



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA DA BACIA DE DETENÇÃO SANTA LÚCIA  
UTILIZANDO O PROGRAMA HEC-HMS

EVANDRO ALEXANDRE PERCHÉ

BELO HORIZONTE - MG

2015

Evandro Alexandre Perchê

SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA DA BACIA DE DETENÇÃO SANTA LÚCIA  
UTILIZANDO O PROGRAMA HEC-HMS

CEFET-MG  
2015

PERCHÉ, Evandro Alexandre.

S---

Simulação Hidrológica da Bacia de Detenção  
Santa Lúcia utilizando o programa HEC HMS  
/ Evandro Alexandre Perché. – Registro : 2015

--f.; -- cm

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra. Luciana Peixoto Amaral

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Centro Federal de  
Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2015

Gestão de recursos hídricos 2. Controle de enchentes 3. Simulação  
hidrológica I. Perché, Evandro Alexandre. Centro Federal de Educação  
Tecnológica de Minas Gerais. III. Simulação hidrológica da bacia de  
detenção Santa Lúcia, utilizando o programa HEC-HMS.

EVANDRO ALEXANDRE PERCHÉ

SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA DA BACIA DE DETENÇÃO SANTA LÚCIA  
UTILIZANDO O PROGRAMA HEC HMS

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Ambiental e Sanitarista.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra. Luciana Peixoto Amaral

BELO HORIZONTE  
2015

EVANDRO ALEXANDRE PERCHÉ

SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA DA BACIA DE DETENÇÃO SANTA LÚCIA  
UTILIZANDO O PROGRAMA HEC HMS

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Ambiental e Sanitarista.

Data de aprovação: 10/07/2015.

Banca Examinadora:

---

Prof<sup>a</sup> Dra. Luciana Peixoto Amaral – Orientadora

---

Prof<sup>a</sup>. MSc. Lilia Maria de Oliveira

---

Prof. MSc. André Luiz Marques Rocha

## AGRADECIMENTOS

A Deus por iluminar meus pensamentos, caminhos e sempre abençoar a minha vida.

Aos meus pais por me ensinarem o valor da educação e dos estudos e pelo amor sempre incondicional.

Aos meus irmãos pela constante motivação e incentivo e toda a minha família que, de uma ou de outra forma, estiveram comigo nesta jornada.

À minha esposa e companheira Isis, pelo carinho, compreensão, incentivo constante.

A todos os meus amigos, presentes ou a distância, pelo apoio.

À minha orientadora, Profa. Dra. Luciana Peixoto Amaral, pelo imprescindível e valioso apoio prestado além, da confiança, dedicação, solicitude e ensinamentos em todas as fases deste trabalho.

Ao Prof. MSc. Marcos Veloso de Menezes pela colaboração e incentivo.

Ao Prof. Dr. Carlos Wagner Gonçalves Andrade Coelho pelo auxílio com o programa ArcGis.

Ao Eng. Gustavo Coimbra Amaral pela disponibilidade em auxiliar na aplicação do programa HEC-HMS.

À SUDECAP, especialmente a Marise Aparecida Queiroz, do Departamento de Obras Emergenciais / Diretoria de Manutenção pelo auxílio na obtenção de dados e parâmetros utilizados nesta monografia.

Ao CEFET-MG e a todos os professores do Departamento Ciência e Tecnologia Ambiental a minha grata satisfação de conviver e muito aprender.

“Do rio que tudo arrasta se diz que é violento. Mas ninguém diz: violentas as margens que o comprimem...”

Bertolt Brecht

PERCHÉ, Evandro Alexandre; *Simulação hidrológica da bacia de detenção Santa Lúcia utilizando o programa HEC-HMS*. 2015. 62f. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Departamento de Ciência e Tecnologia Ambiental, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

O desenvolvimento urbano é responsável por inúmeros impactos no meio ambiente, principalmente no ciclo hidrológico, tais como o aumento do escoamento superficial e a ocorrência de enchentes. Os sistemas de drenagem são técnicas estruturais que surgiram para contornar o problema das enchentes. As técnicas estruturais de drenagem são representadas pelos reservatórios ou bacias de detenção, retificação e canalização de rios, construção de diques e polders. As medidas não estruturais são caracterizadas pelo zoneamento urbano, a convivência com cheias e sistemas de alerta. Já as medidas compensatórias são exemplificadas pelo uso de pavimento poroso, armazenamento em telhados, microrreservatórios de detenção domiciliares e poços subterrâneos. A multiplicidade de técnicas e a possibilidades de diversos arranjos de alternativas de projeto tornou complexa a tarefa do tomador de decisão na concepção de sistemas de drenagem, já que, envolve critérios econômicos, hidrológicos, ambientais, entre outros. Logo, a simulação hidrológica entra como uma importante ferramenta, pois permite antever os impactos decorrentes de inúmeros cenários hipotéticos. Neste sentido, esta pesquisa tem como objetivo a simulação hidrológica da bacia de detenção Santa Lúcia, em Belo Horizonte–MG, utilizando o programa HEC-HMS. A metodologia proposta foi aplicada a um estudo de caso, envolvendo a coleta de dados e informações sobre a área de estudo, de dados hidrológicos da região, e a simulação hidrológica, utilizando o programa HEC-HMS. Foram realizadas simulações para um tempo de retorno de 50 anos e chuvas com duração de 5, 10, 30 e 60 minutos. Os resultados demonstraram que a bacia de detenção Santa Lúcia é capaz de reduzir a vazão de pico à montante na faixa de 78 a 88% e futuros estudos devem ser empregados, a fim de realizar uma maior aferição deste modelo para esta bacia, bem como estudar a viabilidade técnica da bacia de detenção Santa Lúcia para receber outros volumes hídricos de locais próximos que atualmente sofrem com as enchentes.

Palavras-Chave: Gestão de recursos hídricos. Controle de enchentes. Simulação hidrológica. Bacias de detenção.

## ABSTRACT

The urban development is related to major changes in the environment, especially in the water cycle, which lead to impacts such as increased runoff and the occurrence of floods. Drainage systems have emerged to circumvent the problem of flooding. Structural techniques drainage are represented by reservoirs or detention basins, river rectification and canalization, construction of dams and polders. Non-structural measures are characterized by zoning, living with floods and warning systems. As the compensatory measures are exemplified by the use of porous pavement, storage on rooftops, micro reservoir of detention and underground wells. The multiplicity of techniques and possibilities of the various arrangements and the project alternatives has complicated the tasks of the decision-maker's in the project of drainage systems, as it involves economic, hydrological, environmental, and others. Therefore, the hydrological simulation comes to be an important tool because it allows the impacts of numerous hypothetical scenarios. This research aims to do the hydrological simulation of Santa Lucia detention basin, in Belo Horizonte-MG, using the HEC-HMS program. The methodology proposes to do a case study involving the gathering data of the area of study, the hydrological data of the region and the hydrologic simulation using the HEC-HMS program. Simulations were performed for a return time of last 50 years and 5, 10, 30 and 60 minutes of the rainfall. The results showed that the detention basin Santa Lucia reduced the peak discharge about the 78-88% and further studies must be implemented to measure better this model, as well to do another studies of the technical feasibility of Santa Lucia detention basin for then, receives other water volumes of nearby places that suffer from flooding.

Keywords: Water resources management. Flood control. Hydrological simulation. Detention basins.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Conseqüências do aumento da urbanização e da densidade de construções. ....	19
Figura 2 - Visualização geral de um sistema clássico de drenagem urbana.....	20
Figura 3 - Visualização geral de um sistema alternativo de drenagem urbana. ....	22
Figura 4 - Modelo esquemático típico de uma bacia de detenção.....	23
Figura 5 - Exemplo de bacia de detenção a céu aberto. ....	24
Figura 6 - Exemplo de bacia de detenção subterrâneo. ....	24
Figura 7 - Modelo esquemático de reservatório em série in-line. ....	25
Figura 8 - Modelo esquemático de reservatório em paralelo off-line. ....	25
Figura 9 - Leis relacionadas ao uso e ocupação do solo na cidade de Belo Horizonte. ....	28
Figura 10 - Exemplo de atuação do programa DRENURBS. ....	29
Figura 11 - Modelo de Hidrograma tipo.....	31
Figura 12 - Isoietas de precipitações totais anuais médias da região .....	34
Figura 13 - Imagem da Barragem Santa Lúcia.....	42
Figura 14 - Mapa de Localização da bacia de detenção Santa Lúcia. ....	43
Figura 15 - Poço Vertical.....	45
Figura 16 - Canal de Emergência. ....	45
Figura 17 - Torre de tomada d'água.....	46
Figura 18 - Canal de água pluvial.....	46
Figura 19 - Boca de lobo. ....	47
Figura 20 - Escada Hidráulica. ....	47
Figura 21 - Modelo esquemático do parque Santa Lúcia. ....	48
Figura 22 - Ponto de chegada de água.....	49
Figura 23 - Delimitação da área de contribuição com auxílio do software ArcGis. ....	50
Figura 24 – Representação da área de estudo no programa HEC-HMS. ....	52
Figura 25 - Gráfico do reservatório para TR-50 anos e chuva de 5 minutos. ....	54
Figura 26 - Gráfico do reservatório para TR-50 anos e chuva de 10 minutos .....	55
Figura 27 - Gráfico do reservatório para TR-50 anos e chuva de 30 minutos .....	56
Figura 28 - Gráfico do reservatório para TR-50 anos e chuva de 60 minutos .....	57

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação de solos para estimativa do parâmetro CN.....	38
Tabela 2 - Valores do parâmetro CN para bacias urbanas. ....	38
Tabela 3 - Parâmetros obtidos e estimados para $A_c$ , lag time e CN.....	50
Tabela 4 - Distribuição temporal das chuvas (em mm) para $TR = 50$ anos. ....	51
Tabela 5 - Dados gerais da bacia de detenção. ....	51
Tabela 6 - Relação Cota x Volume x Descarga. ....	52
Tabela 7 - Métodos utilizados nas simulações. ....	53
Tabela 8 - Síntese dos resultados da simulação hidrológica .....	57

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

CEFET-MG – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

CN – Curver Number

DCTA- Departamento de Ciência e Tecnologia Ambiental

FCTH- Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica

HEC-HMS- Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System.

IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

PBH- Prefeitura Municipal de Belo Horizonte

ReCESA- Rede de Capacitação e Extensão Tecnológica em Saneamento Ambiental

SCS- Soil Conservation Service

SRTM- Shuttle Radar Topography Mission

SWMM- Storm Water Management Model

SUDERHSA- Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

USACE – U.S. Army Corps of Engineers,

## SUMÁRIO

1.	MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	14
2.	INTRODUÇÃO .....	15
2.1	Objetivos .....	17
2.2	Estrutura da monografia.....	17
3.	REVISÃO DE LITERATURA.....	18
3.1	Técnicas de Drenagem Urbana .....	18
3.1.1	Bacias de detenção .....	22
3.2	Drenagem urbana na cidade de Belo Horizonte.....	27
3.3	Estudos Hidrológicos na Drenagem Urbana.....	30
3.3.1	Risco Hidrológico e Tempo de Retorno .....	30
3.3.2	Escoamento superficial.....	30
3.3.3	Hidrograma unitário .....	32
3.3.4	Precipitações Máximas .....	33
3.3.5	Método dos Blocos Alternados .....	35
3.3.6	Distribuição temporal das chuvas: Metodologia de Huff.....	35
3.3.7	Método SCS.....	37
3.4	Modelos hidrológicos e parâmetros utilizados na drenagem urbana .....	39
4.	METODOLOGIA .....	42
4.1	Área de estudo: bacia de detenção Santa Lúcia .....	42
4.2	Dados Hidrológicos e Hidráulicos .....	49
4.3	Simulações hidrológicas da bacia Santa Lúcia .....	52
5.	RESULTADOS.....	54
6.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	58
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFIAS.....	59

## 1. MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

Segundo Baptista, Nascimento e Barraud (2005), a urbanização implica, forçosamente, em alterações significativas no meio ambiente, de forma geral, e nos processos hidrológicos, através da ação direta nos cursos d'água e nas superfícies das bacias hidrográficas.

As enchentes aumentam a sua frequência e a sua magnitude, não só devido à impermeabilização causada pela ocupação do solo, mas também devido à construção da rede de coletores de águas pluviais, que acelera o encaminhamento das águas para os vales (MATIAS, 2006).

As enchentes ocorrem com frequência em Belo Horizonte e a prefeitura realiza constantemente ações informativas e obras contra enchentes em diversas regiões da cidade (PBH, 2014).

Visto o atual cenário, a modelagem pode atuar como uma ferramenta imprescindível na previsão de cenários futuros, apresentando a rápida resposta nos resultados quando na alteração dos parâmetros, vantagem esta, de suma importância para o uso dessas ferramentas em sistemas de alerta (SANTOS, 2013).

A escolha do modelo de simulação hidrológica HEC-HMS para a realização do trabalho se deu devido as suas aplicações bem sucedidas relatadas em diversos trabalhos publicados em bacias hidrográficas brasileiras, pela gratuidade e uso livre do software, pela facilidade de uso além, do razoável realismo hidrológico de sua estrutura.

A utilização de ferramentas computacionais pode auxiliar em estudos de planejamento urbano, na tomada de decisão pelos gestores públicos, fornecendo dados e informações importantes para o zoneamento de planícies de inundação, os projetos de drenagem urbana, a implementação de sistemas de alerta e o planejamento da ocupação e uso do solo da bacia.

Assim, o presente estudo de simulação hidrológica da bacia de retenção Santa Lúcia, em Belo Horizonte – MG, utilizando o programa HEC-HMS pode auxiliar na avaliação conjunta das estruturas já existentes no sistema de drenagem atual às técnicas alternativas de drenagem, de forma a diminuir a sobrecarga em sistemas semelhantes.

## 2. INTRODUÇÃO

O aumento da taxa de impermeabilização dos solos, verificado nas últimas décadas, é decorrente da mudança de padrões na ocupação e uso do solo, onde se percebe a massiva configuração do meio urbano e a redução do espaço e ocupação rural. Tais padrões acarretaram grandes alterações no ciclo hidrológico. Logo, o desenvolvimento equilibrado e estável do habitat humano tornou-se fato preocupante visto este crescimento desordenado (MANO, 2008). Estes processos fizeram com que os eventos de cheias nas cidades multiplicassem seu poder de atuação, causando prejuízos dos mais diversos graus e tornando-se um dos maiores problemas contemporâneos.

