

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E
SANEAMENTO AMBIENTAL

**AVALIAÇÃO DE TÉCNICAS DE BAIXO IMPACTO NO
CONTROLE DE IMPACTOS HIDROLÓGICOS EM UMA
BACIA URBANA EM CONSOLIDAÇÃO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Franciele Zanandrea

Orientador: Prof. Dr. André Luiz Lopes da Silveira

Porto Alegre, março de 2016.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E
SANEAMENTO AMBIENTAL

**AVALIAÇÃO DE TÉCNICAS DE BAIXO IMPACTO NO
CONTROLE DE IMPACTOS HIDROLÓGICOS EM UMA
BACIA URBANA EM CONSOLIDAÇÃO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Franciele Zanandrea

Orientador: Prof. Dr. André Luiz Lopes da Silveira

Banca Examinadora:

Prof. PhD. Joel Avruch Goldenfum IPH/UFRGS

Prof. Dr. Juan Martin Bravo IPH/UFRGS

Prof^ª. Dr^ª. Rutinéia Tassi DESA/UFSM

Porto Alegre, março de 2016.

“A coisa mais bela que podemos experimentar é o mistério. Essa é a fonte de toda arte e ciência”

“A vida é como andar de bicicleta. Para manter seu equilíbrio você deve continuar em movimento”.

Albert Einstein

*Dedico este trabalho aos meus pais, Terezinha Zanandrea e Ari Antônio Zanandrea,
pela dedicação, amor e força em todos os momentos.*

AGRADECIMENTOS

A Deus e à natureza na “maravilhosa ordem e harmonia de tudo que existe e em sua alma como se revela”.

Aos meus pais, Terezinha Zanandrea e Ari Antônio Zanandrea, pela herança do amor à natureza, ao que é justo, belo e bondoso.

Aos meus irmãos Fabiana, Viviane e Adriano; e aos meus cunhados, Paulo e Maysa, pela força, dicas e discussões sempre enriquecedoras, não só ao trabalho como à vida. Aos meus sobrinhos, Cecília, Joaquin e Clara, pela alegria e pelo amor transmitidos. Obrigada, família!

Ao Professor Dr. André Luiz Lopes da Silveira, meu orientador, pela experiência e pelos ensinamentos repassados, que aumentaram o amor pela hidrologia, além da força e amizade adquiridas nestes dois anos.

À banca, composta pelos professores Dr. Joel Avruch Goldenfum, Dr. Juan Martin Bravo e Dr^a. Rutinéia Tassi, pela aceitação ao convite e pelas sugestões recomendadas.

Aos professores da pós-graduação pelo conhecimento transmitido e pela elucidação de todas as dúvidas ao longo do mestrado, que contribuíram para o encanto pela ciência.

Ao professor Dr. Cristiano Poletto e às colegas Alice e Josele pela disponibilização de dados referentes à área de estudo; bem como ao Gabriel, Gean, Henrique, Jessé, Jones e Luidgi pela participação efetiva nas campanhas de campo.

À comunidade da bacia Mãe d'água pela recepção e pelas conversas que auxiliaram no entendimento da área de estudo.

Aos colegas de pós-graduação pela convivência agradável e pelos momentos de descontração ao longo do mestrado, em especial, ao Benício, Billy, Erick e Gean pelas discussões e contribuições ao trabalho, além da forte amizade.

Ao meu eterno professor Héctor Raul Muñoz Espinosa pelo incentivo e apoio na realização do mestrado na área da hidrologia.

A todos os amigos de Balneário Camboriú e de Caxias do Sul pela amizade, força e alegria, que, mesmo distantes, sempre estiveram presentes.

Aos funcionários do IPH pela prestatividade em auxiliar na resolução das questões cotidianas.

Ao CNPQ pela bolsa de mestrado concedida.

A todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a elaboração deste trabalho.

RESUMO

O crescimento urbano desordenado traz diversas implicações na drenagem das bacias urbanas, principalmente no referente à alterações no escoamento pluvial. Para que seja possível a minimização dessas alterações, devem ser consideradas tanto medidas estruturais quanto não estruturais de drenagem urbana, pois, muitas vezes, mesmo com a implementação de medidas não estruturais, como ferramentas de planejamento, os conceitos de urbanização ainda visam à ocupação densificada, não priorizando conceitos sustentáveis para gestão adequada das cidades, o que torna necessário o uso de medidas estruturais compensatórias. A bacia urbana Mãe d'água, localizada na divisa dos municípios de Porto Alegre e Viamão no Rio Grande do Sul, retrata bem esse problema. Além de sua ocupação se dar por populações de baixa renda em áreas de risco de inundação e escorregamento, em uma tentativa de ordenação da região pelo município, o mesmo permite a densificação urbana por meio do estabelecimento de altas taxas de impermeabilização dos lotes. Baseado nesta realidade, levanta-se a seguinte questão: existem soluções de LID (*Low Impact Development*) compatíveis com a mitigação de impactos hidrológicos em situações de ocupação urbana em consolidação? Para essa busca, foi realizada uma avaliação dos impactos hidrológicos e das características da dinâmica de expansão urbana local. Deste modo, avaliaram-se os efeitos da ocupação urbana no escoamento superficial, estabelecendo medidas de controle viáveis para mitigação de impactos hidrológicos em bacias com alta impermeabilidade. Para isso, foram realizadas simulações de três cenários diferentes de urbanização, sendo eles: o cenário atual, o cenário futuro e o cenário possível. O cenário atual foi representado pelo sistema atual levantado na bacia, sem nenhuma intervenção e com as taxas de permeabilidade atuais. O cenário futuro é representado pela concretização do Plano Diretor atual de Viamão, considerando a taxa de permeabilidade de 10% em toda bacia e sem nenhuma intervenção. Já o cenário possível foi apresentado através da inserção das medidas de LID *Swales* e pavimento permeável e com as taxas de permeabilidade de lote do cenário futuro. As simulações dos cenários foram realizadas por meio do modelo SWMM (*Storm Water Management Model*) para chuvas de projeto com tempo de retorno de 2, 5, 10 e 20 anos. Os resultados demonstram que a tendência atual do processo de urbanização na bacia é a redução da densidade habitacional e o acréscimo da área impermeável, aumentando a quantidade de metros quadrados de área impermeável por habitante. Em relação aos cenários, o que se apresentou mais crítico quanto a problemas de drenagem foi o cenário futuro, visto que a impermeabilização do solo é maior e não existem medidas preventivas ou corretivas para mitigação dos impactos hidrológicos. No cenário possível, mesmo com medidas mitigadoras, ainda existem volumes de inundação em alguns pontos, porém as LID's reduziram o volume escoado na bacia em até 14% para o tempo de retorno de 2 anos. As medidas de LID apresentaram melhor desempenho para chuvas com menores tempos de retorno. O cenário atual foi o que apresentou os menores volumes escoados. A partir dos resultados pode-se observar uma melhor eficiência na redução dos volumes escoados em medidas não estruturais, como a manutenção de taxas de permeabilidade do solo, do que medidas estruturais, como as LID's avaliadas. Porém as LID's auxiliam na redução do escoamento superficial, sendo uma alternativa viável para áreas que já estão consolidadas.

ABSTRACT

The uncontrolled urban growth brings several implications to the drainage of urban basins, mainly in reference to the alterations in the pluvial runoff. To turn possible the minimization of this alteration is necessary to consider both non-structural and structural measures of urban drainage. It is because often, even with implementation of non-structural measures (planning tools), the urbanization concepts still aim the densified occupation of the territory and do not prioritize sustainable concepts to the appropriate management of these cities. Therefore, the use of compensatory structural measures is necessary many times. The Mãe D'água urban basin, located at the border of Porto Alegre and Viamão municipalities, Rio Grande do Sul state, is an example of this problem. In addition to the poor population living in areas at flood and landslide risk in the basin, the municipal government allows the urban densification through the establishment of high rates of impermeabilization of plots. Based on this fact, the following quest is raised: Do structural solutions of LID (Low Impact Development) compatible with the mitigation of hydrological impacts in urban situations of occupation in consolidation? To answer this question, an assessment of the hydrological impacts and characteristics of the local urban expansion dynamics was performed. Thus, the effects of the urban occupation on the surface runoff were evaluated and feasible control measures to mitigate the hydrological impacts in highly impermeabilized basins were established. For this, were carried out simulations with three different urbanization scenarios: (i) the current scenario; (ii) the future scenario; and (iii) the possible scenario. The current scenario was represented by the current system existent in the basin, without any intervention and current permeability rates. The future scenario is represented by the implementation of the actual Plan Director of Viamão municipality, considering the permeability rate of 10% in the whole basin, and without any intervention. The possible scenario was represented through the insertion of LID measures swales and pervious pavement with the plot permeability rates of the future scenario. The simulations of the scenarios were performed using the SWMM (Storm Water Management Model) for project rainfall with return time of 2, 5, 10 and 20 years. The results demonstrate that the current trend of urbanization in the basin is the reduction of the population density and the increasing of the impermeabilized area, resulting in an increasing of impermeabilized area per inhabitant. In relation to the drainage problems in the basin, the more critical scenario was the future scenario, since the impermeabilization of the soil in this case is higher and there are no preventive or corrective measures to mitigate the hydrological impacts. In the possible scenario, even with implementation of mitigation measures, there are still floods in some places, but the LID measures reduced the runoff volume in the basin in up to 14% for a return period of 2 years. The LID measures demonstrated better performances for rainfalls with shorter return periods. The current scenario was the one with the lower surface runoff volumes. From the results, it is possible to observe that the efficiency in the reduction of the surface runoff volumes is better with non-structural measures, such as land use and occupation management, than with structural measures, such as LID measures evaluated. However, the LID measures can help in the reduction of the surface runoff, being a feasible alternative for areas that are already consolidated.

Sumário

RESUMO	6
ABSTRACT	7
Lista de Figuras.....	9
Lista de Tabelas	12
Lista de Siglas e Abreviaturas	13
1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS	17
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1. Águas Urbanas.....	18
3.1.1. Impactos Hidrológicos do Desenvolvimento Urbano.....	19
3.2. Drenagem em Bacias Urbanas em Consolidação	22
3.3. Desenvolvimento de Baixo Impacto no Controle Pluvial.....	24
3.4. Modelos Computacionais - Storm Water Management Model (SWMM).....	32
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	38
4.1. Área de Estudo.....	38
4.2. Estratégia Metodológica.....	40
4.2.1. Caracterização e levantamento da bacia	41
4.2.2. Simulações dos cenários de urbanização	43
4.2.3. Definição, simulação e avaliação das soluções propostas	49
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
5.1. Caracterização e Levantamento da Área de Estudo.....	51
5.1.1. Dinâmica da expansão urbana	51
5.1.2. Caracterização da sub-bacia do Arroio Central.....	55
5.1.3. Definição dos parâmetros do modelo SWMM.....	62
5.2. Calibração e Validação	65
5.2.1. Calibração	65
5.2.2. Validação.....	67
5.3. Simulação de Cenários de Urbanização.....	69
5.3.1. Cenário atual e futuro.....	69
5.3.2. Cenário possível	76
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	85
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88

Lista de Figuras

Figura 3-1. Características das alterações do escoamento de uma área rural para urbana.	20
Figura 3-2. Solo exposto próximo à nascente do corpo d'água da área de estudo. Fonte: (POLETO, 2011).	21
Figura 3-3. Exemplos de infraestruturas de LID/BMP a) jardins de chuva b) vala de infiltração. Fonte: (ROSSMAN, 2008).	30
Figura 3-4. Representação conceitual de um controle de LID - Bacia de Filtração. Fonte: (ROSSMAN, 2008).	36
Figura 3-5. Ajuste dos parâmetros da sub-bacia após a inserção do LID. Fonte: (ROSSMAN, 2008).	36
Figura 4-1. Bacia hidrográfica Mãe D'água na Região Metropolitana de Porto Alegre - RS.	38
Figura 4-2. Sub-bacia do Arroio central da bacia hidrográfica Mãe d'Água.	40
Figura 4-3. Fluxograma metodológico.	41
Figura 4-4. Mapa dos pontos levantados em campo.	42
Figura 4-5. Levantamento das seções transversais em campo com o uso de Estação Total.	43
Figura 4-6. Discretização da sub-bacia do arroio Central Mãe d'água.	46
Figura 4-7. Curva-chave do arroio central próximo a foz. Fonte: SILVEIRA, (2014). .	48
Figura 5-1. Mapa de uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica Mãe d'Água no ano de 2003.	51
Figura 5-2. Mapa de áreas permeáveis e impermeáveis da bacia hidrográfica Mãe d'Água no ano de 2003.	52
Figura 5-3. Mapa de uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica Mãe d'Água no ano de 2014.	52
Figura 5-4. Mapa de áreas permeáveis e impermeáveis da bacia hidrográfica Mãe d'Água no ano de 2014.	53
Figura 5-5. Mapa de uso e ocupação do solo da sub-bacia do Arroio Central no ano de 2014.	56
Figura 5-6. Mapa de áreas permeáveis e impermeáveis da sub-bacia do Arroio Central no ano de 2014.	56

Figura 5-7. Ponte sobre córrego que recebe contribuições de tubulações de drenagem residencial.....	58
Figura 5-8. Moradias em encostas nas margens dos cursos d'água.....	58
Figura 5-9. Acúmulo de resíduos sólidos lançados pelos moradores próximos as nascentes dos rios.	59
Figura 5-10. Perfil Longitudinal do Arroio Central.....	60
Figura 5-11. Gráficos e fotos das seções 01 e 02 levantadas em campo.	60
Figura 5-12. Gráficos e fotos das seções 03, 04 e 05 levantadas em campo.....	61
Figura 5-13. Infraestruturas urbanas.	62
Figura 5-14. Pontos de alagamento relatados por moradores em campo.....	62
Figura 5-15. Hidrograma da calibração dos eventos 01 e 03.	66
Figura 5-16. Hidrograma da calibração dos eventos 04 e 05.	66
Figura 5-17. Hidrograma da calibração do evento 08.....	67
Figura 5-18. Hidrogramas da validação dos eventos 02 e 06.....	68
Figura 5-19. Hidrograma da validação do evento 07.....	68
Figura 5-20. Hidrogramas de tempos de retorno 2, 5, 10 e 20 anos para o trecho 5 do cenário atual.....	70
Figura 5-21. Hidrogramas de tempos de retorno 2, 5, 10 e 20 anos para o trecho 11 do cenário atual.....	70
Figura 5-22. Hidrogramas de tempos de retorno 2, 5, 10 e 20 anos para o trecho 19 do cenário atual.....	71
Figura 5-23. Hidrogramas de tempos de retorno 2, 5, 10 e 20 anos para o trecho 25 do cenário atual.....	71
Figura 5-24. Hidrogramas de tempos de retorno 2, 5, 10 e 20 anos para o trecho 5 do cenário futuro.....	72
Figura 5-25. Hidrogramas de tempos de retorno 2, 5, 10 e 20 anos para o trecho 11 do cenário futuro.....	72
Figura 5-26. Hidrogramas de tempos de retorno 2, 5, 10 e 20 anos para o trecho 19 do cenário futuro.....	73
Figura 5-27. Hidrogramas de tempos de retorno 2, 5, 10 e 20 anos para o trecho 25 do cenário futuro.....	73
Figura 5-28. Volume de extravasamento em cada nó para os tempos de retorno 2, 5, 10 e 20 anos do cenário atual.	74

Figura 5-29. Volume de extravasamento em cada nó para os tempos de retorno 2, 5, 10 e 20 anos do cenário futuro.	75
Figura 5-30. Hidrogramas de tempos de retorno 2, 5, 10 e 20 anos para o trecho 5 do cenário possível.	79
Figura 5-31. Hidrogramas de tempos de retorno 2, 5, 10 e 20 anos para o trecho 11 do cenário possível.	79
Figura 5-32. Hidrogramas de tempos de retorno 2, 5, 10 e 20 anos para o trecho 19 do cenário possível.	80
Figura 5-33. Hidrogramas de tempos de retorno 2, 5, 10 e 20 anos para o trecho 25 do cenário possível.	80
Figura 5-34. Volume de extravasamento em cada nó para os tempos de retorno 2, 5, 10 e 20 anos do cenário possível.	82
Figura 5-35. Volume infiltrado pelas infraestruturas de LID's por sub-bacia.	82
Figura 5-36. Volume armazenado pelas infraestruturas de LID's por sub-bacia.	83
Figura 5-37. Volume extravasado por hectare de área drenada até o Nó para o tempo de retorno de 10 anos.	84

Lista de Tabelas

Tabela 3-1. Exemplos de infraestruturas de LID e algumas especificações sobre estas. Fonte: (Adaptado de SILVEIRA, 2002; TUCCI, 2005; ROSSMAN, 2008).....	28
Tabela 3-2. Especificações técnicas de algumas infraestruturas de LID. Fonte: (Adaptado de SILVEIRA, 2002).	29
Tabela 5-1. Distribuição do uso e cobertura do solo na bacia hidrográfica Mãe d'Água.	53
Tabela 5-2. Número de habitantes, domicílios, taxa de área impermeável/habitante e taxa de área impermeável/domicílio para bacia hidrográfica Mãe d'Água.	54
Tabela 5-3 - Distribuição do uso e cobertura do solo na sub-bacia hidrográfica do Arroio Central em 2014.....	57
Tabela 5-4. Parâmetros do SWMM para cada sub-bacia definida na discretização.....	63
Tabela 5-5. Parâmetros do SWMM para cada trecho do modelo.....	64
Tabela 5-6. Parâmetros utilizados na calibração do modelo e erros calculados.	65
Tabela 5-7. Eventos utilizados na validação e ajuste estatístico.	68
Tabela 5-8. Localização e tamanho das infraestruturas de LID.	77
Tabela 5-9. Parâmetros do SWMM para as infraestruturas de LID.	78
Tabela 5-10. Redução do volume (%) por tempo de retorno e por trecho do cenário futuro para o cenário possível.	81

Lista de Siglas e Abreviaturas

AI – Área Impermeável

APP - Áreas de Preservação Permanente

BMP - Best Management Practices

CN - *Curve Number*

CORSAN - Companhia Riograndense de Saneamento

EPA - *US Environmental Protection Agency*

GPS - *Global Positioning System*

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IPH – Instituto de Pesquisas Hidráulicas

LID - Low Impact Development

MDT – Modelo Digital de Terreno

MNT - Modelo Numérico de Terreno

RMSE - Raiz do Erro Médio Quadrático

SCS - *Soil Conservation Service*

SEHAB - Secretaria Municipal de Habitação de São Paulo

SWMM - Storm Water Management Model

TC – Tempo de Concentração

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

USDoD - *United States Department of Defense*

USEPA - *United States Environmental Protection Agency*

1. INTRODUÇÃO

O crescimento urbano desordenado traz diversas implicações na drenagem das bacias urbanas, principalmente no referente a alterações no escoamento, na morfologia do canal e na qualidade das águas. Estes problemas são gerados principalmente pela forma como a ocupação urbana se desenvolve, muitas vezes sem planejamento, sem controle do uso do solo, com ocupação de áreas de risco de inundações e escorregamentos, e pelo sistema de saneamento inadequado, tanto em termos de projeto como de conceitos.

O aumento da mancha urbana consoante à impermeabilização do solo traz como resultado o desencadeamento de impactos ambientais, principalmente na hidrologia local. O surgimento de centros urbanos sem o devido planejamento põe em risco o balanço hídrico, devido às alterações geradas no ciclo hidrológico natural. Em áreas impermeabilizadas, a água não infiltra, aumentando o escoamento superficial rumo ao sistema de drenagem urbana ou diretamente aos cursos d'água (FRITZEN; BINDA, 2011).

Existem diversos fatores que resultam em alterações no balanço hídrico urbano, entre eles: impermeabilização do solo, remoção da vegetação, alterações morfológicas na topografia, obras de engenharia nos canais fluviais, lançamentos de esgotos e disposição irregular de resíduos sólidos. Alguns estudos levantados por Fritzen e Binda (2011) relatam que esses fatores desencadeiam ou intensificam o assoreamento de rios e lagos urbanos, ampliando a magnitude e a frequência de inundações, a erosão dos solos e dos canais fluviais, além de movimentos de massa e de outros processos que associados resultam em intensa degradação ambiental.

O ciclo hidrológico, em condições naturais, pode ser considerado um sistema em equilíbrio dinâmico. Contudo, o processo de urbanização, pautado na intervenção antrópica sem planejamento, trouxe grandes complicações para a questão de águas urbanas, trazendo consequências graves à população e ao meio. A questão da drenagem urbana tornou-se bastante complexa no atual contexto da demanda ambiental crescente, pois envolve além de aspectos ambientais, aspectos sanitários, paisagísticos, sociais e técnicos (BAPTISTA; NASCIMENTO; BARRAUD, 2005).

As alternativas para minimização desse problema devem considerar medidas institucionais e também estruturais, sendo possível a prevenção em áreas não ocupadas

por meio de um planejamento adequado. Porém, atualmente existem muitos locais de ocupação densificada, resultando em diversos problemas hidrológicos que devem ser mitigados.

De acordo com Tucci (2008), o planejamento urbano acontece prioritariamente apenas para a região ocupada pela população de renda média e alta. Nas áreas de ocupação ilegal, observam-se processos de invasão, com construções frequentemente ocorrendo sobre áreas de risco, como de inundações e de escorregamentos, com mortes durante o período chuvoso. Assim, trata-se do conceito da cidade formal e informal, sendo que a gestão urbana geralmente atinge somente a primeira.

No entanto, muitas vezes, na tentativa de formalização dessas áreas, mesmo com a instituição de ferramentas de planejamento, os conceitos de urbanização ainda visam à ocupação densificada, não priorizando conceitos sustentáveis para a gestão adequada das cidades. Essa linha de pensamento é ainda muito comum em alguns países, incluindo o Brasil.

Os problemas gerados pela gestão inadequada das cidades agravam-se nas regiões urbanas de baixa renda, que possuem sérios problemas sociais, e colaboram para o aumento da vazão de pico e dos volumes de escoamento. Essas regiões ainda contribuem com uma maior quantidade de sedimentos e resíduos sólidos, não havendo nenhum tipo de controle, o que diminui a capacidade de transporte das galerias a jusante (SANTOS et al., 2013).

As regiões urbanas de baixa renda no Brasil se encontram em processo de consolidação. Áreas ou bacias em consolidação são caracterizadas por já se encontrarem fortemente ocupadas e não possuem ainda toda a infraestrutura urbana necessária. Esses locais começam a ser incluídos no planejamento dos municípios, por meio do fornecimento de infraestruturas de saneamento básico, entre outros serviços.

A bacia hidrográfica Mãe d'água, localizada no município de Viamão no Rio Grande do Sul, retrata bem essa realidade e se apresenta como representativa de uma bacia urbana em consolidação do Brasil. Além de sua ocupação ocorrer em áreas de risco por populações de baixa renda, o município permite a impermeabilização urbana por meio do estabelecimento de baixas taxas de permeabilidade dos lotes, em uma tentativa de ordenação da região. Baseado nesta realidade, levanta-se a seguinte questão: existem

soluções de LID (*Low Impact Development*) compatíveis com a mitigação de impactos hidrológicos em situações de ocupação urbana em consolidação?

Pouco se sabe acerca do que fazer em áreas de ocupação em consolidação de baixa renda em situação crítica de problemas ambientais, principalmente de ordem hidrológica, como é o caso da bacia urbana Mãe d'água. Considerando ainda o alto custo das medidas de controle de drenagem quando a ocupação já está em fase avançada (TUCCI, 2000a), devem-se buscar alternativas adequadas e viáveis dentro da realidade socioeconômica.

Para essa busca, é necessária uma avaliação adequada dos diferentes impactos envolvidos e das características da dinâmica de expansão urbana local. Uma ferramenta muito utilizada na avaliação quantitativa destes impactos é o uso de modelos computacionais de drenagem urbana. Assim, avaliaram-se alternativas aplicáveis a uma área com ocupação em consolidação na bacia Mãe d'água, visando ao desenvolvimento sustentável urbano, com o objetivo de melhorar a qualidade de vida da população e a conservação ambiental.

2. OBJETIVOS

Avaliar a aplicabilidade de medidas estruturais de Desenvolvimento de Baixo Impacto (LID) no controle de impactos hidrológicos da expansão urbana em uma bacia urbana em consolidação.

Objetivos específicos

- Estabelecer procedimento misto de campo e documental para levantar problemas referentes à drenagem urbana da bacia em estudo;
- Avaliar quantitativamente a eficácia das diretrizes de ocupação/zoneamento da bacia de estudo;
- Verificar a adequabilidade do uso do modelo SWMM para avaliar quantitativamente a implantação de medidas estruturais de LID (áreas vegetadas-*swales* e pavimento permeáveis) no controle de impactos hidrológicos na bacia de estudo;

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para a busca de soluções apropriadas, é necessária uma análise ambiental urbana que leve em consideração os efeitos e as respostas do ambiente ao processo de urbanização. Para isso, deve-se procurar conhecer a dinâmica da natureza e da sociedade e suas articulações de forma integrada (FUJIMOTO, 2005). A bacia hidrográfica Mãe D'Água já foi objeto de diversos estudos, que contribuem para a compreensão das características ambientais desta área. A contextualização dos processos hidrológicos, bem como da área de estudo, segue exposta.

3.1. Águas Urbanas

Segundo Tucci (2008), as águas no meio urbano englobam o sistema de abastecimento de água, o saneamento de efluentes sanitários, a drenagem pluvial e as inundações ribeirinhas. Estes componentes estão fortemente inter-relacionados, principalmente pela forma como são gerenciados dentro do ambiente urbano.

Devido às influências das intervenções antrópicas, o balanço hídrico se torna mais complexo em áreas urbanas. Normalmente a água utilizada para o abastecimento urbano é importada de fora da área urbana ou mesmo de outra bacia hidrográfica, e depois convertida em águas residuais voltando para as águas superficiais, em quantidades variáveis, o que reflete no balanço. A precipitação que cai sobre as áreas urbanas também está sujeita a interceptação, armazenamento e evapotranspiração, parte se infiltra no solo e o restante é convertido em escoamento superficial, que pode ser encaminhado para sistemas de drenagem naturais ou construído (MARSALEK et al., 2007).

A drenagem urbana envolve a rede de coleta da água, originada das águas pluviais sobre as superfícies urbanas, o seu tratamento e o retorno aos rios. O escoamento das águas pluviais pode produzir inundações nas áreas urbanas devido a dois processos: as inundações de áreas ribeirinhas, que ocorrem naturalmente no leito maior dos rios, e os alagamentos que ocorrem no sistema de drenagem pluvial, retratado pelas águas acumuladas no leito das ruas e nos perímetros urbanos por fortes chuvas (TUCCI, 2008; BRASIL, 2003).

