uso do solo pelo aumento da densidade populacional sobre o escoamento numa área urbana do Nordeste Brasileiro via geotecnologias e modelagem hidrológica. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n. 2, p. 543–557, 2017.

BABAEI, S.; GHAZAVI, R.; ERFANIAN, M. Urban flood simulation and prioritization of critical urban sub-catchments using SWMM model and PROMETHEE II approach. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 105, p. 3–11, 1 jun. 2018.

BAENA, L. G. N. et al. Regionalização de vazões com base em modelo digital de elevação para a bacia do rio Paraíba do Sul. **Engenharia Agrícola Jaboticabal**, v. 24, n. 3, p. 612–624, 2004.

BARATI, R.; RAHIMI, S.; AKBARI, G. H. Analysis of dynamic wave model for flood routing in natural rivers. **Water Science and Engineering**, v. 5, n. 3, p. 243–258, 2012.

BELL, C. D. et al. Hydrologic response to stormwater control measures in urban watersheds. **Journal of Hydrology**, v. 541, p. 1488–1500, 2016.

BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. **Hydrological Sciences Journal**, v. 24, n. 1, p. 43–69, 1979.

BHASKAR, A. S.; HOGAN, D. M.; ARCHFIELD, S. A. Urban base flow with low impact development. **Hydrological Processes**, v. 30, n. 18, p. 3156–3171, 2016.

BISHT, D. S. et al. Modeling urban floods and drainage using SWMM and MIKE URBAN: a case study. **Natural Hazards**, v. 84, p. 749–776, 2016.

CANHOLI, A. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

CHUI, T. F. M.; LIU, X.; ZHAN, W. Assessing cost-effectiveness of specific LID practice designs in response to large storm events. **Journal of Hydrology**, v. 533, p. 353–364, 1 fev. 2016.

COHEN, J. A Coefficient of Agreement for Nominal Scales. **Educational and Psychological Measurement**, v. 20, n. 1, p. 37–46, 1960.

DAVIS, A. P. et al. Bioretention Technology: Overview of Current Practice and Future Needs. **Journal of Environmental Engineering**, v. 135, n. 3, p. 109–117, 2009.

DI, S. et al. Urban green space classification and water consumption analysis with remote-sensing technology: a case study in Beijing, China. **International Journal of Remote Sensing**, v. 0, n. 0, p. 1–21, 2018.

DONG, X.; GUO, H.; ZENG, S. Enhancing future resilience in urban drainage system: Green versus grey infrastructure. **Water Research**, v. 124, p. 280–289, nov. 2017.

DUAN, H.-F.; LI, F.; YAN, H. Multi-Objective Optimal Design of Detention Tanks in the Urban Stormwater Drainage System: LID Implementation and Analysis. **Water Resources Management**, v. 30, n. 13, p. 4635–4648, 25 out. 2016.

ECKART, K.; MCPHEE, Z.; BOLISSETTI, T. Performance and implementation of low impact development – A review. **Science of the Total Environment**, v. 607–608, p. 413–432, 2017.

EGER, C. G.; CHANDLER, D. G.; DRISCOLL, C. T. Hydrologic processes that govern stormwater infrastructure behaviour. **Hydrological Processes**, v. 31, n. 25, p. 4492–4506, 15 dez. 2017.

EL BAROUDY, A. A. Mapping and evaluating land suitability using a GIS-based model. **Catena**, v. 140, p. 96–104, 1 maio 2016.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Agropecuária, **Mapa de Solos do Brasil. Escala 1:5.000.000**. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/Ambdata/mapa_solos.php>.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Agropecuária. Sumula da X Reunião Técnica de Levantamentos de Solos (SNLCS, Série Miscelânea, 1). **Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos**, 1979.

FEAM et al. **Mapa de solos do Estado de Minas Gerais**. Base de dados. Disponível em: <<http://www.feam.br/noticias/1/949-mapas-de-solo-do-estado-de-minas-gerais>>.

