

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Pedro Augusto Weber Toni

**DIMENSIONAMENTO DE DRENAGEM PLUVIAL:
IMPACTO DO ARRANJO DOS MICRO-RESERVATÓRIOS
NO CONTROLE DO ESCOAMENTO**

Porto Alegre
julho 2013

PEDRO AUGUSTO WEBER TONI

**DIMENSIONAMENTO DE DRENAGEM PLUVIAL:
IMPACTO DO ARRANJO DOS MICRO-RESERVATÓRIOS
NO CONTROLE DO ESCOAMENTO**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Juan Martín Bravo

Porto Alegre
julho 2013

PEDRO AUGUSTO WEBER TONI

**DIMENSIONAMENTO DE DRENAGEM PLUVIAL:
IMPACTO DO ARRANJO DOS MICRO-RESERVATÓRIOS
NO CONTROLE DO ESCOAMENTO**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, julho de 2013

Prof. Juan Martín Bravo
Dr. em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela UFRGS
Orientador

Profa. Carin Maria Schmitt
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Rodrigo Cauduro Dias De Paiva (UFRGS)
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Fernando Mainardi Fan (UFRGS)
Mestre pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Profa. Rosane Barbosa Lopes Cavalcante (UFRGS)
Mestre pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho a minha família, que sempre me apoiou e especialmente durante o período do meu Curso de Graduação estiveram ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Juan Martín Bravo, orientador deste trabalho, pela dedicação e empenho para me ajudar sempre que necessário em busca do melhor resultado possível para este trabalho.

Agradeço a Profa. Carin Maria Schmitt pelas críticas construtivas que serviram para a elaboração de um trabalho consistente.

Agradeço à minha família.

Agradeço aos meus colegas e amigos pelo apoio e amizade.

Há muitas maneiras de avançar,
mas só uma maneira de ficar parado.

Franklin D. Roosevelt

RESUMO

A ocorrência de inundações e enchentes em regiões urbanas vem se tornando comum no decorrer dos últimos anos, em função da elevada impermeabilização do solo, devido ao crescimento das grandes cidades. Uma das alternativas encontradas para diminuir esses problemas se baseia na utilização de medidas de controle de escoamento que buscam a redução das vazões de pico durante um evento de precipitação, através de dispositivos que armazenam uma parcela da água do escoamento superficial das áreas urbanizadas. No cenário atual de drenagem urbana a tendência é que essas medidas de controle sejam implantadas no lote, de maneira a não transferir o problema para jusante. Com o intuito de aliar soluções que reduzam os impactos gerados pela urbanização e incentivar o crescimento sustentável de regiões urbanas, de maneira a diminuir a frequência de alagamentos, este trabalho se propõe a dissertar sobre micro-reservatórios de retenção no lote. Uma análise da eficiência desses dispositivos, em relação à diminuição de vazões de pico, através de gráficos comparativos das vazões geradas para um ambiente no qual o lote apresenta alto grau de impermeabilização, para a hipótese de implementação de um dispositivo de controle isoladamente e em seguida para um cenário no qual dois dispositivos são implementados e por último um cenário em que quatro dispositivos são implementados. Para realizar essas análises, as características do regime hidrológico local foram estudadas, por meio da escolha de um loteamento, no município de Porto Alegre, através da observação de imagens de satélite e definição e caracterização das áreas que compõem sua superfície. A partir da equação IDF (Intensidade-Duração-Frequência), desta região da cidade, fornecida no Manual de Drenagem Urbana de Porto Alegre, foi criado o evento de precipitação e a partir disto foi realizado o processo de transformação da chuva em vazão de forma a permitir a comparação dos escoamentos superficiais resultantes nos diferentes cenários simulados. Durante o desenvolvimento das simulações, os resultados obtidos mostraram que um número maior de dispositivos aplicados em um loteamento não reflete em uma maior efetividade no abatimento das vazões geradas por essa área. Além disso, um número maior de micro-reservatórios pode levar a uma maior necessidade de volume de água a ser reservado para obter resultados aceitáveis de diminuição de vazão.

Palavras-chave: Drenagem Urbana. Diminuição de Vazões de Pico. Micro-Reservatórios.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Etapas do trabalho de diplomação	17
Figura 2 – Efeitos da urbanização sobre o padrão do escoamento superficial	20
Figura 3 – Curva IDF para a cidade de Porto Alegre	27
Figura 4 – Hietograma de projeto utilizando método dos blocos alternados	30
Figura 5 – Hidrograma unitário sintético triangular do SCS	35
Figura 6 – Exemplo de convolução de hidrogramas unitários	36
Figura 7 – Sequência de passos de um estudo de drenagem	40
Figura 8 – Hidrogramas típicos de pequenas áreas urbanas	43
Figura 9 – Esquema de micro-reservatório	43
Figura 10 – Detalhe da entrada e saída de um micro-reservatório	44
Figura 11 – Hidrograma de pré e pós-ocupação <i>on-line</i>	45
Figura 12 – Hidrograma de pré e pós-ocupação <i>off-line</i>	45
Figura 13 – Fluxograma detalhado do trabalho	47
Figura 14 – Localização da área estudada no município de Porto Alegre	49
Figura 15 – Composição da área do loteamento em estudo	50
Figura 16 – Divisão do terreno em duas sub-bacias	52
Figura 17 – Divisão do terreno em quatro sub-bacias	53
Figura 18 – Hietograma de projeto obtido pelo Método dos Blocos Alternados	57
Figura 19 – Modelo de micro-reservatório usado nas simulações	58
Figura 20 – Representação topológica do sistema no programa IPHS1 para o cenário com a utilização de um micro-reservatório	61
Figura 21 – Representação topológica do sistema no programa IPHS1 para o cenário com a utilização de dois micro-reservatórios em paralelo	62
Figura 22 – Representação topológica do sistema no programa IPHS1 para o cenário com a utilização de dois micro-reservatórios em série	62
Figura 23 – Representação topológica do sistema no programa IPHS1 para o cenário com a utilização de quatro micro-reservatórios em paralelo	63
Figura 24 – Representação topológica do sistema no programa IPHS1 para o cenário com a utilização de quatro micro-reservatórios em série	63
Figura 25 – Vazão de saída do loteamento obtida para a simulação com um micro-reservatório	65
Figura 26 – Vazões de saída do loteamento obtidas para a simulação com dois dispositivos em paralelo	66
Figura 27 – Vazões de saída do loteamento obtidas para a simulação com dois dispositivos em série	68

Figura 28 – Vazões de saída do loteamento obtidas para a simulação com quatro dispositivos em paralelo	71
Figura 29 – Vazões de saída do loteamento obtidas para a simulação com quatro dispositivos em série	73
Figura 30 – Vazões de saída do loteamento, inferiores a vazão de pré-desenvolvimento, para cada cenário estudado	74

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação hidrológica dos solos pelo método SCS	31
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coeficiente de escoamento de acordo com o tipo de ocupação	23
Tabela 2 – Coeficiente de escoamento de acordo com o tipo de superfícies de revestimento	24
Tabela 3 – Período de retorno para sistemas urbanos	28
Tabela 4 – Número de escoamento para regiões urbanas, suburbanas e agrícolas	32
Tabela 5 – Número de escoamento para regiões rurais	33
Tabela 6 – Valor de CN para a ocupação inicial	51
Tabela 7 – Quantificação e percentual da composição das áreas	51
Tabela 8 – Quantificação e percentual da composição das áreas para duas divisões do terreno.....	54
Tabela 9 – Quantificação e percentual da composição das áreas para quatro divisões do terreno	54
Tabela 10 – Chuva de projeto	56
Tabela 11 – Hipóteses de sistema de micro-reservatórios avaliados	60
Tabela 12 – Resultados obtidos para a simulação com um micro-reservatório	64
Tabela 13 – Resultados obtidos para a simulação com dois dispositivos em paralelo	66
Tabela 14 – Resultados obtidos para a simulação com dois dispositivos em série	67
Tabela 15 – Resultados obtidos para a simulação com quatro dispositivos em paralelo .	70
Tabela 16 – Resultados obtidos para a simulação com quatro dispositivos em série	72
Tabela 17 – Resumo dos resultados encontrados	73