Os alagamentos são fortemente relacionados com a urbanização, devido ao efeito da impermeabilização do solo, da canalização e obstruções do escoamento e da insuficiência

da rede de galerias pluviais (TUCCI, 2008; BRASIL, 2003). O extravasamento e acúmulo das águas, ocasionados por este fenômeno, depende diretamente de uma drenagem deficiente, que dificulta a vazão das águas acumuladas, do que propriamente das precipitações locais (BRASIL, 2003).

Os efeitos da urbanização, da industrialização e do crescimento desordenado da população afetam as paisagens naturais e a resposta hidrológica das bacias hidrográficas, principalmente no que diz respeito aos caminhos preferenciais e às abstrações hidrológicas (MARSALEK et al., 2007), sendo o balanço hídrico natural bastante modificado por essas alterações no meio ambiente.

3.1.1. Impactos Hidrológicos do Desenvolvimento Urbano

O desenvolvimento urbano é responsável por diversas alterações no ambiente. O modo de ocupação das cidades brasileiras tem causado diversos impactos ambientais negativos. De acordo com Tucci e Collischonn (1998), à medida que a cidade se urbaniza, ocorre o aumento das vazões máximas, devido à impermeabilização do solo e à construção da rede de trechos pluviais, aumentando a frequência e a magnitude das inundações. Outros impactos citados pelos autores são o aumento da produção de sedimentos devido à retirada da proteção das superfícies, a produção de resíduos sólidos e a deterioração da qualidade da água, relacionada à lavagem das ruas, ao transporte de material sólido e às ligações clandestinas de esgoto cloacal e pluvial.

O aumento da frequência das inundações se dá não só pelo aumento da vazão, mas também pela redução de capacidade de escoamento causada pelo assoreamento dos condutos e canais (TUCCI; COLLISCHONN, 1998). Alguns causadores de alagamentos, relacionados ao desenvolvimento urbano, são as obstruções do escoamento, causadas por aterros, pontes, drenagens inadequadas com diâmetros que diminuem para jusante e sem esgotamento, a obstrução de rios, canais e condutos pela má disposição dos resíduos sólidos.

Diversos estudos foram realizados no sentido de levantar e quantificar os impactos gerados nos processos de urbanização (TUCCI; COLLISCHONN, 1998; MARSALEK et al., 2007; FRITZEN; BINDA, 2011). Entre estes impactos, destacam-se as consequências da redução da infiltração, que aumenta o volume de escoamento superficial. Na construção de condutos para o esgotamento das águas pluviais, o tempo de deslocamento é reduzido aumentando as velocidades do fluxo, o que aumenta as

vazões máximas e antecipa seus picos no tempo (Figura 3-1). Com a diminuição da infiltração, ocorre também uma redução do nível do lençol freático por falta de recarga, reduzindo o escoamento subterrâneo (TUCCI, 2005).

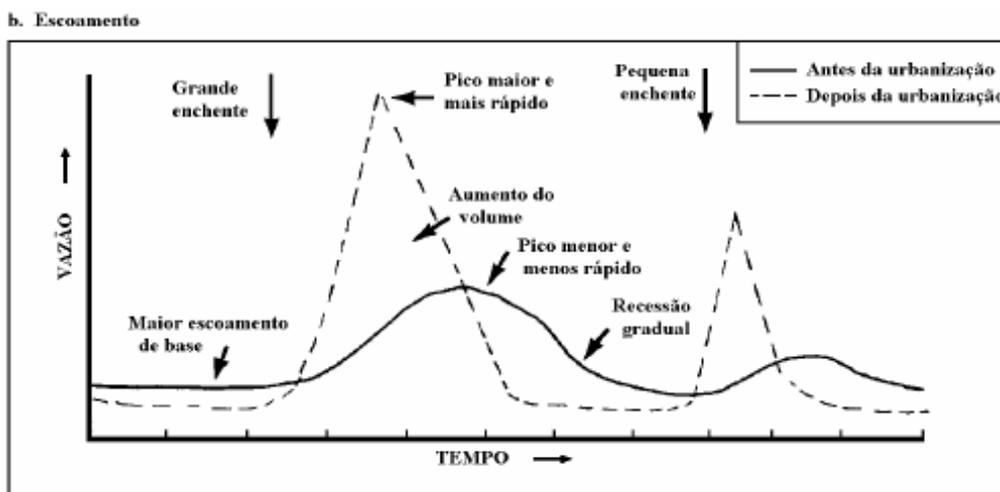


Figura 3-1. Características das alterações do escoamento de uma área rural para urbana.
Fonte: (Adaptado de SCHUELER, 1987 apud TUCCI, 2005).

Silveira (2000) realizou uma avaliação do impacto da urbanização sobre os coeficientes de escoamento para a bacia do Arroio Dilúvio em Porto Alegre, da qual a sub-bacia Mãe d'água faz parte. Essa evolução quantitativa dos escoamentos relacionada à urbanização, segundo Silveira (2000), pode transcender o mero impacto hidrológico quantitativo, pois cargas de poluentes e de sedimentos podem ser associadas a diferentes taxas de urbanização.

Para a sub-bacia Mãe d'Água, Poletto (2011) verificou que, do ano de 2003 para 2005, houve um aumento de 4,6% nas áreas impermeabilizadas, alcançando uma impermeabilização de 42,6% da área total da bacia, o que, de acordo com a literatura (TUCCI, 2000b), já pode ser considerada como uma taxa elevada, ocasionando diversas alterações no regime hidrológico. Foi observada uma redução nas áreas vegetadas, principalmente na nascente e ao longo das margens do curso d'água, o que auxilia no aumento da carga de poluentes e de sedimentos carregados para o corpo d'água.

Em seus levantamentos de campo, Poletto (2011) avaliou o avanço das áreas com solo exposto próximo às nascentes, percebendo que a vegetação natural foi retirada, dando lugar a pastagens. Com o passar do tempo e por se tratar de uma área de grande declividade com uma camada de solo pouco profunda, os processos erosivos ocasionaram

a perda progressiva do solo, o que proporcionou o afloramento de uma camada pedregosa (Figura 3-2).



Figura 3-2. Solo exposto próximo à nascente do corpo d'água da área de estudo.
Fonte: (POLETO, 2011).

O material carregado é formado pelos sedimentos provenientes das vias não pavimentadas e de aterros feitos nas margens erodidas, que geralmente tem baixa coesão (areia e cascalho) e/ou são entulhos da construção civil. Estes são facilmente levados pelas enxurradas para dentro do corpo d'água durante as chuvas, além dos resíduos sólidos urbanos jogados no corpo d'água, aumentando a instabilidade do canal (POLETO, 2011). O autor observou, por meio de batimetria realizada, alterações na morfologia fluvial pelo intenso processo de assoreamento do canal.

Em estudo realizado por Hüffner e Mendes (2013), foram quantificados alguns impactos hidrológicos da bacia Mãe d'Água. Neste trabalho foi determinado um aumento nos valores do coeficiente *Curve Number* (CN) do método SCS e uma diminuição no tempo de concentração (T_c) da bacia do ano de 1972 para 2012, para duas chuvas de projeto com tempo de retorno de 10 e 25 anos. Os valores de CN maiores indicam que ocorreram alterações no uso do solo, diminuindo a capacidade de infiltração.

Outro resultado obtido por Hüffner e Mendes (2013) foi que, no cenário de pré-urbanização, a vazão máxima no exutório da bacia era estimada em $2,23 \text{ m}^3/\text{s}$. Em 1972, este valor passou para $5,28 \text{ m}^3/\text{s}$ e, no ano de 2012, a vazão máxima alcançou o valor de $7,53 \text{ m}^3/\text{s}$. Dessa forma, o impacto hidrológico nesta bacia, ao se analisar os valores de CN e o T_c , foi um aumento mais de duas vezes na vazão máxima em relação à vazão de pré-urbanização.

Estes resultados demonstram que o crescimento urbano na região e o consequente aumento da impermeabilização influenciaram o aumento da vazão de pico ao longo dos anos. Como a bacia está situada em uma região de cabeceira e não há nenhum tipo de estrutura de armazenamento na área, a urbanização desordenada acaba por resultar em inundações a jusante da bacia (HÜFFNER E MENDES, 2013).

3.2. Drenagem em Bacias Urbanas em Consolidação

O rápido crescimento urbano dos países em desenvolvimento tem resultado no aumento dos assentamentos informais. Estas áreas normalmente não são apropriadas para construções devido a fatores físicos e ambientais (PARKINSON; TAYLER; MARK, 2007). A ocupação das encostas com grande declividade agrava o risco de escorregamento e contribui para o aumento do escoamento superficial a jusante. Já a construção de residências nas margens de cursos d'água limita o espaço para extravasamento (SANTOS et al., 2013), contribuindo também para o aumento da erosão e da vazão superficial, devido à retirada da vegetação.

Essa ocupação informal é quase sempre construída sem o consentimento das autoridades, não fazendo parte do planejamento prévio do município, e raramente está em conformidade com os regulamentos e normas de construção (PARKINSON; TAYLER; MARK, 2007). Grande parte das ocupações irregulares no Brasil já se encontram densificadas, porém os problemas concernentes ao seu rápido crescimento permanecem.

As ocupações informais são denominadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística- IBGE como aglomerados subnormais. Os termos favelas, invasões ou ocupações informais são utilizados frequentemente como sinônimos. Segundo a definição do Plano de Habitação Urbana de São Paulo publicado pela SEHAB (2011), favela é definida como:

Ocupação feita à margem da legislação urbanística e edilícia, de áreas públicas ou particulares de terceiros, predominantemente desordenada e com precariedade de infraestrutura, com construções predominantemente autoconstruídas e precárias, por famílias de baixa renda e vulneráveis socialmente.

A falta de planejamento urbano e a regulação do uso do solo podem agravar o problema da drenagem nas grandes cidades, sendo que nas áreas informais o fornecimento da infraestrutura de drenagem é inadequado, muitas vezes, improvisada pela própria comunidade, em condições irregulares.

A política das grandes cidades para as favelas era a de extinção até a década de 1970. A partir de então, ocorreu uma mudança na visão do poder público, chegando aos projetos de urbanização de favelas, a fim de manter a população no local em que está e reintegrando assim a favela à cidade formal. No entanto, muitas vezes, as instituições públicas, ao inserir essas áreas no planejamento urbano, não consideram suas peculiaridades, como a localização em áreas de fragilidade ambiental, e acabam por permitir a alta ocupação dessas regiões.

Com isso, o planejamento urbano, que deveria auxiliar na resolução dos problemas de drenagem, acaba por agravar as condições de escoamento. Este é o caso da exigência de taxas de permeabilidade inadequadas nos planos diretores municipais, que tem por função a regulamentação do uso e ocupação do solo. Porém, a falta de entendimento das autoridades e a pressão imobiliária tornam as ferramentas de regulamentação nocivas ao correto gerenciamento das águas urbanas, exigindo maiores intervenções estruturais nas cidades.

Na elaboração de projetos de drenagem para ocupação consolidadas e em consolidação, devem ser levadas em conta as peculiaridades locais, considerando características geotécnicas e topográficas da área, assim como o desenho do sistema viário. Devem-se avaliar as características físicas do local, como o elevado adensamento, desordenamento espacial, espaços livres exíguos, diversidade de usos dos espaços público e privado, topografia complexa, autoconstrução e improvisado de soluções técnicas para as moradias por parte da população (FURIGO; SILVA, 2004).

É necessária a incorporação destas peculiaridades nos projetos, pois, segundo Furigo e Silva (2004), essas características determinarão a viabilidade dos projetos urbanísticos e de infraestrutura. Deve-se flexibilizar com parcimônia o uso de métodos de concepção convencionais, sendo necessária uma adaptação destes para as áreas de ocupação informal, visto que requererão situações diferentes de funcionamento e de manutenção.

A drenagem deve estar integrada aos projetos de pavimentação e de recomposição ambiental, pois as características destes podem interferir na mesma. Também é possível relacionar áreas de lazer e de uso comum com mecanismos de amortecimento de inundações. Por exemplo, quando existe a dificuldade de obtenção de espaço nas áreas de ocupação em consolidação, se torna importante o uso de soluções integradas para urbanização, onde certos espaços acabam por cumprirem mais de uma função.

As comunidades de baixa renda apresentam não só características urbanísticas diferenciadas, mas também de cunho sociocultural, o que enfatiza o uso de soluções técnicas adaptadas e distintas das convencionais. Conforme Miguez, Mascarenhas e Magalhães (2007), a formação de uma cidade irregular coloca a engenharia, a arquitetura e urbanismo em uma encruzilhada, onde é necessário encontrar soluções para recuperar a cidade informal, proporcionando a infraestrutura necessária. Assim, o planejamento urbano deve buscar estratégias para a reestruturação destes tecidos urbanos comprometidos pelo nível de consolidação das edificações.

3.3. Desenvolvimento de Baixo Impacto no Controle Pluvial

O controle da drenagem urbana pode ser realizado através de medidas estruturais, referentes às intervenções físicas, e não estruturais, de caráter preventivo, como é o caso dos planos diretores, dos planos setoriais de gestão de águas pluviais, da regulamentação do parcelamento do solo e do zoneamento ambiental. Essas medidas de planejamento podem repercutir de forma efetiva sobre o emprego de técnicas de LID na drenagem pluvial, bem como prejudicar a gestão das águas urbanas, se planejados de maneira inadequada.

Os projetos estruturais tradicionais de drenagem têm como princípio o escoamento e o afastamento rápido das águas pluviais para tornar possível o tráfego e o acesso aos lotes, porém esse conceito deve se adaptar à realidade de cada local.

Para alterar a tendência atual e prevenir os impactos causados pela urbanização, é necessário estabelecer princípios de controle de cheias que considerem que o aumento de vazão devido à urbanização não deve ser transferido para jusante. Deve ser priorizada a recuperação da infiltração natural da bacia, considerando a bacia hidrográfica como o domínio físico de avaliação dos impactos resultantes, visto que a água não respeita limites políticos. As medidas de controle para o escoamento pluvial urbano devem possuir dois objetivos básicos: controle do aumento da vazão máxima e melhoria das condições ambientais (IPH, 2005). Esses conceitos devem ser estabelecidos através das medidas não estruturais de planejamento urbano, servindo como subsídio à implantação das medidas estruturais.

Miguez, Mascarenhas e Magalhães (2007) relatam as tendências recentes do conceito de desenvolvimento de baixo impacto através das melhores práticas de gestão (BMP). O

BMP é definido como um conjunto de ações planejadas a serem implementadas na bacia, com o intuito de atenuar os impactos da urbanização, considerando os aspectos quantitativos e qualitativos da água.

O desenvolvimento sustentável vem sendo buscado em diversos temas, incluindo a drenagem urbana. Segundo o Relatório Brundtland, desenvolvimento sustentável é aquele que atenda às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras atenderem também às suas. Este conceito reconhecido pela Organização das Nações Unidas trata das questões relacionadas à sustentabilidade, através da maior integração dos três pilares do desenvolvimento sustentável: econômico, social e ambiental. Este trabalho terá como maior ênfase a sustentabilidade no âmbito ambiental, compatibilizando com as questões sociais, porém não será avaliada a questão econômica.

O conceito de drenagem sustentável estabelece que a concepção dos sistemas tenha o intuito de minimizar os impactos da urbanização sobre os padrões naturais de escoamento, integrando aspectos quantitativos e qualitativos, na busca de objetivos técnicos, sociais, econômicos e políticos, sem transferir custos no espaço e no tempo (MIGUEZ e MAGALHAES, 2010).

Cruz, Souza e Tucci (2007) relatam uma abordagem sustentável para os sistemas de drenagem por meio da minimização das perturbações aos processos naturais e sociais e do ônus a empreendedores e municipalidades para manutenção e ampliação de sua infraestrutura. Desta forma, o grau de integração da drenagem urbana a outras atividades e ao meio serve como parâmetro para identificar seu nível de sustentabilidade.

O conceito apresentado por Cruz, Souza e Tucci (2007) é a estratégia de Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto (LID), que se mostra como um eficiente método para aproximar a drenagem urbana ao desenvolvimento sustentável, considerando que sua implementação pode ser compatível com o sistema existente, além de providenciar melhorias, no caso de reformulações pelo redirecionamento de águas pluviais para seu aproveitamento, infiltração e evaporação, mitigando os impactos provenientes da urbanização desordenada.

Essa estratégia LID apresenta o planejamento de empreendimentos e de espaços urbanos através da conservação de processos hidrológicos e de recursos naturais, além da

prevenção à poluição do solo e das águas. Os elementos-chave para alcançar estes objetivos são (USDoD, 2004):

- Conservação – preservação de vegetação e de solo nativos, minimizando o emprego de áreas impermeáveis e permitindo a manutenção de caminhos naturais de drenagem;
- Projetos locais únicos – elaboração de projetos que respeitem peculiaridades locais naturais e assegurem a proteção de toda a bacia, em detrimento a padronizações;
- Direcionar escoamento para áreas vegetadas – encorajar infiltração e recarga de aquíferos, terras úmidas e riachos, e aproveitamento, controle e tratamento realizados pela natureza;
- Controles distribuídos de pequena escala – empregar técnicas de manejo hídrico o mais próximo possível da fonte de geração do escoamento, de forma integrada ao ambiente, para mimetizar processos hidrológicos naturais;
- Manutenção, prevenção à poluição e educação – trabalhar a educação e o envolvimento público (inclusive de profissionais), objetivando a redução de cargas de poluentes e o aumento da eficiência e da longevidade de sistemas de drenagem, exonerando o poder público.

O controle da geração de escoamento superficial deve ser considerado não apenas para os lotes, mas também para os espaços públicos. É importante tratar o problema na sua origem e de forma sistêmica, com ações distribuídas sobre a paisagem urbana para diminuir e atrasar picos de cheia, além de permitir a recarga das águas subterrâneas, aproximando-se assim às condições do fluxo natural, e de integrar o ambiente urbano (MIGUEZ; MASCARENHAS; MAGALHÃES, 2007).

As infraestruturas de drenagem podem ser divididas em três tipos distintos, segundo a forma de controle de vazões (TUCCI, 2005):

- Técnicas para controle na fonte: definido pelo controle do escoamento no lote, em praças e passeios, como poços de infiltração, como pavimentos permeáveis, microrreservatórios individuais, valas, valetas ou áreas de armazenamento e infiltração, telhados armazenadores, entre outras;

- Técnicas para controle na microdrenagem: controle que age sobre o hidrograma de um ou mais loteamentos, valas e valetas de armazenamento e infiltração, entre outras;
- Técnicas para controle na macrodrenagem: é o controle sobre os principais canais urbanos, como bacias de retenção, detenção ou infiltração.

Existem diferentes tipos de controle de drenagem, uma técnica bastante utilizada são as chamadas infraestruturas verdes. Esta técnica, aplicada em um meio urbano consolidado ou em consolidação, consiste em uma rede multifuncional (drenagem-vegetação), que incorpora a adaptação da infraestrutura existente. De acordo com Herzog e Rosa (2010), as infraestruturas verdes visam manter ou restabelecer os processos naturais, apresentando-se como intervenções de baixo impacto que possuem alto desempenho, pois seus espaços são multifuncionais e flexíveis, podendo exercer diferentes funções ao longo do tempo. Essas infraestruturas contribuem para a atenuação do escoamento superficial e também da poluição carregada pelo escoamento, através da captação de águas pluviais, contribuindo com a filtragem e seu processo natural de retorno ao solo.

A Tabela 3-1 mostra algumas especificações de exemplos de infraestruturas de drenagem comumente usadas como LID. Na Tabela 3-2 seguem algumas especificações técnicas quanto à viabilidade da instalação destas infraestruturas.

Tabela 3-1. Exemplos de infraestruturas de LID e algumas especificações sobre estas. Fonte: (Adaptado de SILVEIRA, 2002; TUCCI, 2005; ROSSMAN, 2008)

Infraestruturas	Característica Principal	Função	Efeito	Considerações
Trincheiras de Infiltração	Reservatório linear escavado no solo preenchido com material poroso	Infiltração no solo e/ou retenção, de forma concentrada e linear, da água da chuva caída em superfície limítrofe	Retardo e/ou redução do escoamento pluvial gerado em área adjacente	Não recomendada para locais com lençol freático próximo à superfície, devido ao risco de contaminação
Jardins de Chuva	São um tipo de sistema de biorretenção	Englobam os processos de retenção e/ou infiltração	Redução do volume de escoamento superficial	Não recomendada para locais com lençol freático próximo à superfície, devido ao risco de contaminação
Pavimentos Permeáveis	Pavimento com camada de base porosa como reservatório	Armazenamento e/ou infiltração temporária da chuva no local do próprio pavimento. Áreas externas ao pavimento podem também contribuir	Retardo e/ou redução do escoamento pluvial gerado pelo pavimento e por eventuais áreas externas	Não pode ser usado em locais com tráfego intenso e/ou de cargas pesadas (TUCCI, 2005)
Micro-reservatório	Reservatório de pequenas dimensões tipo 'caixa d'água' residencial	Armazenamento temporário do esgotamento pluvial de áreas impermeabilizadas as próximas	Retardo e/ou redução do escoamento pluvial de áreas impermeabilizadas	Recomendado somente se houver declividade para escoamento por gravidade até rede convencional
Áreas vegetadas (Swales)	Depressões lineares cobertas com grama e/ou vegetação	Permitir maior tempo para água infiltrar no solo natural abaixo dela	Retardo e/ou redução do escoamento pluvial ROSSMAN, 2008	Não eficiente se a afluência vem com muitos sedimentos

Tabela 3-2. Especificações técnicas de algumas infraestruturas de LID. Fonte: (Adaptado de SILVEIRA, 2002).

Infraestrutura	Viabilidade de acordo com a infiltração (mm/h)	Viabilidade de acordo com a Área de Contribuição (ha)	Viabilidade de acordo com a Declividade
Trincheira de Infiltração	7 - 200	0 - 4	<20%
Jardim de Chuva	2 - 200	0 - 4	<20%
Pavimentos Permeáveis	7 - 200	0 - 8	<10% (HASELBACH; VALAVALA; MONTES, 2006)
Micro-reservatório	-	<1	-
Áreas vegetadas (Swales)	2-200	0-4	<20%

Araujo, Tucci e Goldenfum (2000) concluíram a eficiência dos pavimentos permeáveis na simulação de chuva onde praticamente não ocorreu escoamento superficial comparado aos pavimentos impermeáveis e solos compactados, demonstrando a eficiência desta LID em experimentos físicos em uma região próxima à área de estudo do presente trabalho.

Em relação a profundidade de armazenamento os ensaios realizados por Acioli et al. (2003) mostraram a adequabilidade com relação ao suporte de cargas de veículos leves para espessura de 260 mm, considerada suficiente para o dimensionamento do ponto de vista mecânico dos pavimentos permeáveis.

Os métodos de drenagem devem ainda ser apropriados para as condições locais, como no caso deste estudo, para áreas de expansão urbana em consolidação. As infraestruturas de drenagem LID apresentam-se como alternativa para intervenção em áreas em consolidação, já que se trata de variações do sistema de drenagem urbana, e podem ser conciliadas com o sistema implantado.

Francisco et al. (2014) propuseram algumas diretrizes de intervenção para uma área consolidada em Presidente Prudente/ SP. Entre elas, encontram-se as infraestruturas verdes em um sistema associado de biovaletas e jardins de chuva (Figura 3-3-a). Por não existirem muitos espaços vazios, o sistema foi adotado nas avenidas que possuem canteiros centrais ou vias largas, utilizando como critério a implantação dos jardins de chuva no final ou na lateral das biovaletas, servindo como apoio na captação de um

possível excedente de água desse sistema. Aliado a isso, elegeram-se as vias com linhas de vertentes côncavas para implantação deste sistema, já que elas são concentradoras de fluxo de água.

Através de uma simulação contínua do escoamento urbano antes e depois do estabelecimento de infraestruturas de LID, Lee et al. (2012) avaliaram o efeito da redução de inundações no distrito de AsanTangjung na Coreia do Sul, que possui uma precipitação total anual similar à do Rio Grande do Sul. As instalações de LID utilizadas neste estudo foram trincheira de infiltração (Figura 3-3-b), barril de chuva e áreas vegetadas (*swale*), com suas instalações planejadas de acordo com o uso e as características do solo, e com a configuração das vias, dos parques e dos espaços verdes. Os resultados deste estudo mostraram uma redução de 7 a 15% da vazão de pico de cheia, para 50 e 100 anos de tempo de retorno respectivamente.

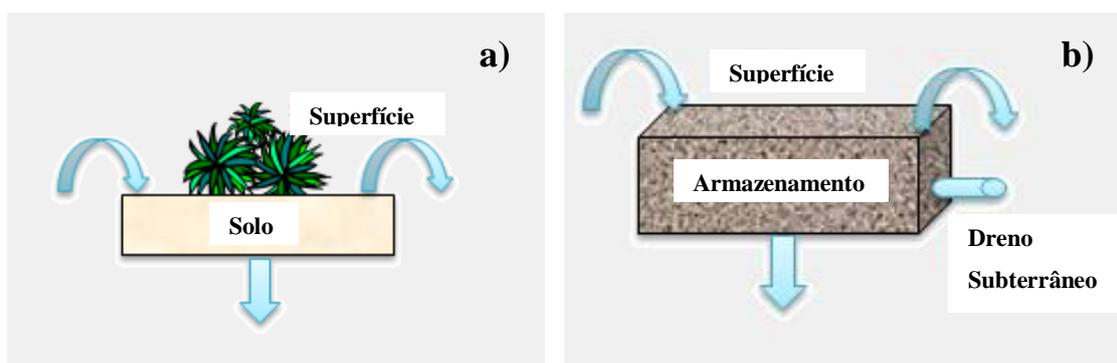


Figura 3-3. Exemplos de infraestruturas de LID/BMP a) jardins de chuva b) vala de infiltração.
Fonte: (ROSSMAN, 2008).

Qin, Li e Fu (2013) também avaliaram o efeito de técnicas de LID sobre inundações urbanas no município de Shenzhen na China, cuja precipitação média anual é de 1.933 mm. As estruturas de LID avaliadas foram áreas vegetadas (*swale*), pavimento permeável e telhado verde, comparando-as com o sistema de drenagem convencional. Uma série de eventos de chuvas, com diferentes totais precipitados, durações e locais de intensidade de pico, foi considerada para a avaliação, em que os efeitos foram medidos pela redução do volume de inundação durante os eventos comparados com a drenagem convencional. Os resultados obtidos indicaram que todos os três cenários LID são mais eficazes na redução de inundação devido a chuvas intensas e de curta duração. Porém o desempenho de cada LID variou significativamente de acordo com a localização do pico de chuva.