FENG, Y.; BURIAN, S.; POMEROY, C. Potential of green infrastructure to restore predevelopment water budget of a semi-arid urban catchment. **Journal of Hydrology**, v. 542, p. 744–755, 2016.

FIGUEIREDO, G. C.; VIEIRA, C. A. O. Estudo do comportamento dos índices de Exatidão Global, Kappa e Tau, comumente usados para avaliar a classificação de imagens do sensoriamento remoto. **Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, n. 1995, p. 5755–5762, 2007.

FREITAS, JR., R. L. DE; RIBEIRO, G. P. Avaliação de classificação de imagens para mapeamento digital do Parque Nacional da Serra dos Órgãos (PARNASO). **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 66, n. 6, p. 1203–1213, 2014.

GALLET, D. The Value of Green Infrastructure: A Guide to Recognizing Its Economic, Environmental and Social Benefits. **Proceedings of the Water Environment Federation**, v. 2011, n. 17, p. 924–928, 1 jan. 2011.

GIRI, S. et al. Analysis of best management practice effectiveness and spatiotemporal variability based on different targeting strategies. **Hydrological Processes**, v. 28, n. 3, p. 431–445, 30 jan. 2014.

HOANG, L.; FENNER, R. A. System interactions of stormwater management using sustainable urban drainage systems and green infrastructure. **Urban Water Journal**, v. 13, n. 7, p. 739–758, 2 out. 2016.

HOGAN, D. M. et al. Mitigating the Effects of Landscape Development on Streams in Urbanizing Watersheds. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 50, n. 1, p. 163–178, 1 fev. 2014.

HU, T. et al. Mapping urban land use by using landsat images and open social data. **Remote Sensing**, v. 8, n. 2, 2016.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, **Malha de setores censitários - censo de 2010** IBGE, 2010. Disponível em: <ftp://geoftp.ibge.gov.br/recortes_para_fins_estatisticos/malha_de_setores_censitarios/censo_2010/base_de_faces_de_logradouros/MG/>

JAIN, G. V. et al. Estimation of sub-catchment area parameters for Storm Water Management Model (SWMM) using geo-informatics. **Geocarto International**, v. 31, n. 4, p. 462–476, 20 abr. 2016.

JATO-ESPINO, D. et al. Coupling GIS with Stormwater Modelling for the Location Prioritization and Hydrological Simulation of Permeable Pavements in Urban Catchments. **Water**, v. 8, n. 10, p. 451, 14 out. 2016.

JOBSON, H. E.; FROELICH, D. **Basic Hydraulic Principles of open-channel flow**. Reston, VA: U. S. Geological Survey, 1988.

KAYKHOSRAVI, S. et al. The Low-Impact Development Demand Index : A New Approach to Identifying Locations for LID. n. Lid, p. 11–15, 2019.

KONG, F. et al. Modeling stormwater management at the city district level in response to changes in land use and low impact development. **Environmental Modelling & Software**, v. 95, p. 132–142, 2017.

KOURTIS, I. M.; KOPSIAFTIS, G.; TSIHRINTZIS, V. A. Calibration and validation of SWMM model in two urban catchments in Athens, Greece. **15th International Conference on Environmental Science and Technology**, p. 1–6, 2017.

LAGADEC, L.-R. et al. Description and evaluation of a surface runoff susceptibility mapping method. **Journal of Hydrology**, v. 541, p. 495–509, 2016.

LEE, J. G. et al. A watershed-scale design optimization model for stormwater best management practices. **Environmental Modelling and Software**, v. 37, p. 6–18, 2012.

LI, C. et al. Can stormwater control measures restore altered urban flow regimes at the catchment scale? **Journal of Hydrology**, v. 549, p. 631–653, 1 jun. 2017.

LI, J.; LI, Y.; LI, Y. SWMM-based evaluation of the effect of rain gardens on urbanized areas. **Environmental Earth Sciences**, v. 75, n. 17, p. 14, 2016.