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	15
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	15
2.2 OBJETIVO DA PESQUISA	15
2.3 PREMISSA	15
2.4 PRESSUPOSTO	15
2.5 DELIMITAÇÕES	16
2.6 LIMITAÇÕES.....	16
2.7 DELINEAMENTO.....	16
2.7.1 Pesquisa bibliográfica	17
2.7.2 Caracterização das variáveis	18
2.7.3 Condições hipotéticas estudadas	18
2.7.4 Aplicação do modelo de cálculo	18
2.7.5 Análise dos resultados obtidos	18
2.7.6 Considerações finais	19
3 ÁGUAS URBANAS: DEFINIÇÕES E ASPECTOS GERAIS	20
3.1 BACIAS HIDROGRÁFICAS	21
3.2 CICLO HIDROLÓGICO	24
3.3 DRENAGEM URBANA	37
4 MICRO RESERVATÓRIOS DE DETENÇÃO	42
4.1 PARAMETROS DE DIMENSIONAMENTO	44
4.2 VANTAGENS E DESVANTAGENS DA UTILIZAÇÃO	45
5 CARACTERIZAÇÃO E MODELAGEM	47
5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS	48
5.1.1 Descrição da área estudada	48
5.1.2 Definição e quantificação das áreas	49
5.2 HIETOGRAMA DE PROJETO	55
5.3 VAZÃO DE PRÉ-DESENVOLVIMENTO	57
5.4 PROJETO E DIMENSIONAMENTO DOS MICRO-RESERVATÓRIOS	58
5.5 CENÁRIOS HIPOTÉTICOS ESTUDADOS	59
5.6 MODELAGEM CHUVA-VAZÃO	61
6 ANÁLISE DE RESULTADOS	64
6.1 REDUÇÃO DA VAZÃO DE PICO COM UM MICRO-RESERVATÓRIO	64

6.2 REDUÇÃO DA VAZÃO DE PICO COM DOIS MICRO-RESERVATÓRIOS	65
6.2.1 Redução da vazão de pico com dois micro-resrvatórios em paralelo	65
6.2.2 Redução da vazão de pico com dois micro-resrvatórios em série	67
6.3 REDUÇÃO DA VAZÃO DE PICO COM QUATRO MICRO-RESERVATÓRIOS	68
6.3.1 Redução da vazão de pico com quatro micro-resrvatórios em paralelo	68
6.3.2 Redução da vazão de pico com quatro micro-resrvatórios em série	71
6.4 RESUMO DOS RESULTADOS	73
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	75

1 INTRODUÇÃO

Com o aumento populacional e o desenvolvimento econômico ocorrido no Brasil, o número de edificações vem crescendo em grande escala. Tanto os grandes centros urbanos, como áreas de menor densidade populacional, estão tendo seu território modificado, devido à construção de loteamentos e condomínios. Como decorrência desses fatores o solo, antes coberto por vegetação, está sofrendo um processo de impermeabilização, tornando os escoamentos superficiais mais rápidos devido ao menor período de concentração e menor nível de infiltração da água precipitada. Em decorrência desse fato, ocorrem sobrecargas nos sistemas de drenagem das cidades, resultando em um número cada vez maior de enchentes e alagamentos.

Em se tratando de drenagem urbana, a tendência é a utilização de técnicas que visam à manutenção das características originais do solo, combatendo na fonte a geração de vazões de pico. Em um programa de drenagem urbana, para que ocorram resultados satisfatórios, alguns princípios devem ser considerados. Dentre eles, há o que estipula que os usuários urbanos não devem alongar a cheia natural da bacia, ou seja, durante os eventos chuvosos o escoamento não pode ser ampliado em função da urbanização da bacia hidrográfica, seja em um simples loteamento, ou em obras de microdrenagem e macrodrenagem que constituem a rede de drenagem urbana. Como solução interessante para este fim, são utilizados os micro-reservatórios de controle de escoamento, dispositivos estes capazes de reduzir volumes de escoamento superficial e vazões de pico. Este tipo de dispositivo de controle é capaz de reduzir o tempo de resposta das bacias e as vazões de pico para níveis iguais ou até inferiores aos observados antes da urbanização. É importante salientar que para ocorrer um completo funcionamento destas alternativas que priorizam a preservação do sistema de drenagem urbana, as medidas a serem tomadas são de responsabilidade daqueles que produzem o aumento do escoamento superficial.

Na tentativa de buscar uma solução para a diminuição de vazões de pico de escoamentos superficiais, com o intuito de não ocorrer à sobrecarga do sistema de drenagem urbano, este trabalho tem como objetivo o estudo da utilização de dispositivos para o controle pluvial no lote. Foi proposto, então, o abatimento destas vazões por meio de micro-reservatórios que

detenham o escoamento superficial, analisando o número ideal de reservatórios e a distribuição espacial dos mesmos em um loteamento.

A descrição do método, questão e objetivos da pesquisa são transcritos no segundo capítulo. Ainda, são apresentadas a hipótese, pressuposto, premissa, delimitações, limitações e o delineamento do trabalho.

No terceiro capítulo são apresentados alguns conceitos fundamentais para o entendimento de como os processos hidrológicos ocorrem nas bacias hidrográficas e como estes são alterados em decorrência da urbanização, fundamentalmente no âmbito da drenagem urbana. São definidas as características mais importantes de uma bacia, e como essas afetam o escoamento superficial, além da definição de eventos de projeto.

A descrição dos dispositivos de controle pluvial quanto à funcionalidade e a aplicação são exibidas no quarto capítulo.

Após apresentados os componentes fundamentais para o entendimento do trabalho através da pesquisa bibliográfica apresentada nos capítulos anteriores, o capítulo 5 apresenta os parâmetros e características da bacia relevantes no processo de transformação da chuva em escoamento superficial. Neste capítulo também são apresentadas diferentes variáveis a serem avaliadas a fim de verificar a sua influência no abatimento das vazões geradas pelo loteamento. Cinco cenários foram simulados para passarem por avaliações: cenário com a utilização de um dispositivo, cenário com a implantação de dois dispositivos em paralelo, cenário com a implantação de dois dispositivos em série, cenário com a implantação de quatro dispositivos em paralelo e cenário com a implantação de quatro dispositivos em série.

No capítulo 6 são realizadas as análises dos resultados obtidos através da simulação dos diferentes cenários. Os resultados encontrados em cada um dos cenários são apresentados em gráficos e tabelas, de forma a facilitar a compreensão por parte do leitor.

No último capítulo são realizadas as considerações finais e conclusões obtidas a respeito do trabalho desenvolvido.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: qual a influência da localização dos micro-reservatórios na redução das vazões de pico escoadas, geradas em um loteamento urbano, para o controle pluvial no lote?

2.2 OBJETIVO DA PESQUISA

O objetivo do trabalho é dar suporte para a tomada de decisão no projeto de micro-reservatórios de controle de escoamento pluvial no lote para o abatimento de vazões de pico escoadas, para um determinado loteamento urbano, em relação aos aspectos quantitativos do escoamento de água precipitada.

2.3 PREMISSA

O trabalho tem por premissa que em um loteamento urbano o escoamento superficial deve ser controlado na fonte geradora de maneira que suas consequências não sejam repassadas para jusante.

2.4 PRESSUPOSTO

O trabalho tem por pressuposto que os registros históricos de pluviógrafos fornecidos no manual de Drenagem Urbana de Porto Alegre, apresentados no formato de curvas IDF (Intensidade-Duração-Frequência), são representativos das condições futuras da ocorrência de precipitações.

2.5 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se a um loteamento urbanizado da cidade de Porto Alegre.