Outra adaptação observada em áreas urbanizadas, principalmente favelas, é o escoamento pela parte central da via, entre outros. Santos et al. (2013) apresentaram um estudo de

caso no Rio de Janeiro onde as grandes declividades são aproveitadas para conduzir o escoamento superficial, diferindo das tradicionais galerias coletoras de vazão a montante. A coleta inicial através de canais abertos é direcionada a um pequeno reservatório de retenção, antes de ser lançado na rede de drenagem formal. Para reduzir os volumes de escoamento, o conceito de coleta de águas pluviais também é introduzido no projeto através de pequenos tanques de armazenamento de cerca de 1m³ em cada casa. A operação destes tanques se dá através da ação gravitacional, sendo estes posicionados acima do nível do terreno, porém abaixo do nível dos telhados.

Uma das grandes dificuldades encontradas para implantação dos sistemas de LID está na falta de manutenção, uma vez que os órgãos públicos do setor se encontram defasados, dificultando a necessária manutenção indispensável ao bom funcionamento do sistema. Cada tipo de estrutura de LID possui um tipo de manutenção diferente. A manutenção de algumas dessas infraestruturas pode ter seus custos reduzidos quando integrado ao paisagismo do município (CRUZ; SOUZA; TUCCI, 2007).

Os custos das medidas de controle do escoamento LID aliadas às redes de galerias também se reduzem no tempo. Porém, a ausência de manutenção provoca efeitos imediatos e visíveis na eficiência das medidas, sendo importante a participação da sociedade. Incentivar a sociedade a assumir suas responsabilidades faz parte da sustentabilidade do sistema (POMPÊO, 2000).

Grande parte dos trabalhos citados (FRANCISCO et al., 2014; SANTOS et al., 2013) declaram ainda a importância fundamental das campanhas de conscientização, sendo tão importantes quanto o correto dimensionamento do sistema de drenagem, uma vez que mesmo uma perfeita execução da obra será ineficiente caso o sistema esteja obstruído por resíduos ou contaminados por esgotos lançados pela população.

Existe muita dificuldade na busca de soluções adequadas para áreas consolidadas ou em consolidação, considerando que possuem pouco espaço, não foram planejadas e há falta de infraestrutura. Neste contexto, as medidas devem ser de baixo custo, ser realizada a manutenção e a localização das intervenções deve ser preferencialmente em áreas públicas, além de integrar a participação popular. A região de aplicação deste trabalho possui uma associação de moradores organizada e envolvida com os problemas da bacia, o que demonstra um interesse de aplicação de LID neste local.

3.4. Modelos Computacionais - Storm Water Management Model (SWMM)

Modelos espacializados vêm sendo utilizados para avaliar o efeito integrado de LID's e BMP's em bacias urbanas (BOSLEY, 2008; LEE et al., 2012; JIA, LU, YU e CHEN, 2012; QIN, LI E FU, 2013). De acordo com Bosley (2008) a modelagem hidrológica espacialmente distribuída é o melhor método para comparar a resposta da inserção dos LID's e da drenagem convencional.

Para a utilização de infraestruturas de LID requer-se conhecimento detalhado e avaliação dos efeitos hidrológicos em microescala distribuída, exigindo uma modelagem espacialmente distribuída em um nível maior de detalhe do que é usual em modelagem (BOSLEY, 2008).

Modelos computacionais são muito úteis em diversas situações na gestão das águas pluviais urbanas, sendo utilizados para o detalhamento de projeto e para o planejamento. São utilizados principalmente nos casos em que existe a necessidade de tomada de decisões, como na manutenção corretiva em que é necessário realizar obras complementares, e também quando se deseja simular cenários sobre o comportamento de um sistema de drenagem submetido a determinadas condições (RIGHETTO, 2009).

O objetivo, em um modelo computacional de drenagem urbana, é a representação da precipitação, do escoamento pela superfície do terreno, da interceptação, da infiltração, da evapotranspiração e da interação destes processos com a rede de drenagem de águas pluviais (ROSSMAN, 2008).

É evidente que nenhum modelo representa de forma otimizada todos os processos hidrológicos considerados importantes na avaliação LID. Apenas três modelos, EPA-SWMM, Kineros e HSPF/WWHM, apresentam um modelo distribuído de processos hidrológicos em bacia urbana integrado com LID (BOSLEY, 2008).

Atualmente, o SWMM é o pacote computacional mais utilizado para simulação da drenagem urbana, principalmente por ser de domínio público e ter seu código de programação aberto. O modelo SWMM foi desenvolvido pela USEPA (*United States Environmental Protection Agency*) e, ao longo das últimas décadas, foram incorporados diversos melhoramentos (RIGHETTO, 2009).

Algumas das possibilidades da utilização do SWMM são:

- Dimensionamento do sistema de drenagem urbana para controle de alagamentos;
- Avaliação de uso de sistemas de retenção de cheias e proteção da qualidade das águas;
- Mapeamento de áreas inundáveis a partir do modelo;
- Análise do efeito de medidas compensatórias;
- Efeito qualitativo no sistema devido ao carreamento de poluentes;
- Entradas de esgoto e de outras fontes pontuais externas ao sistema de águas pluviais;
- Redução da concentração de poluentes no tratamento das águas em reservatórios e por meio de processos naturais em galerias e canais;
- Sensibilidade quanto aos componentes do ciclo hidrológico de bacias, como infiltração, evaporação e escoamento superficial.

Este modelo possui nove blocos, sendo quatro de cálculo computacional referentes à transformação chuva-vazão (*Runoff*), ao transporte na rede de drenagem conforme o conceito da onda cinemática (*Transport*), à modelagem hidrodinâmica em condutos e canais (*Extran*), além do referente à qualidade de água, o qual não será abordado neste trabalho.

O SWMM disponibiliza diferentes métodos para modelar a quantidade e a qualidade do escoamento derivado da chuva, por meio de sete processos físicos: escoamento superficial, infiltração, águas subterrâneas, degelo de neve, propagação de fluxo, inundações e alagamentos na superfície do terreno e comportamento e evolução da qualidade da água.

A visão conceitual do escoamento superficial trata cada sub-bacia como um reservatório não-linear, em que as contribuições são provenientes dos diferentes tipos de precipitação e da sub-bacia situada a montante. Existem diversos fluxos de saída, como a evaporação, o escoamento superficial e a infiltração. Esta última pode ser calculada através de três modelos: a Equação de Horton, o Método de Green-Ampt e o Método do SCS, à escolha do usuário (ROSSMAN, 2008).

O processo de transformação chuva-vazão, no bloco *Runoff*, é representado pela combinação das equações de continuidade e de Manning:

$$\frac{dh}{dt} = i_{ef} - \frac{W}{A.n} (h - d_p)^{\frac{5}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

sendo A área da superfície da bacia, S declividade da bacia, i_{ef} a precipitação efetiva, n o coeficiente de Manning, d_p a altura correspondente ao armazenamento por depressão, h a profundidade da água no reservatório, t o tempo e W a largura representativa. Em que esta equação diferencial não linear deve ser resolvida para um valor desconhecido de h , obtido através do processo iterativo de Newton-Raphson.

Vale destacar que a largura provoca efeitos de armazenamento e de forma sobre o hidrograma (BERTONI, 1998). Uma estimativa deste parâmetro pode ser feita através da relação entre a área e o valor médio dos comprimentos máximos de escoamento superficial (ROSSMAN, 2008).

Qin, Li e Fu (2013) obtiveram bons resultados na validação do modelo SWMM, utilizando a equação de Horton para infiltração, apresentando uma boa representação dos processos de chuva-vazão em sua área de estudo, alcançando um RMSE (Raiz do Erro Médio Quadrático) de 0,084 m³/s, o que demonstra uma pequena diferença entre o valor estimado e o valor real dos dados.

O transporte de água em um trecho está regido pelas equações de conservação de massa e da quantidade de movimento. O SWMM permite a escolha do nível de sofisticação para a resolução dessas equações, através dos seguintes modelos hidráulicos: Fluxo em Regime Uniforme, Modelo da Onda Cinemática e Modelo da Onda Dinâmica. O Fluxo em Regime Uniforme e o Modelo da Onda Cinemática resolvem as equações de Saint Venant de maneira simplificada, enquanto o Modelo da Onda Dinâmica (hidrodinâmico) resolve as equações de Saint Venant completas unidimensionais, gerando resultados mais precisos. Esse modelo pode levar em conta o armazenamento nos trechos, o ressalto hidráulico, as perdas nas entradas e saídas dos trechos, o remanso e o fluxo pressurizado (ROSSMAN, 2008).

No bloco “*Extran*”, utiliza-se um sistema de nós interligados para a discretização física do sistema de drenagem, e a solução matemática por diferenças finitas para as equações completas de Saint Venant para fluxo não permanente gradualmente variado, conforme Equação 2:

$$\frac{dQ}{dt} + gAS_f - 2V \frac{dA}{dt} - V^2 \frac{dA}{dx} + gA \frac{dH}{dx} = 0 \quad (2)$$

onde Q é a vazão, V velocidade, A área molhada da seção transversal, H a carga hidráulica, t tempo, g aceleração da gravidade e S_f a declividade da linha de atrito.

A declividade da linha de atrito é definida pela equação de Manning:

$$S_f = \frac{k}{gAR^{\frac{4}{3}}} Q|V| \quad (3)$$

sendo $k=g.n^2$, n o coeficiente de Manning, g a aceleração da gravidade e R o raio hidráulico.

Substituindo na equação 2 e expressando em forma de diferenças finitas tem-se:

$$Q_{t+\Delta t} = Q_t - \frac{k\Delta t}{R^{\frac{4}{3}}} |V_t| Q_{t+\Delta t} + 2V \left(\frac{\Delta A}{\Delta t} \right)_t \Delta t + V^2 \left[\frac{(A_2 - A_1)}{L} \right] \Delta t - gA \left[\frac{(H_2 - H_1)}{L} \right] \Delta t \quad (4)$$

onde Δt é o intervalo de tempo e L o comprimento do trecho.

O intervalo de cálculo não deve superar o tempo de viagem que uma onda dinâmica precisa para percorrer o menor trecho do sistema, sendo a estabilidade numérica dada pela condição de Courant (BERTONI, 1998).

O SWMM simula os controles de LID através de sua representação pela combinação de camadas verticais cujas propriedades são definidas por unidades de área. Durante essa simulação, o modelo realiza o balanço hídrico, determinando o que escoar de uma camada para outra e o que é armazenado em uma camada (Figura 3-4). Os dispositivos de LID são projetados para subtrair parte do escoamento superficial por meio de processos combinados de retenção, infiltração e evapotranspiração. Esses dispositivos são inseridos nas sub-bacias do modelo, e suas quantidades são definidas pelo usuário (ROSSMAN, 2008).

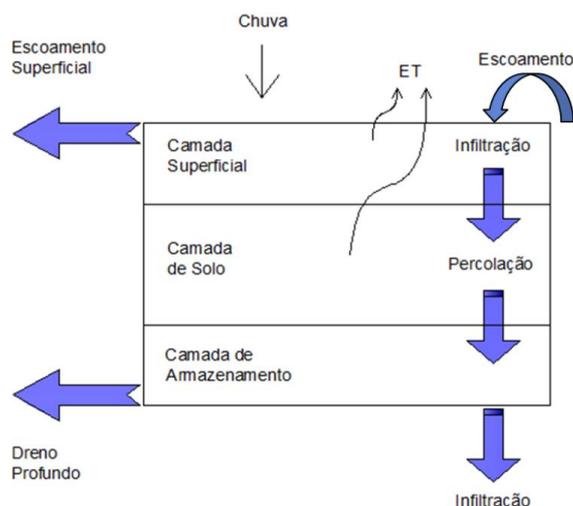


Figura 3-4. Representação conceitual de um controle de LID - Bacia de Filtração. Fonte: (ROSSMAN, 2008).

O SWMM permite simular oito dispositivos, sendo eles: células de biorretenção, trincheiras de infiltração, pavimentos permeáveis, cisternas, valas de infiltração sem drenos, telhado verde, áreas vegetadas (*swale*) e jardins de chuva. Após a inserção das infraestruturas de LID na sub-bacia, é necessário o ajuste das propriedades referentes ao percentual de áreas impermeáveis e à largura do escoamento (Figura 3-5).

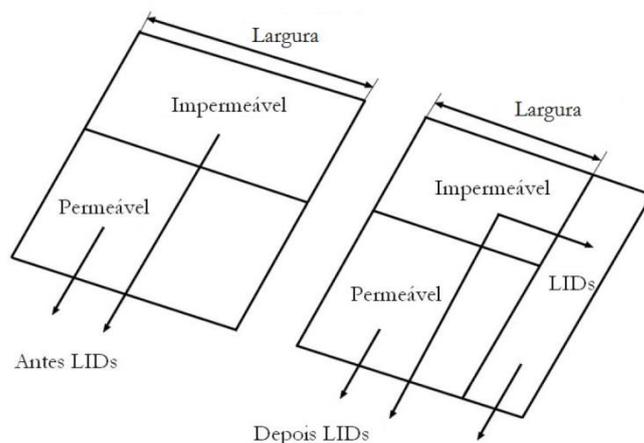


Figura 3-5. Ajuste dos parâmetros da sub-bacia após a inserção do LID. Fonte: (ROSSMAN, 2008).

A inserção de infraestruturas de LID's no modelo SWMM para avaliação do efeito na redução do escoamento superficial e na melhoria da qualidade da água foi estudo de diversas pesquisas recentemente fora do Brasil (BOSLEY, 2008; LEE et al., 2012; JIA, LU, YU e CHEN, 2012; QIN, LI e FU, 2013; ROSA, CLAUSEN e DIETZ, 2015).

Esta revisão bibliográfica apresentou os principais temas referentes ao trabalho proposto, que serviram como base para a discussão dos resultados apresentados. Este capítulo

levantou também alguns estudos já realizados para a área de estudo, a bacia hidrográfica Mãe d'água, com temas alusivos a esta pesquisa.

O presente estudo se diferenciou dos demais já realizados por propor um conjunto de soluções de drenagem urbana sustentáveis para os impactos, principalmente hidrológicos, já levantados. Relacionando com a dinâmica da expansão urbana da região, onde se buscou uma abordagem aplicada a bacias de ocupação urbana em consolidação, com problemas de urbanização, muito comuns no Brasil e ainda pouco estudadas.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Área de Estudo

A área de estudo compreende a sub-bacia hidrográfica da Mãe D'Água, localizada na Região Metropolitana de Porto Alegre, no estado do Rio Grande do Sul, entre os municípios de Porto Alegre e Viamão, como pode ser observado na Figura 4-1. Esta área constitui uma das nascentes da bacia do Arroio Dilúvio, que corta grande parte do perímetro urbano do município de Porto Alegre.



Figura 4-1. Bacia hidrográfica Mãe D'água na Região Metropolitana de Porto Alegre - RS.

Essa bacia é composta por quatro afluentes principais, possui uma área de aproximadamente 3,34 km², e tem uma estimativa de 18.246 habitantes e 5.907 domicílios de acordo com o Censo de 2010 (IBGE, 2010). O exutório da bacia é a barragem Mãe D'água, situada no Campus do Vale da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. As altitudes variam de 290 metros nos altos do morro Santana a 40 metros nas regiões mais baixas.

A bacia possui topografia levemente ondulada, cuja formação geológica é composta por granito. A área encontra-se na região de clima subtropical úmido, de acordo com a classificação de Köppen, com temperatura média anual entre 14 e 20°C, e precipitação total anual variando de 1200 a 2000 mm bem distribuídos ao longo do ano (POLETO; MERTEN, 2007).

O tipo de solo predominante na área da bacia é arenoargiloso, tipo Podzólico vermelho-amarelo de substrato granodiorito e gnaiss, formado por solos minerais rasos com muito material de rocha em decomposição, ocorrendo em encostas de alto declive associado a afloramentos rochosos (RANGEL, 2008). Solos argilosos e em regiões de alta declividade favorecem o aumento do volume e da velocidade do escoamento superficial, sendo potencializado neste local pelas altas precipitações que ocorrem na região.

O processo de urbanização na área da bacia remonta à década de 1950, com a formação dos primeiros loteamentos, acentuando-se a partir dos anos 1970, sendo a região habitada por pessoas que não tinham condições de ocupar os lotes urbanizados na cidade. A ocupação da área ocorreu de maneira desordenada, onde o traçado das vias não seguiu nenhum tipo de planejamento. A ocupação ocorreu inclusive em áreas de risco, como nas encostas do morro Santana e às margens dos cursos de água, desmatando a vegetação natural (HÜFFNER e MENDES, 2013), o que potencializa os problemas de inundações e alagamentos na bacia.

Os bairros contidos na bacia não apresentam sistemas públicos de drenagem urbana e saneamento, não havendo rede coletora nas vias locais. A renda média dos responsáveis pelos domicílios na bacia é de aproximadamente R\$997,00 segundo o censo 2010 (IBGE, 2010).

A área pertence ao perímetro urbano de Viamão, localizado na Macrozona Urbana de Consolidação, segundo o Plano Diretor do município, em uma tentativa de formalização desta região. Neste Plano foram identificadas ocupações irregulares em áreas de risco e em áreas de preservação permanente – APP nesta Macrozona, além da degradação de arroios. A taxa de permeabilidade exigida por lote nesta Macrozona é de 10% do terreno, definido como o percentual expresso pela relação entre a área do lote sem pavimentação impermeável e sem construção no subsolo e a área total do terreno (VIAMÃO, 2013), o que permite a impermeabilização da bacia.

Para uma simulação com maior detalhe, optou-se por realizar a modelagem apenas para a sub-bacia referente ao arroio Central, que segue apresentada na Figura 4-2. Essa sub-bacia possui 0,91 km², e foi escolhida por apresentar a maior concentração de problemas quanto à ocupação urbana e um crescimento em direção às nascentes. Essa sub-bacia apresenta as mesmas características descritas da bacia Mãe d'água em que está contida.



Figura 4-2. Sub-bacia do Arroio central da bacia hidrográfica Mãe d'Água.

4.2. Estratégia Metodológica

O procedimento metodológico foi organizado em quatro etapas distintas e interdependentes, como é demonstrado na Figura 4-3 através de um fluxograma metodológico. Cada etapa será detalhada na sequência, contendo as informações sobre os procedimentos e os seus objetivos.



Figura 4-3. Fluxograma metodológico.

4.2.1. Caracterização e levantamento da bacia

Inicialmente foram levantados os dados sobre a área de estudo por meio de pesquisa bibliográfica, o que permitiu uma caracterização da bacia hidrográfica em questão. Constaram ainda, nesta fase do levantamento, a obtenção de dados de chuva, vazão e características físicas da bacia.

Para delimitação da bacia, sub-bacias e cursos d'água, foi utilizado o modelo numérico de terreno (MNT) criado a partir das curvas de níveis e pontos cotados de Porto Alegre na escala 1:1.000, disponível no site do Laboratório de Geoprocessamento do Centro de Ecologia da UFRGS (HASENACK et al., 2010). A rede hidrográfica foi corrigida de acordo com a imagem de alta resolução e com as saídas de campo, devido a alterações antrópicas existentes nos cursos d'água.

Para a averiguação do uso do solo, foi realizada uma interpretação visual das imagens de satélite de alta resolução, e assim definidas as classes de uso e cobertura do solo. As imagens utilizadas foram obtidas do satélite Quickbird para os anos de 2003 e 2014, previamente georreferenciadas e possuem resolução de 0,5 metros, permitindo analisar a ocupação do solo na bacia hidrográfica Mãe d'Água nesse período.

A classificação manual das imagens foi realizado no software ArcGIS® 10.1, no qual foi criado um mapa de uso do solo com as seguintes classes: campos, edificações, grama, corpos d'água, vegetação, solo exposto, vias pavimentadas e vias não pavimentadas. Posteriormente essa classificação foi separada em área permeável e impermeável.

Para entender a dinâmica da expansão urbana da área calculou-se a população da bacia contabilizando o número de habitantes e domicílios dos setores censitários dos censos do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) de 2000 e 2010 que se encontravam dentro dos limites da mesma. Com estes dados de população e domicílios da bacia e também os já disponíveis para o município de Viamão se realizou uma projeção para os anos de 2003 e 2014, através do método de tendência de crescimento demográfico (IBGE, 2007). Escolheram-se estes dois anos para avaliar e comparar com as imagens

disponíveis. Após, estabeleceu-se uma relação de área impermeável da bacia por habitante e por domicílio.

A caracterização do sistema de drenagem existente foi adquirida junto a CORSAN, empresa responsável pela gestão das águas pluviais no município de Viamão. Visto a falta de informações completas de dados por órgãos públicos, foram realizados também levantamentos em campo para averiguação e georreferenciamento das infraestruturas de drenagem urbana encontradas.

Neste levantamento determinou-se o comprimento e a largura ou diâmetro de pontes e canalizações. Também foi realizado um detalhamento de 5 seções transversais do curso d'água principal, tendo sua localização definida com base nas mudanças da morfologia do canal. As medições ocorreram nas seções 1 a 5, conforme indicado na Figura 4-4. O levantamento topográfico foi realizado com o uso do equipamento Estação Total, marca TOPCON, coeficiente angular de 10 segundos, modelo CTS3000 (Figura 4-5). Este levantamento foi georreferenciado utilizando um GPS (*Global Positioning System*).

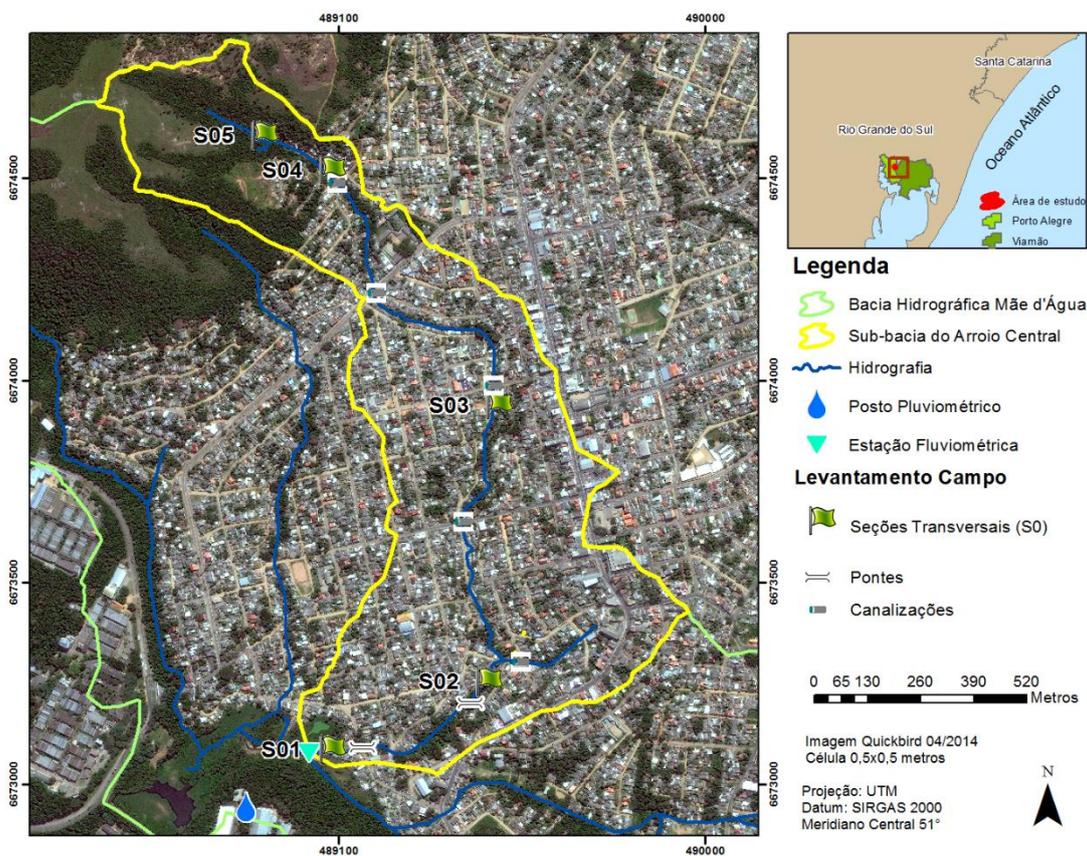


Figura 4-4. Mapa dos pontos levantados em campo.



Figura 4-5. Levantamento das seções transversais em campo com o uso de Estação Total.

Através de diálogo com os moradores foram levantados em campo os pontos onde ocorreram as principais modificações realizadas pela população no leito do rio, além dos principais pontos de alagamento.

4.2.2. Simulações dos cenários de urbanização

Neste trabalho, as simulações hidrológicas e hidráulicas foram realizadas através do modelo SWMM (*Storm Water Management Model*).

Para simulação hidrológica chuva-vazão utilizou-se dados de precipitação, área das sub-bacias, largura característica da sub-bacia, coeficiente de rugosidade de Manning, declividade da sub-bacia, altura do armazenamento em depressões e parâmetros de infiltração.

O manual do modelo SWMM sugere que as larguras das sub-bacias sejam calibradas (ROSSMAN, 2008). Uma estimativa inicial para este parâmetro foi através da largura do retângulo equivalente, que relaciona o perímetro e a área da bacia.

Para isso calculou-se a largura do retângulo equivalente através da equação 5 e 6, que utiliza apenas características físicas:

$$L_e = \frac{K_c \sqrt{A}}{1,12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_c} \right)^2} \right] \quad (5)$$

$$K_c = 0,282 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (6)$$

onde L_e é a largura equivalente (m); A é a área da sub-bacia (m^2); e K_c é o coeficiente de compacidade (adimensional), definido pela relação entre o perímetro da bacia (P) em metros e a circunferência de um círculo de área igual à da bacia (A);

Foram utilizadas 4 chuvas de projeto na simulação dos cenários, com tempos de retorno de 2, 5, 10 e 20 anos, estimadas a partir da relação Intensidade-Duração-Frequência –IDF (Equação7) estabelecida para o posto pluviométrico localizado próximo a bacia, nas áreas adjacentes ao IPH/UFRGS (GOLDENFUM et al., 1990).

$$i = \frac{509,859 * T^{0,196}}{(t + 10)^{0,72}} \quad (7)$$

onde, i = intensidade da chuva (mm/h); T = tempo de retorno (anos); t = tempo de duração da chuva (min).

A duração da precipitação adotada foi estimada através de um teste realizado com hietogramas de projeto de duração de 1, 3, 5, 6 e 10 horas, com tempo de retorno de 20 anos. A intensidade média de cada um destes hietogramas foi testada como uma chuva constante no modelo calibrado. Com isso, calculou-se o tempo da curva S, ou seja, o tempo desde o início da chuva até a estabilização da vazão. Então definiu-se o tempo de duração mais apropriado para bacia quando o tempo de duração do hietograma fosse aproximadamente igual ao tempo da curva S representativo de todas as durações.

Encontrou-se assim o valor de 5 horas, que foi utilizado como a duração de todas as chuvas de projeto, permitindo que toda a precipitação contribuísse no hidrograma do exutório da bacia. A discretização temporal foi de 5 minutos, sendo desagregada pelo método dos blocos alternados, onde o pico está localizado na metade da precipitação.