Os sistemas para contenção destes eventos de cheias são classificados em convencionais e alternativos. As soluções clássicas têm como premissa a condução das águas pluviais para jusante das áreas urbanizadas, realizando seu lançamento em algum corpo receptor. Já as alternativas baseiam-se na infiltração e/ou na retenção das águas de chuva, propiciando um menor volume de escoamento superficial das águas e uma melhor distribuição das vazões no tempo. Estes sistemas são concebidos por métodos estruturais, que incluem soluções tradicionais, tais como ampliação dos condutos, retificação e canalização de cursos d'água, e soluções compensatórias, tais como microrreservatórios em lotes, bacias de retenção e trincheiras de infiltração. Outra forma de evitar perdas humanas e financeiras a partir de enchentes consiste nas chamadas soluções não estruturais, tais como o zoneamento urbano, a convivência com cheias, sistemas de alerta, construções mais apropriadas e sistemas de seguro contra enchentes (FRANCO, 2004).

Uma alternativa de grande potencial no controle de enchentes é a implementação de bacias de retenção onde, de acordo com Tucci (2005), este sistema funciona retendo o volume do hidrograma durante as enchentes, que reduz o pico e o impacto a jusante.

Baptista, Nascimento e Barraud (2005) classificam as bacias de retenção como estruturas que contribuem para a redução dos impactos da urbanização sobre os processos hidrológicos em bacias hidrográficas urbanas.

Canholi (2005) afirma que estas bacias demonstram ser extremamente eficazes para grandes cidades com elevadas taxas de impermeabilização, tanto pelo rápido impacto em inundações localizadas, quanto no custo relativamente baixo.

Para otimizar a construção destas bacias de retenção, ou mesmo para avaliar a eficiência de reservatórios já construídos, os estudos hidrológicos e a modelagem apresentam-se como importantes ferramentas.

Estudos hidrológicos envolvendo a quantificação das vazões máximas de projeto são uma das tarefas mais importantes da hidrologia, pois por meio desta quantificação são dimensionadas todas as estruturas hidráulicas relacionadas com o ciclo hidrológico (MACEDO, 2010).

Já os modelos hidrológicos nasceram dentro da necessidade de dar resposta às diferentes questões práticas e científicas, bem como explicar componentes da relação chuva-vazão como o escoamento superficial (SOUZA et al., 2012).

A atual diversidade dos modelos hidrológicos é justificada pela heterogeneidade física das bacias e dos processos envolvidos, que se diferenciam pelos dados utilizados, pela discretização temporal, das prioridades de representação dos processos e dos objetivos a serem alcançados (GONTIJO, 2007).

De acordo com Silva (2007), a utilização destes modelos permite antever os impactos decorrentes de inúmeros cenários hipotéticos, o que possibilita fundamentar as decisões de gestão de bacias por seus responsáveis legais.

Tucci (1998) ressalta que o uso destes modelos objetiva um maior entendimento do comportamento dos fenômenos hidrológicos na bacia, a análise de consistência e preenchimento de falhas, promover a previsão de vazão em tempo atual, auxiliar no dimensionamento e previsão de cenários de planejamento, avaliar os efeitos resultantes da modificação do uso do solo, entre outros.

De acordo com Tucci (2005), as limitações dos modelos hidrológicos estão relacionadas com a quantidade e a qualidade dos dados hidrológicos, a dificuldade de formulação matemática de alguns fenômenos e também à descrição espacial das variáveis envolvidas.

Dentre os diversos programas que tratam da temática, o software HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center- Hydrologic Modeling System) foi concebido para simular os processos de precipitação-vazão de sistemas de bacias hidrográficas. Tal programa suporta desde a modelagem de um pequeno escoamento hídrico urbano a um grande rio em uma bacia hidrográfica.

## 2.1 Objetivos

Esta pesquisa tem como objetivo principal a simulação hidrológica da bacia de detenção Santa Lúcia, em Belo Horizonte – MG, utilizando o programa HEC-HMS.

Paralelamente, os objetivos específicos foram:

- Coleta de dados e informações sobre a área de estudo; e
- Avaliar a capacidade de redução da vazão de pico para diferentes durações de chuva.

## 2.2 Estrutura da monografia

Esta monografia está organizada em sete capítulos.

A primeira parte do trabalho (capítulo 1) contém a motivação e justificativa para a realização desta pesquisa. Na segunda parte (capítulo 2) é apresentada uma introdução e os objetivos principais e específicos.

A terceira parte do trabalho (capítulo 3) contém a revisão bibliográfica de pesquisas referentes às técnicas de drenagem urbana, considerações sobre bacia de detenção, A drenagem urbana na cidade de Belo Horizonte e modelos hidrológicos.

Na quarta parte (capítulo 4) é abordada a metodologia utilizada nesta pesquisa, sendo este capítulo dividido em três etapas:

- Primeira etapa: Coleta de dados e informações da área de estudo, com visita *in loco* à bacia de Santa Lúcia e entorno;
- Segunda etapa: Coleta de dados Hidrológicos e Hidráulicos; e
- Terceira etapa: simulações hidrológicas da bacia de detenção Santa Lúcia, com a utilização do modelo HEC-HMS.

Na quinta parte do trabalho (capítulo 5) são apresentados os resultados e discussões.

A sexta parte (capítulo 6) contém as conclusões gerais e recomendações a futuros trabalhos.

### 3 REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 Técnicas de Drenagem Urbana

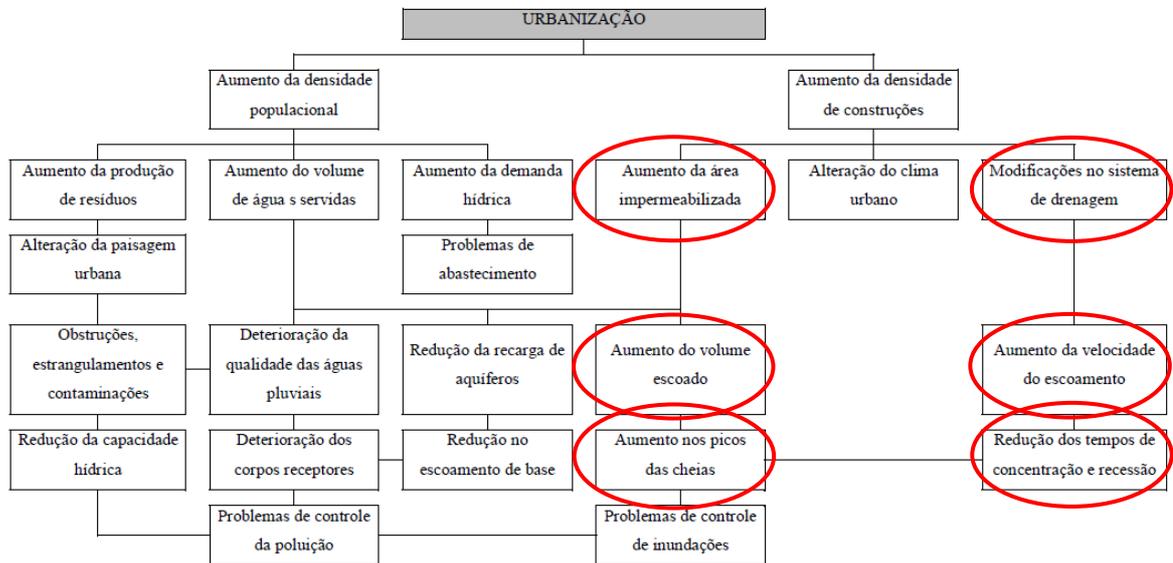
O censo do IBGE (2010) contabilizou que, do total da população brasileira, cerca de 84,4% estão localizadas na área urbana e 15,6% na área rural. Com a maioria da população vivendo em cidades, a aglomeração e ocupação desordenada resultaram em diversos problemas de infraestrutura, sociais e políticos. Segundo Nascimento e Heller (2005), a insuficiência de meios técnicos e de recursos humanos e financeiros dos municípios, em face do rápido crescimento em complexidade dos problemas a gerir, fez com que instrumentos de ordenação do desenvolvimento urbano, como diretrizes de uso do solo, sua implementação e fiscalização, se distanciassem da realidade. Logo, dentre os diversos problemas urbanos, as enchentes são uns dos grandes desafios a serem solucionados nas cidades brasileiras.

Matias (2006) afirma que a tendência natural da urbanização é a de ocorrer no sentido de jusante (foz) para montante (nascentes) na drenagem urbana, devido às características do relevo. Junto a isso, quando um loteamento é licenciado, em muitos casos, os municípios costumam apenas exigir que o sistema de drenagem pluvial seja eficiente no sentido de escoar a água que se precipita no loteamento. Então, a consequência dessa falta de planejamento e regulamentação pode traduzir-se em inundações nas áreas mais antigas, localizadas a jusante, que são sobretudo sentidas nas grandes cidades.

De acordo com Tucci (1997), os principais tipos de enchentes em áreas urbanas são caracterizados devido à urbanização e à ocupação de áreas ribeirinhas, bem como a problemas localizados. A primeira está relacionada às enchentes produzidas pela impermeabilização do solo e pelo aumento da capacidade de escoamento da drenagem através de condutos e canais. A segunda se dá devido às enchentes naturais onde o rio extravasa do seu leito menor, atingindo a várzea (leito maior), que foi ocupada pela população, devido à sequência de anos com enchentes pequenas ou pelo reduzido custo dessas áreas. Já em relação aos problemas localizados, as enchentes ocorrem pelas obstruções ao escoamento e por projetos inadequados e ineficientes.

Na **Figura 1** são apresentadas as diversas consequências relacionadas ao aumento da urbanização concomitante com a ampliação de obras civis.

**Figura 1 - Consequências do aumento da urbanização e da densidade de construções.**



**Fonte: Tucci (1997) apud Nakazone (2005).**

Cabe observar na **Figura 1** que vários itens descritos relacionam-se a esta pesquisa, visto que, o aumento da área impermeabilizada, modificações no sistema de drenagem, aumento do volume e da velocidade do escoamento, aumento dos picos de cheia e redução dos tempos de concentração e recessão são elementos importantes na verificação do comportamento de um sistema hídrico.

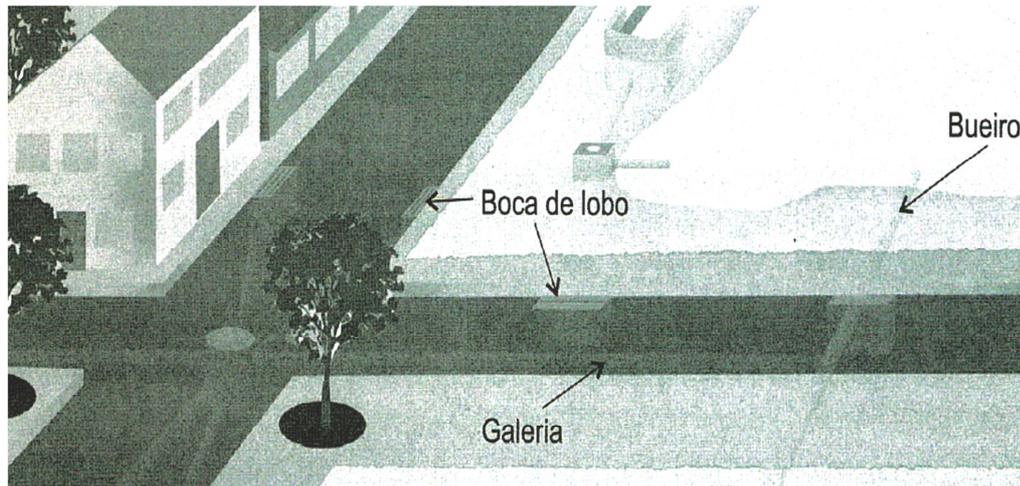
O aumento da área impermeabilizada está diretamente relacionado à pesquisa, pois se relaciona com a vazão, ou volume escoado por unidade de tempo, que é a principal grandeza que caracteriza um escoamento. Os problemas de controle de inundações e as modificações no sistema de drenagem são elementos controladores que interferem nas vazões máximas do escoamento e na propagação da água (CARVALHO e SILVA, 2006).

Franco (2004) relacionou diversas soluções técnicas para o controle de cheias urbanas, sendo elas, estruturais ou não e compensatórias. As técnicas estruturais são representadas pelos reservatórios ou bacias de retenção, retificação e canalização de rios, construção de diques e polders. As medidas não estruturais são caracterizadas pelo zoneamento urbano, a convivência com cheias e sistemas de alerta. Já as medidas compensatórias são exemplificadas pelo uso de pavimento poroso, valas de infiltração, armazenamento em telhados, microrreservatórios de retenção domiciliares e poços subterrâneos.

De acordo com a Rede de Capacitação e Extensão Tecnológica em Saneamento Ambiental (ReCESA) (2007), os sistemas clássicos de drenagem urbana são caracterizados pelo rápido escoamento das águas pluviais e constituídos por microdrenagem e macrodrenagem. Podem-se classificar como sistemas de microdrenagem os meio-fios, sarjetas, bocas-de-lobo, tubulações de ligação, galerias e poços de visita. Já o sistema de macrodrenagem são canais que, de forma geral, são representados por redes naturais de canais existentes antes da ocupação urbana, sendo compostos pelos córregos, riachos e rios localizados nos talvegues e vales.

Os sistemas clássicos de drenagem (**Figura 2**) possuem alguns inconvenientes. Por se tratar de um sistema que aumenta a velocidade do escoamento, as cheias são propagadas para jusante com maiores velocidades e as áreas urbanas localizadas a montante são, em muitos casos, responsáveis por inundações em áreas de jusante. Além disso, o sistema clássico não considera a manutenção e o controle da qualidade das águas. Com o aumento da ocupação urbana no espaço, principalmente, de forma desordenada, o sistema de drenagem já implantado apresenta falhas que provocam inundações, e a ampliação destes sistemas para solucionar tais falhas é onerosa (MOURA, 2004).

**Figura 2 - Visualização geral de um sistema clássico de drenagem urbana.**



**Fonte: Baptista, Nascimento e Barraud (2005).**

Os sistemas alternativos ou compensatórios, caracterizados pela retenção e infiltração das águas, visam à diminuição do volume e da velocidade da água, além da melhor distribuição das vazões, fato que auxilia na redução e incoerência de inundações (BRITO, 2006).