2.6 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

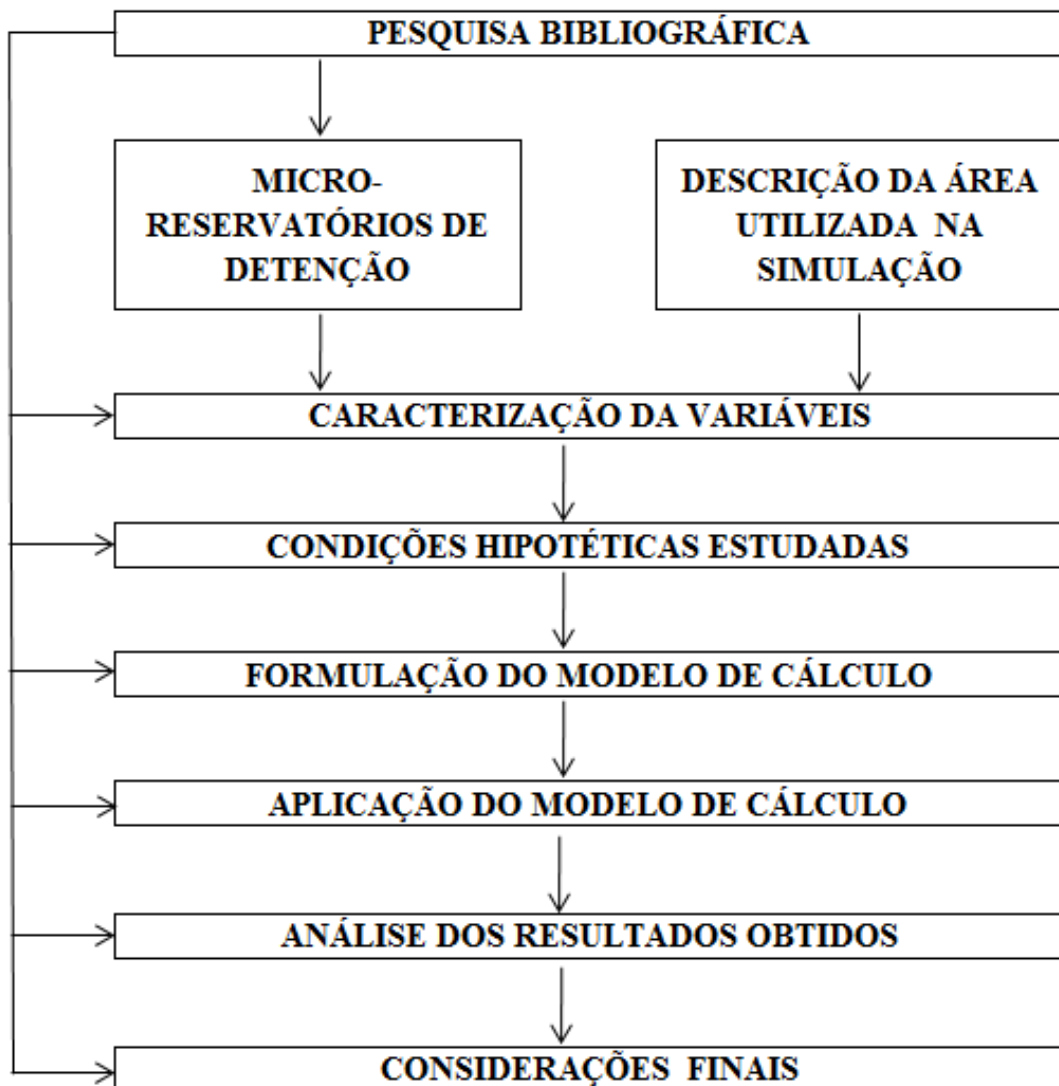
- a) a utilização das curvas IDF do posto pluviométrico do 8º Distrito da cidade de Porto Alegre;
- b) a utilização de micro-reservatórios de detenção apenas para diminuir as vazões de pico;
- c) loteamento com alta taxa de impermeabilização do solo e passível da utilização de dispositivos de controle de escoamento;
- d) a utilização somente dos métodos do hidrograma unitário triangular do SCS na transformação de chuva em vazão;
- e) a utilização de planilha eletrônica para a apresentação de tabelas e gráficos representativos aos resultados do trabalho;
- f) a utilização do método dos blocos alternados na construção do hidrograma de projeto;
- g) a utilização de apenas diâmetros comerciais para os orifícios de saída dos micro-reservatórios.

2.7 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das etapas apresentadas a seguir, que estão representadas na forma esquemática na figura 1, descritas nos próximos itens:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) descrição da área utilizada na simulação;
- c) caracterização das variáveis;
- d) condições hipotéticas estudadas;
- e) formulação do modelo de cálculo;
- f) aplicação do modelo de cálculo;
- g) análise dos resultados obtidos;
- h) considerações finais.

Figura 1 – Etapas do trabalho de diplomação



(fonte: elaborado pelo autor)

2.7.1 Pesquisa bibliográfica

Com a definição do tema, teve início a pesquisa bibliográfica através da recomendação do professor orientador. A partir destas obras foram coletados dados e informações com o intuito de aprofundar o conhecimento do tema escolhido. Durante esta etapa foram obtidas informações sobre:

- a) ciclo hidrológico;
- b) drenagem urbana;
- c) determinação do coeficiente de escoamento superficial;
- d) dispositivos de controle pluvial na fonte;

- e) pré-dimensionamento de dispositivos de controle pluvial;
- f) micro-reservatórios de retenção.

2.7.2 Caracterização das variáveis

Durante esta etapa ocorreu a definição das variáveis utilizadas no processo de pré-dimensionamento de micro-reservatórios de retenção com aplicação em um loteamento: definição do hidrograma de projeto utilizado, proporção entre áreas com capacidade de infiltração e as áreas impermeáveis, análise entre volume de água precipitado e escoado, além do desenvolvimento de um modelo no *software Microsoft Excel*.

2.7.3 Condições hipotéticas estudadas

Esta etapa teve como foco a análise de como os micro-reservatórios de retenção podem ser dispostos em um loteamento, primeiramente analisou-se qual a vazão de pico deveria ser abatida no loteamento. Em um segundo momento, foi testada a este com a utilização de apenas um dispositivo para o abatimento das vazões de pico, em seguida outras hipóteses foram testadas: variando-se o número de dispositivos e o tipo de ligação entre eles.

2.7.4 Aplicação do modelo de cálculo

Com as variáveis para os dispositivos já caracterizadas, o loteamento estudado definido e com a composição das combinações dos dispositivos, foi possível criar um modelo de cálculo baseado em estudos já desenvolvidos para a transformação dos dados de entrada, precipitações, em hidrogramas de projeto para cada uma das combinações analisadas.

2.7.5 Análise dos resultados obtidos

Ocorreram assim as análises dos resultados alcançados a partir da aplicação do modelo matemático no loteamento estudado e a eficácia do número de micro-reservatórios e suas disposições no loteamento, gerando assim gráficos que relacionam o número de micro-reservatórios e seus tipos de ligação com as vazões de pico abatidas.

2.7.6 Considerações finais

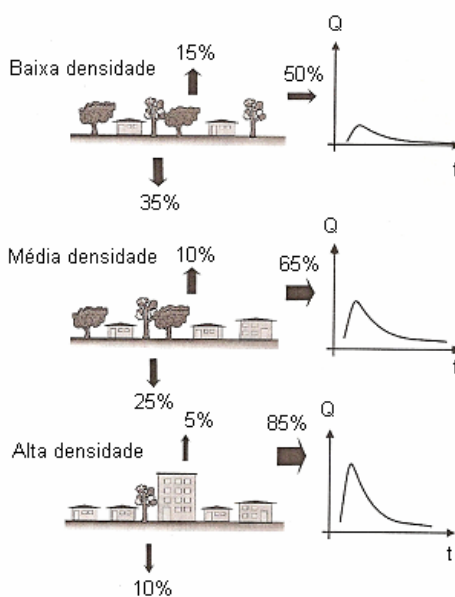
Nesta etapa transcorreram as considerações finais sobre os resultados obtidos com a realização deste trabalho.

3 ÁGUAS URBANAS: DEFINIÇÕES E ASPECTOS GERAIS

A aceleração da economia brasileira nos últimos anos, vem fazendo com que as áreas urbanas passem por um processo de expansão desenfreado. Este crescimento cada vez maior no número de edificações nas médias e grandes cidades brasileiras, esta levando a uma diminuição considerável das áreas verdes dos municípios. Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2010), 84% da população brasileira vive em áreas urbanas. O processo de transformação do ambiente natural, antes coberto por vegetação, em áreas construídas faz com que regiões onde antes existia a possibilidade da água da chuva infiltrar no solo se tornem impermeáveis. Esse aumento da impermeabilização do solo faz com que ocorra a elevação do escoamento superficial das águas escoadas e das vazões de pico, fatores esses que por sua vez tendem a sobrecarregar os sistemas de drenagem urbana.

Costa et al. (2007, p. 10) afirmam que áreas que sofrem um intenso processo de urbanização, após curtos períodos de precipitação, tem seus hidrogramas modificados conforme mostra a figura 2.

Figura 2 – Efeitos da urbanização sobre o padrão do escoamento superficial



(fonte: COSTA et al., 2007, p. 10)

Segundo Tucci (1995, p. 15), “Os efeitos desse processo fazem-se sentir sobre todo o aparelhamento urbano relativo a recursos hídricos: abastecimento de água, transporte e tratamento de esgotos cloacais e drenagem pluvial.”.