O modelo de infiltração utilizado neste trabalho foi a equação de infiltração de Horton, a qual vem sendo demonstrada como preferência na literatura no uso do SWMM (LEE et al., 2012; QIN, LI e FU, 2013). Os parâmetros utilizados para estimar a capacidade de

infiltração (I) pela equação de Horton são a taxa de infiltração máxima (I_o), a taxa de infiltração mínima (I_b) e a constante de decaimento (k) ao longo do tempo (t).

$$I = I_b + (I_o - I_b) * e^{(-kt)} \quad (8)$$

O algoritmo de infiltração do SWMM usa também um parâmetro que é o tempo necessário para secar totalmente um solo completamente saturado (t_s). A estimativa desses parâmetros de infiltração foram feitas com base na literatura (TERSTRIEP e STALL, 1974; AKAN, 1993; ROSSMAN, 2008).

Como dados de entrada de evapotranspiração exigidos pelo modelo foram utilizados valores médios de evapotranspiração real mensal para o município de Porto Alegre estabelecidos por Mota et al. (1970).

Para uma modelagem com uma melhor representatividade dos processos hidrológicos e hidráulicos faz-se necessária a discretização da bacia. Para isso foram consideradas as variações da topografia, as linhas de fluxo e a homogeneidade das características urbanas e de uso e ocupação do solo. Na Figura 4-6 estão apresentadas as 26 sub-bacias discretizadas, os 26 nós definidos como as junções que ligam os trechos e que recebem a contribuição das sub-bacias, e os 26 trechos de drenagem.

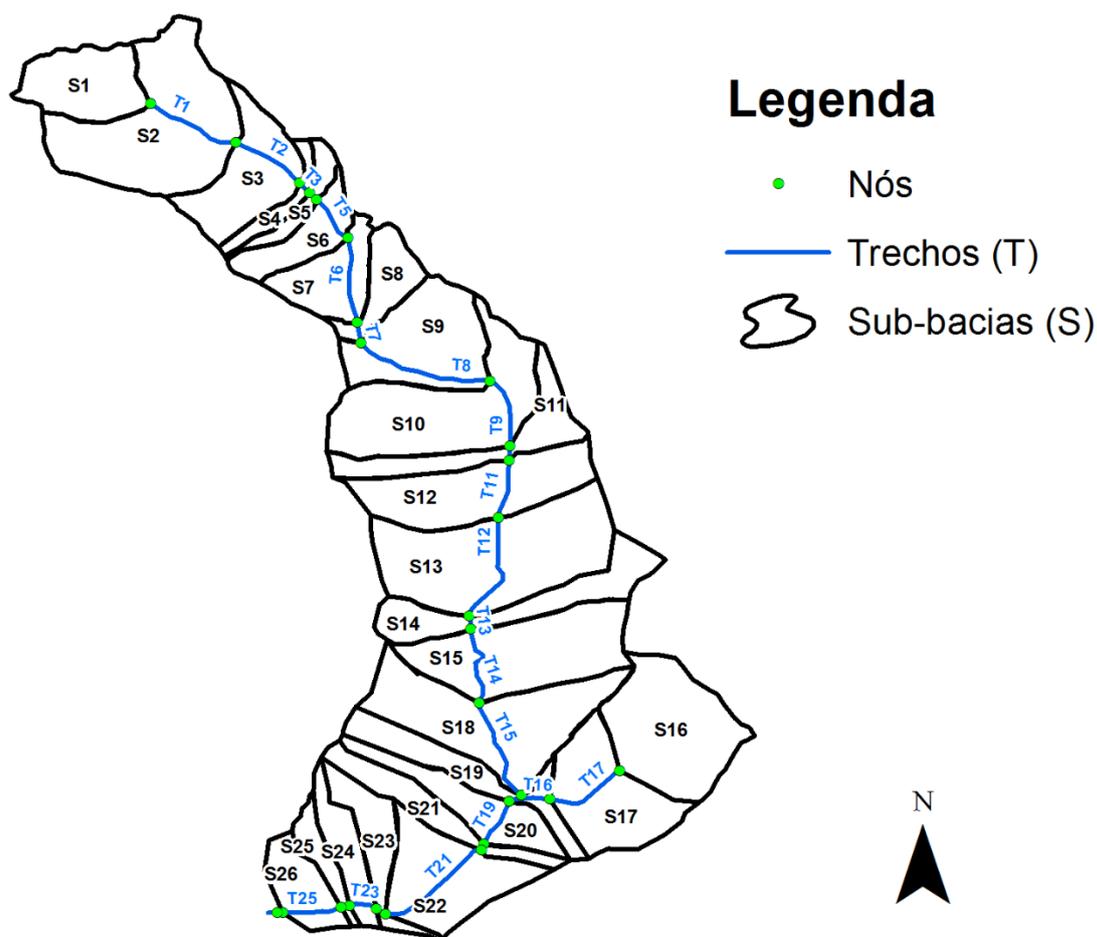


Figura 4-6. Discretização da sub-bacia do arroio Central Mãe d'água.

As ferramentas de geoprocessamento trazem grandes facilidades de entrada de dados e representação geométrica dos sistemas de drenagem para os modelos de drenagem urbana. Dados referentes à discretização da bacia, à declividade, às áreas de contribuição e perímetros das sub-bacias foram calculados através da manipulação de imagens e de vetores com o uso do software de sistema de informações geográficas ArcGIS®.

A altura do armazenamento em depressões e o coeficiente de rugosidade foram definidos de acordo com faixas de valores sugeridas na literatura (AKAN, 1993; ROSSMAN, 2008), observadas as características de campo.

Os parâmetros necessários para caracterização dos condutos e canais naturais são: o comprimento, a declividade, a rugosidade, a seção transversal e o *offset* de saída. O comprimento e a declividade foram calculados a partir de geoprocessamento. O restante dos dados foi levantado em campo, sendo que o coeficiente de rugosidade foi definido de acordo com faixas de valores sugeridas no Manual do SWMM, observadas as características de campo.

Para estimar a vazão de base, foi calculada a vazão específica da bacia através da média das vazões observadas em um período sem chuva. De posse desse valor, foram calculadas as vazões de base para cada nó e trecho, multiplicando a vazão específica da bacia pela área de contribuição referente a cada nó.

Os nós, definidos como as junções que ligam os trechos e que recebem a contribuição das sub-bacias, são representados pelos encontros entre canais, locais de mudança de seção ou início e fim de canalização e pontes. As cotas e coordenadas destes nós foram obtidas de acordo com mapa planialtimétrico e levantamento em campo.

As simulações foram realizadas para três cenários diferentes de urbanização, sendo eles: o cenário atual, o cenário futuro e o cenário possível. O cenário atual é representado pelo sistema atual de acordo com o que foi levantado na bacia, sem nenhuma intervenção e com as taxas de permeabilidade atuais. O cenário futuro é representado pela concretização do Plano Diretor atual de Viamão (VIAMÃO, 2013), considerando a taxa de permeabilidade de 10% dos lotes e pavimentação de todas as ruas em toda bacia e sem nenhuma intervenção. Já o cenário possível é apresentado através da inserção das intervenções propostas, sendo elas pavimento permeável e áreas vegetadas (*swale*) considerando o Plano Diretor vigente. Foram escolhidas estas infraestruturas considerando as características urbanísticas da área de estudo, como a falta de espaço para estruturas de manejo pluvial, população de baixa renda e áreas públicas ainda disponíveis.

Na simulação atual pode ser verificado se o sistema existente garante o adequado escoamento das águas pluviais. Os resultados obtidos para os cenários simulados permitiram uma evolução comparativa, verificando os efeitos obtidos com as medidas propostas.

Calibração e Validação

Os dados de chuva utilizados na calibração e validação são provenientes de uma estação pluviométrica localizada no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS (Figura 4-4), próxima a estação da IDF. Esta é a estação mais próxima à área de estudo, com uma série de 5 anos, de dezembro de 2003 a abril de 2008, com dados de 15 em 15 minutos.

Para calibração, foram utilizados 5 eventos de dados de cota medidos próximos à foz do arroio central antes da confluência, referentes ao ano de 2005 (Figura 4-4), o qual possui

a curva-chave apresentada na Figura 4-7. Cada evento foi utilizado independentemente para ajustar os parâmetros da calibração.

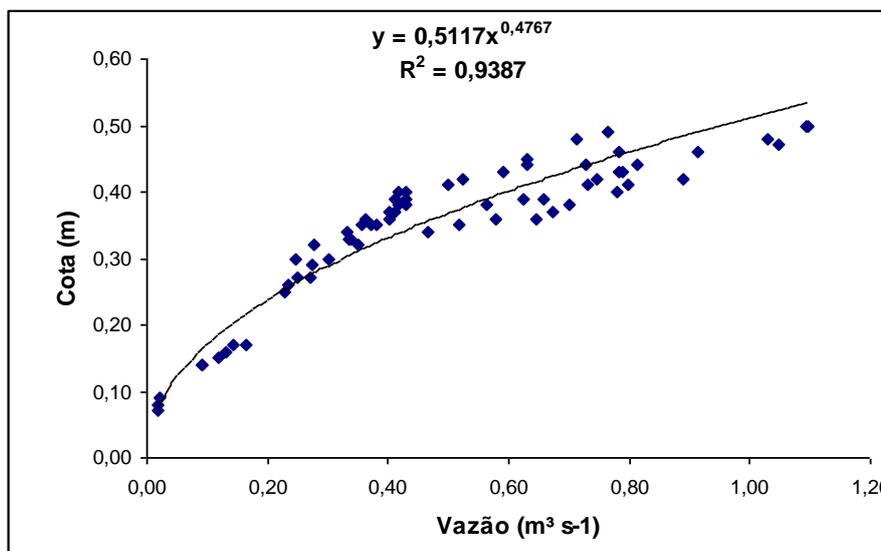


Figura 4-7. Curva-chave do arroio central próximo a foz. Fonte: SILVEIRA, (2014).

Buscou-se a calibração dos parâmetros dos quais havia mais incertezas quanto aos seus valores. Assim, o modelo foi calibrado com os seguintes parâmetros: largura do escoamento, coeficiente de rugosidade de Manning e parâmetros de infiltração. No estudo realizado por Rosa, Clausen e Dietz (2015), o modelo SWMM demonstrou maior sensibilidade aos parâmetros de infiltração, principalmente pelo déficit de umidade do solo inicial, e pelo coeficiente de Manning tanto para bacias sem infraestruturas de LID como para bacias com inserções destas infraestruturas.

Para avaliar o ajuste dos hidrogramas na calibração do modelo, optou-se pela Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs}(i) - Q_{cal}(i))^2}{n}} \quad (9)$$

onde Q_{obs} é a vazão observada no final do intervalo de tempo i (m^3/s); Q_{cal} é a vazão calculada no final do intervalo de tempo i (m^3/s); e n é o número de intervalos de tempo do evento analisado. Este parâmetro procura avaliar a qualidade do ajuste, sendo mais sensível aos erros nas vazões máximas (TUCCI, 1998).

Também se optou pelo erro dos volumes (ΔV) através da relação entre os volumes calculados e observados:

$$\Delta V(\%) = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{obs}(i) - \sum_{i=1}^n Q_{cal}(i)}{\sum_{i=1}^n Q_{obs}(i)} * 100 \quad (10)$$

O erro dos volumes é complementar e avalia o desvio geral do volume total calculado em relação ao observado (TUCCI, 1998).

A validação do modelo avaliou a eficiência do SWMM em simular hidrogramas reais para a bacia de estudo. Para validação, foram selecionados 3 eventos da série de vazões, excluídos da calibração. Utilizou-se a mediana dos valores dos parâmetros definidos durante a calibração, pois se demonstrou mais adequada que a média.

4.2.3. Definição, simulação e avaliação das soluções propostas

Cada tipo de infraestrutura de LID-BMP tem características técnicas e econômicas intrínsecas, além de limitações. Para definição das soluções aplicáveis à bacia de estudo, considerou-se o tipo de solo, o nível do lençol freático, a topografia do terreno, bem como requisitos de espaço, áreas públicas livres, de acordo com os critérios estabelecidos por Jia et al. (2013). Com isso, foram identificados os locais em campo onde estas intervenções são pertinentes e, através de simulações, foi avaliada a eficiência hidrológica das mesmas.

A versão atual do SWMM 5.1.77 fornece um módulo de controle de LID e pode simular explicitamente o desempenho hidrológico dessas técnicas. No modelo, os controles de LID são representados por uma combinação de camadas verticais, cujas propriedades, tais como a largura, a depressão de armazenamento, a infiltração, entre outras, são definidas por unidades de área. Esses controles foram colocados dentro de sub-bacias selecionadas na quantidade definida.

Através da simulação da inserção das estruturas de LID (áreas vegetadas “*swale*” e pavimento permeável), foi possível avaliar a sua influência sobre o hidrograma resultante.

Foi estabelecida uma vazão meta para balizar o desempenho dos cenários. Esta vazão meta foi definida como a vazão da calha cheia e espelhou uma situação livre de enchente para a capacidade máxima de escoamento da calha menor dos córregos. A vazão máxima gerada pelos três cenários foi comparada com a vazão de calha cheia definida para também verificar o desempenho dos cenários.

Para a avaliação dos cenários foi utilizado de estatística simples, comparando a magnitude dos eventos simulados. Foi realizada uma comparação dos volumes gerados para cada cenário.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Caracterização e Levantamento da Área de Estudo

5.1.1. Dinâmica da expansão urbana

Os mapas de uso do solo gerados para a bacia hidrográfica Mãe d'Água para os anos de 2003 e 2014 seguem expostos na Figura 5-1 e Figura 5-3 respectivamente. Apresentam-se também na Figura 5-2 e Figura 5-4 a classificação das áreas permeáveis e impermeáveis. A distribuição de cada classe segue na Tabela 5-1.

Vale destacar que em 2003, quando foi realizada a classificação, a bacia já se encontrava fortemente urbanizada, baseada no fato da larga abrangência da classe edificações, que já ocupava 39,9% da área da bacia.

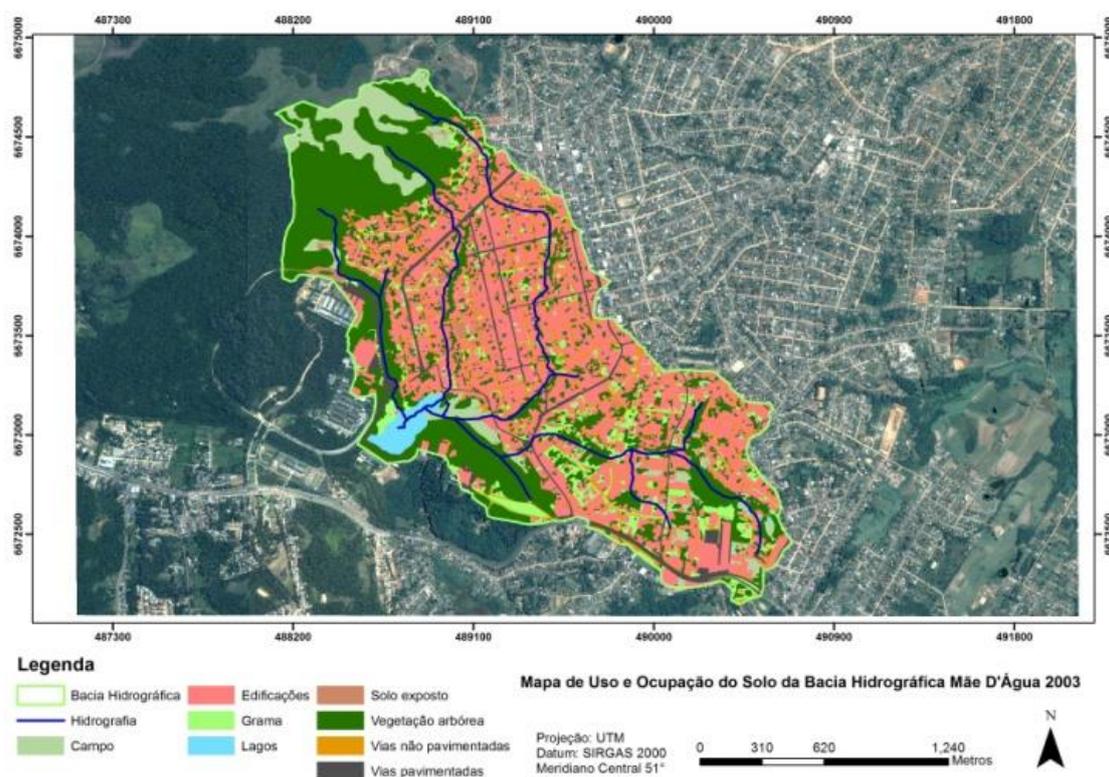


Figura 5-1. Mapa de uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica Mãe d'Água no ano de 2003.

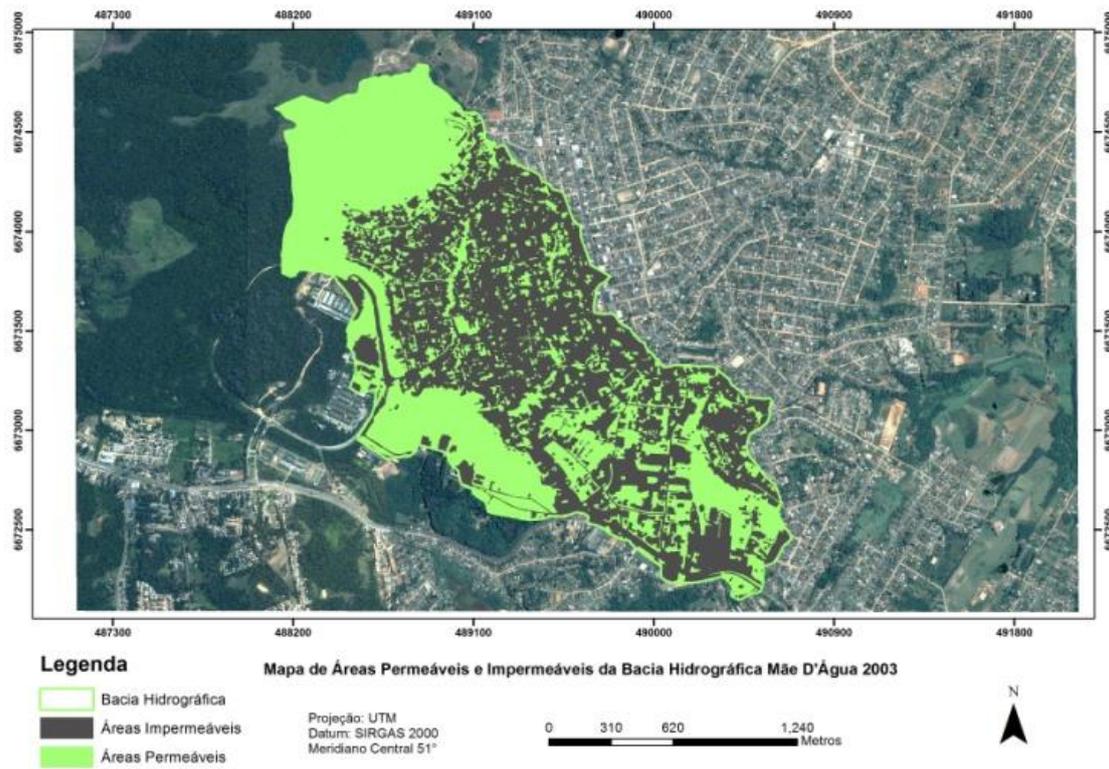


Figura 5-2. Mapa de áreas permeáveis e impermeáveis da bacia hidrográfica Mãe d'Água no ano de 2003.



Figura 5-3. Mapa de uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica Mãe d'Água no ano de 2014.

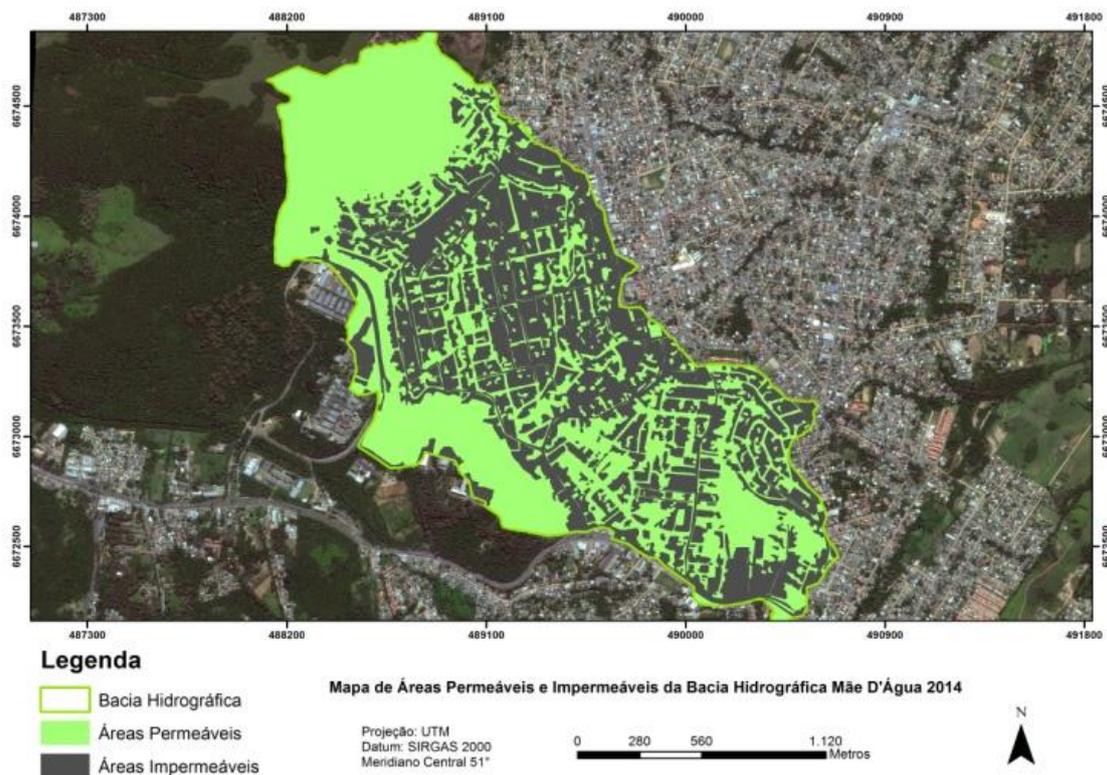


Figura 5-4. Mapa de áreas permeáveis e impermeáveis da bacia hidrográfica Mãe d'Água no ano de 2014.

Tabela 5-1. Distribuição do uso e cobertura do solo na bacia hidrográfica Mãe d'Água.

Classes	2003		2014	
	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²)	Área (%)
Campo	0,22	6,6	0,14	4,2
Vegetação	1,14	34,1	1,16	34,7
Solo exposto	0,04	1,2	0,01	0,3
Edificações	1,3	38,9	1,43	42,8
Vias pavimentadas	0,16	4,8	0,25	7,5
Vias não pavimentadas	0,19	5,7	0,13	3,9
Gramados	0,24	7,2	0,16	4,8
Lagos	0,05	1,5	0,06	1,8
Total	3,34	100	3,34	100

As áreas edificadas representam a classe predominante da bacia com 42,8% em 2014, ressaltando seu caráter urbano e demonstrando um crescimento de 3,9% em relação a 2003. Outra característica representante da urbanização da região é o aumento das vias pavimentadas em 2,7% e consequente diminuição das áreas não pavimentadas.

As áreas de campo tiveram uma redução de 2,4% de 2003 para 2014, dando lugar provavelmente a vegetação, que apresentou crescimento em relação a 2003. Essa hipótese baseia-se no fato de as áreas de campo localizarem-se nos topos do morro Santana, onde

não há urbanização e também a localização de uma antiga mineração nesta região, atualmente desativada (FUJIMOTO, 2002), demonstrando a recuperação natural do ambiente.

Em 2003 a bacia possuía um total de 1,46 km² de área impermeabilizada, totalizando 43,7% da bacia, já em 2014 esse valor passou para 1,68 km², o que corresponde a 50,3% de toda a bacia Mãe d'Água.

A bacia Mãe d'água possui uma densidade habitacional de aproximadamente 53 hab./ha, com uma área impermeabilizada de aproximadamente 50%. Isto representa maiores índices quando comparadas as relações entre área impermeável e densidade habitacional estabelecidas a partir de dados de Porto Alegre, Curitiba e São Paulo por Campana e Tucci (1994), onde 50 hab./ha representou 23,3% de área impermeável. Essa diferença é explicada possivelmente pelo fato do tipo de ocupação peculiar da área de estudo, representada por uma urbanização em consolidação, informal com ocupação em áreas de alta declividade.

Os valores das projeções do número de habitantes e domicílios para os anos de 2003 e 2014, bem como a taxa de área impermeável por habitante e por domicílio para a bacia hidrográfica Mãe d'Água apresentam-se na Tabela 5-2.

Tabela 5-2. Número de habitantes, domicílios, taxa de área impermeável/habitante e taxa de área impermeável/domicílio para bacia hidrográfica Mãe d'Água.

Ano	Número de Habitantes	Número de Domicílios	Taxa de área impermeável/habitante (m²/hab.)	Taxa de área impermeável/domicílio (m²/dom.)
2000	19.734	5.762	-	-
2003	19.296*	5.804*	75,66	251,55
2010	18.246	5.907	-	-
2014	17.629*	5.970*	95,30	281,41

* – projeção

A projeção do número de habitantes da bacia apresentou redução de 9,5% de 2003 para 2014, enquanto os dados do número de habitantes do município de Viamão apresentaram um aumento de 2000 para 2010, segundo o Censo do IBGE de 2010. Tanto na bacia como no município o número de domicílios aumentou de acordo com o Censo de 2010. As áreas impermeáveis da bacia aumentaram em 6,6%, o que demonstra um aumento de 19,64 m² de área impermeabilizada por um habitante e 29,86 m² por domicílio.

Esses resultados demonstram que a tendência atual do processo de urbanização é a redução da densidade habitacional e o aumento da área impermeável, aumentando a quantidade de metros quadrados de área impermeável por habitante, como já retratado por Menezes Filho & Tucci (2012).

A bacia vem sofrendo um processo de emigração, provavelmente devido à falta de infraestrutura urbana, como saneamento básico, porém a urbanização e a impermeabilização do solo aumentam, potencializando o problema.

Nota-se que mesmo com a redução da população ocorre um aumento das áreas impermeáveis na bacia, devido ao aumento do número de domicílios, e a diminuição do número de habitantes por domicílio. Segundo o Censo do IBGE a densidade habitacional para uma mesma área impermeável no município de Viamão era 3,4 hab./domicílio em 2000 e passou para 3,1 hab./domicílio em 2010.