De acordo com o ReCESA (2007), os sistemas compensatórios apresentam diferentes técnicas de controle do escoamento sendo elas:

a) Técnicas para controle na fonte, que são implantadas junto a parcelas ou pequenos conjuntos de parcelas associadas à drenagem de pequenas áreas e são representadas pelas valetas, trincheiras e poços;

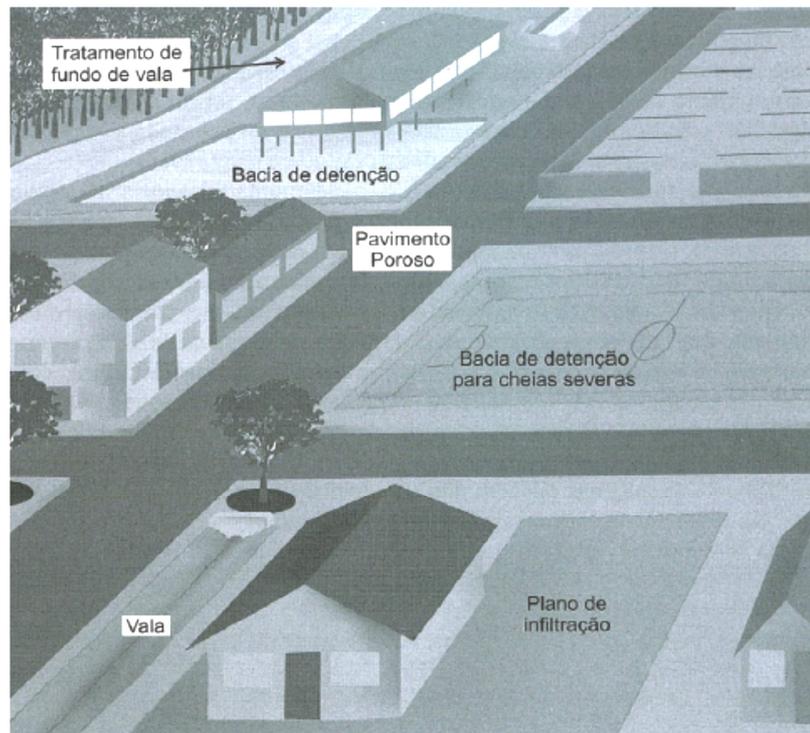
b) Técnicas para controle nos sistemas viários, implantadas junto aos sistemas de infraestrutura viária existentes representados pelos pavimentos porosos;

c) Técnicas para controle a jusante, implantadas junto a parcelas ou conjuntos de parcelas associadas à drenagem de grandes áreas caracterizadas pelas bacias de retenção e infiltração.

Estes sistemas compensatórios, quando adequadamente concebidos, são capazes de atuar na melhoria da qualidade das águas pluviais. Tais sistemas podem assumir múltiplas formas, podendo ser utilizados em diferentes escalas, desde pequenas parcelas, até projetos para cidades inteiras. Estes também podem ser facilmente integrados ao meio ambiente e, além disso, podem permitir diversos usos no meio urbano tais como áreas de estacionamento, áreas para a prática de esportes, áreas de parques ou de lazer inundáveis, entre outros (MOURA, 2004).

Na **Figura 3** são mostradas algumas aplicações de sistemas alternativos de drenagem urbana.

**Figura 3 - Visualização geral de um sistema alternativo de drenagem urbana.**



Fonte: Baptista, Nascimento e Barraud (2005).

### 3.1.1 Bacias de detenção

As bacias de detenção são estruturas de armazenamento de águas pluviais que regularizam as vazões à jusante. De acordo com Baptista Nascimento e Barraud, (2005) esta bacia atende a três funções principais:

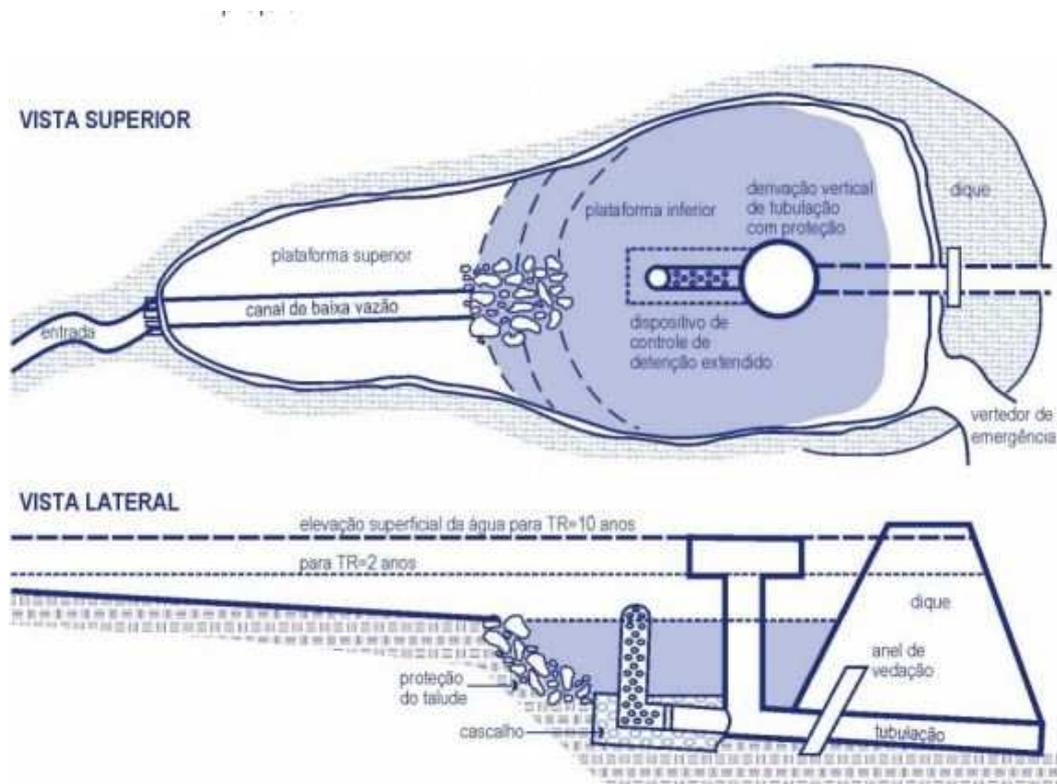
- Amortecimento de cheias geradas em contexto urbano como forma de controle de inundações;
- A eventual redução de volumes de escoamento superficial, nos casos de bacia de infiltração; e
- A redução da poluição difusa de origem pluvial no contexto urbano.

Logo, a bacia de detenção, quando ocorre um evento chuvoso, regulariza a vazão da água de escoamento superficial, pois é temporariamente armazenada acima do nível normal de detenção durante e imediatamente após a chuva (FCTH, 1999).

De acordo com Baptista, Nascimento e Barraud (2005), sua composição básica inclui um volume deixado livre para armazenamento de águas de escoamento e/ou a eventual infiltração, usualmente denominado volume de espera. Também é composta por uma estrutura hidráulica de controle de saída, usualmente uma estrutura de descarga de fundo, controlada ou

não por comportas ou válvulas e um vertedor de emergência. Na **Figura 4** é representado um esquema típico de uma bacia de detenção.

**Figura 4 - Modelo esquemático típico de uma bacia de detenção.**



Fonte: SUDERHSA (2002).

Algumas literaturas fazem uma distinção entre bacia de detenção e bacias de retenção. As bacias de retenção mantêm a água de escoamento estocada por longo período com o fim principal de decantação de partículas sólidas e usualmente operam com os sistemas de descargas fechados durante o evento pluvial. Já as bacias de detenção tem o objetivo principal de controlar inundações, logo, o armazenamento de água de escoamento se dá por um tempo curto e sua estrutura de saída permanece em operação durante todo o evento (BAPTISTA, NASCIMENTO E BARRAUD, 2005).

De acordo com Matias (2006), as bacias de detenção podem ser classificadas em: a céu aberto (**Figura 5**) e a seco com nível de água permanente ou subterrâneo (**Figura 6**). Além disso, de acordo com a disposição destes reservatórios em relação ao coletor ou canal de drenagem, podem também serem classificados como bacias em série *in-line* (**Figura 7**) ou em paralelo *off-line* (**Figura 8**). De acordo com Basso et al. (2013), o tipo *off-line* são

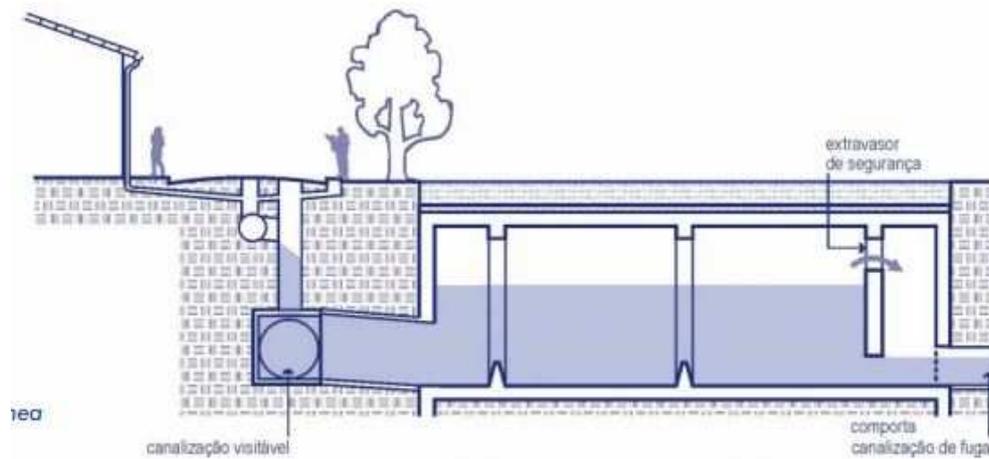
reservatórios que entram em funcionamento para determinados eventos, definidos em projeto; já os reservatórios *on-line*, recebem água de chuvas com intensidades baixas.

**Figura 5 - Exemplo de bacia de detenção a céu aberto.**



Fonte: Acervo pessoal de Erika Taminaga/ FCTH *apud* MOTA (2012).

**Figura 6 - Exemplo de bacia de detenção subterrâneo.**



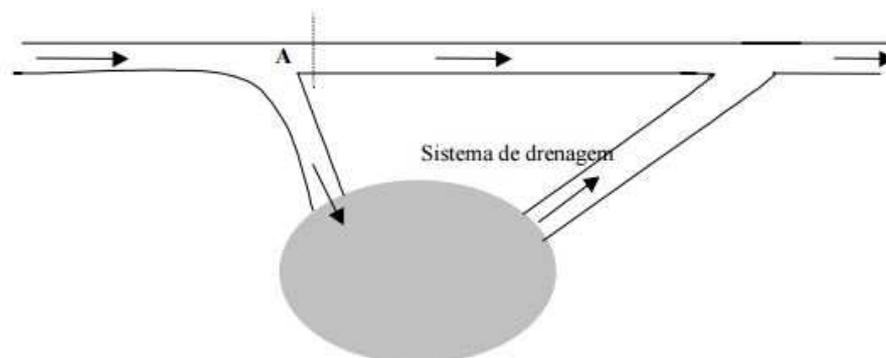
Fonte: SUDERHSA (2002).

**Figura 7 - Modelo esquemático de reservatório em série in-line.**



Fonte: MOTA (2012).

**Figura 8 - Modelo esquemático de reservatório em paralelo off-line.**



Fonte: IPH (2005).

As bacias a céu aberto são geralmente construídas em terra, com taludes reforçados ou diques de proteção lateral. Podem resultar da simples intercepção de uma linha de água em local de fisiografia favorável, através de uma pequena barragem ou açude, ou de zonas em depressão natural com solos de resistência e características adequadas (MATIAS, 2006).

Os reservatórios secos acumulam água pluvial apenas em períodos específicos (duração máxima da ordem de alguns dias), correspondentes à ocorrência de precipitações mais ou menos significativas. Já os reservatórios com nível de água permanente possuem água, mesmo durante os períodos de ausência de precipitação, pois o nível freático atingido em tempo seco é o condicionante (SOUZA *et al.*, 2013).

Segundo Souza *et al.* (2013), estas bacias necessitam de constante manutenção e estas intervenções estão diretamente relacionadas ao tipo de estrutura e sua localização, bem como

seu uso. Neste processo de manutenção, estão inclusos inspeções periódicas, limpezas de estruturas e dispositivos existentes, replantio de vegetação, reparos de estruturas danificadas e remoção dos resíduos sólidos acumulados em seu leito e nos sedimentos. Além destas, os autores citam que se faz necessária uma manutenção mais específica referentes às outras funcionalidades da bacia de detenção, quando seu uso não se atem somente ao controle de cheias, tais como a presença de parques lineares e equipamentos de lazer no local.

De acordo com Lima e Silva (2006), para o dimensionamento e a implantação da bacia de detenção deve-se conhecer previamente a topografia, a rede hidrográfica, o clima e os regimes de precipitação, tipo do solo, tipo de ocupação da bacia de drenagem, sistema de drenagem existente, o plano de desenvolvimento da cidade e as condições do meio receptor a jusante.

Em relação ao dimensionamento de bacias de detenção, a gestão do escoamento requer o cálculo do hidrograma do escoamento da bacia de drenagem, para os períodos de pré e pós-desenvolvimento, devendo mensurar a vazão do escoamento (LIMA e SILVA, 2006).

Matias (2006) descreveu duas formas para o cálculo da vazão: o Método Racional e o Método Soil Conservation Service. O Método Racional é reconhecidamente o de maior utilização e divulgação à escala mundial para o cálculo da vazão de pico de cheia em pequenas bacias hidrográficas.

Conforme Franco (2004), o método Racional apresenta a seguinte hipótese:

“a hipótese central do método sugere que, em uma bacia sujeita a uma chuva de intensidade constante e distribuição uniforme, estabelece-se o regime permanente com a vazão máxima na seção de controle para um tempo igual ao de concentração da bacia, nesta seção. Como a intensidade média máxima da chuva é uma função decrescente da sua duração, a vazão máxima corresponde a uma chuva com duração igual ao tempo de concentração.”

Em relação ao Método Soil Conservation Service (SCS), Franco (2004) descreve que para bacias maiores, adequadas ao uso de um hidrograma unitário, o efeito do armazenamento sobre o escoamento pode ser avaliado em função do uso e tipo do solo. De acordo com Matias (2006), este método baseia-se na definição de uma grandeza, que é designada pela capacidade máxima de detenção da bacia hidrográfica, que quantifica a capacidade da bacia para reter a água não utilizada na geração do escoamento superficial.