Em áreas com alta densidade de urbanização são notados alguns efeitos que interferem diretamente nos processos hidrológicos que atuam na bacia. Castro et al. (2008, p. 9) exemplificam estes processos como fenômenos físicos ou acontecimentos que se manifestam na superfície terrestre em função das precipitações à medida que estas águas circulam pela crosta terrestre. De maneira a compreender o funcionamento desses fenômenos e qual as suas influências em relação às atividades humanas, torna-se essencial um entendimento do fenômeno chuva, do ciclo hidrológico e de bacias hidrográficas. Assim esses tópicos são detalhados nos próximos itens.

3.1 BACIAS HIDROGRÁFICAS

A bacia hidrográfica é definida como a superfície topográfica drenada por um curso d'água e seus afluentes a montante dessa seção. A delimitação desta área é feita por uma linha que atravessa todos os cumes das elevações periféricas (divisor de águas) e que corta a corrente somente uma vez no exutório, que é a parte mais baixa da linha cumeada. O tipo de onda de cheia gerada tem influência direta com as características da bacia, tornando de grande importância o conhecimento dessas características, para que possa ser efetivada a transformação de chuva em vazão. Em relação a estes parâmetros, os mais importantes são a área de drenagem, o tempo de concentração e o coeficiente de escoamento (CASTRO et al., 2008, p. 9).

Em uma bacia a área de drenagem corresponde à superfície na qual os eventos de precipitação ocorridos sobre essa região tem contribuição para o mesmo sentido de escoamento ou para o mesmo leito, ou seja, os escoamentos superficiais provenientes das precipitações são direcionados para o mesmo ponto de saída da região. Assim sendo, torna-se possível concluir que se trata da área na qual as consequências das precipitações vão ser estudadas ou investigadas (CASTRO et al., 2008, p. 9-12).

Segundo Tucci (2007, p. 394), tempo de concentração é “[...] o tempo necessário para a água precipitada no ponto mais distante da bacia deslocar-se até a seção principal. Esse tempo é definido também entre o fim da precipitação e o ponto de inflexão do hidrograma.”.

O coeficiente de escoamento é o total de água de escoamento produzida em função de um evento chuvoso, sendo modificado em decorrência da urbanização da bacia e a amplitude da enchente que ocorre, e é definido como a relação entre os volumes totais de escoamento durante o evento e o volume total precipitado (TUCCI, 2000, p. 61-64).

Castro et al. (2008, p. 11-12) salienta que o tempo de concentração pode ser determinado para uma série de pontos da área em questão, criando um campo de períodos de escoamento, dessa maneira é possível interpolar uma rede de isolinhas de mesma duração ou isócronas, e o maior valor obtido nessas regiões será adotado como tempo de concentração para esta região.

Costa et al. (2007, p. 34) definem o coeficiente de escoamento ou deflúvio, como a relação entre o volume que esco superficialmente na bacia e o volume total que precipita.

O tipo de solo predominante na bacia e sua capacidade de infiltração são fatores que afetam diretamente o coeficiente de escoamento. Solos com pouca permeabilidade, como os argilosos, apresentam valores de escoamento superficial muito elevado, e as bacias constituídas por este tipo de material tem um alto potencial para a geração de cheias. Todavia, solos constituídos por areias possuem elevada capacidade de infiltração e diminutas possibilidades de gerar cheias. A cobertura vegetal que recobre o solo da bacia também afeta diretamente o coeficiente de escoamento (CASTRO et al. 2008, p. 13).

O Plano Diretor de Drenagem Urbana (PDDrU) (PORTO ALEGRE, 2005, p. 86-87) fornece duas tabelas com coeficientes de escoamento: uma com base no tipo de ocupação e outra de acordo as superfícies de revestimento (tabela 1 e 2 respectivamente).

Tabela 1 – Coeficientes de escoamento de acordo com o tipo de ocupação

Descrição da área	C
Área Comercial/Edificação muito densa	
Partes centrais, densamente construídas, em cidade com ruas e calçadas pavimentadas	0,70 – 0,95
Área Comercial/Edificação não muito densa	
Partes adjacentes ao centro, de menor densidade de habitações, mas com ruas e calçadas pavimentadas	0,60 – 0,70
Área Residencial	
residências isoladas; com muita superfície livre	0,35 – 0,50
unidades múltiplas (separadas); partes residências com ruas macadamizadas ou pavimentadas	0,50 – 0,60
unidades múltiplas (conjugadas)	0,60 – 0,75
lotes com >2.000 m ²	0,30 – 0,45
áreas com apartamentos	0,50 – 0,70
Área industrial	
Indústrias leves	0,50 – 0,80
Indústrias pesadas	0,60 – 0,90
Outros	
Matas, parques e campos de esporte, partes rurais, áreas verdes, superfícies arborizadas e parques ajardinados	0,05 – 0,20
Parques, cemitérios, subúrbio com pequena densidade de construção	0,10 – 0,25
<i>Playgrounds</i>	0,20 – 0,35
Pátios ferroviários	0,20 – 0,40
Áreas sem melhoramentos	0,10 – 0,30

(fonte: PORTO ALEGRE, 2005, p. 86)

Tabela 2 – Coeficiente de escoamento de acordo com superfícies de revestimento

Superfície	C
Pavimento	
Asfalto	0,70 – 0,95
Concreto	0,80 – 0,95
Calçadas	0,75 – 0,85
Telhado	0,75 – 0,95
Cobertura: grama/areia	
plano (declividade 2%)	0,05 – 0,10
médio (declividade de 2 a 7%)	0,10 – 0,15
alta (declividade 7%)	0,15 – 0,20
Gramma, solo pesado	
plano (declividade 2%)	0,13 – 0,17
médio (declividade de 2 a 7%)	0,18 – 0,22
alta (declividade 7%)	0,25 – 0,35

(fonte: PORTO ALEGRE, 2005, p. 87)

3.2 CICLO HIDROLÓGICO

O ciclo hidrológico é estudado com maior ênfase em sua fase terrestre, em que o componente crucial a ser analisado é a bacia hidrográfica. Segundo Castro et al. (2008, p. 12-14), o trânsito de água no meio ambiente pode ser analisado conceitualmente como um ciclo fechado contínuo de entradas, saídas e armazenamentos interligados. Esse deslocamento de água pode ser interpretado como uma troca de volumes hídricos entre dois grandes reservatórios, um terrestre e outro atmosférico que efetuam a transposição de água entre si, utilizando dois importantes processos hidrológicos, que são a evaporação e a precipitação. No âmbito terrestre, o processo de formação e difusão do escoamento subterrâneo e superficial é de elevada importância na hidrologia. O fenômeno que propicia a entrada principal é a precipitação e as saídas podem ocorrer tanto na forma de evaporação, escoamento ou infiltração.

Tucci (2007, p. 8) afirma que:

O ciclo hidrológico é impulsionado por energia eletromagnética proveniente do sol e pela energia de caráter gravitacional do sistema solar. O sol fornece energia para a evaporação da água e o campo gravitacional terrestre, conjuntamente com a força de Coriolis, condicionam o movimento dos ventos (responsáveis pelo transporte

atmosférico horizontal); as influências gravitacionais do sol e da lua alteram o equilíbrio das massas de água e as variações na emissão de energia pelo sol (manchas solares) e nos raios cósmicos e incidem sobre a estabilidade atmosférica, afetando, por sua vez, a distribuição de água superfície terrestre.

Em relação aos quantitativos referentes às principais partes envolvidas no ciclo hidrológico, é difícil estabelecer valores fixos para cada fenômeno devido ao fato de que a circulação atmosférica é um processo extremamente complexo, dinâmico e com fluxo não linear. No entanto, existe a possibilidade de gerar estimativas de algumas etapas do processo como a infiltração, evapotranspiração e escoamento superficial das bacias hidrográficas urbanas (CASTRO et al., 2008, p. 12-13).

Segundo Buffon (2010, p. 17), a etapa do ciclo hidrológico mais perceptível pela sociedade no meio urbano é a chuva, devido ao fato de que quando ocorre sobre superfícies impermeabilizadas pela urbanização é impossibilitada de infiltrar no solo, originando uma elevação no volume que escoar superficialmente e tendo como consequência alagamentos e enchentes.

A compreensão das inter-relações das variáveis que descrevem os processos hidrológicos pode ser melhorada com a utilização de diagramas apropriados para cada caso. Em relação às chuvas, a utilização de pluviômetros manuais ou digitais pode medir com grande facilidade a quantidade gerada pelo fenômeno em relação a uma determinada área, com os valores formados por uma escala diária proveniente destes registros, é possível construir uma série histórica de volumes precipitados.