Isso reflete a mudança do perfil demográfico brasileiro das últimas 2 décadas, principalmente em áreas urbanas em consolidação, de baixa renda, onde a dinâmica de crescimento é diferenciada da expansão ordenada.

O arranjo espacial da paisagem, expresso pelos mapas de uso e cobertura do solo, é decorrente das ações naturais e antrópicas sobre a bacia. Em que a dinâmica da paisagem envolve a evolução espacial da ocupação ao longo do tempo.

5.1.2. Caracterização da sub-bacia do Arroio Central

Essa região é caracterizada por possuir alta degradação de arroios; ocupações irregulares em áreas de risco, áreas de preservação permanente – APPs, áreas verdes e áreas públicas; com alta densidade populacional e parcelamento fragmentado, sem integração viária.

O mapa de uso do solo referente à sub-bacia do Arroio Central para o ano de 2014 segue exposto na Figura 5-5. A classificação das áreas permeáveis e impermeáveis está apresentada na Figura 5-6. A distribuição de cada classe para a sub-bacia do Arroio Central encontra-se na Tabela 5-3, juntamente com o percentual das ocupações na sub-bacia.

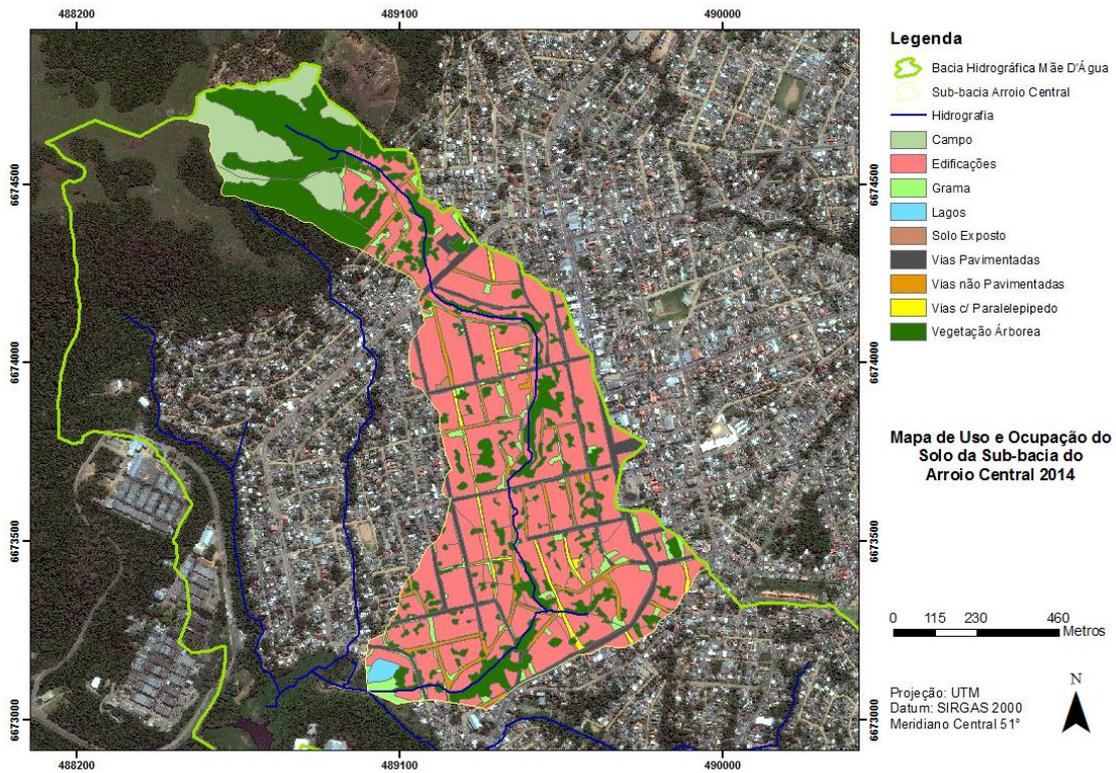


Figura 5-5. Mapa de uso e ocupação do solo da sub-bacia do Arroio Central no ano de 2014.

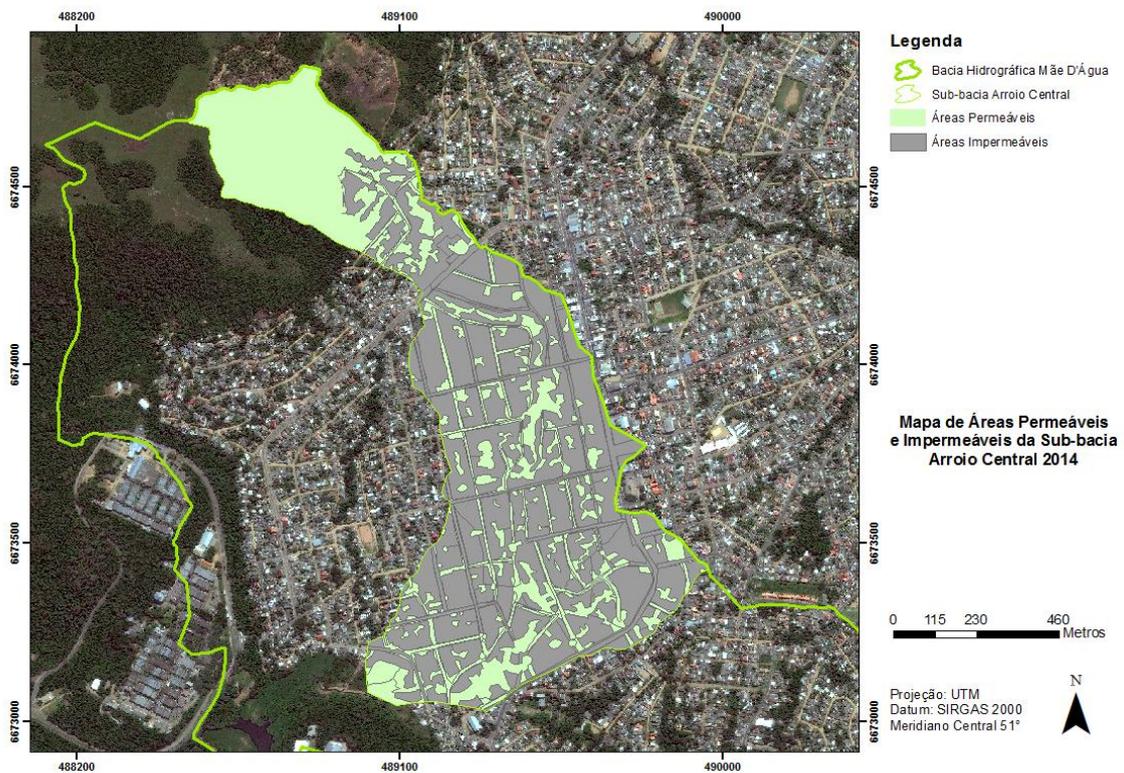


Figura 5-6. Mapa de áreas permeáveis e impermeáveis da sub-bacia do Arroio Central no ano de 2014.

Tabela 5-3 - Distribuição do uso e cobertura do solo na sub-bacia hidrográfica do Arroio Central em 2014.

Sub-bacia Arroio Central		
Classes	Área (km²)	Área (%)
Campo	0,06	6,6
Vegetação	0,23	25,3
Solo exposto	0,001	0,1
Edificações	0,47	51,6
Vias pavimentadas	0,07	7,7
Vias não pavimentadas	0,04	4,4
Gramados	0,035	3,8
Corpos d'água	0,004	0,4
Total	0,91	100

As áreas edificadas representam a classe predominante da sub-bacia do arroio Central, com em torno de 51% da área total, ressaltando seu caráter urbano. Observou-se um crescimento da urbanização na direção das nascentes em áreas de maior declividade no arroio central da bacia, como constatado por Poletto & Merten (2007).

A bacia Central possui aproximadamente 60% de sua área impermeabilizada. O aumento das áreas impermeabilizadas traz como consequência o aumento do volume escoado superficialmente, efeito perceptível nos hidrogramas, onde para a mesma chuva, a vazão de pico é maior (TUCCI, 2005). Este fato foi considerado no dimensionamento de infraestruturas de drenagem, para que as mesmas não sejam subestimadas.

Na primeira visita a campo, observou-se que parte do curso d'água foi parcialmente canalizado, em alguns locais, pelos próprios moradores. Existem alguns tubos de drenagem pluvial e esgoto doméstico que deságuam nos córregos (Figura 5-7). As situações de risco existentes têm como causa cortes e aterros mal executados nas áreas mais íngremes próximas as nascentes do arroio central, bem como a ocupação nas margens do rio (Figura 5-8). Também ocorre o lançamento de esgoto doméstico e resíduos sólidos nos canais de drenagem (Figura 5-9).



Figura 5-7. Ponte sobre córrego que recebe contribuições de tubulações de drenagem residencial.



Figura 5-8. Moradias em encostas nas margens dos cursos d'água.



Figura 5-9. Acúmulo de resíduos sólidos lançados pelos moradores próximos as nascentes dos rios.

O perfil longitudinal do arroio central, extraído do MDT, está apresentado na Figura 5-10, com as declividades dos trechos. Existem muitas casas nas áreas íngremes próximas a nascentes, nos primeiros 100 metros de distância horizontal, onde se encontram as maiores altitudes.

Na segunda visita a campo foram levantadas 5 seções transversais do curso d'água principal, como pode ser observado na Figura 5-11 e na Figura 5-12. A localização das seções estão apresentadas no perfil da na Figura 5-10.

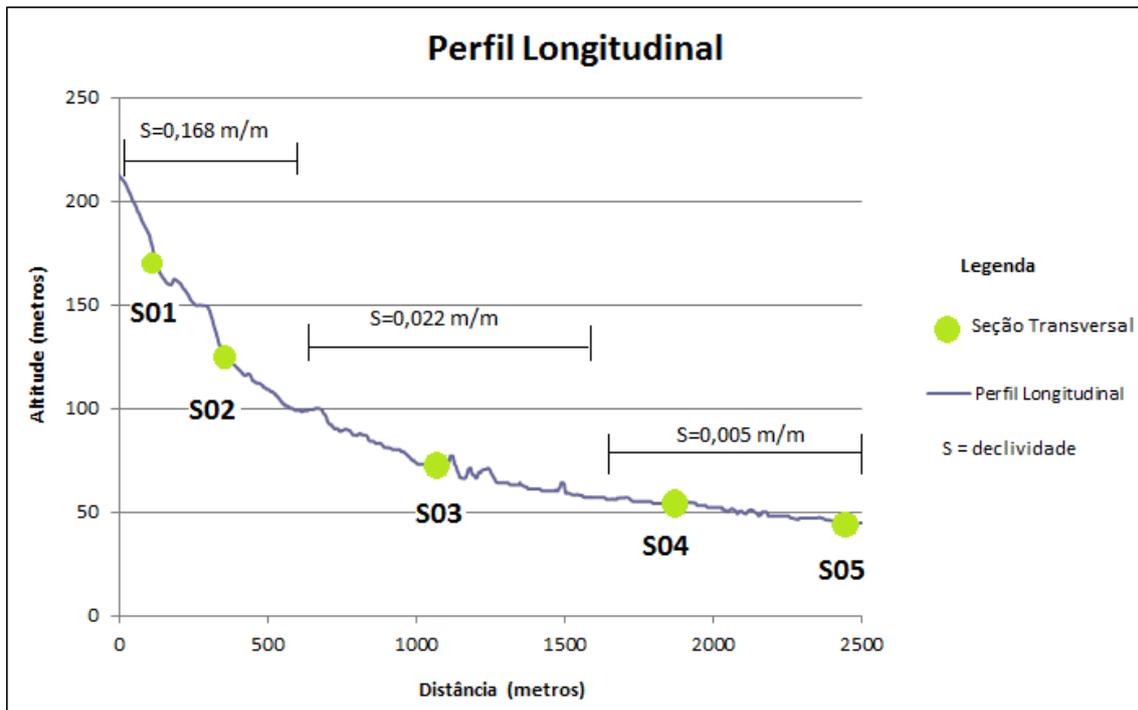


Figura 5-10. Perfil Longitudinal do Arroio Central.

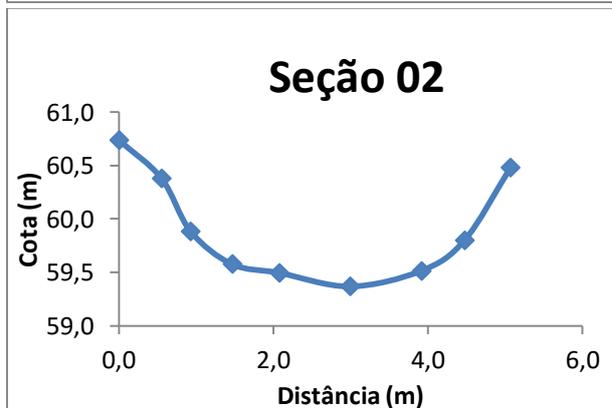
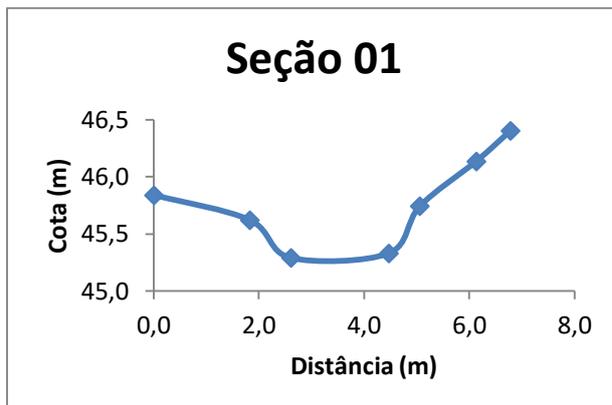


Figura 5-11. Gráficos e fotos das seções 01 e 02 levantadas em campo.

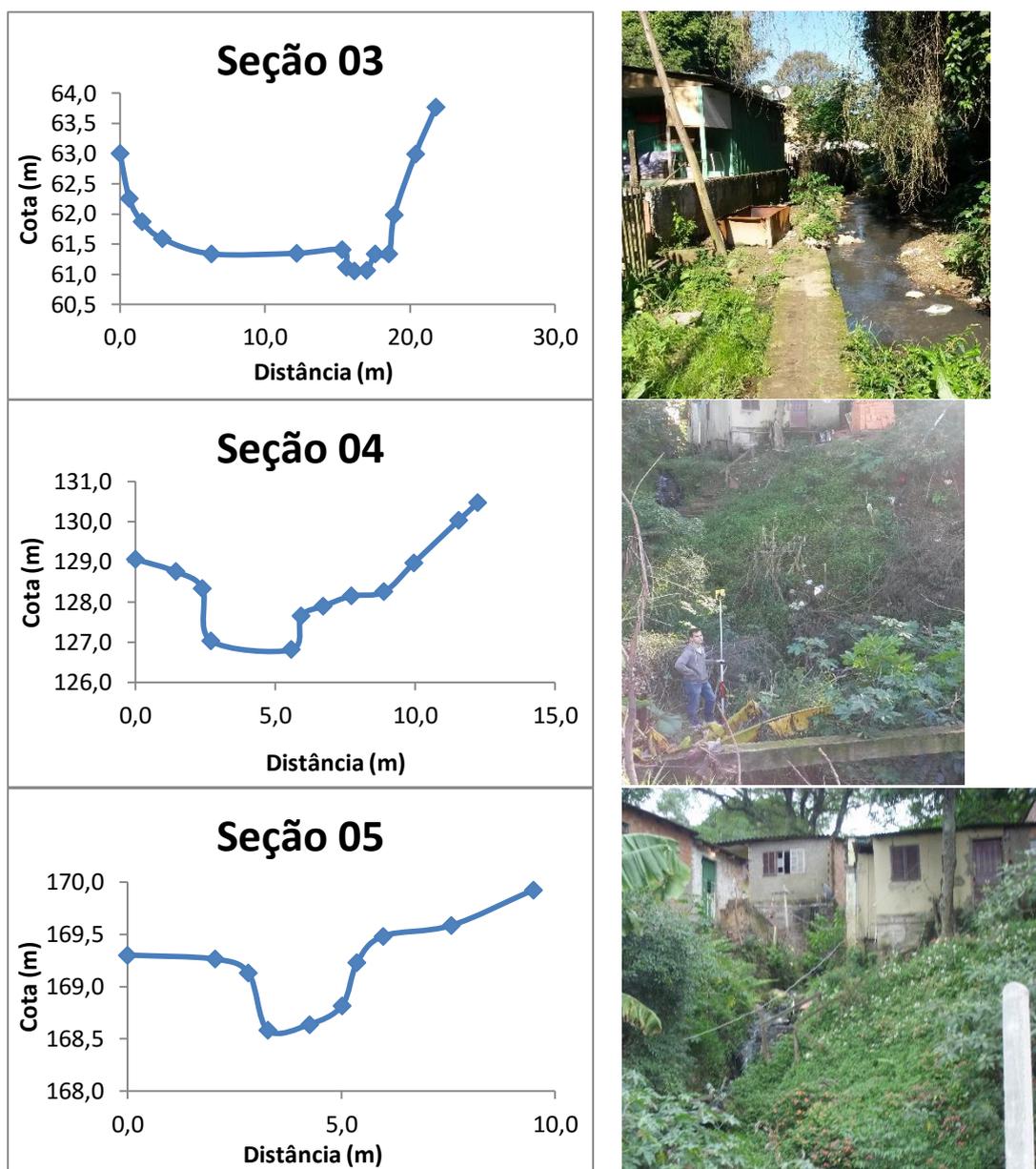


Figura 5-12. Gráficos e fotos das seções 03, 04 e 05 levantadas em campo.

Grande parte das ocupações encontram-se construídas próximas ou em cima das margens do rio, demonstrando o alto grau de ocupação da bacia e a falta de ordenamento urbano.

Em conversas com moradores foram levantados os pontos onde ocorrem os principais problemas de alagamento em eventos de chuvas intensas (Figura 5-13). A espacialização destes pontos pode ser observada na Figura 5-14.



Figura 5-13. Infraestruturas urbanas.

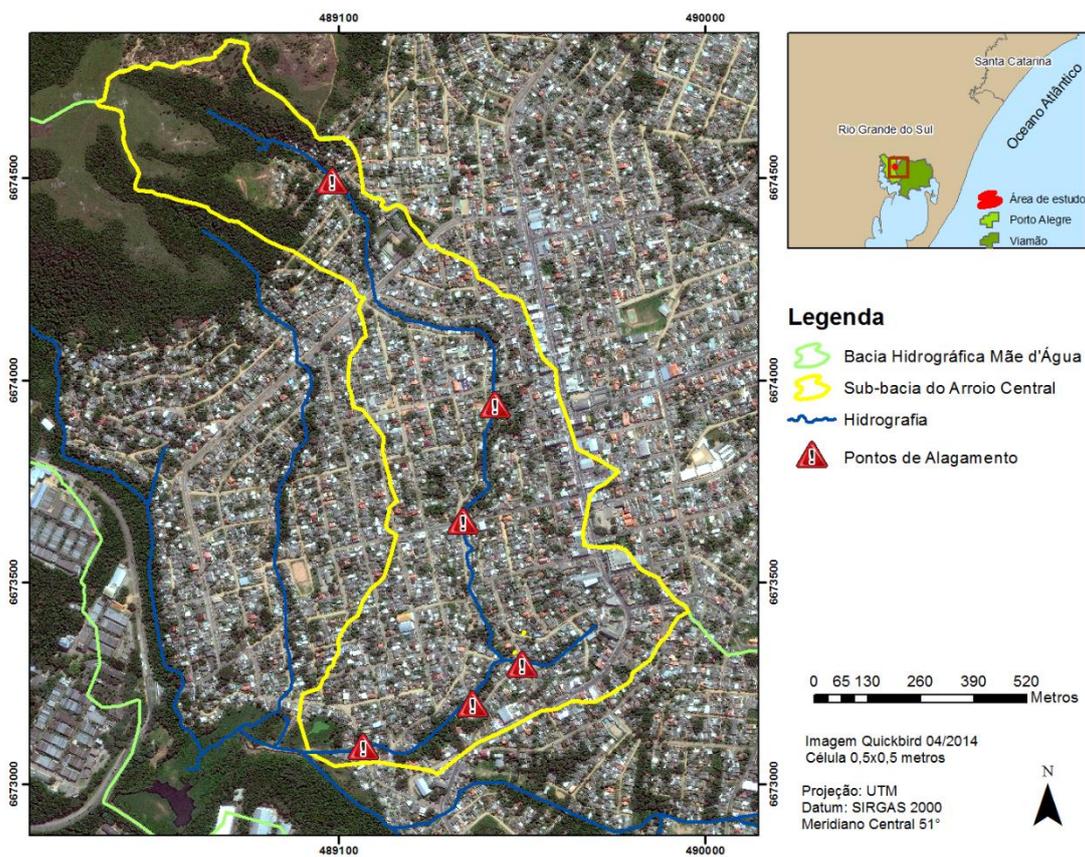


Figura 5-14. Pontos de alagamento relatados por moradores em campo.

5.1.3. Definição dos parâmetros do modelo SWMM

As características calculadas e os parâmetros estimados inicialmente para cada sub-bacia do modelo encontram-se apresentados na Tabela 5-4, bem como as cotas para cada nó. Os dados referentes aos trechos se encontram na Tabela 5-5.

Tabela 5-4. Parâmetros do SWMM para cada sub-bacia definida na discretização.

Sub-bacia	Área (ha)	Largura inicial (m)	Declividade (%)	AI (%)	n inicial permeável	n inicial impermeável	dp Impermeável (mm)	dp Permeável (mm)	Cota do Nó Exutório da sub-bacia (m)
S1	2,96	122,0	36,5	0,0	0,4	0,05	1,5	7,62	213
S2	7,48	128,1	36,4	0,1	0,4	0,05	1,5	7,62	162
S3	3,52	65,9	36,0	25,9	0,4	0,05	1,5	5,08	132
S4	0,78	22,8	42,5	35,8	0,4	0,05	1,5	5,08	124
S5	0,92	25,2	37,6	46,1	0,4	0,05	1,5	3,81	121
S6	1,86	55,5	29,7	37,1	0,325	0,014	1,5	3,81	111
S7	2,35	82,9	23,6	52,6	0,4	0,014	1,5	3,81	100
S8	1,71	56,0	9,6	79,6	0,24	0,011	1,5	3,81	97
S9	4,49	150,2	15,1	80,5	0,145	0,014	1,5	3,81	78
S10	6,21	107,9	11,4	86,9	0,145	0,014	1,5	3,81	73
S11	2,67	41,1	9,8	89,7	0,145	0,014	1,5	3,81	72
S12	4,66	93,0	13,8	72,5	0,145	0,014	1,5	3,81	69
S13	7,64	159,1	18,0	67,7	0,24	0,0125	1,5	3,81	61
S14	3,18	50,5	11,3	87,5	0,15	0,011	1,5	3,81	58
S15	5,48	117,4	13,8	80,0	0,15	0,0125	1,5	3,81	56
S16	5,42	188,9	11,5	84,8	0,15	0,011	1,5	3,81	68
S17	4,09	121,3	17,0	72,3	0,15	0,011	1,5	3,81	55
S18	6,19	97,8	13,0	79,0	0,15	0,014	1,5	3,81	53
S19	2,51	39,2	8,7	80,1	0,15	0,014	1,5	3,81	53
S20	2,53	52,0	12,4	77,5	0,15	0,0125	1,5	3,81	52
S21	2,06	38,9	10,8	86,1	0,15	0,013	1,5	3,81	51
S22	4,01	104,4	15,3	52,0	0,24	0,014	1,5	3,81	47
S23	1,95	41,8	12,4	71,6	0,15	0,014	1,5	3,81	46
S24	1,62	47,8	13,4	72,6	0,15	0,014	1,5	3,81	46
S25	0,91	32,2	14,9	72,1	0,15	0,014	1,5	3,81	46
S26	1,75	86,3	6,2	44,2	0,24	0,014	1,5	5,08	44

*AI= Área impermeável; n = Coeficiente de Manning e dp=Armazenamento em depressão.

Tabela 5-5. Parâmetros do SWMM para cada trecho do modelo.

Trechos	Comprimento (m)	Seção tipo	n trecho inicial	n margem inicial	Fluxo inicial (m ³ /s)
T1	187	Seção 05	0,04	0,4	0,00017
T2	148	Seção 05	0,04	0,4	0,00059
T3	30	Seção 04	0,07	0,4	0,00078
T4	20	Diâmetro 1,5m	0,013	-	0,00083
T5	100	Seção 04	0,07	-	0,00088
T6	168	Seção 03 s/margens	0,07	-	0,00098
T7	40	Diâmetro 1,5m	0,013	-	0,00112
T8	270	Seção 03 s/margens	0,07	-	0,00121
T9	140	Seção 03 s/margens	0,07	-	0,00131
T10	30	Diâmetro 1,5m	0,013	-	0,00156
T11	115	Seção 03 c/margens	0,07	0,24	0,00171
T12	230	Seção 03 s/margens	0,07	-	0,00197
T13	20	Diâmetro 1,5m	0,013	-	0,00240
T14	165	Seção 02	0,07	-	0,00258
T15	210	Seção 02	0,07	-	0,00289
T16	60	Diâmetro 1m	0,013	-	0,00030
T17	160	Seção ret. 3x1m	0,07	-	0,00053
T18	25	Diâmetro 1,5m	0,013	-	0,00324
T19	100	Seção 02	0,07	-	0,00338
T20	12	Ponte 3x2m	0,07	-	0,00352
T21	235	Seção 02	0,07	-	0,00364
T22	20	Diâmetro 1,5m	0,013	-	0,00386
T23	60	Seção 01 s/margens	0,07	-	0,00397
T24	10	Ponte 3x1,5m	0,07	-	0,00406
T25	120	Seção 01	0,05	0,4	0,00411
T26	20	Seção 01	0,05	-	0,00421

ret. = retangular

5.2. Calibração e Validação

5.2.1. Calibração

Para calibração utilizou-se os dados de área permeável de acordo com o uso do solo realizado para o ano de 2003, visto que os dados de chuva e vazão são referentes ao ano de 2005.

Foi utilizado o método da tentativa e erro na calibração dos 5 eventos da série, afim de minimizar a diferença entre as vazões calculadas e as vazões medidas em campo. Os valores definidos para os parâmetros calibráveis e os erros Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) e Erro dos Volumes (ΔV) da calibração seguem expostos na Tabela 5-6.

Tabela 5-6. Parâmetros utilizados na calibração do modelo e erros calculados.