Cabe ressaltar que há inúmeros métodos e formas de realizar os cálculos para o dimensionamento de bacias de detenção e, segundo Nakazone (2005), não há um consenso

sobre uma metodologia universalmente aceita pelos projetistas e pelas agências responsáveis, pois a geometria e a composição dos dispositivos de saída dos reservatórios estão intimamente ligadas e possibilitam as mais variadas combinações. Além disso, de acordo com Tucci e Marques (2001), a incisiva influência de peculiaridades locais (legislações, solo, lençol freático, ocupação, população, métodos construtivos, etc.) e de aspectos hidrológicos torna a fixação de apenas uma metodologia muito trabalhosa. Contudo, há procedimentos e práticas convencionais plenamente aceitas pelo meio técnico.

### **3.2 Drenagem urbana na cidade de Belo Horizonte**

Conforme Champs et al. (2001), o sistema de drenagem implantado na concepção da cidade de Belo Horizonte teve como base os princípios higienistas que eram predominantes na época, prevalecendo o método de escoamento da evacuação rápida das águas reunidas em sistemas unitários. Também a retificação dos cursos d'água foi implementada na época, mas estes sistemas converteram-se em condutos de efluentes poluídos dos primeiros núcleos populacionais da cidade.

Visto o contínuo desenvolvimento da cidade, com a criação das Leis Municipais nº 7.165/96 e nº 7.166/96 instituiu-se o Plano Diretor do Município e definiram diretrizes e parâmetros para parcelamento, ocupação e uso do solo da cidade. As Leis Municipais nº 8.137/00 e nº 9.959/10 alteraram termos das leis nº 7.165/96 e 7.166/96, além de estabelecerem normas e condições para a urbanização e a regularização fundiária das Zonas de Especial Interesse Social, dispor sobre parcelamento, ocupação e uso do solo nas Áreas de Especial Interesse Social, e darem outras providências. Na **Figura 9** é apresentada a instituição das leis relacionadas à ocupação do solo em Belo Horizonte.

**Figura 9 - Leis relacionadas ao uso e ocupação do solo na cidade de Belo Horizonte.**



Fonte: Adaptado de (CHAMPS et al. 2001).

Como ferramenta para adequação das leis municipais relacionadas à drenagem urbana, entre os anos 1999 e 2001, foi criado o Plano Diretor de Drenagem Urbana dedicado à elaboração de diagnósticos do sistema de drenagem, bem como da ocorrência de cheias, inundações, gestão dos serviços de drenagem pluvial, controle e combate às inundações (CHAMPS, 2012).

Além do Plano Diretor, o município de Belo Horizonte conta como referencial, com uma instrução técnica para elaboração de estudos e projetos de drenagem urbana, criada em 2004. Esta instrução objetiva estabelecer uma padronização de estudos e projetos de micro drenagem, além de promover uma drenagem urbana que ofereça aos municípios condições de conforto e segurança quando da ocorrência de eventos chuvosos (PBH, 2004).

O sistema drenagem do município de Belo Horizonte conta atualmente com o Programa de Recuperação Ambiental e Saneamento de Belo Horizonte - DRENURBS (SUDECAP, 2002). O programa DRENURBS atua de acordo com o Plano Diretor e tem como premissa o tratamento integrado dos problemas sanitários e ambientais a nível da bacia hidrográfica. Este programa foi implantado em 2002 e ainda é operante e atua em diversos aspectos no município sendo eles (MOTA, 2012b):

- Adoção de calhas vegetadas;
- Implantação de parques e de áreas de preservação permanente ao longo dos cursos d'água;

- Implantação de bacias de retenção;
- Tratamento integrado dos corpos d' água como elementos da paisagem urbana;
- Envolvimento das comunidades nos processos de decisão; e
- Promoção de ações voltadas para a conscientização e o estímulo às atitudes de valorização dos recursos hídricos, entre outros.

Na **Figura 10** é apresentado um exemplo de revitalização realizada pelo programa DRENURBS.

**Figura 10 - Exemplo de atuação do programa DRENURBS.**



Fonte: Adaptado do arquivo da Prefeitura de Belo Horizonte *apud* (MOTA, 2012).

### 3.3 Estudos Hidrológicos na Drenagem Urbana

Segundo Abreu (2013), em virtude da carência de dados fluviométricos que poderiam subsidiar análises estatísticas de cheias, nos estudos hidrológicos voltados à drenagem urbana, normalmente são adotados modelos matemáticos do tipo chuva-vazão para definição dos hidrogramas de projeto. Com relação aos dados pluviométricos, estão disponíveis para as principais cidades do país as relações IDF (intensidade-duração-frequência).

A seguir são apresentados alguns parâmetros e métodos utilizados nos modelos de transformação chuva-vazão.

#### 3.3.1 Risco Hidrológico e Tempo de Retorno

De acordo com Baptista, Nascimento e Barraud (2005), a escolha do risco hidrológico resulta de um compromisso entre a aspiração a uma proteção absoluta, praticamente intangível, e a preocupação de limitar, tanto quanto possível os custos de implantação e operação.

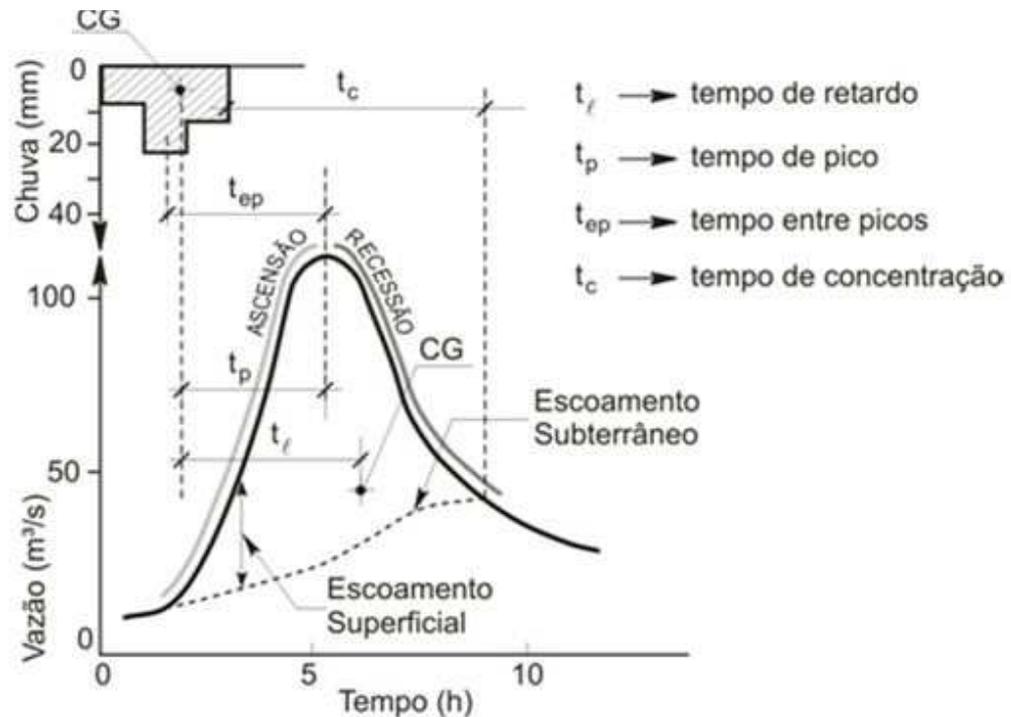
O risco adotado na concepção do projeto é definido por referência à probabilidade de ocorrência ou superação de um dado evento tomado como crítico. Já o tempo de retorno é uma variável aleatória definida como o intervalo médio de tempo decorrido entre duas ocorrências sucessivas de um dado evento ou sua superação.

Devido à disponibilidade de dados hidrológicos de bacias urbanas, é comum a análise de precipitações definidas pela sua intensidade, altura, duração e distribuição temporal e espacial. Logo, o emprego de precipitações de projeto para fins de diagnósticos e de dimensionamento de sistemas de drenagem pluvial são muitas vezes utilizados.

#### 3.3.2 Escoamento superficial

De acordo com Tucci (2012), o hidrograma pode ser denominado como um gráfico que relaciona a vazão com o tempo e, esta relação é o resultado da interação de todos os componentes do ciclo hidrológico com a precipitação e a vazão da bacia hidrográfica. Um modelo de hidrograma é representado na **Figura 11**.

**Figura 11 - Modelo de Hidrograma tipo.**



Fonte: COLLISCHONN e TASSI (2008).

Este hidrograma (**FIGURA 11**) apresenta o comportamento típico de uma bacia após a ocorrência de uma sequência de precipitações, porém a forma de um hidrograma é representada por diversos fatores. Júnior (s/d) identificou alguns destes principais fatores, sendo eles: relevo, cobertura da bacia, modificações artificiais no rio, distribuição, duração e intensidade da precipitação, solo, entre outras.

Segundo Tucci (2012), o hidrograma e o comportamento da bacia utilizando alguns valores de tempo podem ser caracterizados da seguinte forma:

Tempo de retardo ( $t_l$ ): é definido como o intervalo de tempo entre o centro de massa da chuva (hietograma) e do hidrograma;

Tempo de pico ( $t_p$ ): intervalo entre o centro de massa da precipitação e o pico do hidrograma;

Tempo de concentração ( $t_c$ ): intervalo para que a precipitação no ponto mais distante da bacia atinja a seção principal, também é definido como o intervalo entre o término da precipitação e o ponto de inflexão do hidrograma (fim do escoamento superficial);

Tempo de ascensão ( $t_m$ ): intervalo entre o início da chuva e o pico do hidrograma;

### 3.3.3 Hidrograma unitário

Tucci (2012) definiu o hidrograma unitário como uma resposta da bacia a uma precipitação de volume unitário de duração  $\Delta t$  com base às **Equações 1 e 2** quando se trata de um hidrograma unitário instantâneo:

Para  $0 < t < \Delta t$  (tempo e variação do tempo), a precipitação  $P(\zeta) = 1/\Delta t$  e

$$h(\Delta t, t) = \frac{1}{\Delta t} \int_0^t \mu(t - \tau) d\tau \quad (1)$$

Para  $\Delta t > t$

$$h(\Delta t, t) = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} \mu(t - \tau) d\tau \quad (2)$$

Já a vazão pode ser calculada pela **Equação 3**:

$$Qt = \sum_{i=j}^t P_i h_{t-j} + 1 \quad (3)$$

Em que  $Qt$  é a vazão total e  $P_i$  a precipitação total.

Cada bacia hidrográfica possui seu tempo de concentração, que pode ser definido como o tempo que uma gota de chuva, de uma região mais remota da bacia, leva para atingir o exutório. O tempo de concentração pode ser estimado por vários métodos, dentre eles tem-se a equação de Kirpich, usada quando se deseja estimar o tempo de concentração de pequenas bacias (TUCCI, 2012):

$$t_c = 57 \left( \frac{L^2}{\Delta h} \right)^{0,38s} \quad (4)$$

Em que  $t_c$  é o tempo de concentração em minutos;  $L$  o comprimento do curso d'água principal em km; e  $\Delta h$  a diferença de altitude ao longo do curso d'água principal, em metros.

### **3.3.4 Precipitações Máximas**

As precipitações intensas são as principais causas de cheias e prejuízos, por isso merecem destaque especial em hidrologia.

A precipitação máxima é entendida como a ocorrência extrema, com duração, distribuição temporal e espacial crítica para uma área ou bacia hidrográfica. A disponibilidade de longas séries de precipitações é, em geral, muito mais frequente que a de vazão. O estudo das precipitações máximas é um dos caminhos para conhecer-se a vazão de enchente de uma bacia (TUCCI, 2004). Uma das formas de retratar as precipitações máximas, pontualmente, é por meio de curvas de intensidade, duração e frequência (i-d-f), que relacionam a duração, a intensidade e o risco da precipitação de ser superada ou igualada.

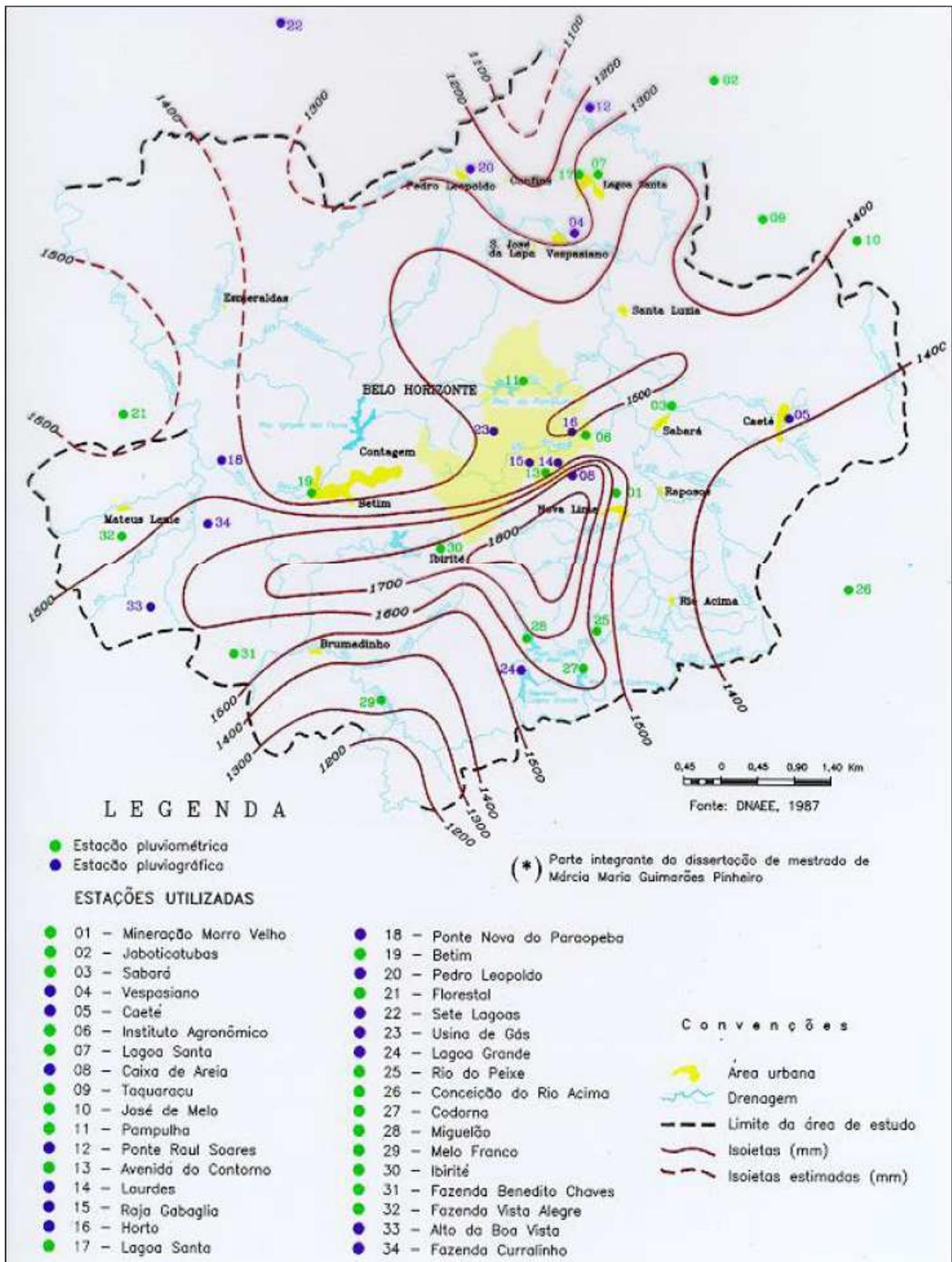
Segundo Tucci (2004), correlacionando intensidades e durações das chuvas, verifica-se que quanto mais intensa for a precipitação, menor será sua duração. Da mesma forma, quanto menor for o risco, maior será a intensidade. A determinação da relação entre estas três variáveis (curvas i-d-f) deve ser deduzida das observações das chuvas intensas durante um período de tempo suficientemente longo e representativo dos eventos extremos no local. Na **Figura 12** são apresentadas as isoietas de precipitações totais anuais médias da região metropolitana de Belo Horizonte.