Nos dias de hoje é possível ter acesso aos dados de séries pluviométricas diárias para diversas regiões brasileiras com enorme facilidade. Os sítios eletrônicos de entidades e associações com estes fins apresentam registros históricos com um bom grau de confiabilidade. Por meio destes registros as curvas e equações IDF são produzidas para esta determinada localidade, estas curvas recebem este nome porque relacionam intensidade, duração e frequência de chuvas.

Segundo o PDDrU (PORTO ALEGRE, 2005, p. 22), “A precipitação é a principal informação hidrológica de entrada utilizado no cálculo das vazões de projeto das obras de drenagem pluvial. A expressão precipitação de projeto identifica a precipitação utilizada na geração do hidrograma ou vazão de projeto.”.

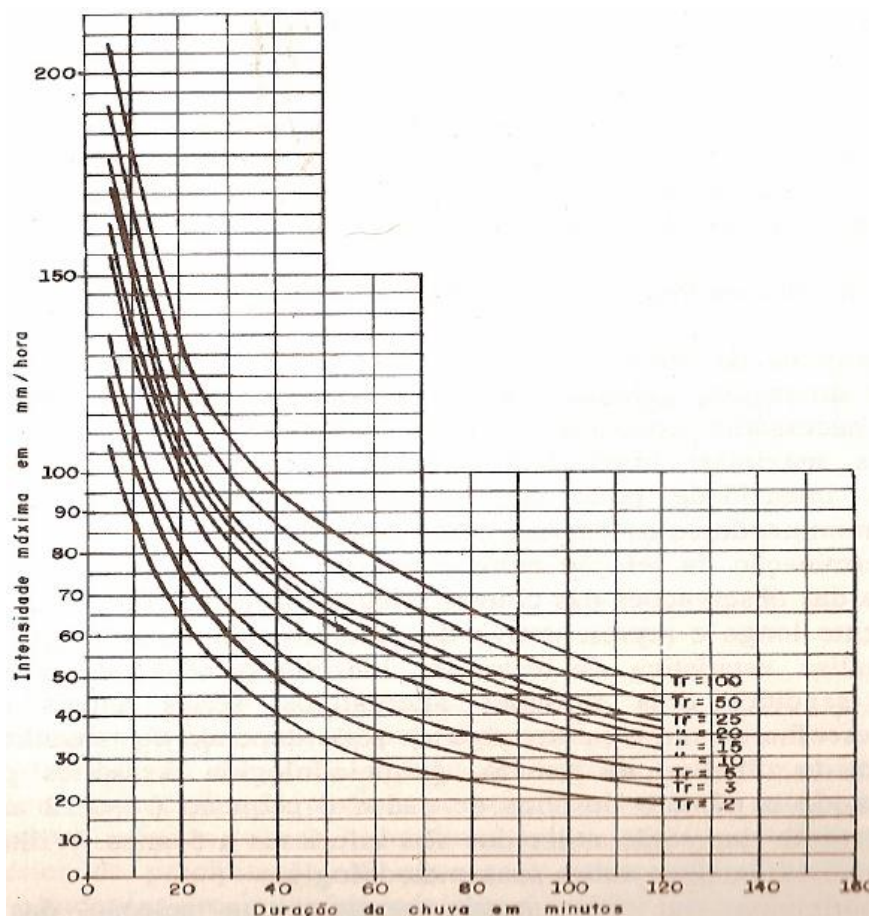
Costa et al. (2007, p. 22) salientam que “O hietograma de projeto é uma sequencia de intensidades de chuva que descrevem a entrada de água na bacia contribuinte, para qual determinada obra deve ser projetada.”.

Conforme o PDDrU (PORTO ALEGRE, 2005, p. 23):

As precipitações de projeto são normalmente determinadas a partir de relações intensidade-duração-frequência (curvas IDF) da bacia contribuinte. Expressas sob forma de tabelas ou equações, as curvas IDF fornecem a intensidade da precipitação para qualquer duração e período de retorno. Pode-se obter uma lâmina ou altura de precipitação, multiplicando-se a intensidade dada pela IDF pela sua correspondente duração.

Com a utilização de dados estatísticos da chuva natural e de características de resposta da bacia hidrográfica é possível criar um evento crítico artificial chamado de chuva de projeto. No PDDrU (PORTO ALEGRE, 2005, p. 24), podem ser encontradas as equações das curvas IDF para quatro regiões distintas do município de Porto Alegre. Como pode ser visto na figura 3, a IDF representativa a uma determinada localidade, apresenta a intensidade da chuva em milímetros por hora em função de uma determinada duração de precipitação e um determinado tempo de retorno, sendo que esses fatores variam conforme o tipo e o porte de obra a ser dimensionado.

Figura 3 – Curva IDF para a cidade de Porto Alegre



(fonte: TUCCI, 2007, p. 202)

O período de retorno, conhecido também como período de recorrência, é o inverso da probabilidade de um determinado evento hidrológico ser igualado ou excedido em um determinado ano. Essa é a variável que identifica qual será o risco a ser adotado no projeto, utilizando uma relação dos investimentos envolvidos para reduzir a frequência das inundações e os prejuízos aceitos. Trata-se de definir qual será o risco que a sociedade deverá tolerar. Quando se adota um período de retorno de 10 anos, está se admitindo que em média possam ocorrer eventos que gerem prejuízos uma vez a cada 10 anos. Para ocorrer uma análise adequada do tempo de retorno a ser utilizado em um determinado projeto, é necessário que sejam efetuadas avaliações dos prejuízos que podem ocorrer tanto nos parâmetros econômicos quanto nos sociais, em decorrência dos impactos causados por enchentes, de maneira a se admitir riscos toleráveis. Para que os riscos causados pelos eventos tenham o seu potencial minimizado na etapa de projeto deve ser utilizado o limite superior para o período de retorno, sempre que se tratar de eventos que possam trazer grandes riscos à vida humana ou com

capacidade de interferência em obras de utilidade pública, como aeroportos ou rodovias. A tabela 3 apresenta os riscos usualmente adotados em projeto (TUCCI, [20--?], p. 53).

Tabela 3 – Período de retorno para sistemas urbanos

SISTEMA	CARACTERÍSTICA	INTERVALO	VALOR FREQUENTE
Microdrenagem	Residencial	2 – 5	2
	Comercial	2 – 5	5
	Áreas de prédios públicos	2 – 5	5
	Aeroporto	5 – 10	5
	Áreas comerciais e avenidas	5 – 10	10
Macro-drenagem		10 – 25	10
Zoneamento de áreas ribeirinhas		5 – 100	100

(fonte: TUCCI, [20--?], p. 54)

Tucci (1995, p. 110) afirma que a utilização de níveis de segurança elevados acarreta em custos elevados para as obras e em grandes intervenções no ambiente urbano. A possibilidade de diminuir custos e interferências é uma meta essencial em obras de drenagem urbana, porém esses fatores não devem ser obtidos com a utilização de períodos de retorno pequenos ou inadequados.

Conforme Baptista et al. (2005, p. 28):

O risco é quantificado pelo período de retorno do evento contra o qual se quer proteger. Definindo-se o risco como a junção de um fator aleatório natural e da vulnerabilidade do sistema que sofre este evento, pode-se modular a escolha do tempo de retorno em função da vulnerabilidade da área do objeto de estudo. De fato, não se justifica adotar o mesmo tempo de retorno para uma zona densamente ocupada e uma zona de estacionamento ocasional.

Em um evento de precipitação natural existe uma grande variabilidade da duração da chuva. O método hidrológico utilizado tem relação direta com a variação temporal nas chuvas de projeto. O Método Racional considera a chuva de projeto com intensidade constante em toda a sua duração, retirada diretamente da curva IDF. Já os métodos baseados em hidrogramas unitários utilizam a precipitação variável no tempo. O Manual apresenta o método de blocos

alternados, que constrói o hietograma de projeto a partir da curva IDF (PORTO ALEGRE 2005, p. 26).