Evento	Data	Q _{obs} pico (m ³ / s)	Sub-bacias			Trecho <i>n</i>	Infiltração de Horton				Ajuste estatístico	
			W (m)	<i>n</i> imp.	<i>n</i> per.		I _o (mm /h)	I _b (mm/ h)	k (1/h)	t _s (dias)	RMSE (m ³ /s)	ΔV (%)
1	23/mar	0,76	inicial	inicial	Inicial	inicial	130	7	2	2	0,12	-7,1
3	01/abr	3,58	inicial	8x	máx. (0,8)	8x	130	7	2	2	0,68	-0,66
4	13/jun	0,33	inicial	2x	2x	2x	130	7	2	2	0,03	17,8
5	26/jun	0,20	inicial	2x	2x	2x	200	10	2	2	0,06	-150,6
8	05/jul	0,08	1,5x	1,5x	1,5x	1,5x	130	7	2	2	0,02	-1,30
Mediana			inicial	2x	2x	2x	130	7	2	2	0,06	-1,30

Supôs-se que os parâmetros de infiltração do modelo de Horton não variam espacialmente neste caso considerando as características da bacia, então pode-se definir valores iguais para todas as sub-bacias. Observa-se que os valores de infiltração que se adaptaram melhor a maior parte dos eventos são referentes ao tipo de solo arenoargiloso conforme estabelecido Terstriep and Stall (1974), condizente com o tipo de solo da região.

Já a largura, o *n* de *Manning* para áreas permeáveis, impermeáveis e para os trechos são variáveis espacialmente, sendo diferentes para cada sub-bacia ou trecho. Dessa forma, para a calibração destes parâmetros foram utilizados coeficientes, pelos quais seus valores iniciais foram multiplicados. Os resultados obtidos para esses coeficientes são iguais para todas as sub-bacias.

Os valores de largura que melhor se adaptaram ao modelo na maior parte dos eventos foram os valores estabelecidos inicialmente. Este fato demonstrou eficiência do método

utilizado na estimativa das larguras das sub-bacias. Quanto aos valores de *Manning* os eventos se comportaram de maneira diferenciada entre eles, porém todos valores encontrados foram iguais ou maiores aos estabelecidos inicialmente de acordo com o tipo de material ou fundo.

Nos gráficos das Figura 5-15, Figura 5-16 e Figura 5-17 seguem expostos os hidrogramas resultantes dos 5 eventos calibrados.

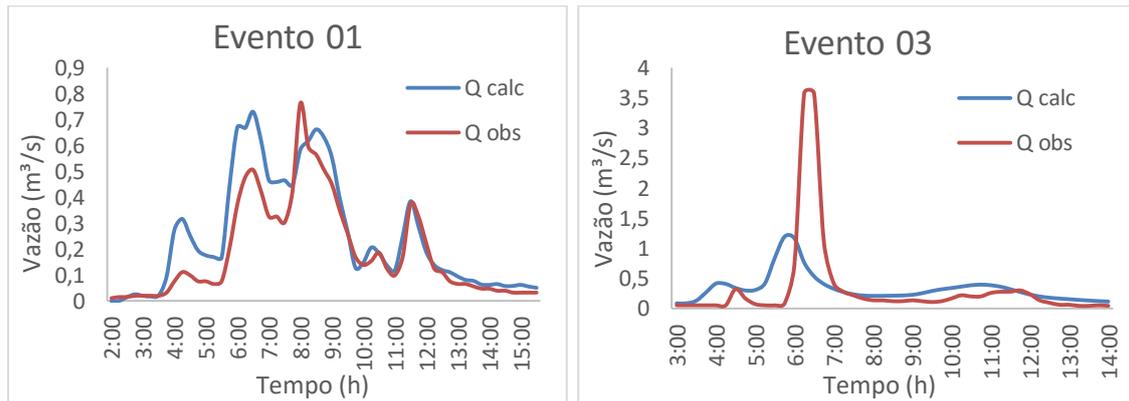


Figura 5-15. Hidrograma da calibração dos eventos 01 e 03.

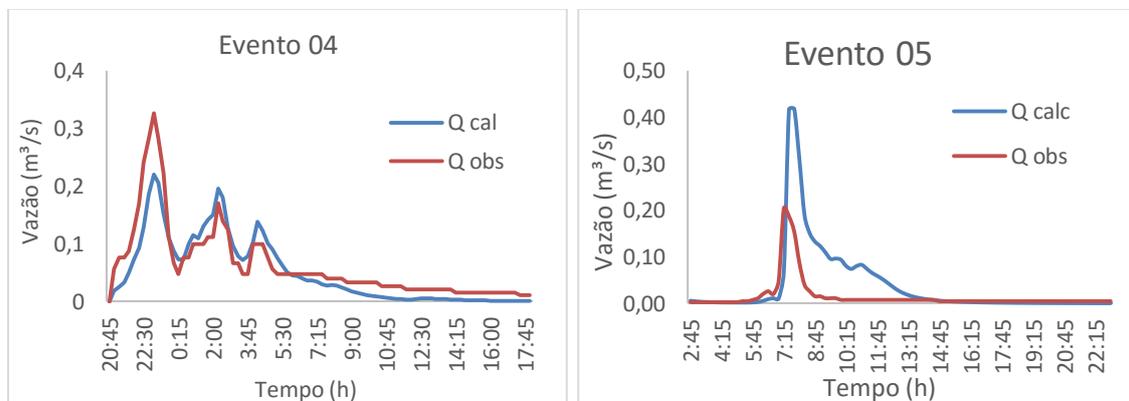


Figura 5-16. Hidrograma da calibração dos eventos 04 e 05.

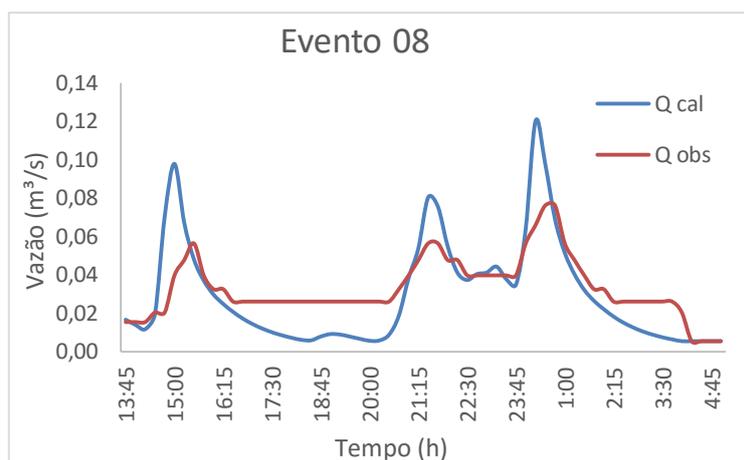


Figura 5-17. Hidrograma da calibração do evento 08.

Graficamente pode-se observar que os hidrogramas calibrados apresentam comportamentos similares aos observados em termos de volume. Entretanto foi encontrado um erro de volume alto no evento 5, provavelmente devido a um erro na extrapolação da curva chave. Já os outros eventos apresentaram erros aceitáveis na calibração do modelo.

Os maiores problemas da simulação apresentaram-se na estimativa dos valores reais de vazão, visto que a bacia possui vazões baixas, os RMSE encontrados para os eventos representam uma dificuldade em relação a esta estimativa.

Porém, como para os objetivos do presente trabalho os volumes dos hidrogramas são de maior interesse, considerou-se a calibração satisfatória. Considerando ainda que foi realizada para poucos eventos, devido à escassez de dados medidos nessa bacia.

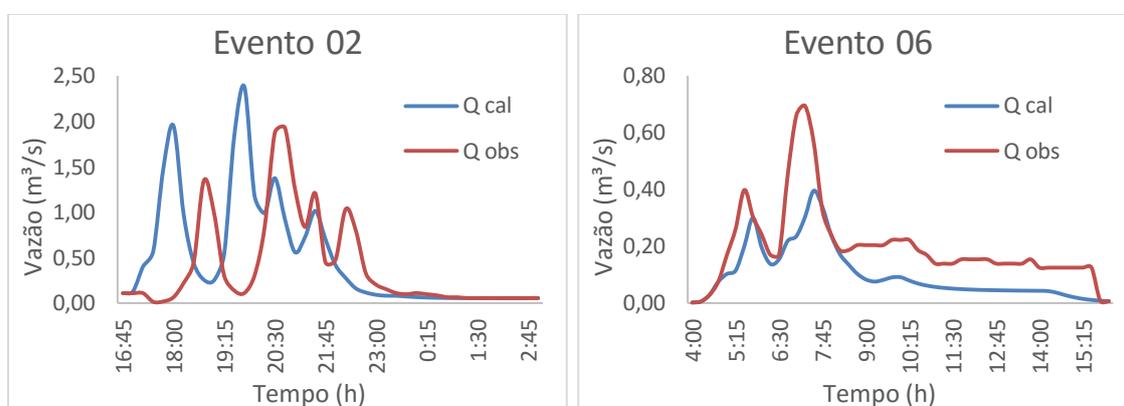
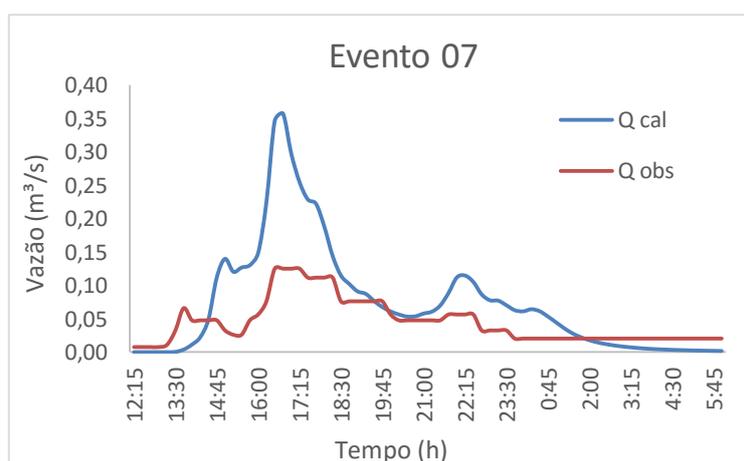
5.2.2. Validação

O processo de validação dos parâmetros calibrados buscou analisar a resposta do modelo para simular hidrogramas reais. Para validação foram utilizadas as medianas dos valores obtidos na calibração. O modelo foi validado para outros 3 eventos da série apresentados abaixo. Os erros estatísticos calculados para cada evento validado seguem apresentado na Tabela 5-7.

Tabela 5-7. Eventos utilizados na validação e ajuste estatístico.

Evento	Data	Q pico (m ³ /s)	Ajuste estatístico	
			RMSE (m ³ /s)	ΔV (%)
2	31/mar	1,93	0,69	-23,7
6	17/jul	0,69	0,13	49,1
7	21/jul	0,13	0,05	-52,7
Mediana			0,13	-23,7

Os erros encontrados na validação foram maiores que na calibração, em que o evento 2 e 7 apresentaram-se seus volumes superestimados pelo modelo, enquanto o evento 6 teve seu volume subestimado. Os hidrogramas da validação seguem apresentados na Figura 5-18 e Figura 5-19.

**Figura 5-18. Hidrogramas da validação dos eventos 02 e 06.****Figura 5-19. Hidrograma da validação do evento 07.**

No evento 2 observa-se uma translação temporal de 45 minutos nos hidrogramas calculado e observado, podendo ser atribuído esta diferença a um erro nas chuvas.

Considerando ainda que o objetivo do trabalho está baseado na diferença do volume escoado superficialmente nos diferentes cenários, os erros encontrados na validação não se demonstram como impeditivos a boa aplicação do modelo, visto que os erros são sistemáticos nos resultados dos cenários.

5.3. Simulação de Cenários de Urbanização

5.3.1. Cenário atual e futuro

No cenário atual foram utilizados os dados de área permeável de acordo com o uso do solo realizado para o ano de 2014 e parâmetros definidos na calibração.

Já no cenário futuro estimou-se a expansão urbana, considerando critérios do Plano Diretor do município de Viamão, onde é estabelecido que a região se encontra na Macrozona Urbana de Consolidação. Essa região, segundo a Lei municipal 4.154/2013, é uma zona prioritária para investimentos em infraestrutura urbana, como pavimentação de ruas, de forma a consolidar essas áreas.

Baseado nestes critérios no cenário futuro foi considerado a pavimentação de todas as vias, 10% de permeabilidade de todos os lotes, e o avanço da ocupação nas áreas de vegetação.

Foram definidas 4 seções de controle para análise dos hidrogramas, sendo eles o trecho 5, 11, 19 e 25, todos de seções naturais. O trecho 5 representa a porção a montante da bacia, onde atualmente possui baixa ocupação e é uma região onde existem problemas de drenagem segundo os moradores. Porém apresentará sua ocupação máxima no cenário futuro, com exceção da sub-bacia 1 que se encontra próxima a área de proteção do morro Santana. O trecho 11 encontra-se em uma área central da bacia, onde também existem alagamentos atualmente. O trecho 19 encontra-se logo após a junção da bacia do rio principal com a contribuição lateral de um pequeno riacho, onde também existem problemas de alagamento. E o trecho 25 representa a porção mais a jusante da bacia, em que se tem uma representação do escoamento total da bacia de estudo.

Os hidrogramas do cenário atual para os tempos de retorno de 2, 5, 10 e 20 anos seguem apresentados nas Figura 5-20, Figura 5-21, Figura 5-22 e Figura 5-23 de acordo com cada trecho, respectivamente. Neste mesmo gráfico também está representada por uma linha vermelha contínua a vazão de calha cheia (vazão meta) do respectivo trecho. O trecho 11

apresenta uma vazão de calha cheia baixa, devido ao “estrangulamento” da seção pela pavimentação de calçadas e casas feitas pelos moradores.

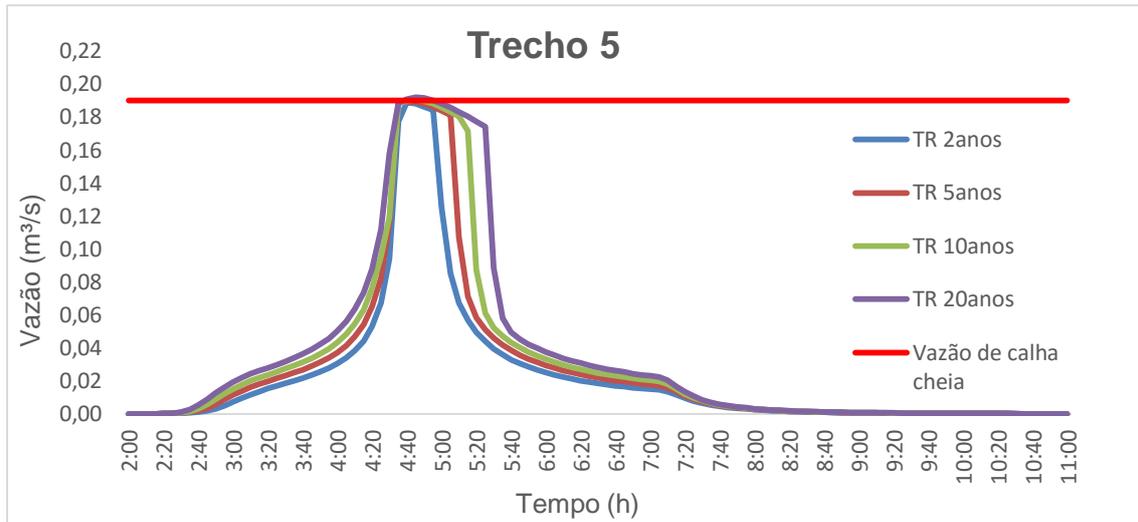


Figura 5-20. Hidrogramas de tempos de retorno 2, 5, 10 e 20 anos para o trecho 5 do cenário atual.

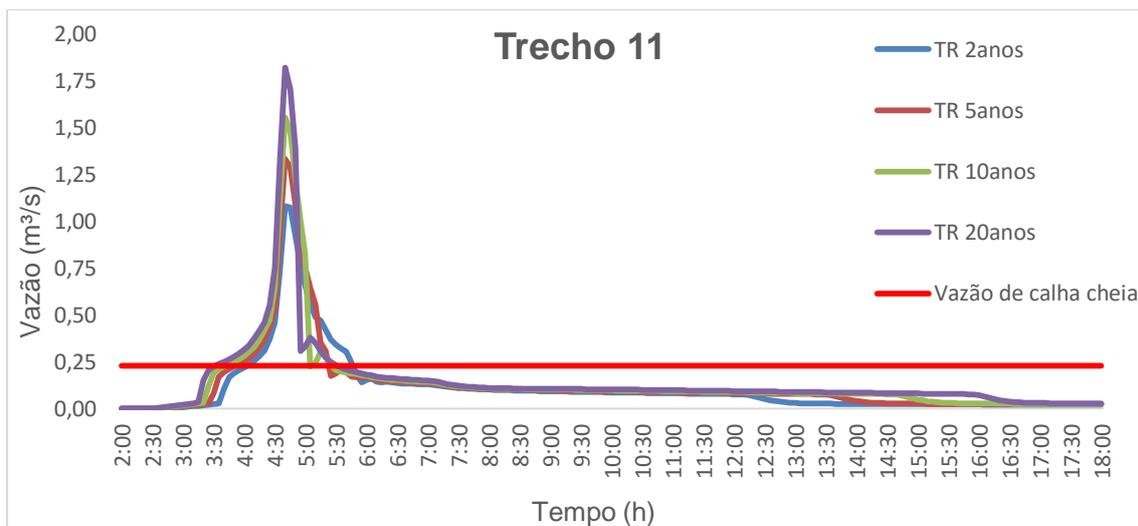


Figura 5-21. Hidrogramas de tempos de retorno 2, 5, 10 e 20 anos para o trecho 11 do cenário atual.

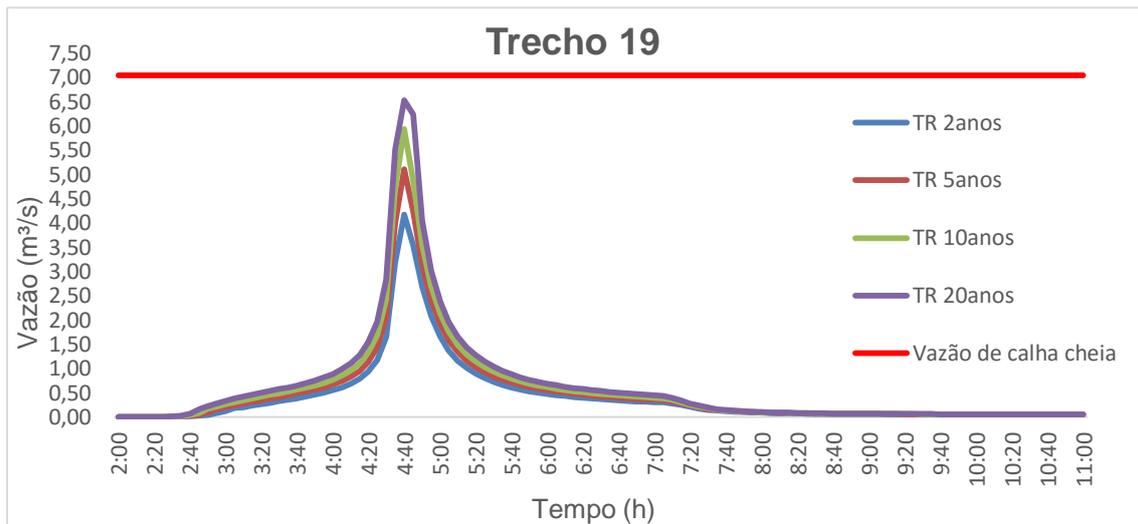


Figura 5-22. Hidrogramas de tempos de retorno 2, 5, 10 e 20 anos para o trecho 19 do cenário atual.

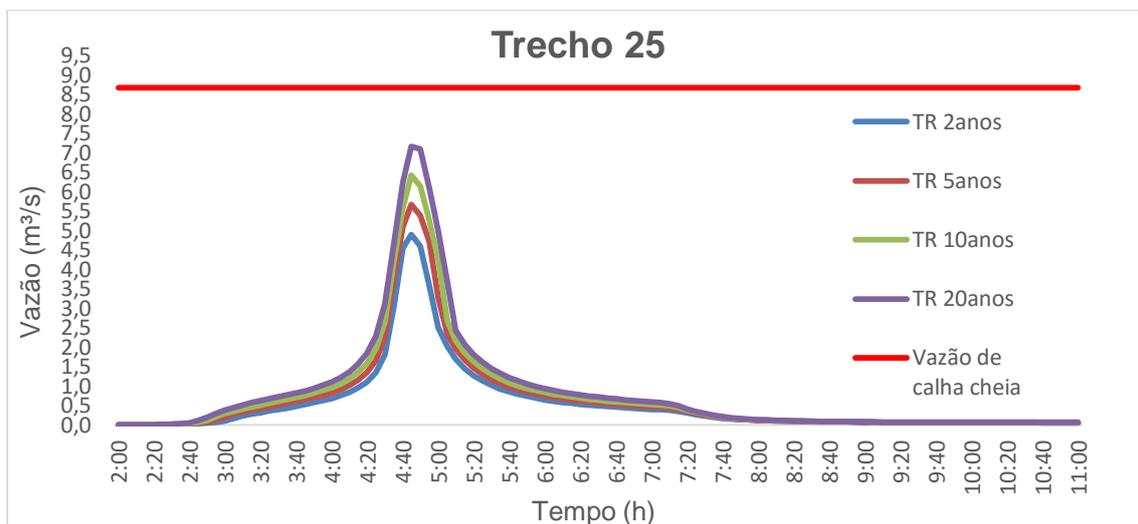


Figura 5-23. Hidrogramas de tempos de retorno 2, 5, 10 e 20 anos para o trecho 25 do cenário atual.

Os hidrogramas do cenário futuro para os mesmos trechos e tempos de retorno se encontram expostos nas Figura 5-24, Figura 5-25, Figura 5-26 e Figura 5-27.

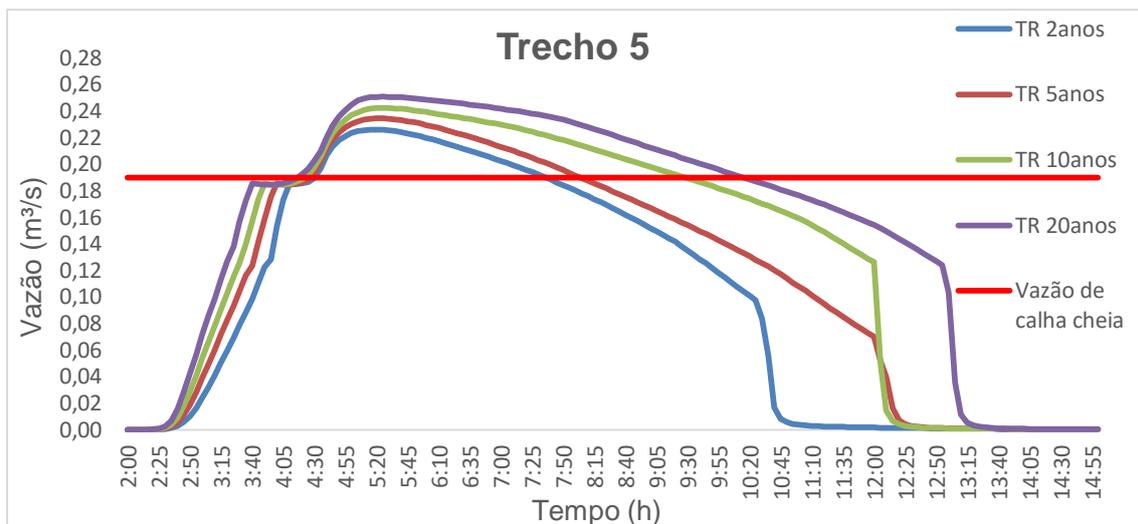


Figura 5-24. Hidrogramas de tempos de retorno 2, 5, 10 e 20 anos para o trecho 5 do cenário futuro.

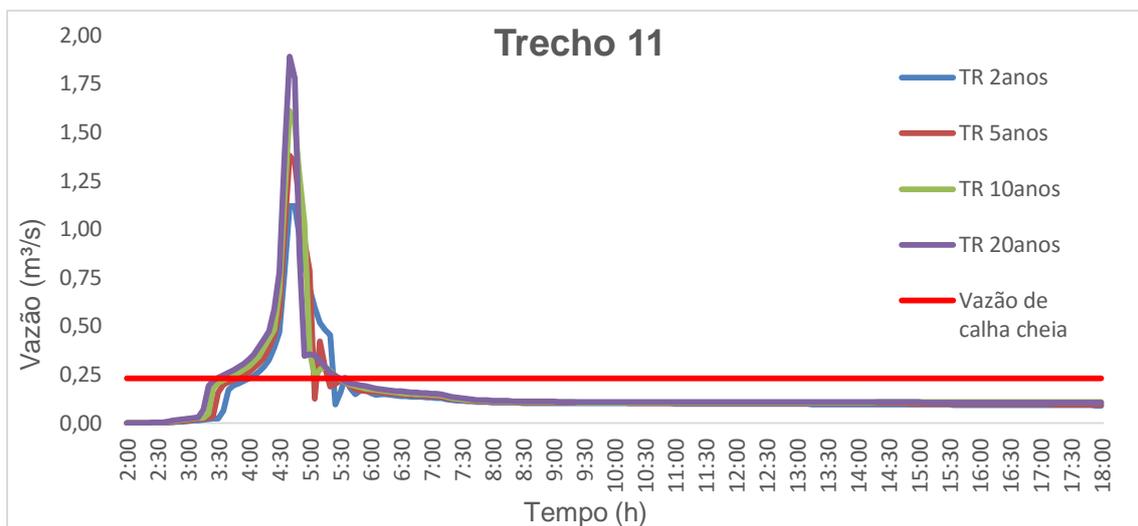


Figura 5-25. Hidrogramas de tempos de retorno 2, 5, 10 e 20 anos para o trecho 11 do cenário futuro.

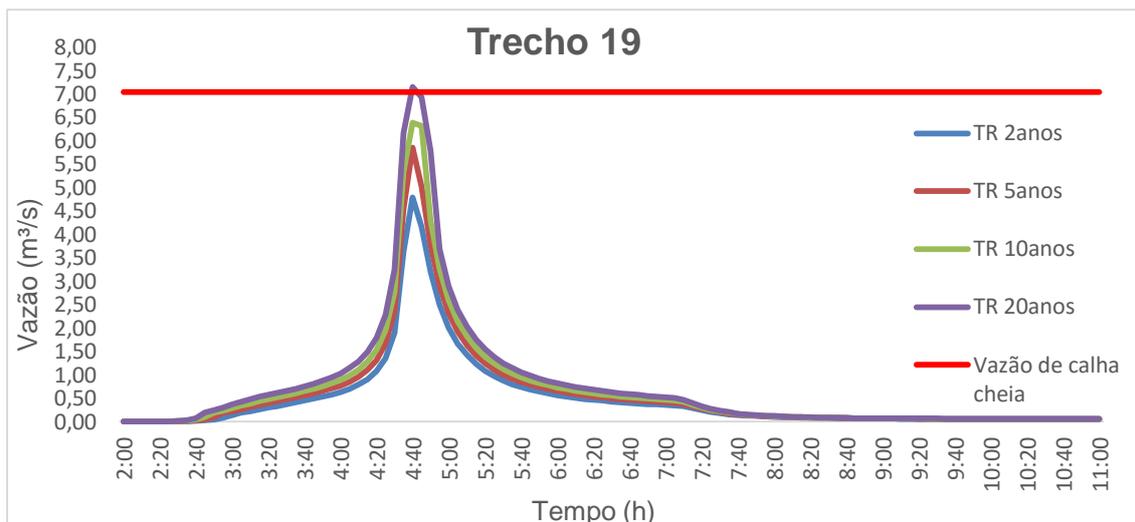


Figura 5-26. Hidrogramas de tempos de retorno 2, 5, 10 e 20 anos para o trecho 19 do cenário futuro.