Segundo Abreu (2013), a adoção de chuvas padronizadas é um dos métodos mais utilizados para a definição de chuva de projeto. A chuva de projeto deve ser representativa de muitos eventos e ter as características de intensidade, volume e duração de uma tormenta de mesma frequência.

Ao se adotar chuvas de projeto padronizadas, devem ser consideradas algumas hipóteses: a tormenta de projeto tem volume equivalente ao de uma chuva observada com a mesma recorrência; a distribuição temporal da chuva adotada é representativa de uma tormenta ocorrida; a chuva é considerada uniformemente distribuída na bacia (CANHOLI, 2005).

A seguir serão descritos os métodos utilizados para desagregação de tormentas e composição das chuvas de projeto utilizadas neste trabalho.

Figura 12 - Isoietas de precipitações totais anuais médias da região metropolitana de Belo Horizonte.



Fonte: PINHEIRO e NAGHETTINI (1998).

### **3.3.5 Método dos Blocos Alternados**

No Método dos Blocos Alternados, a distribuição temporal é obtida utilizando-se dados das relações IDF. É uma solução simples, que caracteriza uma condição crítica. Este método propõe a distribuição de totais de chuva em intervalos de tempo contidos na duração total. Assim, a partir dos incrementos totais acumulados de precipitação transformados em alturas de chuva, os blocos obtidos são rearranjados numa sequência tal que, no centro da duração da tormenta, situe-se o bloco maior e, em seguida, os demais blocos, em ordem decrescente, uma à direita e o outro à esquerda do bloco maior, alternadamente (TUCCI, 1995, *apud* ABREU, 2013).

### **3.3.6 Distribuição temporal das chuvas: Metodologia de Huff**

São diversos os procedimentos para a definição do hietograma de chuva de projeto, porém, a metodologia desenvolvida por Huff (1967) se destacou pelo seu elevado grau de flexibilidade, por suas curvas de distribuição temporal seguirem critérios objetivos e por elas representarem melhor a variabilidade temporal que ocorre, naturalmente, numa chuva intensa (BONTA e RAO, 1987 *apud* MOLIN *et al.*, 1996).

A curva de Huff corresponde a um padrão de distribuição temporal associado à uma chance de ocorrência que relaciona a duração da chuva com a altura precipitada, ambas expressas em porcentagem. Os resultados são expressos de forma gráfica e são considerados o período de retorno das chuvas em anos, o número de blocos de chuva, a duração da chuva em horas e o total precipitado em milímetros (HUFF, 1967 *apud* MOLIN *et al.*, 1996).

Na escolha dos eventos a serem analisados as chuvas cujos períodos não sejam inferiores a 30 minutos são selecionadas, bem como, o total precipitado que é, no mínimo, igual à precipitação mínima ( $P_{min}$ ) representada pela **Equação 5** (PFASTETTER, 1959 *apud* MOLIN *et al.*, 1996) :

$$P_{min} = 8,9914 \times D^{0,2466} \quad (5)$$

Em que  $P_{min}$  é a precipitação mínima e D a duração da chuva.

De acordo com Huff (1967) *apud* Molin et al. (1996), a frequência das chuvas dentro de cada grupo é determinada da seguinte forma:

De cada chuva de um determinado grupo, determina-se a porcentagem acumulada do total precipitado para cada 10% de sua duração total, isto é, para 10%, 20%, 30% até 90%. Portanto, a cada uma dessas porcentagens de duração da chuva total corresponderá uma série de percentuais de precipitação, cujo número de elementos é igual à quantidade de chuvas classificadas no grupo. De cada uma das nove séries formadas, determina-se a probabilidade empírica acumulada. Para tanto, utiliza-se a fórmula de Weibull (HANN, 1977) representada pela **Equação 6**:

$$P(X > x) = \frac{m}{(N + 1)} \quad (6)$$

Em que  $m$  é o número de ordem de cada elemento da série;  $N$  é o número total de elementos de cada série e  $P(X > x)$  é a probabilidade empírica acumulada. Isto posto, determina-se a porcentagem do total precipitado correspondente aos níveis de probabilidade de 10 a 90%, em intervalos de 10%. Nesse cálculo, quando necessário, utiliza-se a interpolação linear.

A curva de Huff é uma linha que une pontos de igual valor de uma função de duas variáveis, a probabilidade da precipitação acumulada (%) e diferentes intervalos de tempo (%). Corresponde também a um padrão de distribuição temporal de uma chuva intensa associado a um nível probabilístico de ocorrência (HUFF, 1967 *apud* MOLIN *et al.*, 1996).

De cada uma das nove séries de percentuais de precipitação na curva de Huff, o valor do percentual do total precipitado corresponde ao nível de probabilidade que se deseja. Logo, o padrão de distribuição temporal correspondente ao nível probabilístico de 10%, indica que 10% das chuvas terão um padrão igual ou acima deste. Enquanto, um nível probabilístico de 90% indica que 10% das chuvas terão um padrão igual ou menor que 10% (HUFF, 1967 *apud* MOLIN *et al.*, 1996).

### 3.3.7 Método SCS

O método desenvolvido pelo National Resources Conservatoin Center dos EUA (antigo Soil Conservation Service – SCS) é também um dos mais usados, devido a sua simplicidade em estimar o volume de escoamento superficial resultante de um evento de chuva e para criar um hidrograma de projeto de uma determinada bacia (CANHOLI, 2005).

Segundo Tucci (1998), o modelo SCS possui as seguintes vantagens: o reduzido número de parâmetros e a relação existente entre os parâmetros e características físicas da bacia. Em contrapartida, o autor afirma que o hidrograma de projeto gerado apresenta-se superestimado.

Em relação a este modelo, Lança e Rodrigues (2000) atribuíram grande praticidade ao método ao utilizá-lo para o cálculo da precipitação efetiva, utilizando valores de CN presentes em sua bibliografia.

De acordo ao método SCS, a lâmina escoada durante uma chuva é dada pela **Equação 7**:

$$\begin{cases} Q = \frac{(P - Ia)^2}{(P - Ia + S)}, \text{ quando } P > Ia \\ Q = 0, \text{ quando } P \leq Ia \end{cases} \quad (7)$$

Em que Q é a lâmina escoada, também chamada chuva efetiva ou volume de escoamento superficial dividida pela área da bacia em estudo (mm); P é a precipitação ao decorrer do evento (mm); S é o armazenamento do solo (mm), que depende de CN (parâmetro adimensional que denota a capacidade de armazenamento e infiltração do solo); e Ia é uma estimativa das perdas iniciais de água, dado por  $Ia=0,2S$ , ou seja, 20% da capacidade de armazenamento do solo.

O parâmetro CN está relacionado ao armazenamento de solo S pela seguinte **Equação 8**:

$$S = \left( \frac{25400}{CN} \right) - 254 \quad (8)$$

Para a estimativa do valor de CN, o solo é classificado em quatro tipos: A, B, C e D, conforme descrição da **Tabela 1**.

**Tabela 1 - Classificação de solos para estimativa do parâmetro CN.**

<b>Tipo de solo</b>	<b>Tipo de ocupação da área</b>
A	Solos que produzem baixo escoamento superficial e alta infiltração Solos arenosos profundos com pouco silte e argila.
B	Solos menos permeáveis do que o anterior, solos arenosos menos profundos que o do tipo A e com permeabilidade superior à média. Solos que geram escoamento superficial acima da média e com
C	capacidade de infiltração abaixo da média, contendo porcentagem considerável de argila e pouco profundo.
D	Solos contendo argilas expansivas e pouco profundos com muito baixa capacidade de infiltração, gerando a maior proporção de escoamento superficial.

Fonte: TUCCI (2004) *apud* SILVA (2009).

A partir do tipo de solo (A, B, C ou D), bem como da utilização e cobertura do solo da região em estudo, o valor de CN pode ser obtido pela **Tabela 2**.

**Tabela 2 - Valores do parâmetro CN para bacias urbanas.**

<b>Utilização ou Cobertura do Solo</b>	<b>Solo Tipo A</b>	<b>Solo Tipo B</b>	<b>Solo Tipo C</b>	<b>Solo Tipo D</b>
Zonas cultivadas:				
Sem conservação do solo	72	81	88	91
Com conservação do solo	62	71	78	81
Pastagens e terrenos em más condições	68	79	86	89
Baldios em boas condições	39	61	74	80
Prados em boas condições	30	58	71	78
Bosques ou zonas florestais:				
Cobertura boa	25	55	70	77
Cobertura ruim	45	66	77	83
Espaços abertos, parques, campos de golfe, cemitérios, em boas condições:				
Com relva em mais de 75% da área	39	61	74	80
Com relva de 50% a 70% da área	49	69	79	84
Zonas comerciais e de escritórios	81	88	91	93

Utilização ou Cobertura do Solo	Solo Tipo A	Solo Tipo B	Solo Tipo C	Solo Tipo D
Zonas industriais	81	88	91	93
Zonas residenciais:				
Lotes de (m <sup>2</sup> )	% média impermeável			
< 500	65	77	85	90
1000	38	61	75	83
1300	30	57	72	81
2000	25	54	70	80
4000	20	51	68	79
Parques de estacionamento, telhados, viadutos, etc.	98	98	98	98
Arruamentos e estradas:				
Asfaltadas e com drenagem de águas pluviais	98	98	98	98
Paralelepípedos	76	85	89	91
Terra	72	82	87	89

Fonte: TUCCI (2004) *apud* SILVA (2009).

### 3.4 Modelos hidrológicos e parâmetros utilizados na drenagem urbana

O modelo hidrológico é uma ferramenta utilizada para melhor entendimento e representação do comportamento da bacia hidrográfica, bem como para a previsão das condições diferentes das observadas. É usado em pesquisas de bacias hidrográficas para estruturar dados, estudar as respostas do local, selecionar e avaliar parâmetros, estudar a significância da variabilidade espacial e temporal das características físicas e determinar observações necessárias para encontrar um grau de precisão em um período específico de tempo (DE COURSEY, 1985 *apud* BARBOSA, 2006).

Os principais tipos de modelos usados em problemas relacionados a recursos hídricos são diferenciados de acordo com os processos físicos representados. Assim, os modelos correlatos a este tema podem ser reunidos em 3 grupos diferentes: hidrodinâmicos, de qualidade de água e hidrológicos (GONTIJO, 2007).

Uma das ferramentas para a modelagem destes grupos anteriormente citados, dentre diversos programas existentes, é o software Hydrologic Engineering Center- Hydrologic Modeling System (HEC-HMS), desenvolvido pelo Centro de Engenharia Hidrológica do

Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (U.S. Army Corps of Engineers - USACE). Este programa foi concebido para simular os processos de precipitação-vazão de sistemas de bacias hidrográficas (USACE-HEC, 2008), e suporta desde a modelagem de um pequeno escoamento hídrico urbano à um grande rio em uma bacia hidrográfica.

A simulação com o modelo HEC-HMS é feita com base na representação gráfica de uma bacia através de elementos hidrológicos, sendo eles: sub-bacia, junção, reservatório não controlado, extração, fonte e sumidouro. (MILDE et al., 2002).

O HEC-HMS assume que uma bacia hidrográfica é reproduzida como um grupo interligado de áreas e que os processos hidrológicos podem ser representados pelos parâmetros que refletem as condições dentro da área (Milde et al., 2002).

Os hidrogramas gerados por este programa são usados diretamente ou em conjunto com outros softwares para estudos de disponibilidade de água, drenagem urbana, previsão de fluxo, o impacto da urbanização futura, projeto de vertedor do reservatório, redução de danos causados pelas inundações, a regulação de várzea, e operação de sistemas (SCHARFFENBERG e FLEMING, 2010).

Os modelos matemáticos têm limitações para incorporar em suas equações informações relativas a uma realidade heterogênea. Características da topografia, tipos de solo, padrões e mudanças da cobertura do solo influenciam sobre os processos hidrológicos. Geralmente, a representação da variabilidade espacial é feita por intermédio de valores e parâmetros, o que traz dificuldades para calibrar os modelos e interpretar fisicamente os parâmetros, sobretudo quando o modelo envolve um grande número de parâmetros (BEVEN, 1989 *apud* MATEUS, 2006).

Milde et al. (2002) realizaram testes no programa HEC-HMS para a geração de hidrogramas da sub-bacia de Analândia, parte da bacia do Rio Corumbataí. Os autores utilizaram, como coadjuvante no manuseio de dados georeferenciados em hidrologia, com o programa HECPREPRO, além do modelo digital do terreno, a rede de drenagem e os limites da bacia. Como resultados evidenciaram que o HEC-HMS permitiu rápida visualização dos efeitos das variações dos parâmetros em uso sobre as respostas, em termos de vazão simulada, além de apresentar resultados mais realistas para eventos de menor duração, como uma pancada de chuva definida. Logo, o uso do HEC-HMS apresentou-se satisfatório gerando resultados admissíveis em termos volumétricos e de simulação de descarga, e resultados razoáveis no traçado da hidrógrafa em relação à bacia hidrográfica do Rio Corumbataí, sub-bacia de Analândia. Contudo, mesmo que o modelo apresente algumas deficiências quanto à

facilidade de manipulação, a diversidade de métodos de tratamento dos dados de entrada e os cálculos dos parâmetros necessários fazem com que ele seja uma boa ferramenta.