LI, M. et al. Parameter Uncertainty Analysis of SWMM Based on the Method of GLUE. **7th International Conference on Biology, Environment and Chemistry**, v. 98, n. 11, p. 1–6, 2016.

LIU, R. et al. Identifying non-point source critical source areas based on multi-factors at a basin scale with SWAT. **Journal of Hydrology**, v. 533, p. 379–388, 1 fev. 2016a.

LIU, Y. et al. Optimal selection and placement of BMPs and LID practices with a rainfall-runoff model. **Environmental Modelling and Software**, v. 80, p. 281–296, 2016b.

LOPERFIDO, J. V. et al. Effects of distributed and centralized stormwater best management practices and land cover on urban stream hydrology at the catchment scale. **Journal of Hydrology**, v. 519, p. 2584–2595, 27 nov. 2014.

LORENTZ, J. F. et al. Multicriteria analysis applied to landslide susceptibility mapping. **Natural Hazards**, v. 83, n. 1, p. 41–52, 22 ago. 2016.

MALEKPOUR, S. et al. Preparing for disruptions: A diagnostic strategic planning intervention for sustainable development. **Cities**, v. 63, p. 58–69, 1 mar. 2017.

MANFREDA, S. et al. Investigation on the use of geomorphic approaches for the delineation of flood prone areas. **Journal of Hydrology**, v. 517, p. 863–876, 2014.

MARIA, A. C. DE S.; FARIA, T. C. D. A.; STEPHAN, I. I. C. Um retrato da evolução urbana de Viçosa-MG: impactos da federalização da UFV sobre a cidade (1969-2014). **Revista Brasileira de Planejamento e Desenvolvimento**, v. 3, n. 1, p. 37–54, 2014.

MARTIN-MIKLE, C. J. et al. Identifying priority sites for low impact development (LID) in a mixed-use watershed. **Landscape and Urban Planning**, v. 140, p. 29–41, 2015.

MIGUEZ, M. G.; REZENDE, O. M.; VERÓL, A. P. City Growth and Urban Drainage Alternatives: Sustainability Challenge. **Journal of Urban Planning and Development**, v. 141, n. 3, p. 4014026, set. 2015.

MIKOVITS, C. et al. Decision Support for Adaptation Planning of Urban Drainage Systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 143, n. 12, p. 4017069, dez. 2017.

MMA, M. DO M. A. **Catálogo de imagens de satélite Rapideye do Ministério do Meio Ambiente**, 2015. Disponível em: <Geocatalogo.mma.gov.br>

MOMENI, R. et al. Mapping Complex Urban Land Cover from Spaceborne Imagery: The Influence of Spatial Resolution, Spectral Band Set and Classification Approach. **Remote Sensing**, v. 8, n. 2, p. 88, 23 jan. 2016.

PALLA, A.; GNECCO, I.; LA BARBERA, P. Assessing the hydrologic performance of a green roof retrofitting scenario for a small urban catchment. **Water**, v. 10, n. 8, 2018.

PAUS, K.; BRASKERUD, B. Suggestions for Designing and Constructing Bioretention Cells for a Nordic Climate. **Journal of Water Management and Research**, v. 70, n. October 2014, p. 139–150, 2014.

PORTO, R. et al. Drenagem Urbana. In: UFRGS/ABRH (Ed.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2012. p. 943.

PRUSKI, F. F. (ED.). **Conservação de solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica**. 2. ed. Viçosa - MG: Universidade Federal de Viçosa, 2009.

PRUSKI, F. F.; BRANDÃO, V. DOS S.; SILVA, D. D. DA. **Escoamento superficial**. 2. ed. Viçosa - MG: UFV, 2004.

RABORI, A. M.; GHAZAVI, R.; REVESHTY, M. A. Sensitivity analysis of SWMM model parameters for urban runoff estimation in semi-arid area. **Journal of Biodiversity and Environmental Sciences**, v. 10, n. 5, p. 284–294, 2017.