Segundo o PDDrU (PORTO ALEGRE, 2005, p. 26), para uma correta determinação do tempo de duração da chuva algumas observações importantes devem ser levadas em consideração:

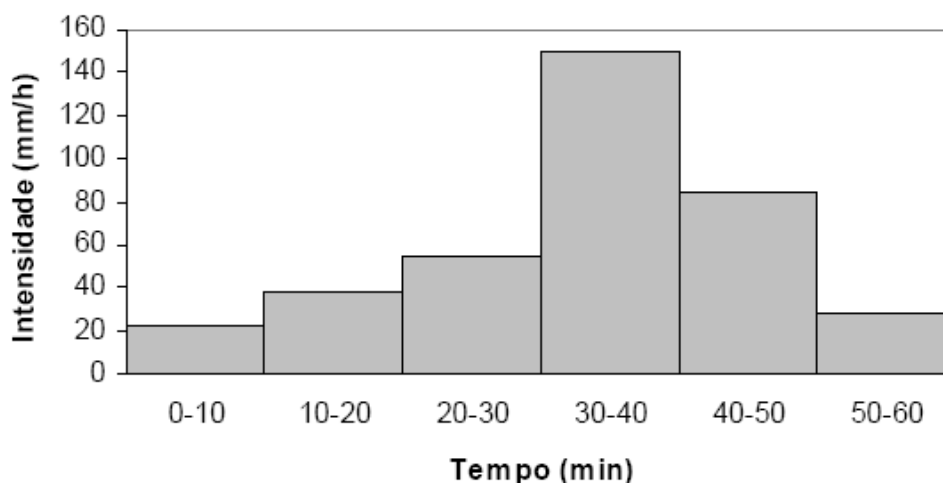
- a) a precipitação ocorrida deve ter um tempo de duração total igual ou maior que o tempo de concentração da bacia, admitindo que toda ela sinta o efeito da precipitação;
- b) a simulação deve ter um tempo total de pelo menos duas vezes o tempo de concentração, possibilitando que toda precipitação atue sobre o hidrograma de saída;
- c) as precipitações devem ter um intervalo de tempo preferencialmente de um terço do tempo de pico do hidrograma unitário da bacia.

O método dos blocos alternados é utilizado para que ocorra uma melhor distribuição da precipitação ao longo do tempo na tentativa de buscar um contexto no qual a precipitação torne-se crítica. O método tem como fundamento concentrar a precipitação baixa e média no início do tempo e a alta próxima ao final da duração, gerando hidrogramas de grande pico. Esta metodologia pode ser descrita em três etapas (PORTO ALEGRE, 2005, p. 27):

- a) para o tempo de retorno escolhido, calcular a precipitação relativa à duração, espaçadas pelo intervalo de tempo até a duração final através da curva IDF;
- b) fazer a diferença entre dois intervalos para encontrar o valor de cada intervalo, desacomulando os valores das precipitações obtidas em cada intervalo de tempo, assim obtém a primeira versão do hietograma;
- c) reordenar o hietograma, posicionando o maior valor na metade da duração total, o segundo logo após o de maior valor e o terceiro antes do de maior valor, criando o cenário mais desfavorável.

A figura 4 apresenta um hietograma de projeto definido a partir do método dos blocos alternados.

Figura 4 – Hietograma de projeto utilizando método dos blocos alternados



(fonte: COSTA et al., 2007, p. 25)

Existem diversas formas de realizar a transformação da precipitação em vazão, um dos métodos mais utilizados é por meio do modelo hidrológico sugerido pelo Soil Conservation Service (SCS) (TUCCI, 2007). Esse modelo hidrológico é definido por dois fatores, a aproximação da precipitação efetiva pelo método do coeficiente CN (Curva Número) e a construção do hidrograma de projeto pelo método do hidrograma unitário sintético.

O ordenamento dos solos apresentado no quadro 1 aponta para um solo de classificação A, um inferior valor do coeficiente CN, o limite da condição mais permeável, de maneira a gerar menor escoamento superficial. E assim, o módulo do coeficiente CN e, por conseguinte a impermeabilidade do solo aumenta para as demais classificações. Desta forma, um determinado solo que se enquadra na classificação D, apresenta valor de coeficiente CN maior em comparação aos demais, sendo para essa classificação o máximo da condição impermeável.

Quando as condições de utilização ou cobertura do solo em questão tiverem uma composição de variados valores para o coeficiente CN, o valor deste coeficiente é alcançado pela média ponderada das áreas com regiões homogêneas para a qual foi subdividida a bacia, conforme a fórmula 1:

$$CN = \frac{\sum_i^n CN_i \times A_{bi}}{\sum_i^n A_{bi}} \quad (\text{fórmula 1})$$

Onde:

CN = Coeficiente da bacia com áreas heterogêneas;

CN_i = Coeficiente da área homogênea i;

A_{bi} = área da região homogênea i.

Quadro 1 – Classificação hidrológica dos solos pelo método SCS

Grupo	Características
A	Solos arenosos com baixo teor de argila total, inferior a uns 8%, não há rocha nem camadas argilosas e nem mesmo densificadas até a profundidade de 1,5m. O teor de húmus é muito baixo, não atingindo 1%.
B	Solos arenosos menos profundos que os do Grupo A e com menor teor de argila total, porém ainda inferior a 15%. Nos casos de terras roxas este limite pode subir a 20% graças à maior porosidade. Os dois teores de húmus podem subir, respectivamente, a 1,2% e 1,5%. Não pode haver pedras nem camadas argilosas até 1,50m, mas é quase sempre presente camada mais densificada que a camada superficial.
C	Solos barrentos com teor total de argila de 20 a 30%, mas sem camadas argilosas impermeáveis ou contendo pedras até a profundidade de 1,20m. No caso de terras roxas, estes dois limites máximos podem ser de 40% e 1,50m. Nota-se, a cerca de 60 cm de profundidade, camada mais densificada que no Grupo B, mas ainda longe das condições de impermeabilidade.
D	Solos argilosos (30 – 40% de argila total) e ainda com camada densificada a uns 50cm de profundidade. Ou solo arenoso como B, mas com camada argilosa quase impermeável ou horizonte de seixos rolados.

(fonte: TUCCI, 2007, p. 404)

Tucci (2007) classifica os valores de CN de acordo com as regiões, ordenadas em urbanas, suburbanas e agrícolas ordenadas conforme a tabela 4 e, para o caso de bacias rurais, conforme a tabela 5.

Tabela 5 – Número de escoamento para regiões rurais

UTILIZAÇÃO OU COBERTURA DO SOLO	CONDIÇÕES DE SUPERFÍCIE	TIPO DE SOLO			
		A	B	C	D
Solo lavrado		77	86	91	94
Culturas arvenses	Segundo o maior declive	64	76	84	88
	Segundo as curvas de nível	62	74	82	85
	Segundo as curvas de nível e em terraço	60	71	79	82
Rotações de culturas	Segundo o maior declive	62	75	83	87
	Segundo as curvas de nível	60	72	81	84
	Segundo as curvas de nível e em terraço	57	70	78	82
Pastagens	Pobre	68	79	86	89
	Normal	49	69	79	84
	Boa	39	61	74	80
	Pobre, segundo as curvas de nível	47	67	81	88
	Normal, segundo as curvas de nível	25	59	75	83
	Boa, segundo as curvas de nível	6	35	70	79
Prado permanente	Normal	30	58	71	78
Zonas sociais rurais	Normal	59	74	82	86
Estradas	Pavimento permeável	72	82	87	89
	Pavimento impermeável	74	84	90	92
Florestas	Muito abertas ou de baixa transpiração	56	75	86	91
	Abertas ou de baixa transpiração	45	66	77	83
	Normal	36	60	73	79
	Densas ou de alta transpiração	25	55	70	77
	Muito densas ou de alta transpiração	15	44	54	61
Superfície impermeável		100	100	100	100

(fonte: TUCCI, 2007, p. 405)

Durante as etapas de planejamento e projeto de obras de drenagem com frequência este modelo hidrológico é utilizado. Tucci (2007) salienta também que o método SCS foi desenvolvido com base em informações de bacias agrícolas em diversas regiões dos Estados Unidos, associando dados de chuvas e vazões e configura o modelo ideal a ser aplicado em

bacias hidrográficas com falta de dados observados de vazão. O resultado obtido e representado pela fórmula 2.

$$P_{esc} = \frac{(I - 0,2S)^2}{I + 0,8S} \quad (\text{fórmula 2})$$

Onde:

P_{esc} = precipitação efetiva (mm);

I = precipitação total (mm);

S = máxima capacidade de retenção da bacia no início da chuva (mm).