No estudo hidrológico da bacia do rio Negrinho, em Santa Catarina, realizado por Macedo (2010), foi proposta a quantificação das vazões máximas de projeto a partir do programa HEC-HMS, já que a bacia do rio Negrinho não dispõe de estação fluviométrica automática. Neste estudo, o HEC-HMS foi capaz de construir hidrogramas sintéticos muito bem ajustados aos hidrogramas observados pelos métodos SCS-CN, Snyder e de recessão para o escoamento de base. A vazão de pico encontrada e o volume do escoamento também apresentaram bons resultados, porém foi observado que a configuração deste modelo pode não calcular corretamente eventos com mais de um pico de vazão.

Em um comparativo de modelos para simulação de escoamento superficial, Souza et al. (2012) avaliou os programas HEC-HMS e SWMM para a bacia do córrego Samambaia, localizada no município de Goiânia- GO. Para realizar tal comparação foram consideradas duas hipóteses: a bacia ser discretizada em 5 subáreas e a bacia ser concentrada. O trabalho demonstrou que o programa HEC-HMS possibilitou uma representação espacial mais adequada da bacia e sub-bacias para a modelagem do processo de escoamento superficial em bacias rurais. Porém, neste estudo, para a modelagem do sistema de drenagem de bacias urbanas, o modelo SWMM, se adequou melhor. Sendo assim, constatou-se que cada modelo analisa as influências dos parâmetros na modelagem do escoamento de forma diferente, logo, torna-se de suma importância a análise de sensibilidade e a calibração dos parâmetros ao se utilizar um modelo.

Matta, Peixoto e Oliveira (2013) identificaram e analisaram o impacto (de caráter hidrológico) da implantação de reservatórios de retenção domiciliares em quadras de área urbanizada no município de Belo Horizonte com o auxílio do HEC-HMS. Foram realizados testes em uma área em estudo com 0,02 km<sup>2</sup> para encontrar os valores ótimos para quantidade de dispositivos, volume do reservatório e área do orifício de saída. As características dos reservatórios que foram simuladas no programa HEC-HMS, no qual adotou o modelo SCS.

## 4 METODOLOGIA

A metodologia está dividida em três etapas: a) coleta de dados e informações da área de estudo, com visita *in loco* à bacia de Santa Lúcia e entorno, b) coleta, tratamento e análises de dados hidrológicos e hidráulicos e c) simulações hidrológicas da bacia de detenção Santa Lúcia, com a utilização do modelo HEC-HMS.

### 4.1 Área de estudo: bacia de detenção Santa Lúcia

Os primeiros reservatórios de detenção do Brasil foram implantados em 1953, na cidade de Belo Horizonte, denominados como o da Pampulha e Santa Lúcia (**Figura 13**) onde, funcionam até a atualidade (NASCIMENTO e BAPTISTA, 1997 *apud* BASSO et al., 2013).

**Figura 13 - Imagem da Barragem Santa Lúcia.**



**Fonte: Acervo PBH- site institucional.**

De acordo com Fonseca et al. (2006), a bacia de detenção de Santa Lúcia está localizada na região centro sul de Belo Horizonte, na bacia hidrográfica do córrego do Leitão (**FIGURA 14**).

Figura 14 - Mapa de Localização da bacia de detenção Santa Lúcia.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Esta barragem foi construída com o objetivo de controlar as cheias às margens do córrego do Leitão durante o período chuvoso, que atingia os bairros de Lourdes, Santo Antônio e Cidade Jardim (SOARES, 2001).

Na concepção desta bacia de detenção, o volume de espera era da ordem de 300.000 m<sup>3</sup>, e sua área de contribuição na bacia de detenção de 370 ha. A partir da década de 1970, a intensa urbanização da região, aliada às declividades nesta bacia, ocasionaram diversos processos erosivos com consequências diretas ao aporte de sedimentos, resíduos sólidos e esgotos domésticos provenientes das galerias de águas pluviais. Em 1988, iniciou-se o projeto de recuperação da bacia de detenção de Santa Lúcia, com a criação de um parque urbano para atividades de lazer, bem como a reservação dos deflúvios superficiais contribuintes.

Devido às canalizações no período serem dimensionadas levando em conta a redução do pico de cheia, os problemas deste sistema acarretaram em graves inundações no ano de 1996, tornando-se essencial a reinserção do reservatório no sistema (FONSECA et al. 2006).

No mesmo ano também foi criado o Plano Diretor Urbanístico do município e a Lei de Parcelamento, Ocupação e Uso do Solo, respectivamente, Leis Municipais n° 7.165 e n° 7.166. Com estas diretrizes, restringiu-se a impermeabilização do solo e determinou-se, em alguns casos, a implantação de caixas de detenção e soluções de controle de águas pluviais na fonte (DUMOND, 2012).

Em estudos de simulação hidrológica e hidráulica, citados por Fonseca *et al.* (2006), foi constatada a possibilidade da redução de riscos de inundação, através de uma estrutura de controle hidráulico de forma a propiciar o extravasamento dos deflúvios do canal subterrâneo existente para a bacia de detenção de Santa Lúcia e do retorno ao trecho canalizado no período de recessão do hidrograma.

Foram realizadas visitas *in loco* na área da bacia de detenção Santa Lúcia e foram observadas as seguintes estruturas hidráulicas:

- Um poço vertical (**Figura 15**) localizado no interior do lago, em comunicação com a galeria subterrânea que atravessa a barragem e descarrega na galeria do vertedouro.
- Um canal de emergência (**Figura 16**) que recebe parte da água armazenada quando o volume do reservatório atinge níveis críticos.
- Uma torre de tomada de água (**Figura 17**) aparentemente desativada. Quando a captação é prevista no projeto do reservatório é comum a construção de torres de tomada com saída através do maciço da barragem (FILHO, s/d).

- Estruturas de captação de água pluvial (**Figuras 18, 19 e 20**). Adjacentes à barragem algumas estruturas foram implementadas, a fim de direcionar as águas pluviais do entorno para a barragem.

**Figura 15 - Poço Vertical.**



Fonte: Registro fotográfico do autor

**Figura 16 - Canal de Emergência.**



Fonte: Registro fotográfico do autor

**Figura 17 - Torre de tomada d'água.**



**Fonte: Registro fotográfico do autor**

**Figura 18 - Canal de água pluvial.**



**Fonte: Registro fotográfico do autor**

**Figura 19 - Boca de lobo.**



**Fonte: Registro fotográfico do autor**

**Figura 20 - Escada Hidráulica.**

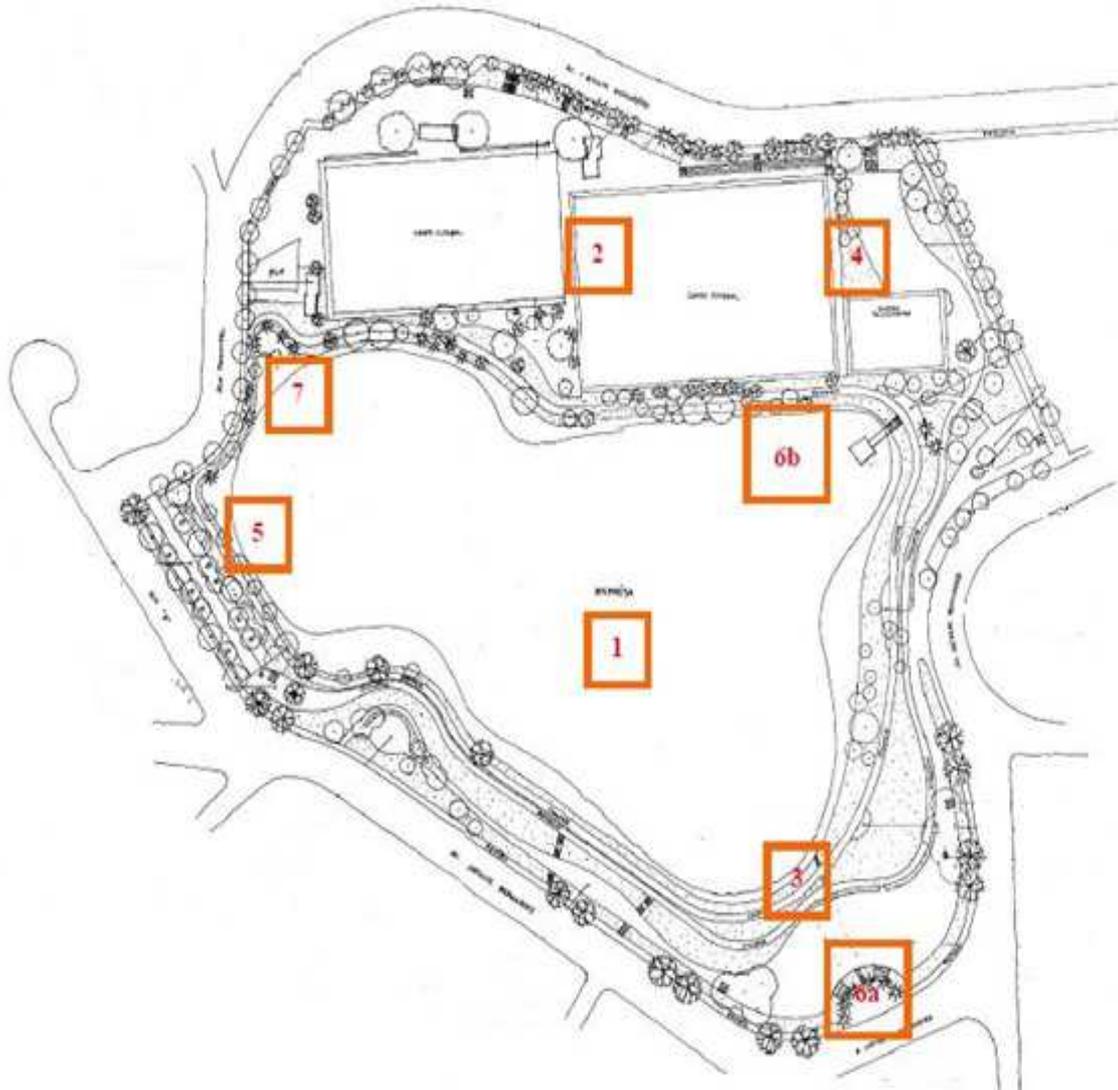


**Fonte: Registro fotográfico do autor**

No entorno da barragem, por meio do Decreto n.6.544, de 5/6/1990, foi criado o parque Santa Lúcia (**Figura 21**), uma área verde pública do município de Belo Horizonte. Este parque teve como objetivo de reordenar a área do entorno da barragem Santa Lúcia, englobando a represa, bem como criar um espaço de integração entre a população circundante, por meio de um parque ecológico e de lazer conjugado com a função de

amortecer o impacto das águas das chuvas na rede de drenagem pluvial urbana proveniente das drenagens dos bairros circundantes.

**Figura 21 - Modelo esquemático do parque Santa Lúcia.**



**Fonte: (REGIONAL ADMINISTRATIVA CENTRO-SUL – PBH, 1996) apud (SOARES, 2001).**

Na **Figura 21**, estão representadas as principais estruturas do parque sendo elas: 1- represa. 2- o complexo esportivo. 3 - praças internas conectadas às demais a partir do percurso periférico à represa restaurada. 4 - brinquedos. 5- estacionamento. 6a - chegada do Córrego do Leitão, canalizado. 6b- chegada do Tributário Santa Maria. 7 - o sumidouro (SOARES, 2001).

A bacia de detenção Santa Lúcia é alimentada pela água de três nascentes é conduzida até a barragem por uma estrutura canalizada de 1.710 metros de extensão do parque denominado por Área das Nascentes da Barragem Santa Lúcia (PBH, 2015).

Na **Figura 22** é mostrado o ponto de chegada de água na área da barragem.

**Figura 22 - Ponto de chegada de água**



Fonte: Registro fotográfico do autor.

#### 4.2 Dados Hidrológicos e Hidráulicos

Para caracterizar e melhor representar o comportamento da bacia Santa Lúcia, são necessários alguns dados e informações como áreas de contribuição, distribuição temporal das chuvas, definição do método de transformação chuva-vazão e relações cota x armazenamento x descarga.

Inicialmente, foram determinadas as áreas de contribuição por meio do uso de um modelo digital e de elevação da cidade de Belo Horizonte, e a partir do software ArcGis versão 10.1 onde foram extraídas as curvas de nível da região e, assim, a área de contribuição delimitada. Na **Figura 23** é apresentada a delimitação da área de contribuição realizada pelo software ArcGis versão 10.1.

Além disso, foi definido o tempo de retardo (*lag time*) para ambas sub-bacias de contribuição, como 60% do tempo de concentração. E, com base nos mapas, foi escolhido o

valor do CN com base na **Tabela 2** para zonas residenciais  $< 500 \text{ m}^2$  e média impermeável de 65%.

Na **Tabela 3** são apresentados os parâmetros área de contribuição ( $A_c$ ), *lag time* e o valor de CN.

**Figura 23 - Delimitação da área de contribuição com auxílio do software ArcGis.**



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados da Esri e SRTM.

**Tabela 3 - Parâmetros obtidos e estimados para  $A_c$ , lag time e CN.**

Sub-bacia de contribuição	$A_c$ ( $\text{Km}^2$ )	lag time (minutos)	CN
Rua Lira	0,6	7	85
Córrego Leitão	3,5	20	85

Fonte: Elaborada pelo autor.

A chuva de projeto utilizada no estudo foi obtida do estudo desenvolvido por Matta, Peixoto e Oliveira (2013). Para o estudo hidrológico da bacia Santa Lúcia foram utilizados os hietogramas para um tempo de retorno de 50 anos e duração das chuvas de 5, 10, 30 e 60 minutos (**TABELA 4**). Os autores adotaram como precipitação média anual de 1400 mm e,

com base ao método de Huff, foram geradas as distribuições temporais das chuvas para diversos períodos de retorno e duração de chuvas.