ROSA, D. J.; CLAUSEN, J. C.; DIETZ, M. E. Calibration and Verification of SWMM for Low Impact Development. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 51, n. 3, p. 746–757, 2015.

ROSSMAN, L. A.; EMERITUS, E. S.; EPA, U. S. E. P. A. **Storm Water Management Model User's Manual**. Cincinnati: Office of Research and Development - Water Supply and Water Resources Division, 2015.

RWANGA, S. S.; NDAMBUKI, J. M. Accuracy Assessment of Land Use/Land Cover Classification Using Remote Sensing and GIS. **International Journal of Geosciences**, v. 8, p. 611–622, 2017.

SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. M. Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o método do serviço de conservação do solo dos Estados Unidos Parte 1 : Classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 4, p. 19–29, 2005.

SILVEIRA, A. L. L. Hidrologia urbana no Brasil. In: **Braga B., Tucci CEM y Tozzi M.** 1ª.ed. ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 1998.

SINGH, P.; GUPTA, A.; SINGH, M. Hydrological inferences from watershed analysis for water resource management using remote sensing and GIS techniques. **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences**, v. 17, p. 111–121, 2014.

TUCCI, E. M. Escoamento Superficial. In: UFRGS/ABRH (Ed.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2012. p. 943.

UFV; UFMG; RENOVA, F. **Metodologia de priorização: Definição de critérios de priorização de áreas para recuperação ambiental na bacia do Rio Doce** Produto 3.2 Universidade Federal de Viçosa, , 2018.

UN, Nações Unidas, **Resolution 70/1. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development/RES/70/1** General Assembly 2015a, , 2015.

USDA, S. National Engineering Handbook, Hydrology, Section 4. **United States Department of Agriculture, Soil Conservation Service (Chapters 4–10)**, 1972.

VIÇOSA, M. G. **Lei Nº 1.420 de 21 de Dezembro de 2000 Institui a Lei de Ocupação, Uso do Solo e Zoneamento do Município de Viçosa** Viçosa - MG Prefeitura Municipal de Viçosa, , 2000.

VIÇOSA, M. G. **Lei n 1633/2004 - Dispõe sobre o Código de Obras e Edificações do Município de Viçosa** OViçosa - MG, BrazilPrefeitura Municipal de Viçosa, , 2004.

WANG, M. et al. A framework to support decision making in the selection of sustainable drainage system design alternatives. **Journal of Environmental Management**, v. 201, p. 145–152, 2017a.

WANG, Y. et al. A Diagnostic Decision Support System for BMP Selection in Small Urban Watershed. **Water Resources Management**, v. 31, n. 5, p. 1649–1664, 9 mar. 2017b.

WINSTON, R. J.; DORSEY, J. D.; HUNT, W. F. Quantifying volume reduction and peak flow mitigation for three bioretention cells in clay soils in northeast Ohio. **Science of The Total Environment**, v. 553, p. 83–95, 15 maio 2016.

YANG, J. et al. Hydrologic response of a tropical watershed to urbanization. **Journal of Hydrology**, v. 517, p. 538–546, 2014.

YAO, L.; WEI, W.; CHEN, L. How does imperviousness impact the urban rainfall-runoff process under various storm cases? **Ecological Indicators**, v. 60, p. 893–905, 2016.

YAZDANFAR, Z.; SHARMA, A. Urban drainage system planning and design - Challenges with climate change and urbanization: A review. **Water Science and Technology**, v. 72, n. 2, p. 165–179, 2015.

ZELLNER, M. et al. Exploring the effects of green infrastructure placement on neighborhood-level flooding via spatially explicit simulations. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 59, p. 116–128, 2016.