A consideração das perdas iniciais neste método abrange a interceptação, detenção superficial e a água que infiltra no solo antes do escoamento iniciar. O valor de S na fórmula 2 leva em consideração o estado inicial de umidade do solo, utilização do solo e práticas de manejo do mesmo, e é definido pela fórmula 3.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (\text{fórmula 3})$$

Onde:

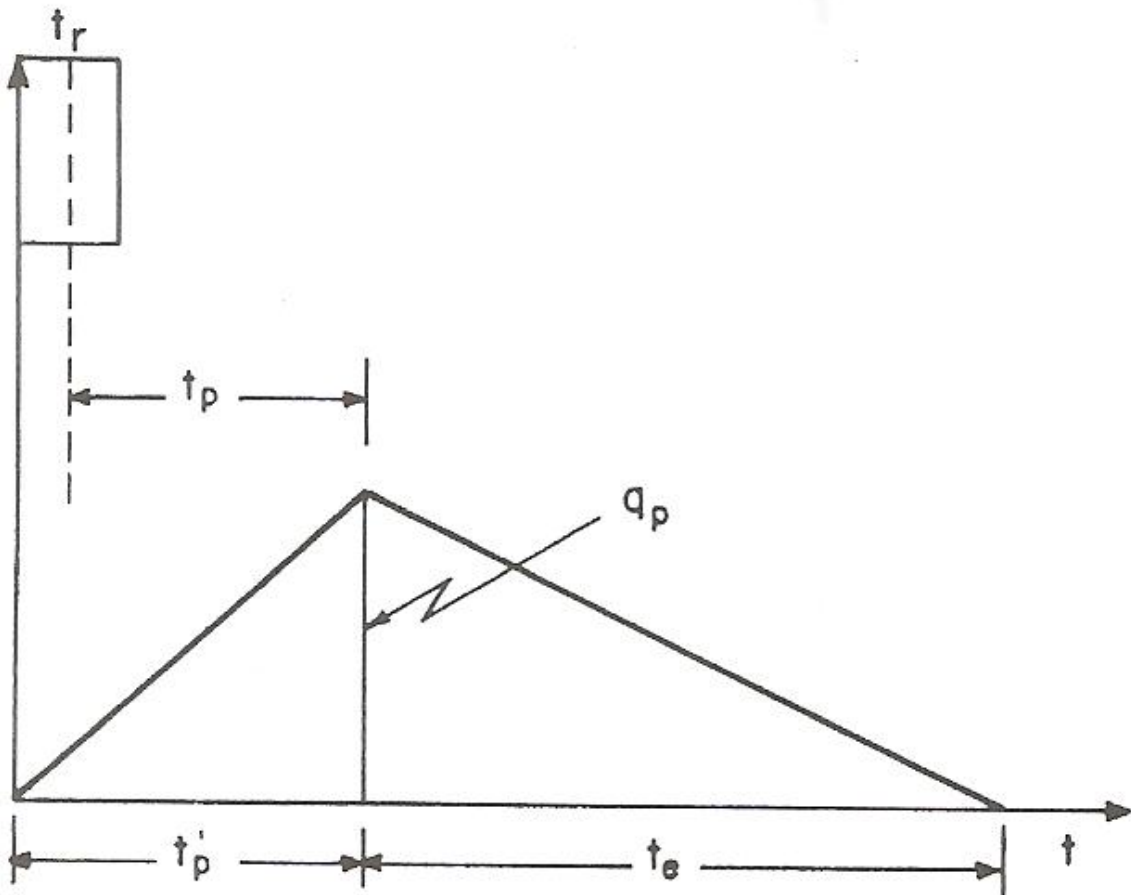
CN = valor do coeficiente CN .

Para este modelo cada caracterização de solo tem um valor de coeficiente CN que pode variar de 0 a 100, considerando o valor de 100 a representação de um solo totalmente impermeável e o valor de 0 a representação de um solo 100% permeável.

A composição de um hidrograma representativo de uma bacia necessita de dados hidrológicos diretos da bacia em estudo, como isso frequentemente não é possível, em uma grande maioria de casos, é necessário calcular o hidrograma de projeto, empregando métodos indiretos, e um dos mais utilizados é o Hidrograma Unitário Sintético do modelo SCS. O hidrograma unitário é originado de um escoamento superficial com volume unitário. O volume unitário deriva de uma chuva unitária, que equivale à altura pluviométrica e duração unitária.

Tendo em mãos o Hidrograma Unitário de uma bacia, é possível calcular as ordenadas do escoamento superficial equivalente a qualquer chuva, de igual duração e com intensidade uniforme aquela que gerou o Hidrograma Unitário, por meio da convolução. Baseado nas características físicas da bacia que influenciam de modo direto o escoamento, em se tratando de Hidrograma Triangular do SCS, os parâmetros utilizados para determinar o hidrograma são a vazão de pico (q_p), tempo de base (t'_p+te) e tempo de pico (t'_p), conforme figura 5.

Figura 5 – Hidrograma unitário sintético triangular do SCS



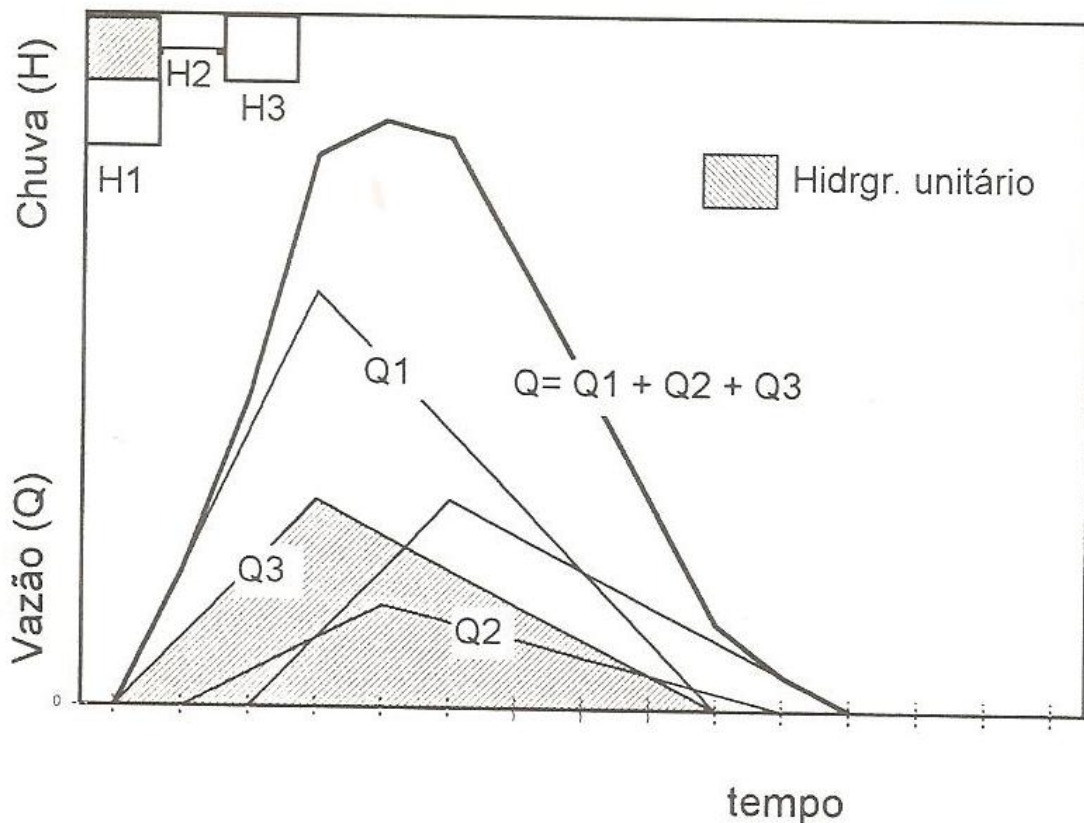
(fonte: TUCCI, 2007, p. 434)

Tucci (2007) enfatiza que o Hidrograma Unitário seja talvez o principal operador chuva-vazão empregado na hidrologia básica. Admitindo a bacia como um sistema linear e, assim, sendo regido pelo princípio da superposição, é possível efetuar a convolução com cada intervalo de precipitação e em seguida somar os resultados parciais de maneira a formar o hidrograma resultante com a composição linear dos diversos hidrogramas defasados, como pode ser visto na figura 6. A figura apresenta os hidrogramas parciais gerados por três eventos

de precipitação. Com a precipitação que acontece em um intervalo de tempo foi gerado um hidrograma parcial. É importante frisar que para cada intervalo de tempo os valores de precipitação são diferentes e por isso o valor das ordenadas dos hidrogramas parciais é diferente. Os hidrogramas resultantes para esses três eventos de precipitação são alcançados com a soma das ordenadas de cada um dos hidrogramas parciais gerado por cada evento.

O *software* computacional IPHS1, desenvolvido no IPH da UFRGS em conjunto com a Faculdade de Engenharia Agrícola da UFPEL, pode ser utilizado para efetuar a transformação de precipitação em vazão pelo método do SCS. Para executar esse processo é necessário fornecer as informações e características da bacia e o evento de chuva a ser propagado, dessa maneira se obtém o hidrograma resultante.