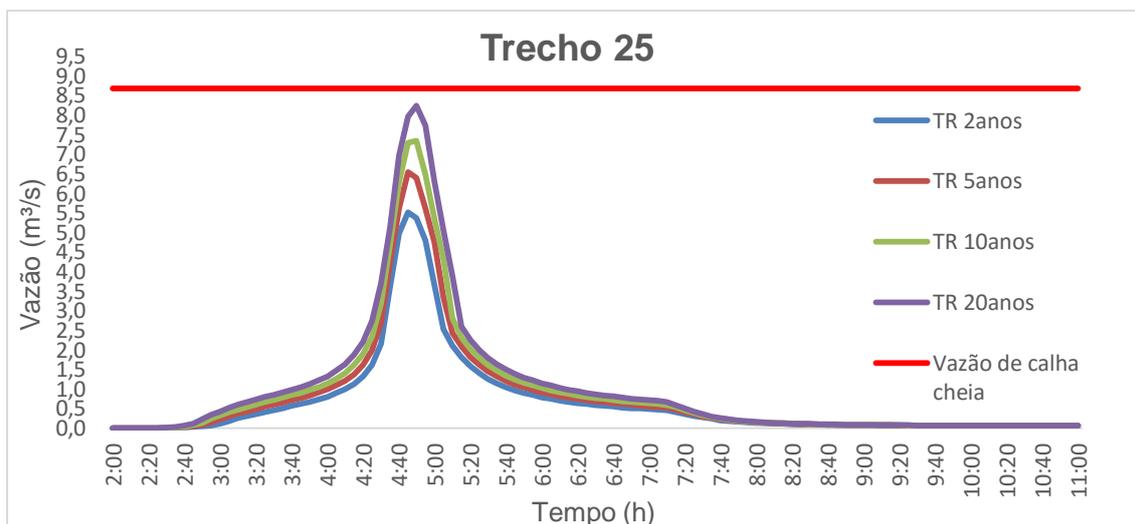


Figura 5-27. Hidrogramas de tempos de retorno 2, 5, 10 e 20 anos para o trecho 25 do cenário futuro.

Observa-se um aumento de 16% nos volumes dos hidrogramas do trecho 25 no cenário futuro, aumentando $19,54\text{m}^3$ do cenário atual para o cenário futuro com tempo de retorno de 20 anos e $17,2\text{m}^3$ para 10 anos. Isso representa o aumento do volume do hidrograma de toda a bacia. As vazões de pico neste trecho para o tempo de retorno de 20 anos chegam muito próximas a vazão de calha cheia do trecho.

O trecho 19 também apresenta um aumento nos volumes dos hidrogramas do cenário atual para o futuro. A vazão de pico do cenário atual passa de $6,5\text{m}^3/\text{s}$ para $7,2\text{m}^3/\text{s}$ em um curto horizonte de tempo, visto que a bacia já se encontra altamente ocupada e apresentou um aumento da taxa de área impermeável por habitante em um horizonte de

aproximadamente 10 anos (Tabela 5-2). Porém como esta seção possui a maior calha, a mesma não foi extravasada.

Já no trecho 11 a vazão de calha cheia é ultrapassada nos 2 cenários, demonstrando problemas atuais de inundação na bacia já com chuvas de tempo de retorno de 2 anos. Nos hidrogramas do trecho 11 observa-se algumas alterações na recessão dos hidrogramas, que podem ser causadas por certa instabilidade do modelo no trecho, o que não foi identificado pelo programa.

O trecho 05 apresenta extravasamento da calha apenas no cenário futuro para todos os tempos de retorno, visto que as bacias que drenam para este trecho possuem uma baixa taxa de ocupação atualmente e seriam totalmente ocupadas no cenário futuro, com exceção na sub-bacia 1.

Nas Figura 5-28 e Figura 5-29 seguem apresentados os volumes de extravasamento interna dos nós para os cenários atual e futuro, respectivamente. Estes extravasamentos apresentam-se por um tempo e depois são devolvidos no mesmo nó ao sistema pelo modelo, o que não ocorreria na realidade principalmente em áreas de grandes declividades.

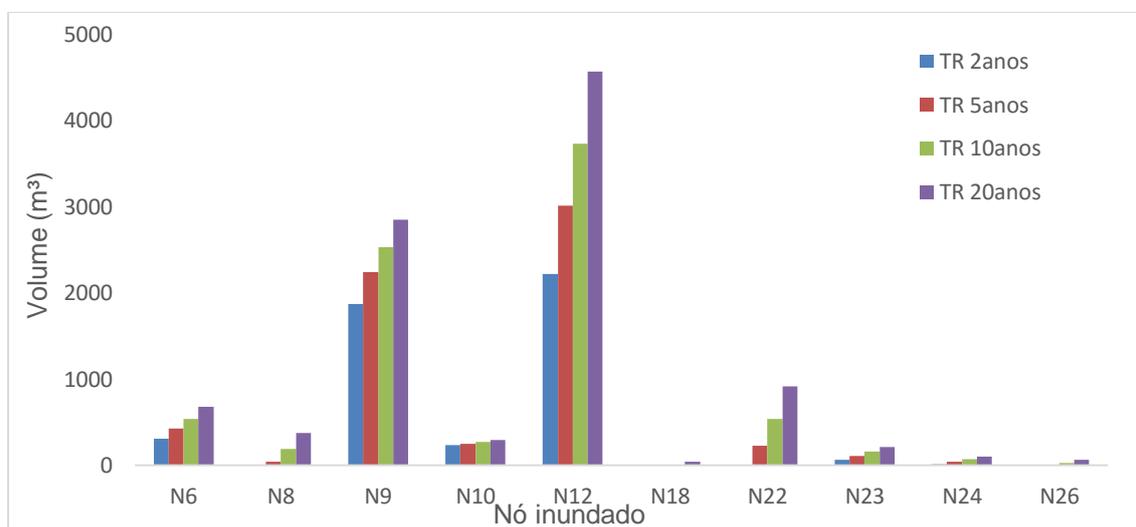


Figura 5-28. Volume de extravasamento em cada nó para os tempos de retorno 2, 5, 10 e 20 anos do cenário atual.

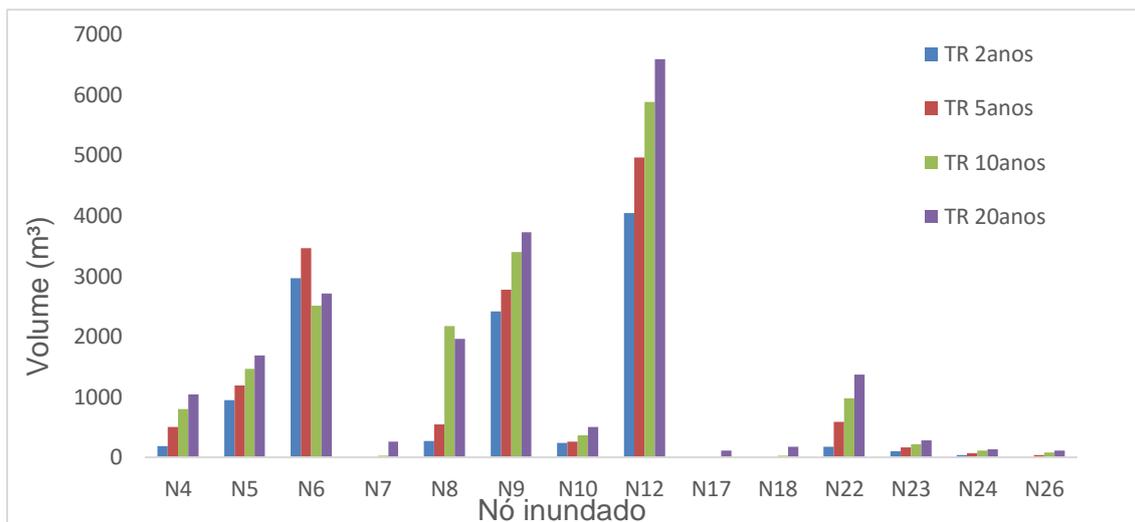


Figura 5-29. Volume de extravasamento em cada nó para os tempos de retorno 2, 5, 10 e 20 anos do cenário futuro.

O N12 foi o que apresentou o maior volume de extravasamento nos 2 cenários. Neste ponto a seção a jusante do nó diminui devido a ocupação de residências nas margens do canal, não havendo uma calha maior como há a montante. O nó N9 também apresentou maiores volumes, em que os trechos a montante e a jusante também se encontram suprimidos pela ocupação tendo suas margens ocupadas.

Comparados aos pontos de inundação relatados pelos moradores (Figura 5-14), a simulação atual foi condizente. O cenário atual apresentou extravasamento nos nós N6, N12, N18, N22, N23 e N24, localizados nas regiões onde existem problemas com drenagem atualmente na bacia.

Os nós N6 e N8 do cenário futuro não apresentam um valor crescente de volume com o aumento do tempo de retorno como nos outros nós em ambos cenários. Isso ocorre devido a ocorrência de um extravasamento no N7 no cenário futuro apenas nos tempos de retorno de 10 e 20 anos, o que não ocorre nos outros tempos de retorno, e acaba por dividir esse volume nesses tempos.

No cenário futuro aumentam o número de nós que apresentaram extravasamentos, principalmente na região de montante (N4, N5) onde atualmente existe baixa ocupação e consecutivamente menos impermeabilização das sub-bacias. Também há um aumento no volume de extravasamento dos nós no cenário futuro, demonstrando o agravamento da situação da drenagem da bacia.

No cenário atual os canais 9 e 23 foram a plena capacidade pelo maior número de horas em todos os tempos de retorno. No cenário futuro a situação apresenta-se mais crítica, pois além dos canais 9 e 23, o canal 5 em todos tempos de retorno e os canais 6 e 12 a partir do tempo de retorno de 10 anos apresentaram-se a plena capacidade. Esses canais são os que apresentam menor seção, pois encontram-se altamente urbanizados em suas margens. O canal 11 apesar de ultrapassar a vazão da calha como observado nos hidrogramas dos dois cenários (Figura 5-21 e Figura 5-25), não esteve a seção plena, pois possui margens não ocupadas, ou seja, ainda possui sua calha maior natural.

Todos os trechos apresentaram aumento dos volumes dos hidrogramas no cenário futuro, como esperado, devido ao aumento da impermeabilização do solo. O que ocasionou também um aumento dos alagamentos nos nós. Considerando que a região é um local de investimento na expansão urbana do município. Isto demonstra um problema em relação as metas de expansão para área se não forem adotadas medidas de controle, o que acabará por ocasionar aumento dos problemas com drenagem urbana da bacia.

5.3.2. *Cenário possível*

No cenário possível propôs intervenções de LID supondo a ocupação do cenário futuro, referente a implantação do Plano Diretor de Viamão.

Definiu-se como meta para um bom funcionamento do sistema de drenagem o tempo de retorno de 10 anos para as chuvas. No cenário possível o trecho 16 foi substituído por uma tubulação com diâmetro maior, a existente, de 1,5 metros como nos demais locais da bacia.

Para um melhor funcionamento da drenagem propôs-se que as sub-bacias 1 e 2, não fossem ocupadas, mantendo a área permeável atual das mesmas. Estas sub-bacias apresentam maiores declividades e é onde encontram-se as nascentes do rio principal, por isso deve-se evitar a ocupação nestas áreas, mantendo a preservação do local.

Foram propostas infraestruturas de pavimento permeável de asfalto poroso em algumas vias das sub-bacias. As vias foram definidas de acordo com a declividade e por não serem rotas de tráfego intenso e de veículos pesados como ônibus e caminhões. Propôs-se também áreas vegetadas (*swales*) nos locais onde atualmente existem espaços vegetados. As infraestruturas de LID utilizadas seguiram de acordo com as especificidades técnicas

estabelecidas (Tabela 3-2). O arranjo espacial e o dimensionamento das infraestruturas de LID seguem apresentados na Tabela 5-8.

Tabela 5-8. Localização e tamanho das infraestruturas de LID.

Sub-bacia	LID	Área (m ²)	Quantidade	% área de LID
S7	<i>swale</i>	2550	2	10,9
S8	<i>swale</i>	2510	1	14,7
S9	<i>swale</i>	2740	1	10,9
	pav.permeável	2145	1	
S10	<i>swale</i>	1960	2	4,8
	pav.permeável	1000	1	
S12	<i>swale</i>	2470	2	6,8
	pav.permeável	720	1	
S13	<i>swale</i>	3890	2	7,1
	pav.permeável	1530	1	
S15	pav.permeável	1220	1	2,2
S18	<i>swale</i>	2080	2	5,5
	pav.permeável	1300	1	
S19	pav.permeável	633	1	2,5
S17	<i>swale</i>	1460	2	3,6
S20	<i>swale</i>	1015	2	6,1
	pav.permeável	520	1	
S21	<i>swale</i>	635	2	5
	pav.permeável	400	1	
S22	<i>swale</i>	5070	2	17,1
	pav.permeável	1800	1	
S26	<i>swale</i>	1070	2	6,1

Os parâmetros do pavimento permeável inseridos no modelo foram retirados de Korkealaakso et al. (2014); Urbonas e Stahre (1993); Araujo, Tucci e Goldenfum (2000); Acioli et al. (2003), sendo que estes dois últimos trabalhos realizaram medições em campo para a mesma região. O volume do reservatório do pavimento permeável e a profundidade média de armazenamento da área vegetada foram estimadas através da metodologia apresentada por Silveira e Goldenfum (2007), alcançando o valor de 350 mm para altura do reservatório e 1000 mm para profundidade da área vegetada. A estimativa do volume foi realizada para área de contribuição do pavimento e de uma pequena área adjacente que drena para o mesmo, sendo em torno de 1% da área da sub-bacia, variando de acordo com cada uma. O mesmo foi feito para as áreas vegetadas,

porém as porcentagens da bacia que drenam para a LID forem maiores, variando de acordo com a sub-bacia. Todos os parâmetros utilizados no modelo SWMM para as infraestruturas de LID encontram-se na Tabela 5-9.

Tabela 5-9. Parâmetros do SWMM para as infraestruturas de LID.

Parâmetros	Pavimento Permeável	Swales
Superfície		
Profundida de armazenamento (mm)	3	1000
Volume de vegetação	n.a.	0,2
<i>n</i> Manning	0,05	0,8
Declividade (%)	8	8
Declividade paredes (%)	n.a.	5
Pavimento		
Espessura (mm)	100	n.a.
Índice de vazios	0,2	n.a.
Superfície impermeável	0	n.a.
Permeabilidade (mm/h)	54000	n.a.
Fator de colmatção	180	n.a.
Solo		
Espessura (mm)	25	n.a.
Porosidade	0,46	n.a.
Capacidade de campo	0,2	n.a.
Ponto de murcha	0,1	n.a.
Condutividade hidráulica (mm/h)	25	n.a.
Ponto Matricial	3,5	n.a.
Armazenamento		
Altura (mm)	350	n.a.
Índice de vazios	0,6	n.a.
Taxa de infiltração (mm/h)	7	n.a.
Fator de colmatção	180	n.a.

n.a. = não se aplica

As larguras e áreas impermeáveis das sub-bacias foram recalculadas após a colocação dos LID's. Os hidrogramas simulados para os tempos de retorno 2, 5, 10 e 20 anos, após a inserção das mudanças propostas para o cenário possível seguem apresentadas na Figura 5-30, Figura 5-31, Figura 5-32 e Figura 5-33.

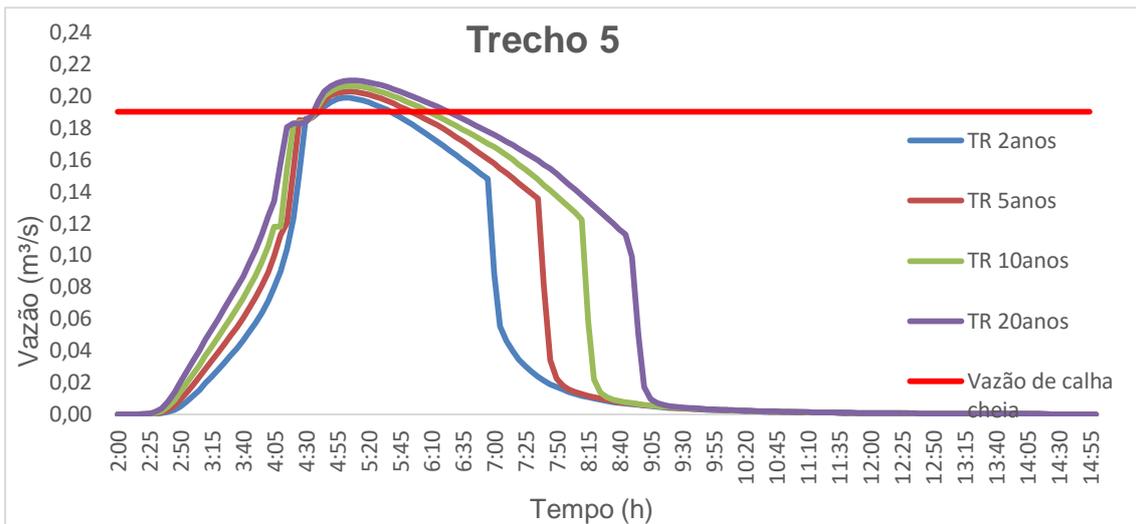


Figura 5-30. Hidrogramas de tempos de retorno 2, 5, 10 e 20 anos para o trecho 5 do cenário possível.

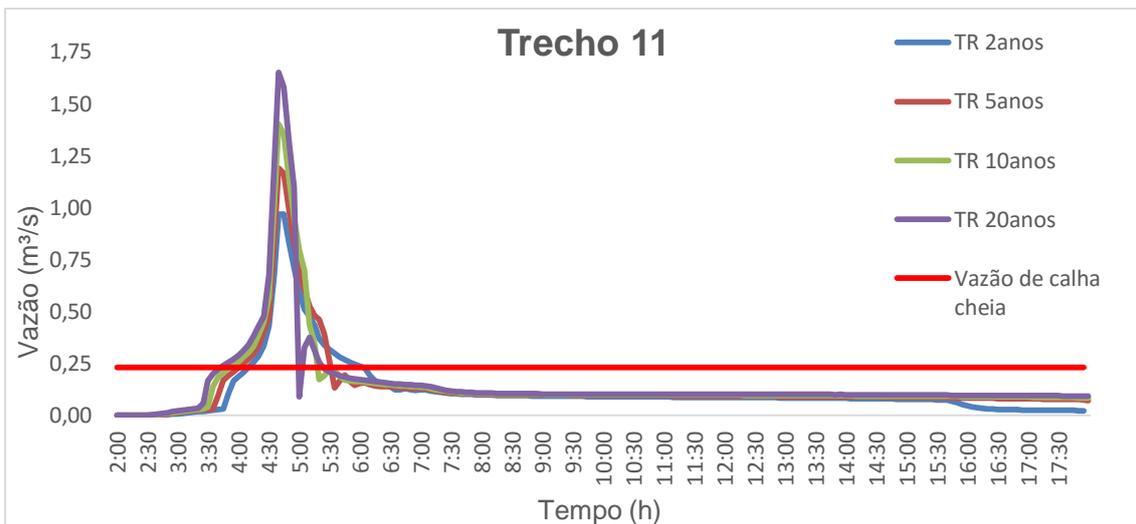


Figura 5-31. Hidrogramas de tempos de retorno 2, 5, 10 e 20 anos para o trecho 11 do cenário possível.

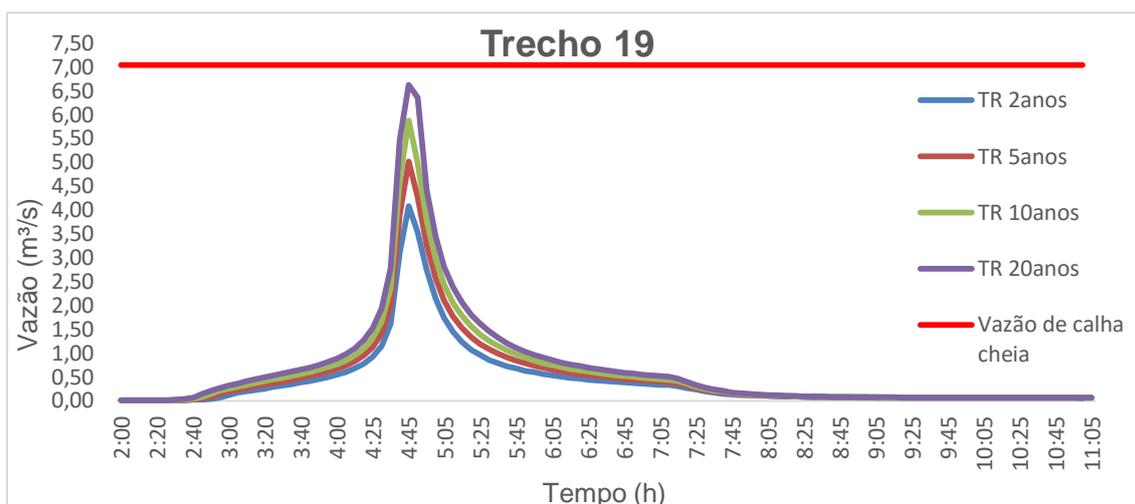


Figura 5-32. Hidrogramas de tempos de retorno 2, 5, 10 e 20 anos para o trecho 19 do cenário possível.

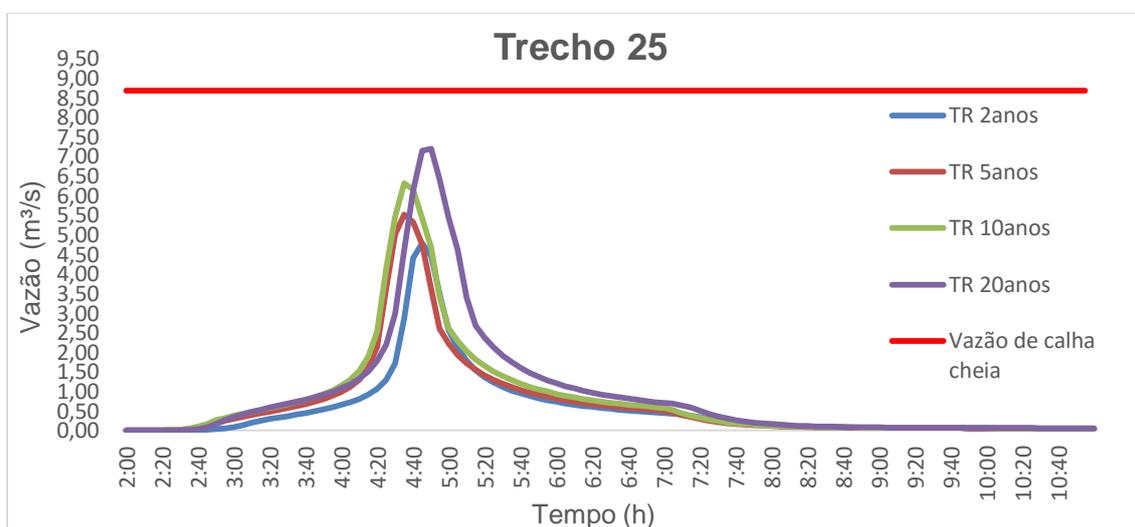


Figura 5-33. Hidrogramas de tempos de retorno 2, 5, 10 e 20 anos para o trecho 25 do cenário possível.

Todos hidrogramas apresentaram uma vazão de pico e volume menor comparado ao cenário futuro, utilizando também o cenário de ocupação máxima de acordo com o plano diretor. O trecho 5 ainda extravasou a sua calha, considerando que nas sub-bacias que drenam para este canal não foram colocadas infraestruturas de LID devido as maiores declividades. Porém os volumes apresentaram uma redução de 53% do cenário futuro em todos tempos de retorno, devido a medida de manter a permeabilização atual das sub-bacias 1 e 2.

O trecho 11 também tem sua calha extravasada em qualquer tempo de retorno como já acontecia no cenário atual, devido a ocupação de sua calha maior. Nesta região as edificações estão construídas na borda do leito menor, apresentando risco tanto de

inundação quanto de desbarrancamento para estas famílias. O trecho C11, mais a montante, obteve maiores reduções de volume, devido suas menores áreas de contribuição e a maior presença de LID's, proporcionalmente.

O trecho 19 foi o que apresentou a menor variação com a inserção das LID's devido à alta ocupação dessas áreas e a presença de poucos espaços vegetados (Figura 5-6). O trecho 25 teve seus picos reduzidos afastando-se mais do extravasamento da calha em todos tempos de retorno. Esse trecho teve seus picos adiantados comparados aos cenários atuais e futuros para os tempos de retorno de 5 e 10 anos.

Na Tabela 5-10 estão apresentados a porcentagem dos volumes reduzidos em cada trecho. Os trechos 11, 19 e 25, que são controlados por LID, tiveram uma redução de volume do cenário futuro para o possível menor que o trecho 5. Essas porcentagens de redução diminuíram conforme o aumento do tempo de retorno, demonstrando maior eficiência das infraestruturas de LID para chuvas menores.

Tabela 5-10. Redução do volume (%) por tempo de retorno e por trecho do cenário futuro para o cenário possível.

Tempo de Retorno (anos)	Trecho		
	T11	T19	T25
2	22%	11%	14%
5	17%	10%	11%
10	14%	8%	10%
20	9%	7%	9%

No cenário atual para o cenário futuro houve um aumento de 16% no volume do hidrograma do trecho 25, que corresponde a região mais a jusante da sub-bacia. As infraestruturas de LID combinadas representam uma redução considerável nos volumes escoados, alcançando 14% de redução do volume para chuvas de Tr 2anos do cenário futuro para o cenário possível no mesmo trecho, valor próximo ao aumento gerado pela expansão urbana consolidada com baixas taxas de permeabilidade do lote.