ZHANGSUI; LIZHE. Simulation of Urban Rainstorm Waterlogging and Pipeline Network Drainage Process Based on SWMM. **IOP Conference Series: Journal of Physics**, v. 1213, p. 52061, 2019.

APÊNDICE A – Áreas ocupadas por técnicas compensatórias em cada sub-bacia

| Áreas ocupadas por técnicas compensatórias em cada sub-bacia (m²) | | | | | | |
|---|---------------------|------------------------|----------------------|----------------------------|------------------|---|
| Sub-bacia | Biorretenção | Jardim de chuva | Telhado verde | Pavimento permeável | Vegetação | Porcentagem total em relação a área da bacia |
| 0 | 954 | 5460 | 0 | 1331 | 2857 | 33% |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4482 | 25% |
| 2 | 0 | 348 | 0 | 350 | 4734 | 28% |
| 3 | 25 | 1585 | 0 | 124 | 7084 | 32% |
| 4 | 0 | 3077 | 0 | 68 | 8140 | 33% |
| 5 | 339 | 3291 | 0 | 25 | 17870 | 51% |
| 6 | 406 | 2528 | 0 | 203 | 16657 | 37% |
| 7 | 574 | 880 | 0 | 685 | 5741 | 26% |
| 8 | 1258 | 1657 | 0 | 1495 | 6776 | 55% |
| 9 | 5465 | 38372 | 0 | 3736 | 308610 | 82% |
| 10 | 1736 | 12150 | 0 | 975 | 49631 | 78% |
| 11 | 26 | 17662 | 0 | 0 | 76173 | 95% |
| 12 | 699 | 3747 | 0 | 507 | 29584 | 55% |
| 13 | 175 | 21258 | 0 | 811 | 55069 | 69% |
| 14 | 375 | 165 | 0 | 1074 | 987 | 17% |
| 15 | 0 | 328 | 0 | 0 | 1282 | 17% |
| 16 | 50 | 1193 | 0 | 170 | 2450 | 20% |
| 17 | 1391 | 2404 | 0 | 1432 | 8141 | 29% |
| 18 | 100 | 1047 | 0 | 150 | 2002 | 19% |
| 19 | 0 | 0 | 0 | 505 | 861 | 21% |
| 20 | 297 | 510 | 0 | 3782 | 626 | 12% |
| 21 | 188 | 212 | 0 | 802 | 0 | 18% |
| 22 | 453 | 1050 | 0 | 0 | 673 | 13% |
| 23 | 2157 | 755 | 0 | 3515 | 3446 | 17% |
| 24 | 50 | 682 | 0 | 263 | 13281 | 17% |
| 25 | 3245 | 6757 | 0 | 525 | 13709 | 41% |
| 26 | 5 | 87 | 0 | 0 | 5328 | 42% |
| 27 | 2152 | 5956 | 0 | 1884 | 35420 | 36% |
| 28 | 0 | 200 | 0 | 120 | 5888 | 39% |
| 29 | 2594 | 2071 | 0 | 975 | 12641 | 83% |
| 30 | 539 | 1679 | 0 | 771 | 9951 | 70% |
| 31 | 0 | 1175 | 0 | 0 | 10426 | 41% |
| 32 | 520 | 2423 | 0 | 755 | 33087 | 81% |
| 33 | 9236 | 19947 | 0 | 2205 | 75839 | 73% |