**Tabela 4 - Distribuição temporal das chuvas (em mm) para TR = 50 anos.**

Duração (min)	5	10	30	60
	2,37	5,14	4,55	5,84
	7,26	15,73	16,09	20,64
Tr = 50 anos	5,97	12,94	18,04	23,15
	1,86	4,03	10,17	13,05
	0,54	1,17	2,87	3,68

Fonte: MATTA, PEIXOTO E OLIVEIRA (2013).

Os dados relacionados à bacia de detenção Santa Lúcia estão representados nas Tabelas 5 e 6.

**Tabela 5 - Dados gerais da bacia de detenção.**

Dados da Bacia de Detenção Santa Lúcia	
Altura da barragem	18 m
Comprimento da crista	115 m
Volume total do reservatório	189.000 m <sup>3</sup>
Tipo de barragem	Terra
Tipo de fundação	solo residual
Vazão de projeto	Decamilenar
Percolação	Totalmente controlada pelo sistema de drenagem
Volume útil do reservatório	76.000 m <sup>3</sup>
Lâmina d'água do reservatório	2,30m
Descarga da barragem (vertedores)	Um do tipo tulipa (torre da tomada d'água) Um do tipo poço vertical.
Nível máximo de operação–cota	900,30 m
Cota máxima da superfície da água no reservatório	903,30 m
Vertedouro	39 m <sup>3</sup> /s
Superfície da água no reservatório	3 ha

Fonte: SUDECAP (2004).

**Tabela 6 - Relação Cota x Volume x Descarga.**

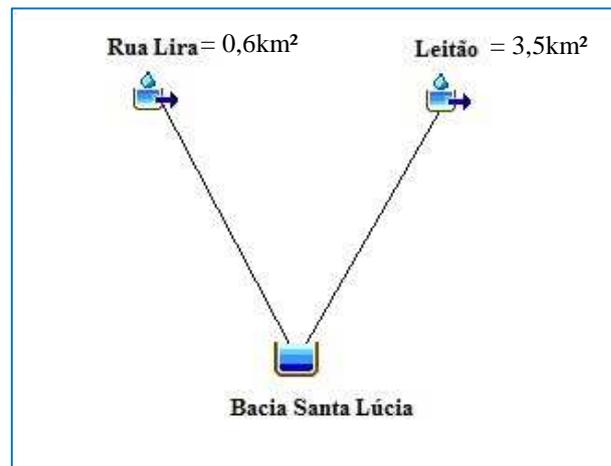
Cota (m)	Volume (1000 m <sup>3</sup> )	Descarga (m <sup>3</sup> /s)*
898.0	0.000	0.00
900.3	75.330	5.60
903.1	180.211	28.88
903.3	188.920	37.17
907.0	350.000**	483.9

Fonte: SUDECAP (2004). \* nota de aula (AMARAL, s/d).\*\* estimado.

#### 4.3 Simulações hidrológicas da bacia Santa Lúcia

A bacia de retenção Santa Lúcia e suas bacias de contribuição foram representadas graficamente conforme **Figura 24**.

**Figura 24 – Representação da área de estudo no programa HEC-HMS.**



Fonte: Simulação HEC-HMS.

Neste trabalho, a simulação hidrológica foi configurada utilizando os métodos apresentados na **Tabela 7**. Foram realizadas simulações para o período de retorno (TR) de 50 anos e as durações da chuva de 5, 10, 30 e 60 minutos.

**Tabela 7 - Métodos utilizados nas simulações.**

---

<b>PARÂMETRO</b>	<b>MÉTODO</b>
Precipitação	Fornecimento de uma chuva de projeto (Método dos Blocos Alternados; Método de Huff)
Escoamento superficial	Método SCS –Curver Number
Amortecimento em reservatório	Fornecimento de Curvas Cota x Volume x Descarga

---

**Fonte: Elaborado pelo autor.**

## 5. RESULTADOS

Na simulação hidrológica da bacia de detenção Santa Lúcia, para chuva de 5 minutos e tempo de retorno de 50 anos, foi observado que a vazão de pico à montante da bacia ocorreu após 21 minutos do início da chuva e atingiu o valor de 3,4 m<sup>3</sup>/s. A bacia armazenou cerca de 52000 m<sup>3</sup> e a vazão de pico de saída foi de 0,4 m<sup>3</sup>/s após 55 minutos do início da chuva. Na **Figura 25** são apresentados os resultados para a bacia de detenção para chuva de 5 minutos.

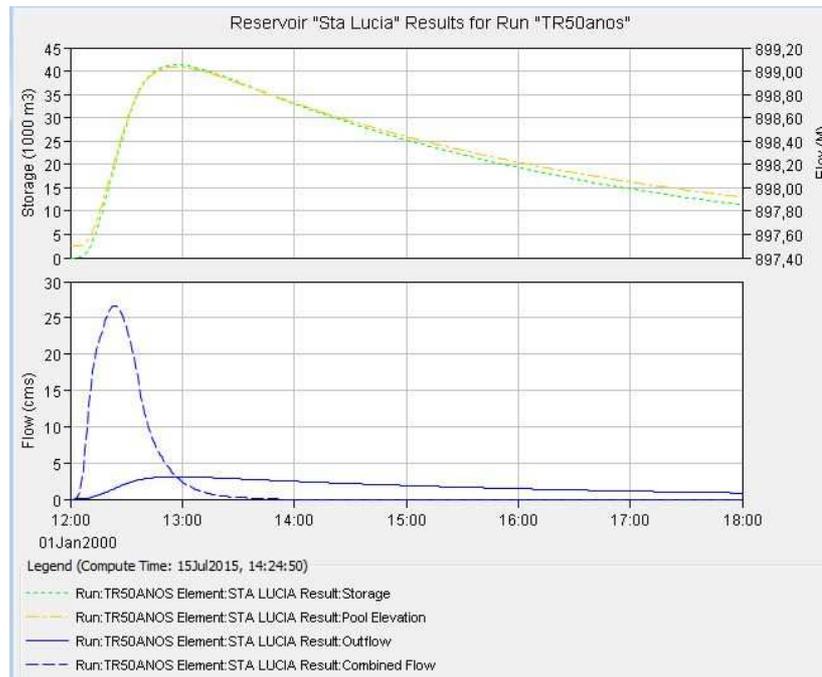
**Figura 25 - Gráfico do reservatório para TR-50 anos e chuva de 5 minutos.**



**Fonte: Simulação HEC-HMS.**

Para chuva de 10 minutos de duração e tempo de retorno de 50 anos, foi observado que a vazão de pico à montante da bacia ocorreu após 24 minutos do início da chuva e atingiu o valor de 26,7 m<sup>3</sup>/s. A bacia armazenou cerca de 41300 m<sup>3</sup> e a vazão de pico na saída foi de 3,1 m<sup>3</sup>/s após 57 minutos do início da chuva. Na **Figura 26** são mostrados os resultados da simulação da bacia de detenção para chuva de 10 minutos.

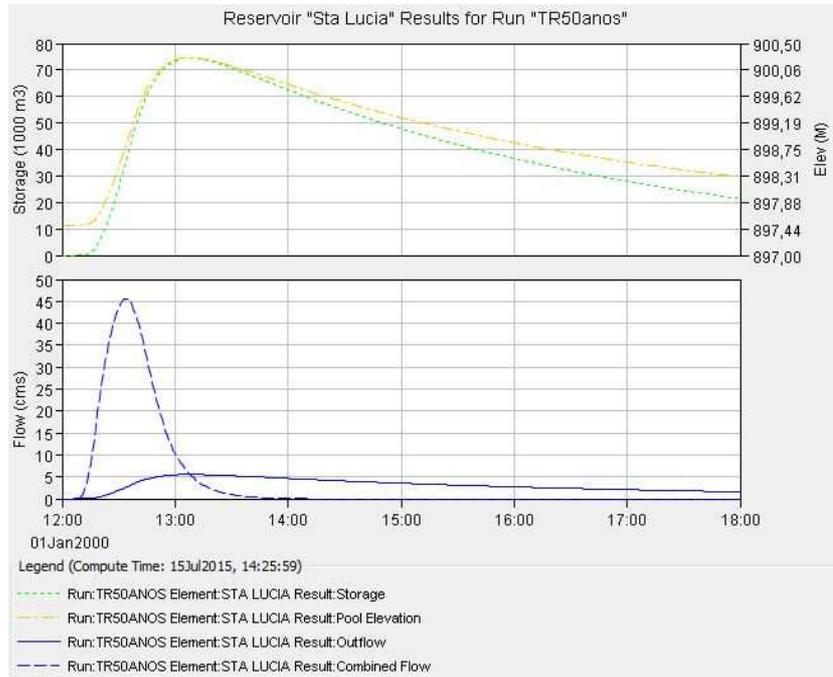
**Figura 26 - Gráfico do reservatório para TR-50 anos e chuva de 10 minutos**



**Fonte: Simulação HEC-HMS.**

Para 30 minutos de duração da chuva e tempo de retorno de 50 anos, a vazão de pico à montante da bacia ocorreu após 34 minutos do início da chuva e atingiu o valor de 45,6 m<sup>3</sup>/s. A bacia armazenou cerca de 74500 m<sup>3</sup>, a vazão de pico no exutório foi de 5,5 m<sup>3</sup>/s após 68 minutos do início da chuva. Na **Figura 27** são apresentados os resultados para chuva de 30 minutos.

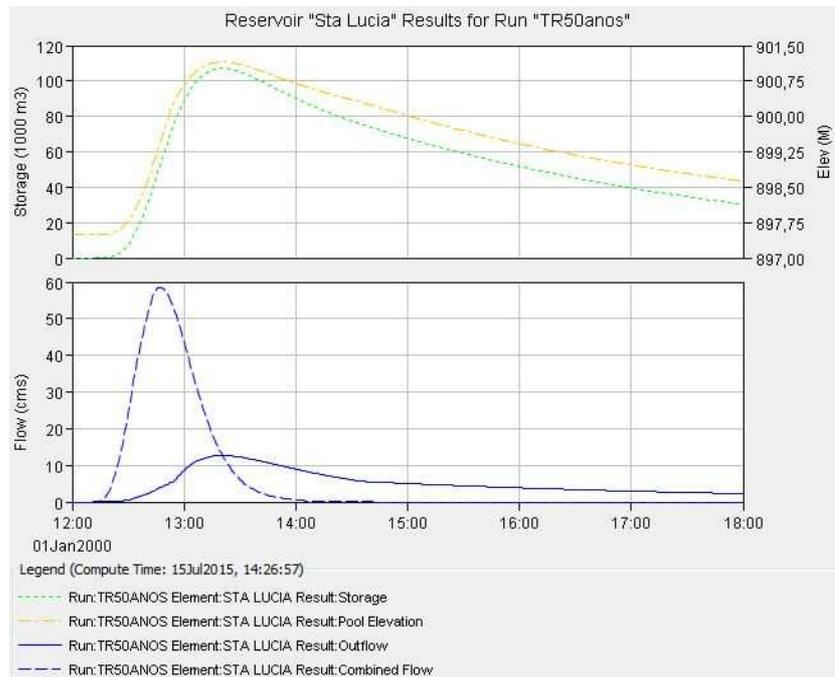
**Figura 27 - Gráfico do reservatório para TR-50 anos e chuva de 30 minutos**



**Fonte: Simulação HEC-HMS.**

Ao considerar a duração da chuva de 60 minutos e tempo de retorno de 50 anos, a vazão de pico ocorreu após 47 minutos do início da chuva e atingiu o valor de 58,5 m<sup>3</sup>/s. A bacia armazenou cerca de 107200 m<sup>3</sup>, a vazão de pico no exutório foi de 12,7 m<sup>3</sup>/s ocorrendo após 81 minutos do início da chuva. Na **Figura 28** são apresentados os resultados da simulação para chuva de 60 minutos.

**Figura 28 - Gráfico do reservatório para TR-50 anos e chuva de 60 minutos**



Fonte: Simulação HEC-HMS.

Na **Tabela 8** são mostrados os resultados obtidos nas simulações para o TR = 50 anos e duração da chuva de 5, 10, 30 e 60 minutos.

**Tabela 8 - Síntese dos resultados da simulação hidrológica**

Duração da chuva (min)	Vazão de pico a montante da bacia de detenção (m <sup>3</sup> /s)	Vazão de pico a jusante da bacia de detenção (m <sup>3</sup> /s)	Volume armazenado (m <sup>3</sup> )	% de redução da vazão de pico
5	3,4	0,4	52000	88,2
10	26,7	3,1	41300	88,4
30	45,6	5,5	74500	87,9
60	58,5	12,7	107200	78,3

Fonte: Elaborado pelo autor a partir da simulação HEC-HMS.

Observa-se na Tabela 8 a bacia de detenção Santa Lúcia apresenta grande eficiência quanto ao amortecimento (armazenamento) das ondas de cheias. Além disso, nota-se que quanto maior a duração da chuva, menor a redução na vazão de pico.

## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Esta pesquisa apresenta o estudo hidrológico da bacia Santa Lúcia, no município de Belo Horizonte, por meio da técnica de simulação utilizando o programa HEC-HMS. O objetivo principal de analisar o impacto no hidrograma de saída, com a redução na vazão de pico e, conseqüentemente, a diminuição nos impactos gerados pelas enchentes a jusante da área de estudo foi obtido.

Os resultados obtidos nas simulações corroboraram ao objetivo principal para a qual foi construída a barragem Santa Lúcia: a retenção do volume escoado das sub-bacias de contribuição. Observou-se que quanto maior a duração da chuva, menor a redução na vazão de pico. A maior redução da vazão de pico foi obtida para a duração da chuva de 5 minutos (88,2%), enquanto que a menor redução foi para a chuva de 60 minutos (78,3%).

Para os tempos simulados de 5, 10, 30 e 60 minutos de duração da chuva, esta bacia de detenção foi capaz de reter grande parte do escoado e reduzir consideravelmente a vazão de pico, sendo esta redução da ordem de 78 a 88%. Os resultados obtidos apresentaram-se satisfatórios se comparados com os de Coelho (2010), por exemplo, que para os períodos de retorno de 10 e 25 anos, e duração de 2 horas, obteve reduções na vazão de pico de 60% e 55% respectivamente.

O uso do software HEC-HMS neste trabalho apresentou-se satisfatório e de fácil uso e de interface didática com o usuário. Entretanto, cabe salienta que a maior dificuldade na realização desta pesquisa foi a aquisição de dados e informações fundamentais para analisar o comportamento da bacia de detenção estudada.