Esse desempenho diminui para chuvas maiores. Uma alternativa para diminuir o volume escoado é a inserção de medidas de controle em lotes, que diminuirá a vazão de lançamento na rede pluvial. Essa alternativa não foi considerada para este trabalho devido ao poder aquisitivo insuficiente da população local da área de estudo.

O volume extravasado em cada nó do sistema para o cenário possível segue apresentado na Figura 5-34. Bem como o volume infiltrado e armazenado pelas infraestruturas de LID em cada sub-bacia encontram-se na Figura 5-35 e Figura 5-36, respectivamente.

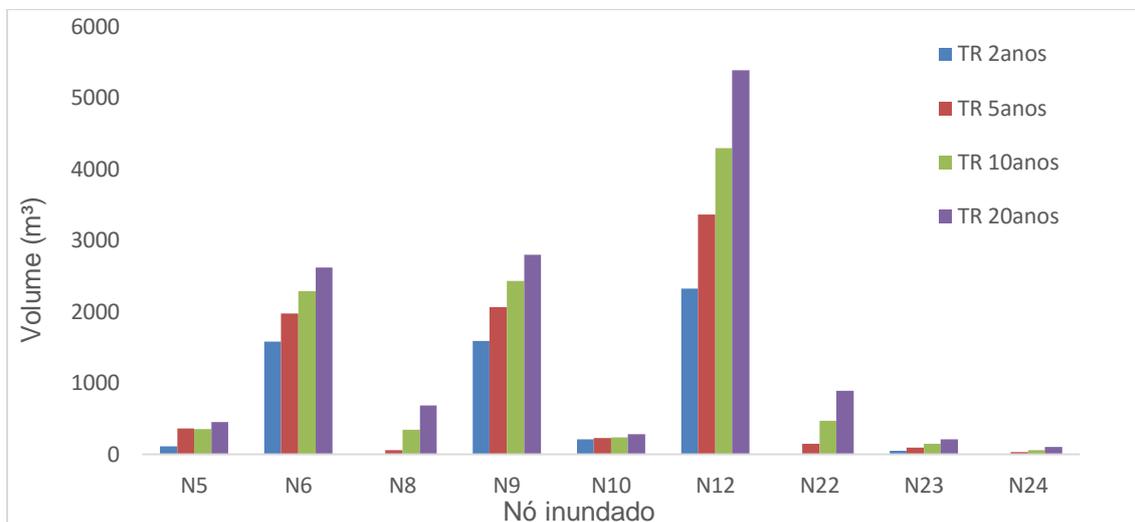


Figura 5-34. Volume de extravasamento em cada nó para os tempos de retorno 2, 5, 10 e 20 anos do cenário possível.

Os nós N4, N7, N17, N18 e N26 não apresentaram extravasamento no cenário possível em todos tempos de retorno, sendo que eram extravasados no cenário futuro. Os nós N8, N22 e N24 não apresentaram extravasamentos no tempo de retorno de 2 anos. Todos os nós tiveram seu volume reduzido no cenário possível comparados ao cenário futuro para todos os tempos de retorno, demonstrando eficiência das medidas adotadas.



Figura 5-35. Volume infiltrado pelas infraestruturas de LID's por sub-bacia.

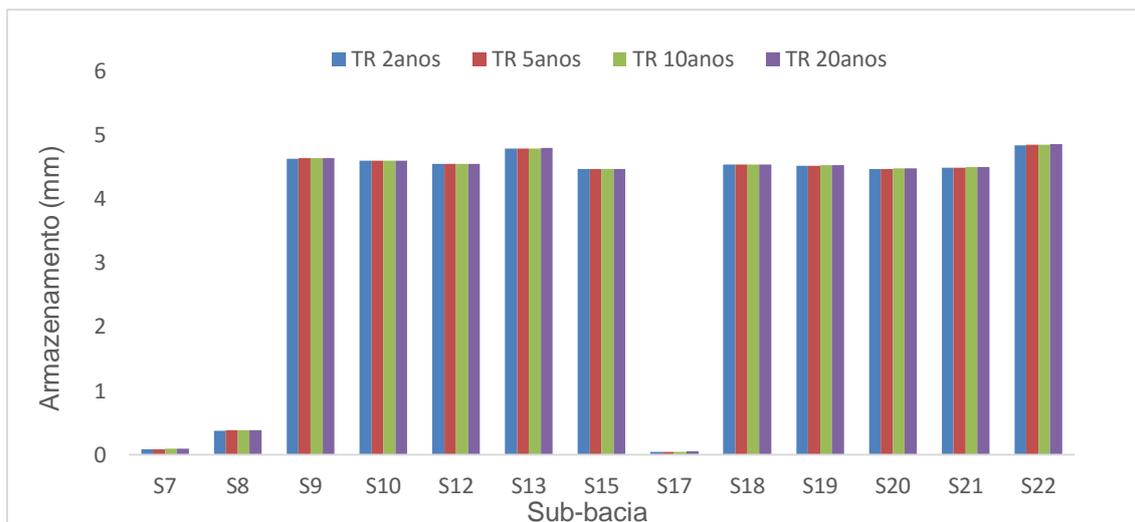


Figura 5-36. Volume armazenado pelas infraestruturas de LID's por sub-bacia.

O volume infiltrado variou de acordo com o tempo de retorno, apresentando maiores volumes nas sub-bacias com maior área de infraestruturas de LID's combinadas. As bacias que possuíam apenas áreas vegetadas tiveram um volume menor infiltrado. O mesmo aconteceu para o armazenamento, que foi maior para as áreas com pavimento permeável. Porém os armazenamentos não tiveram alta variação com o tempo de retorno, devido a capacidade limitada de armazenamento pelos reservatórios dos pavimentos.

As áreas que apresentaram maior armazenamento foram as que possuíam pavimento permeável. De acordo com Qin, Li e Fu (2013), os pavimentos permeáveis apresentaram maior desempenho com a localização do pico da chuva no meio da duração, como utilizado neste trabalho. Já as *swales* apresentaram melhor desempenho quando o pico da chuva era no início da duração. Os mesmos autores também identificaram que o pavimento permeável tem maior efeito sobre a redução das inundações do que as *swales*.

Lee et al. (2012) encontraram efeitos de 7 a 15% na redução das inundações com a instalação de equipamentos de LID, incluindo *swales*, para chuvas de grande intensidade. Porém os mesmos autores relatam que a eficiência dos LID's se demonstrou maior em séries de chuvas reais e de menor intensidade.

Na Figura 5-37 apresenta-se uma comparação entre os cenários para o tempo de retorno de 10 anos, considerando o volume extravasado no nó por hectare de área drenada até o mesmo.

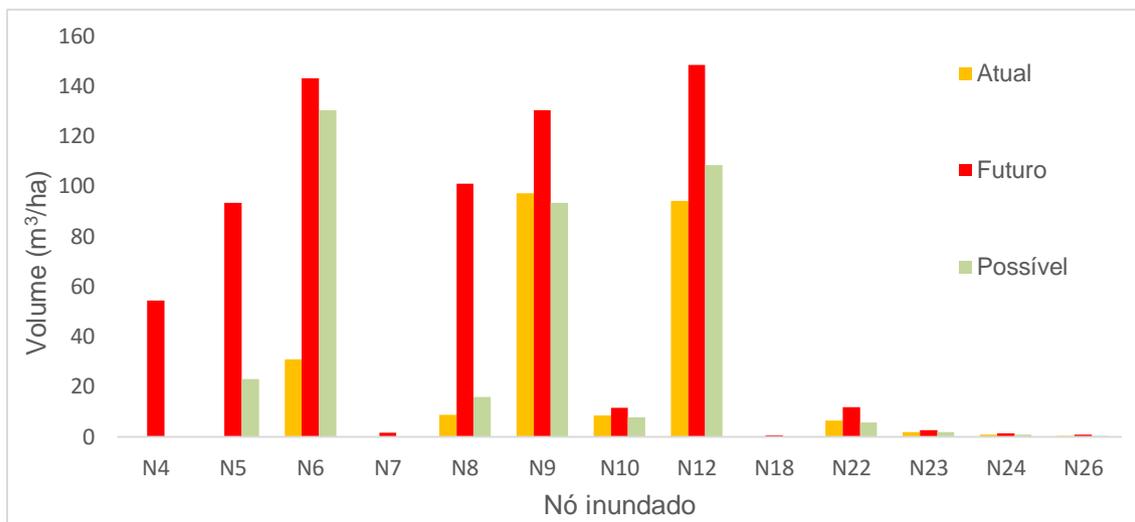


Figura 5-37. Volume extravasado por hectare de área drenada até o Nó para o tempo de retorno de 10 anos.

Observa-se que o cenário mais crítico quanto a problemas de drenagem é o cenário futuro, visto que a impermeabilização do solo é maior e não existem medidas preventivas ou corretivas para mitigação dos impactos hidrológicos.

A Figura 5-37 mostra que no cenário possível, ainda com medidas mitigadoras, restariam consideráveis volumes de extravasamento em alguns nós. Poder-se-ia pensar que soluções tipo reservatório *in-line* fossem possíveis, mas a magnitude dos mesmos seria incompatível com o espaço disponível, a não ser que houvesse grandes relocações de população. Por exemplo, para TR= 10 anos o N 12 exigiria encaixe de 4293 m³, o que corresponderia a um reservatório quadrado de aproximadamente 50 x 50 m de lados e 2 m de profundidade.

O cenário atual foi o que apresentou os menores volumes, o que demonstra que se houvesse uma manutenção das taxas permeáveis atuais da bacia, associada a inserção de infraestruturas de LID poderia diminuir ainda mais os volumes extravasados.

A partir dos resultados pode-se observar uma melhor eficiência na redução dos volumes escoados em medidas não estruturais, como manejo do uso e ocupação do solo, do que medidas estruturais, como as LID's. Porém as LID's auxiliam na redução do escoamento superficial, sendo uma alternativa viável para áreas que já estão consolidadas.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho avaliou através de simulação os impactos de infraestruturas de LID sobre inundações urbanas em uma sub-bacia em consolidação, onde duas propostas de LID foram considerados: pavimento permeável e áreas vegetadas, em combinação com um sistema de drenagem convencional para gestão de águas pluviais.

O uso do modelo SWMM apresentou-se adequado aos objetivos do trabalho, apresentando resultados coerentes quando comparados a outros estudos já realizados na simulação de infraestruturas de LID.

Com a caracterização do sistema de drenagem, foi possível simular seu funcionamento atual, em que os resultados foram coerentes com os problemas existentes na drenagem da bacia. Com isso foi possível a sugestão de um conjunto de soluções bem como sua localização, a fim de auxiliar na atenuação dos problemas hidrológicos encontrados na bacia. Através do uso de medidas estruturais sustentáveis, que visam à manutenção do balanço hídrico, os impactos da urbanização consolidada puderam ser minimizados.

Mesmo com todos os problemas que área apresenta, as políticas públicas da área são orientadas no sentido de consolidar essas áreas urbanas, incentivando a impermeabilização da bacia. Essas políticas permitem o adensamento populacional onde este ainda for possível, como forma de otimizar a infraestrutura disponível. Porém também orienta no âmbito legal a conservação e recuperação do patrimônio natural, além de ampliar e qualificar as áreas públicas de convívio, esporte, lazer, cultura e áreas verdes, o que favorece a implantação das infraestruturas de drenagem sustentável.

Os resultados obtidos para o cenário futuro demonstraram a ineficiência hidrológica das taxas de permeabilidade adotadas para a área de estudo no novo Plano Diretor do município de Viamão, o que irá potencializar os problemas com drenagem urbana existente. Esse fato ainda é agravado por não haver um plano de drenagem urbana para o município, onde se oriente a expansão da urbanização compatibilizada com a drenagem urbana.

Entendeu-se que apenas o uso das medidas estruturais propostas, não é capaz de minimizar todos os impactos hidrológicos da eventual má gestão do uso do solo. Os efeitos sobre os volumes dos hidrogramas foram maiores quando reduziu-se a ocupação, aumentando a permeabilidade do solo, como no caso das sub-bacias de montante do que

nas bacias que mantiveram altas taxas de impermeabilização compatibilizadas com infraestruturas de LID.

Porém o desempenho das infraestruturas de LID foi satisfatório, pois auxiliou na redução dos volumes, principalmente em chuvas de menor intensidade. As LID's combinadas reduziram grande parte do volume (14%) gerado pelo efeito da urbanização consolidada (aumento de 16%) para um tempo de retorno de 2 anos.

Esse desempenho diminuiu para chuvas maiores. Uma alternativa para diminuir ainda mais o volume escoado é a inserção de medidas de controle nos lotes, que diminuirá a vazão de lançamento na rede pluvial. Essa alternativa não foi considerada para este trabalho devido à baixa renda da população local da área de estudo. Por isso optou-se por medidas em áreas públicas.

A eficiência das LID's é substancialmente afetada por suas dimensões e propriedades. No caso deste trabalho os pavimentos permeáveis demonstraram maior eficiência na redução dos volumes escoados sobre as áreas vegetadas.

No entanto as LID tem sua eficiência afetada pelo tempo se não houver uma correta manutenção das mesmas. É necessário o comprometimento do órgão público responsável pela drenagem das cidade com a correta e periódica manutenção das infraestruturas de drenagem, principalmente as de LID.

De acordo com o que vem sendo desenvolvido nos processos de urbanização de assentamentos informais com urbanização consolidada observa-se que não existe uma solução específica para resolução dos problemas de drenagem desses locais. Isso ocorre principalmente devido às peculiaridades de cada área e as diversas problemáticas encontradas. O que se demonstrou apropriado é a adoção de um conjunto de soluções, que seja adaptável a cada local.

Os resultados deste estudo sugerem que as infraestruturas de LID devem ser discutidas como um novo método de controle de inundação urbana, juntamente com o manejo do uso do solo e dos efluentes sanitários, buscando soluções integradas para o correto manejo das águas pluviais.

Para trabalhos futuros sugere-se uma modelagem das áreas inundáveis da bacia, para possíveis medidas de relocação da população destas regiões, visto que a área já não possui espaços disponíveis para grandes obras de engenharia.

Sugere-se também a simulação com outras infraestruturas de drenagem de baixo impacto, como telhados verdes e microreservatórios, que poderiam ser instalados nas residências se houvesse incentivo público da prefeitura local, considerando a renda da população da bacia. Também deveriam ser realizados ensaios de infiltração na bacia possibilitando uma melhora nas condições do modelo comparados a eventos reais.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKAN, A. O., **Urban Stormwater Hydrology - A Guide to Engineering Calculations**, Lancaster, Pennsylvania: Technomic Publishing Co., 1993.

ACIOLI, L. A. et al. Implantação de um módulo experimental para a análise da eficiência de pavimentos permeáveis no controle do escoamento superficial na fonte. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, XV., 2003, Curitiba. **Anais...** Curitiba: ABRH, 2003. 18p.

ARAUJO, P. R. de; TUCCI, C. E. M.; GOLDENFUM, J. A. Avaliação da Eficiência dos Pavimentos Permeáveis na Redução de Escoamento Superficial. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 5, n. 3, p.21-29, set. 2000.

BAPTISTA, M. B.; NASCIMENTO, N. O.; BARRAUD, S. **Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana**, Porto Alegre: ABRH, 2005. 318 p.

BERTONI, J. C. **Simulação Matemática de uma Cheia Urbana sob Condições de Registros Escassos: Aplicação do modelo SWMM**. In: BRAGA, B.; TUCCI, C.; TOZZI, M. (Org.). **Drenagem Urbana: Gerenciamento Simulação Controle**. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS/ABRH, 1998. p. 81-89.

BRASIL. Antônio Luiz Coimbra de Castro. **Manual de Desastres Naturais**. Brasília: Ministério da Integração Nacional, 2003.

BOSLEY, E. K. **Hydrologic evaluation of low impact development using a continuous, spatially-distributed model**. 2008. 348 f. Dissertação (Mestrado), Virginia Polytechnic Institute And State University, Blacksburg, 2008.

CAMPANA, N.; TUCCI, C. E. M. Estimativa de Área Impermeável de Macro Bacias Urbanas. **Revista Brasileira de Engenharia**. Caderno de Recursos Hídricos. v.12, n. 2, p.79-94, 1994.

CRUZ, M. A. S.; SOUZA, C. F.; TUCCI, C. E. M. Controle da Drenagem Urbana no Brasil: Avanços e mecanismos para sua sustentabilidade. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, XVII, 2007, São Paulo. **Anais...** . São Paulo: ABRH, 2007.

FRANCISCO, A. M.; FERRAREZI, A. M.; SCATALON, A. P.; NARIMATSU, V. T. Repensando os Espaços da Cidade: Diretrizes Urbanísticas para Áreas de Preservação

Permanente Urbanas Consolidadas. In: Seminário Nacional sobre o Tratamento de Áreas de Preservação Permanente em Meio Urbano e Restrições Ambientais ao Parcelamento do Solo, III., 2014, Belém. **Anais...** . Belém: UFPA, 2014. p. 1 - 18.

FRITZEN, M.; BINDA, A. L. Alterações no Ciclo Hidrológico em Áreas Urbanas: Cidade, hidrologia e impactos no ambiente. **Ateliê Geográfico**, Goiânia, v. 5, n. 3, p.239-254, dez. 2011.

FUJIMOTO, N. S. V. M. Considerações Sobre o Ambiente Urbano: Um estudo com ênfase na geomorfologia urbana. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo: USP, v. 16, p.76-80, out. 2005.

FUJIMOTO, N. S. V. M. Implicações Ambientais na Área Metropolitana de Porto Alegre - RS: Um estudo geográfico com ênfase na geomorfologia urbana. **GEOUSP: Espaço e Tempo**, São Paulo, n. 12, p.xx, 2002.

FURIGO, R. de F. R.; SILVA, C. C. do A. Avaliação de Desempenho e Parâmetros para Projeto de Redes de Esgotos em Favelas. **Emancipação**, Ponta Grossa, v. 4, n. 1, p.103-128, 2004.

GOLDENFUM, J. A., CAMAÑO, B., SILVESTRINI, J. **Chuvas Intensas em Porto Alegre - Determinação de Curvas I-D-F**. Porto Alegre: IPH-UFRGS. 1990. 26p.

HASELBACH, L. M.; VALAVALA, S.; MONTES, F. Permeability predictions for sand-clogged Portland cement pervious concrete pavement systems. **Journal of Environmental Management**, v. 81, n. 1, p.42-49, out. 2006. Elsevier BV.

HASENACK, H.; WEBER, E. J.; LUCATELLI, L. M. L. 2010. Base Altimétrica Vetorial Contínua do município de Porto Alegre na escala 1:1.000 para uso em sistemas de informação geográfica. Porto Alegre, UFRGS-IB- Centro de Ecologia. ISBN 978-85-63843-03-6. Disponível em <http://www.ecologia.ufrgs.br/labgeo>. Acesso em 15 de junho de 2014.

HERZOG, C. P.; ROSA, L. Z. Infraestrutura Verde: Sustentabilidade e Resiliência para a Paisagem Urbana. **Revista Labverde**, USP/São Paulo, v. 1, n. 1, p.92-115, 2010.

HÜFFNER, A.; MENDES, C. A. B. Impactos Hidrológicos Decorrentes da Expansão Urbana na Bacia Barragem Mãe d'água, Viamão - RS. In: Simpósio Brasileiro de

Recursos Hídricos, XX, 2013, Bento Gonçalves. **Anais...** . Bento Gonçalves: ABRH, 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. (2007). **Metodologia das estimativas das populações de 128 municípios e distrito federal para 2007**. Rio de Janeiro: IBGE. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/contagem2007/metodologia_estimativas.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. (2010). **Censo Demográfico 2010**. Rio de Janeiro: IBGE. Disponível em: <<http://censo2010.ibge.gov.br/resultados.html>>. Acesso em: 15 jan. 2015.

IPH- Instituto de Pesquisas Hidráulicas. **Plano Diretor de Drenagem Urbana: Manual de Drenagem Urbana**. Volume VI. Prefeitura Municipal de Porto Alegre. Porto Alegre: setembro de 2005.

JIA, H.; LU, Y.; YU, S. L.; CHEN, Y. Planning of LID–BMPs for urban runoff control: The case of Beijing Olympic Village. **Separation And Purification Technology**, [S.I.], v. 84, p.112-119, 2012.

JIA, H. F., YAO, H. R., TANG, Y., YU, S. L., ZHEN, J. X., LU, Y. W. Development of a multi-criteria index ranking system for urban runoff best management practices (BMPs) selection. **Environmental Monitoring and Assessment**, 185 (9), p.7915-7933, fev. 2013.

KORKEALAAKSO, J.; KUOSA, H.; NIEMELÄINEN, E.; TIKANMÄKI, M. **Review of pervious pavement dimensioning, hydrological models and their parameter needs. State-of-the-Art**. Finlândia: VTT Technical Research, 2014.

LEE, J.; HYUN, K.; CHOI, J.; YOON, Y.; GERONIMO, F. K. F. Flood Reduction Analysis on Watershed of LID Design Demonstration District Using SWMM5. **Desalination and Water Treatment**, Hopkinton, 38:1-3, p.326-332, Jan. 2012.

MARSALEK, J.; JIMÉNEZ-CISNEROS, B. E.; MALMQUIST, P. -A.; KARAMOUZ, M.; GOLDENFUM, J.; CHOCAT, B. Urban Water Cycle Processes and Interactions. **Urban Water Series**. UNESCO, v. 2. 2007.

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

MIGUEZ, M. G.; MASCARENHAS, F. C. B.; MAGALHÃES, L. P. C. Multifunctional Landscapes for Urban Flood Control in Developing Countries. **International Journal of Sustainable Development and Planning**, Southampton, v. 2, n. 2, p.153-166, jun. 2007.

MIGUEZ, M. G., MAGALHÃES, L. P. C., “Urban Flood Control, Simulation and Management: an Integrated Approach”. In: PINA FILHO, A. C., PINA, A. C. (eds), **Methods and Techniques in Urban Engineering**, 1 ed., cap. 10, India, Intech, 2010.

MOTA, F. S. da; GOEDERT, C. O.; LOPES, N. F.; GARCEZ, J. R. B.; GOMES, A. da S. Balanço Hídrico do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 5, p.1-27, 1970.

PARKINSON, J.; TAYLER, K.; MARK, O. Planning and Design of Urban Drainage Systems in Informal Settlements in Developing Countries. **Urban Water Journal**, v. 4, n. 3, p. 137-149, set. 2007.

POLETO, C.; MERTEN, G. H. Urban Watershed Studies in Southern Brazil. **Journal of Urban and Environmental**, v. 1, n. 2, p.70-78, ago. 2007.

POLETO, C. Alterações Morfológicas em um Canal Fluvial Urbano no Contexto Antrópico, Social e Ambiental: um estudo de caso. **Acta Scientiarum Technology**, Maringá, v. 22, n. 4, p.357-364, 9 jun. 2011.

POMPÊO, C. A. Drenagem Urbana Sustentável. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 5, n. 1, p.15-23, mar. 2000.

QIN, H.; LI, Z.; FU, G. The Effects of Low Impact Development on Urban Flooding Under Different Rainfall Characteristics. **Journal of Environmental Management**, 129, p.577-585, ago. 2013.

RANGEL, M. L. **A Percepção sobre a Água na Paisagem Urbana: Bacia Hidrográfica da Barragem Mãe D'Água - Região Metropolitana de Porto Alegre/RS**. 2008. 164 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

RIGHETTO, A. M. (org.). **Manejo de Águas Pluviais Urbanas**. Rio de Janeiro: ABES, 2009. 396 p.

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: JAWRA**, p.1-12, 2015.

ROSSMAN, L. A., **Storm Water Management Model: User's Manual V.5**, New York, US EPA, 2008. 261p.

SANTOS, R. B.; MIGUEZ, M. G.; VERÓL, A. P.; MASCARENHAS, F. C. B.; SERPA, M. C. Soluções Alternativas para Sistemas de Drenagem Urbana Integrando Áreas de Favelas com a Cidade Formal. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, XX, 2013, Bento Gonçalves. **Anais...** Bento Gonçalves: ABRH, 2013.

SEHAB; São Paulo. **Plano Municipal da Habitação Social da Cidade de São Paulo**. São Paulo: Prefeitura da Cidade de São Paulo, 2011.

SILVEIRA, A. L. L. da; GOLDENFUM, J. A. Metodologia generalizada para pré-dimensionamento de dispositivos de controle pluvial na fonte. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto alegre, v. 12, n. 2, p.157-168, 2007.

SILVEIRA, A. L. L., 2000, **Impactos Hidrológicos da Urbanização em Porto Alegre**, In: TUCCI, C. E. M.; Marques, D. M., 2000, Avaliação e Controle da Drenagem Urbana, Editora da Universidade/UFRGS, Porto Alegre, p. 153-163.

SILVEIRA, A. L. L. **Drenagem Urbana: Aspectos de Gestão**. 1º Ed. Porto Alegre, 2002. P. 1-70.

SILVEIRA, A. L. L. **Curva-chave**. Porto Alegre, UFRGS, 2014. (Comunicação Pessoal).

TERSTRIEP, M. L., STALL, J. B. **The Illinois Urban Drainage Area Simulator**, ILLUDAS, ISWS-74-Bul 58, Illinois State Water Survey, Urbana, IL, 1974.

TUCCI, C; COLLISCHONN, W. Drenagem Urbana e Controle de Erosão. In: Simpósio Nacional de Controle da Erosão, VI., 1998, Presidente Prudente. **Anais...** . Presidente Prudente, 1998.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. Porto Alegre: ABRH - Editora da UFRGS, 1998. 669 p.

TUCCI, C. E. M. Plano Diretor de Drenagem Urbana: Princípios e Concepção. In: TUCCI, C. E. M.; GOLDENFUM, J. A.; DEPETTRIS, C. A.; PILAR, J. V. (Org.). **Hidrologia Urbana na Bacia do Prata**. Porto Alegre: ABRH - Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2000a. p. 109-120.

TUCCI, C. E. M. Coeficiente de Escoamento e Vazão Máxima de Bacias Urbanas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 5, n. 1, p.61-68, 2000b.

TUCCI, Carlos E. M. **Gestão de Águas Pluviais Urbanas**. Ministério das Cidades – Global Water Partnership - World Bank: Unesco, 2005.

TUCCI, C. E. M. Águas Urbanas. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 22, n. 63, p.97-112, 2008.

UNITED STATES DEPARTMENT OF DEFENSE [USDoD]. “Unified Facilities Criteria (UFC) Design: Low Impact Development Manual”. 96 p. 2004.

URBONAS, B. e STAHR, P. **Stormwater Best Management Practices and Detention**, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. 450p.1993.

VIAMÃO. Lei Municipal nº 4.154, de 25 de novembro de 2013. Institui o Plano Diretor, define princípio, políticas, estratégias e instrumentos para o desenvolvimento municipal e para o cumprimento da função social da propriedade no município de Viamão e dá outras providências. **Diário Oficial**. Viamão, 2013.