| Sub-bacia | Biorretenção | Jardim de chuva | Telhado verde | Pavimento permeável | Vegetação | Porcentagem total em relação a área da bacia |
|-----------|--------------|-----------------|---------------|---------------------|-----------|--|
| 34 | 1706 | 4687 | 0 | 6206 | 10734 | 48% |
| 35 | 1076 | 96 | 0 | 1945 | 458 | 20% |
| 36 | 428 | 963 | 0 | 543 | 15231 | 52% |
| 37 | 328 | 1299 | 0 | 281 | 2517 | 16% |
| 38 | 225 | 4039 | 19 | 1989 | 10902 | 25% |
| 39 | 0 | 35 | 0 | 149 | 14438 | 69% |
| 40 | 25 | 2073 | 0 | 375 | 6486 | 31% |
| 41 | 623 | 2787 | 0 | 4142 | 20329 | 55% |
| 42 | 139 | 1787 | 46 | 202 | 8333 | 52% |
| 43 | 208 | 275 | 7770 | 2578 | 630 | 77% |
| 44 | 225 | 2106 | 0 | 606 | 2003 | 50% |
| 45 | 0 | 309 | 0 | 44 | 1607 | 15% |
| 46 | 38 | 7653 | 29 | 118 | 10232 | 39% |
| 47 | 47 | 348 | 8 | 527 | 184 | 10% |
| 48 | 119 | 719 | 327 | 2039 | 604 | 17% |
| 49 | 1140 | 571 | 9017 | 3430 | 194 | 82% |
| 50 | 20 | 4269 | 15284 | 85 | 12958 | 87% |
| 51 | 106 | 970 | 6925 | 976 | 200 | 88% |
| 52 | 50 | 12788 | 86 | 537 | 6616 | 30% |
| 53 | 1464 | 2278 | 36007 | 9017 | 294 | 87% |
| 54 | 1203 | 1020 | 19720 | 3284 | 25 | 84% |
| 55 | 577 | 1445 | 0 | 272 | 919 | 19% |
| 56 | 0 | 50 | 0 | 0 | 3501 | 39% |
| 57 | 0 | 50 | 0 | 0 | 1489 | 18% |
| 58 | 0 | 326 | 0 | 0 | 2067 | 24% |
| 59 | 0 | 778 | 0 | 0 | 3619 | 40% |
| 60 | 0 | 2600 | 0 | 0 | 2656 | 41% |
| 61 | 0 | 144 | 0 | 17 | 1950 | 14% |
| 62 | 866 | 689 | 0 | 300 | 20266 | 71% |
| 63 | 0 | 0 | 0 | 29 | 31 | 1% |
| 64 | 1961 | 2906 | 0 | 955 | 13525 | 33% |
| 65 | 26 | 682 | 94 | 254 | 355 | 7% |
| 66 | 225 | 64 | 2082 | 0 | 252 | 35% |

APÊNDICE B – Resultados da modelagem do SWMM com e sem o uso de técnicas compensatórias