A partir dos resultados de redução da vazão de pico, apresentados neste estudo, constatou-se que as medidas estruturais são, comprovadamente, soluções para o controle da drenagem urbana nos grandes centros urbanos, podendo ser alternativas eficientes aos gestores públicos para alcançarem-se reduções na ocorrência de enchentes.

Entretanto, futuros trabalhos podem analisar e avaliar a utilização conjunta das estruturas já existentes no sistema de drenagem atual às técnicas alternativas de drenagem, de forma a diminuir a sobrecarga no sistema.

Para melhorar ainda mais os resultados, seria interessante a obtenção mais atualizada das relações cota-volume-descarga. Além disso, e futuros trabalhos podem ser utilizados outros períodos de retorno e duração de chuva, como, por exemplo, 100 anos e 2 horas, por exemplo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, F. G. Análise da influência da distribuição temporal das chuvas intensas e de cenários de uso e ocupação de solo na quantificação dos prejuízos econômicos diretos provocados pelas inundações urbanas. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos – EESC, Universidade de São Paulo – USP. 162p. 2013.

BASSO, Raviel Eurico; TASSINARI, Lucas Camargo da Silva; FAVARETTO, Jean Ricardo; CADORE, Regina; ALLASIA, Daniel Gustavo; TASSI, Rutinéia Aplicabilidade de metodologias para pré-dimensionamento de bacias de retenção em Santa Maria-RS. Bento Gonçalves, Anais do XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2013.

BAPTISTA, M.B.; LARA, M. Fundamentos de Engenharia Hidráulica. Belo Horizonte, Editora UFMG e Escola de Engenharia da UFMG, 2a. Edição - Revisada, 2003, 440p.

BAPTISTA, Márcio; NASCIMENTO, Nilo; BARRAUD, Sylvie. Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana, Porto Alegre, ABRH, 2005.

BARBOSA, Francisco de Assis dos Reis. Medidas de proteção e controle de inundações urbanas na bacia do rio Mamanguape/PB/Francisco de Assis dos Reis Barbosa. João Pessoa, 2006. 116p. il.: Orientador: Prof. Dr. Celso Augusto Guimarães Santos. Dissertação (Mestrado). Centro de Tecnologia/Universidade Federal da Paraíba – UFPB.

BELO HORIZONTE. Lei 7.166 de 27 de agosto de 1996. Estabelece normas e condições para parcelamento, ocupação e uso do solo urbano no Município, Belo Horizonte 28 jul. 1996.

BELO HORIZONTE. Lei 8.137 de 21 de dezembro de 2000. Altera as leis nº 7.165/96 e 7.166/96. Belo Horizonte, 21 dez. 2000.

BELO HORIZONTE. Lei 9.959 de 20 de julho de 2010. Altera as leis nº 7.165/96 e nº 7.166/96. Belo Horizonte, 21 jul. 2010.

BRITO, D.S. Metodologia para seleção de alternativas de sistemas de drenagem. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.DM-094/06. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Brasília, Brasília, DF, 117p

CANHOLI, Aluísio Pardo. Drenagem urbana e controle de enchentes. São Paulo: Oficina de Textos, 2005.

CARVALHO, Daniel Fonseca de Carvalho; SILVA, Leonardo Duarte Batista da Silva Apostila de Hidrologia, Capítulo 7. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia, 2006.

COELHO, G. A. Utilização de bacias de retenção de águas pluviais em planos diretores de macrodrenagem. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental e Sanitária). Centro Tecnológico/Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2010, 85 p.

COSTA, M. E. L.; KOIDE, S.. Análise Do Escoamento Superficial Utilizando O Modelo Swmm Em Bacias Urbanas Com Enfoque Na Geração De Cargas De Poluição Difusa, Bento Gonçalves, Anais do XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2013.

CHAMPS, José Roberto; SASDELI Perez; TRIGUEIRO Silvana; VASCONCELLOS, Carla Maria. O Planejamento do Sistema de Drenagem Urbana na Cidade de Belo Horizonte. 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, ABES (2001). João Pessoa, PB, Brasil; 2001.

CHAMPS, José Roberto. Inundações urbanas em Belo Horizonte. Ocorrências, controle e medidas de proteção. Aqua-LAC - Vol. 4 - Nº 2 - Set. 2012

COLLISCHONN, Walter; TASSI, Rutineia. Introduzindo hidrologia: Volume de escoamento: método SCS. Ed. da Universidade: IPH – UFRGS. 2008. p. 60-61 (Verção 5). 155 p

DRUMOND, Pedro de Paula. Estudo da influência da reservação de águas pluviais em lotes no município de Belo Horizonte, MG: Avaliação hidráulica e hidrológica. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da UFMG. Belo Horizonte 2012.

FILHO, *Carlos* Fernandes de Medeiros. Apostila de Abastecimento de Água. Universidade Federal de Campina Grande. Unidade Acadêmica de Engenharia Civil. Campina Grande-PB. Sem data (s/d).

FONSECA, Paulo Luiz da ; NASCIMENTO, ElsonAntonio do ; LONGO, Orlando Celso. Gestão ambiental de bacias hidrográficas: medidas não convencionais no controle de cheias urbanas – principais aspectos, considerações e ações integradas . XIII SIMPEP - Bauru, SP, Brasil, 6 a 8 de Novembro de 2006.

FRANCO, Edu José . Dimensionamento de bacias de detenção das águas pluviais com base no método racional. Dissertação(Mestrado) .Pós-graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná. Paraná Dez 2004.

FCTH- Fundação Centro tecnológica de Hidráulica-Prefeitura do Município de São Paulo. DIRETRIZES BÁSICAS PARA PROJETOS DE DRENAGEM URBANA NO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. Reedição eletrônica realizada em Abril/1999.

GONTIJO, N. T. Avaliação das Relações de Frequência entre Precipitações e Enchentes Raras por Meio de Séries Sintéticas e Simulação Hidrológica. Tese (Mestrado)Universidade Federal de Minas Gerais-UFMG Belo Horizonte-MG, 2007.

IPH, Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Plano Diretor de Drenagem Urbana de Porto Alegre – Manual de Drenagem Urbana. Porto Alegre: IPH/UFRGS, 223 p., 2005.

JAYME, Juliana Gonzaga; TREVISAN, Eveline. Intervenções Urbanas, usos e ocupações de espaços na região central de Belo Horizonte. Civitas–Revista de Ciências Sociais, v. 12, n. 2, 2012.

JÚNIOR, Antenor Rodrigues Barbosa. Elementos de Hidrologia Aplicada - Notas de Aula. Universidade Federal de Ouro Preto, Departamento de Engenharia Civil. Sem Data (s/d).

LANÇA, R. M. M.; RODRIGUES, A. C. Um modelo distribuído de precipitação/escoamento superficial. In: 5º congresso da Água, Lisboa Portugal: APRH. 2000.

LIMA, Herlander Mata; SILVA, Evaristo Santos e Raminhos, Cristina. Bacias de retenção parágrafo Gestão do Escoamento.: Métodos de Dimensionamento e instalação *Rem: Rev. Esc. Minas*[online]. 2006

MACEDO, Rene Lebarbenchon; Estudo hidrológico da bacia do Rio Negrinho – SC utilizando o HEC-HMS.UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina- Centro Tecnológico. Dissertação (Graduação) Florianópolis, SC. Março de 2010

MANO, Eduarda Raquel da Costa. Estudo de Bacias de Retenção como solução para situações crescentes de urbanização. FEUP Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Mestrado Integrado em Engenharia Civil; Departamento De Engenharia Civil. Dissertação (Mestrado). Porto, 2008.

MATEUS, Rosiane da Silva; Modelo hidrológico da Bacia Hidrográfica da Represa Guarapiranga – São Paulo SP. Universidade De São Paulo. Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas. Pós graduação em Geografia Física. Federal de Santa Catarina- Centro Tecnológico. Dissertação (Mestrado) São Paulo SP. Outubro de 2006.

MATIAS, Maria Gorete Barata. Bacias de retenção: estudo de métodos de dimensionamento. FEUP Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Mestrado Integrado em Engenharia Civil; Departamento De Engenharia Civil. Dissertação (Mestrado). Porto, 2006.

MATTA, G. V.; PEIXOTO, L.; Oliveira, L. M. Análise do impacto do uso de reservatórios de detenção domiciliares no escoamento superficial urbano. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais- CEFET-MG. Departamento de Ciência e Tecnologia Ambiental- DCTA. Projeto de Pesquisa PIBIC. Belo Horizonte, 2013.

MILDE, L. C. E.; MORAES J. M.; MORTATTI, J.; FERRAZ, FERNANDO F. I. B.; GROppo, J. Modelo espaço-temporal HEC-HMS: avaliação na bacia de drenagem de Analândia. *Revista de Ciência & Tecnologia*, v. 10, n. 19, p. 61-69, 2002.

MOLIN, L.; DE VILLA, I.; GOULART, J. P.; MAESTRINI, A. P. Distribuição temporal de chuvas intensas em Pelotas, RS. Pelotas, RS. 1996.

MOTA Erica, et al. (São Paulo). ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland (Org.). PROJETO TÉCNICO: RESERVATÓRIOS DE DETENÇÃO. Jaguaré: Fábrica de Ideias Brasileiras – Fib, 2012. 13 p. (Programa Soluções para Cidades). Disponível em: <<http://www.solucoesparacidades.com.br/>>. Acesso em: 09 jan. 2015.

MOTA Erica, et al. (São Paulo). ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland (Org.). PROGRAMA DRENURBSUma concepção inovadora dos recursos hídricos no meio urbano Belo Horizonte - MG. Jaguaré: Fábrica de Ideias Brasileiras – Fib, 2012b. 13 p. (Programa Soluções para Cidades). Disponível em: <<http://www.solucoesparacidades.com.br/>>. Acesso em: 17 jan. 2015.

MOURA, Priscilla Macedo .Contribuição para a avaliação global de sistemas de drenagem urbana. Tese (Mestrado)Universidade Federal de Minas Gerais-UFGM Belo Horizonte-MG, 2004.

NASCIMENTO, Nilo de Oliveira and HELLER, Léo.Ciência, tecnologia e inovação na interface entre as áreas de recursos hídricos e saneamento. *Eng. Sanit. Ambient.* [online]. 2005, vol.10, n.1, pp. 36-48. ISSN 1413-4152.

NAKAZONE, LUCIA MIDORI. Implantação de Reservatórios de Detenção em Conjuntos Habitacionais: a Experiência da CDHU. Dissertação (Mestrado) apresentada à Escola Politécnica da USP em 2005.

NEVES, M. G. F. P.; TASSI, R.; ALLASIA, D. G.; VILLANUEVA, A. O. N. (2005). Propostas de melhorias nos reservatórios para o controle de cheias. XX Congresso Nacional Del Agua y III Simposio de Recursos Hidricos Del ConoSur, Mendonça, Argentina, 12 p.

PINHEIRO, M. M. G.; NAGHETTINI, M. Análise regional de frequência e distribuição temporal das tempestades na região metropolitana de Belo Horizonte - RMBH. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 3, n. 4, p. 73-88. 1998.

PORTO, Rodrigo de Melo. Hidráulica Básica, 2a ed, São Carlos SP: Escola de Engenharia de São Carlos USP, 2000, 519 pg.

PREFEITURA MUNICIPAL DE BELO HORIZONTE-PBH, (2004). Instrução Técnica para Elaboração de Estudos e Projetos de Drenagem Urbana do Município de Belo Horizonte: Sudecap, 2004.

PREFEITURA MUNICIPAL DE BELO HORIZONTE-PBH, (2014). Informativo sobre enchentes. Disponível em: <http://portalpbh.pbh.gov.br/pbh/ecp/comunidade>. Belo Horizonte, 2014

PREFEITURA MUNICIPAL DE BELO HORIZONTE-PBH, (2015). Fundação de Parques Municipais. Disponível em: <http://portalpbh.pbh.gov.br>. Belo Horizonte, 2015

ReCESA Rede de Capacitação e Extensão Tecnológica em Saneamento Ambiental . Águas pluviais : técnicas compensatórias para o controle de cheias urbanas : guia do profissional em treinamento : nível 2 e 3 / Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de SaneamentoAmbiental (org.). – Belo Horizonte :ReCESA, 2007.

SANTOS, Keyla Almeida dos. Modelagem do acompanhamento e controle de cheias em bacias hidrográficas de grande variação de altitude: estudo de caso, bacia do Rio Mundaú. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife, 2013.

SCHARFFENBERG ,William A.; and FLEMING Matthew J.. Hydrologic Modeling System HEC-HMS User's Manual, Washington, DC : U.S. Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center, HEC ,2010, 308 pg

SOARES, Márcia Maria. Da barragem ao Parque Santa Lúcia: um estudo da transformação da paisagem urbana. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, 2001.

SILVA, R. I. Evolução da urbanização e seus efeitos no escoamento superficial na bacia do riacho Reginaldo.( Dissertação de Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento do Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento da Universidade Federal de Alagoas). Maceió – AL. 2009.

SOUZA, Rávila Marques de ; CRISPIM, Diogo Coelho ; FORMIGA , Klebber T. M. Estudo comparativo entre os modelos SWMM e HEC-HMS para simulação de escoamento superficial – Caso de Estudo Bacia do Córrego Samambaia. REEC – Revista Eletrônica de Engenharia Civil Vol5- nº 2 (2012)

SOUZA, Marcos Ferreira de ; COELHO, Márcia M. L. P. Coelho; MOURA, Priscilla Macedo; BAPTISTA, Márcio Benedito; MENEZES, Marcos Veloso de. Custos de Manutenção de Bacias de Detenção para controle de cheias na cidade de Belo Horizonte-MG. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos Bento Gonçalves/ RS 2013.

SUDECAP. Programa DRENURBS, Termo de Referência para Elaboração de Projetos, Belo Horizonte, (2.002).

SUDERHSA, Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental CH2M HILL DO BRASIL. 2002. Manual de drenagem urbana – Região metropolitana de Curitiba/PR - versão 1.0. 2002.

TUCCI, Carlos EM. Plano diretor de drenagem urbana: princípios e concepção. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 2, n. 2, p. 5-12, 1997.

TUCCI, C. E. M. Modelos hidrológicos. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos. 1998. 669p.

TUCCI, C. E. M.; MARQUES, D. M. L. da M. Avaliação e controle da drenagem urbana. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Volume 1. 2005.

TUCCI, C. E. M. Hidrologia Ciência e Aplicação. Porto Alegre: Ed. da UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos 2012.

USACE-HEC (b).“Hydrologic Modeling System, HEC-HMS – Applications Guide”, US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, March 2008.