| Sub-bacia | Cenário atual | | | Com técnicas compensatórias | | |
|-----------|------------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------------|--------------------|--------------------------|
| | Total Precipitado (mm) | Total Infiltrado (mm) | Total escoado (mm) | Total Infiltrado (mm) | Total escoado (mm) | Redução do total escoado |
| 0 | 103,80 | 3,59 | 96,78 | 35,25 | 5,12 | 94,71% |
| 1 | 103,80 | 2,97 | 98,09 | 8,21 | 78,23 | 20,25% |
| 2 | 103,80 | 2,92 | 98,08 | 20,31 | 61,32 | 37,48% |
| 3 | 103,80 | 4,07 | 96,10 | 13,02 | 55,26 | 42,50% |
| 4 | 103,80 | 4,77 | 95,21 | 11,08 | 47,52 | 50,09% |
| 5 | 103,80 | 10,32 | 87,49 | 27,99 | 23,91 | 72,67% |
| 6 | 103,80 | 5,57 | 94,14 | 22,81 | 44,37 | 52,87% |
| 7 | 103,80 | 2,54 | 98,53 | 37,23 | 43,91 | 55,43% |
| 8 | 103,80 | 4,54 | 96,60 | 51,79 | 14,78 | 84,70% |
| 9 | 103,80 | 26,64 | 64,89 | 56,91 | 0,27 | 99,58% |
| 10 | 103,80 | 21,47 | 73,07 | 43,85 | 0,28 | 99,62% |
| 11 | 103,80 | 32,65 | 59,29 | 58,15 | 0,00 | 100,00% |
| 12 | 103,80 | 11,87 | 85,60 | 36,69 | 20,50 | 76,05% |
| 13 | 103,80 | 16,11 | 78,22 | 35,91 | 0,22 | 99,72% |
| 14 | 103,80 | 0,59 | 102,06 | 56,46 | 39,24 | 61,55% |
| 15 | 103,80 | 1,58 | 100,46 | 3,64 | 79,64 | 20,72% |
| 16 | 103,80 | 1,73 | 100,07 | 11,07 | 63,64 | 36,40% |
| 17 | 103,80 | 3,35 | 97,04 | 42,36 | 32,24 | 66,78% |
| 18 | 103,80 | 1,43 | 100,50 | 16,07 | 60,58 | 39,72% |
| 19 | 103,80 | 2,97 | 98,27 | 45,18 | 49,45 | 49,68% |
| 20 | 103,80 | 3,81 | 96,19 | 50,24 | 45,59 | 52,60% |
| 21 | 103,80 | 2,96 | 97,96 | 58,34 | 32,22 | 67,11% |
| 22 | 103,80 | 30,42 | 61,31 | 47,72 | 22,66 | 63,04% |
| 23 | 103,80 | 1,70 | 99,67 | 60,68 | 32,80 | 67,09% |
| 24 | 103,80 | 1,71 | 99,83 | 9,35 | 80,31 | 19,55% |
| 25 | 103,80 | 7,03 | 91,98 | 37,65 | 24,65 | 73,20% |
| 26 | 103,80 | 7,06 | 92,45 | 19,98 | 57,30 | 38,02% |
| 27 | 103,80 | 6,71 | 92,33 | 35,88 | 33,27 | 63,97% |
| 28 | 103,80 | 6,73 | 92,77 | 22,97 | 52,14 | 43,80% |
| 29 | 103,80 | 22,48 | 72,61 | 59,91 | 0,47 | 99,35% |
| 30 | 103,80 | 15,85 | 80,73 | 48,04 | 3,02 | 96,26% |
| 31 | 103,80 | 6,74 | 92,72 | 16,84 | 49,35 | 46,78% |
| 32 | 103,80 | 24,51 | 69,96 | 59,16 | 1,23 | 98,24% |
| 33 | 103,80 | 20,38 | 74,35 | 47,91 | 0,39 | 99,48% |

| Sub-bacia | Total Precipitado (mm) | Total Infiltrado (mm) | Total escoado (mm) | Total Infiltrado (mm) | Total escoado (mm) | Redução do total escoado |
|------------------|-------------------------------|------------------------------|---------------------------|------------------------------|---------------------------|---------------------------------|
| 34 | 103,80 | 5,85 | 93,60 | 50,30 | 9,78 | 89,55% |
| 35 | 103,80 | 5,82 | 93,54 | 72,42 | 23,63 | 74,74% |
| 36 | 103,80 | 9,89 | 88,39 | 42,28 | 25,87 | 70,73% |
| 37 | 103,80 | 5,37 | 94,56 | 24,99 | 54,42 | 42,45% |
| 38 | 103,80 | 2,95 | 97,75 | 23,28 | 50,10 | 48,75% |
| 39 | 103,80 | 17,19 | 79,27 | 49,49 | 26,29 | 66,83% |
| 40 | 103,80 | 3,80 | 96,56 | 15,75 | 49,29 | 48,95% |
| 41 | 103,80 | 8,66 | 89,88 | 46,19 | 16,42 | 81,73% |
| 42 | 103,80 | 9,68 | 88,65 | 28,13 | 21,28 | 76,00% |
| 43 | 103,80 | 3,15 | 97,75 | 35,46 | 8,31 | 91,50% |
| 44 | 103,80 | 7,26 | 92,11 | 28,86 | 4,01 | 95,65% |
| 45 | 103,80 | 1,13 | 101,11 | 5,66 | 81,60 | 19,30% |
| 46 | 103,80 | 6,42 | 93,02 | 11,88 | 24,68 | 73,47% |
| 47 | 103,80 | 0,26 | 102,87 | 29,70 | 61,83 | 39,90% |
| 48 | 103,80 | 0,31 | 102,74 | 42,09 | 47,98 | 53,30% |
| 49 | 103,80 | 3,64 | 96,81 | 40,38 | 2,80 | 97,11% |
| 50 | 103,80 | 8,98 | 89,48 | 10,59 | 2,07 | 97,69% |
| 51 | 103,80 | 2,24 | 100,35 | 16,49 | 1,53 | 98,48% |
| 52 | 103,80 | 3,86 | 96,19 | 8,02 | 25,96 | 73,01% |
| 53 | 103,80 | 0,54 | 101,76 | 28,42 | 1,87 | 98,16% |
| 54 | 103,80 | 1,43 | 100,27 | 25,44 | 2,94 | 97,07% |
| 55 | 103,80 | 1,39 | 100,63 | 32,43 | 38,86 | 61,38% |
| 56 | 103,80 | 6,18 | 93,65 | 16,86 | 61,74 | 34,07% |
| 57 | 103,80 | 1,39 | 100,72 | 3,85 | 86,47 | 14,15% |
| 58 | 103,80 | 2,39 | 99,09 | 6,09 | 73,60 | 25,72% |
| 59 | 103,80 | 6,42 | 93,23 | 14,89 | 44,73 | 52,02% |
| 60 | 103,80 | 6,72 | 92,78 | 10,69 | 15,21 | 83,61% |
| 61 | 103,80 | 2,58 | 98,70 | 6,48 | 84,17 | 14,72% |
| 62 | 103,80 | 17,99 | 78,26 | 60,71 | 7,80 | 90,03% |
| 63 | 103,80 | 24,44 | 69,42 | 28,98 | 64,69 | 6,81% |
| 64 | 103,80 | 7,35 | 91,58 | 45,24 | 25,52 | 72,13% |
| 65 | 103,80 | 5,30 | 94,75 | 15,44 | 72,30 | 23,69% |
| 66 | 103,80 | 18,92 | 76,80 | 43,29 | 21,26 | 72,32% |

7 CONCLUSÃO GERAL

A partir da realização deste trabalho pôde-se concluir que:

- A metodologia de diagnóstico do sistema de drenagem se apresentou eficaz para identificar irregularidades e pontos críticos para o sistema de drenagem, mesmo com a escassez de dados.
- A metodologia possibilitou a constituição de uma base de dados georreferenciada que permite a atualização constante dos dados referentes às estruturas do sistema de drenagem, bem com a verificação dos pontos onde intervenções são necessárias.
- A modelagem no SWMM apresentou resultados satisfatórios para fins de identificação dos pontos alagados, que corresponderam aos locais usualmente reportados pelo município.
- A priorização das áreas críticas ao escoamento superficial se apresenta como uma ferramenta que possibilita identificar áreas com maior potencial de adequação, melhorando a alocação de recursos.
- A alocação das técnicas compensatórias mostrou o potencial da adoção de técnicas compensatórias em espaços apropriados de forma integrada à paisagem urbana, otimizando o espaço urbano.
- A alocação das técnicas compensatórias juntamente com a priorização das áreas mais susceptíveis ao escoamento superficial favoreceu a adoção de técnicas compensatórias em áreas de cabeceira, mostrando seu potencial de favorecer a infiltração em áreas adequadas à manutenção de nascentes, e reduzir o acúmulo do escoamento no início da rede, evitando a geração de vários pontos de alagamentos a jusante.
- O emprego de técnicas compensatórias propiciou a redução do impacto causado por alagamentos em áreas urbanas. Apesar da não eliminação total do escoamento superficial, os pontos de alagamento que ainda persistiram tiveram seu volume reduzido.