Figura 6 – Exemplo de convolução de hidrogramas unitários



(fonte: TUCCI, 1995, p. 147)

3.3 DRENAGEM URBANA

A falta de suporte dos sistemas de drenagem urbana, levando ao seu sobrecarregamento, pode causar graves prejuízos econômicos e sociais. De acordo com Tucci (1995, p. 22-23):

Com o desenvolvimento urbano, ocorre a impermeabilização do solo através de telhados, ruas, calçadas e pátios, entre outros. Dessa forma, a parcela de água que infiltrava passa a escoar pelos condutos, aumentando o escoamento superficial. O volume que escoava lentamente pela superfície do solo e ficava retido pelas plantas, com a urbanização, passa a escoar no canal, exigindo maior capacidade de escoamento das seções. [...] Os efeitos principais da urbanização são o aumento da vazão máxima, a antecipação do pico e o aumento do volume do escoamento superficial.

Tucci (1995, p. 22) salienta que a associação de impactos de diversos loteamentos proporciona o aumento da ocorrência de enchentes à jusante. Normalmente as áreas que mais sofrem com a construção de novas edificações a montante, são as mais velhas, que se encontram a jusante.

Castro e Goldenfum (2010, p. 75) afirmam que a diminuição da cobertura vegetal em decorrência da urbanização altera as quantidades de água presentes em cada uma das etapas que compõe o ciclo hidrológico, devido às áreas impermeabilizadas passarem a direcionar uma maior quantidade da água precipitada para o escoamento superficial, em contrapartida as quantidades de águas envolvidas nos processos de evapotranspiração, interceptação vegetal e infiltração são reduzidas em comparação à situação original. Este processo, além de aumentar os volumes escoados superficialmente, faz com que o tempo de concentração seja diminuído, tornando assim cada vez mais críticos os hidrogramas de cheias.

Araújo et al. (2000, p. 21) acrescentam que:

A drenagem urbana tem sido desenvolvida com o princípio de drenar a água das precipitações o mais rápido possível para jusante, produzindo aumento da frequência e magnitude das enchentes. Este aumento traz consigo o acréscimo da produção de lixo e a deterioração da qualidade da água.

As ações públicas para as soluções desses problemas no Brasil estão voltadas, na maioria das vezes, somente para as medidas estruturais. As soluções geralmente encontradas por parte do poder público têm sido as redes de drenagem, que simplesmente transferem a inundação de um ponto para outro a jusante na bacia sem que se avaliem os reais benefícios da obra. Estas ações de visão local atuam sobre o efeito e não sobre as causas do aumento da vazão, que são: aumento das superfícies impermeáveis; aumento da densidade de drenagem (microdrenagem); redução da rugosidade mudança de geometria de cursos d'água naturais.

O sentido de crescimento das cidades ocorre de jusante para montante, em decorrência das características do relevo. Para que um loteamento seja construído é exigido por parte do poder público apenas que seus esgotos pluviais sejam drenados de maneira eficiente. No entanto, a capacidade de drenagem das cidades não é aumentada, acarretando em um número maior de enchentes e perdas sociais (TUCCI, 1995, p. 22).

Segundo Tucci (1995, p. 25), em relação à gestão de cheias devido à urbanização, a tendência de controle é buscada através da canalização de trechos que se tornam críticos. Porém, este tipo de abordagem soluciona o problema apenas em um trecho da bacia, sem que surtam efeitos para o restante da mesma ou dentro de diferentes possibilidades de ocupação urbana. Esse tipo de canalização apenas transfere a inundação de uma parte para outra da bacia.

Fica evidenciado o fato de que o crescimento acelerado que transcorre nas cidades poderá vir a causar sérios riscos ao sistema de drenagem urbana, para que uma intervenção por parte do poder público não se torne necessária, como a construção de novas redes de drenagem pluvial ou o aumento da capacidade das atuais, é necessário que toda alteração que ocorrerá em função da impermeabilização do solo urbano venha a ser detectada previamente, ainda na fase de projeto, com o objetivo de que algumas medidas sejam tomadas no sentido de não alterar os efeitos causados pelas chuvas.

Atualmente, pode-se utilizar medidas de controle sustentáveis que buscam o controle do escoamento na fonte através da recuperação da capacidade de infiltração ou da detenção do escoamento adicional gerada pelas superfícies impermeabilizadas urbanas. O princípio fundamental deste controle é o de que qualquer novo empreendimento deve manter as condições naturais pré-existentes de vazão para um determinado risco.

Baptista et al. (2005, p. 23) salientam que:

A partir dos anos 1970 uma outra abordagem para tratar o problema foi sendo desenvolvida, sobretudo na Europa e na América do Norte. Trata-se do conceito de tecnologias alternativas ou compensatórias de drenagem, que buscam neutralizar os efeitos da urbanização sobre os processos hidrológicos, com benefícios para a qualidade de vida e preservação ambiental.

Estas tecnologias são alternativas em relação às soluções clássicas porque consideram os impactos da urbanização de forma global, tomando a bacia hidrográfica como base de estudo, buscando compensar, sistematicamente, os efeitos da urbanização. Esta compensação é efetuada pelo controle de produção de excedentes de água decorrentes da impermeabilização e evitando-se sua transferência rápida para jusante.

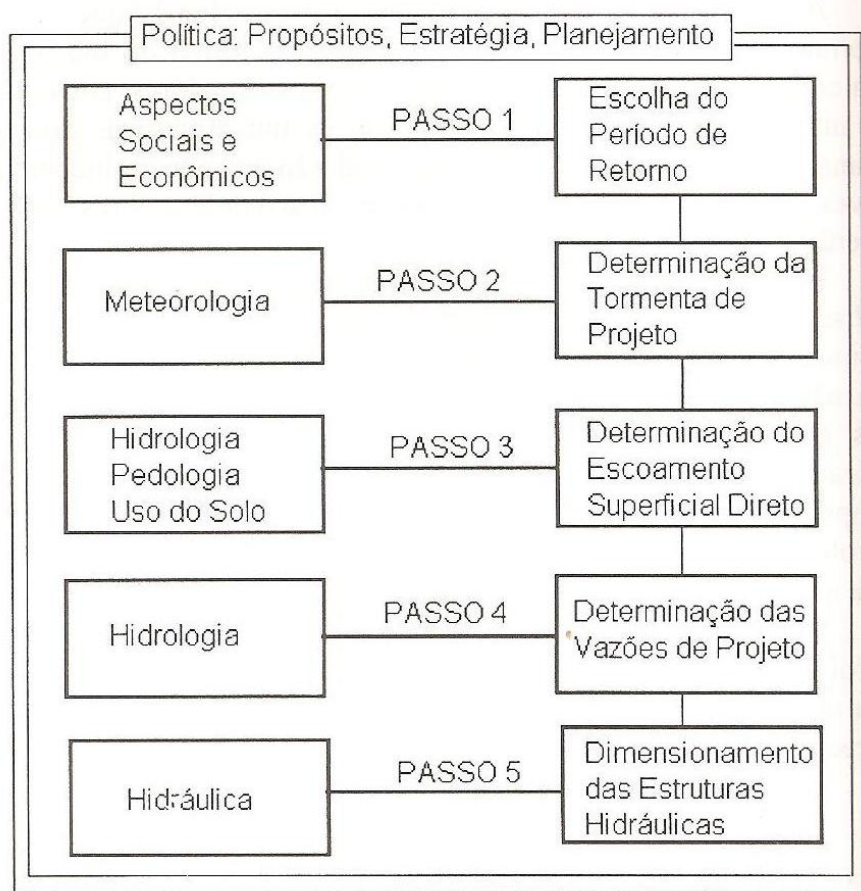
Araújo et al. (2000, p. 21) afirmam que “A tendência moderna na área de drenagem urbana, é a busca da manutenção das condições de pré-desenvolvimento atuando na fonte da geração do mesmo. Para tanto deve-se utilizar de dispositivos de acréscimo de infiltração e do aumento de retardo do escoamento.”. Dessa maneira, os impactos que vierem a ser gerados serão mitigados na fonte, diminuindo a possibilidade de ocorrer problemas para as partes que se encontram a jusante.

O retardo do escoamento superficial pode ser feito a partir de dispositivos de armazenamento, diminuindo o pico dos hidrogramas, retomando assim a capacidade de amortecimento perdida em decorrência da impermeabilização do solo. A implantação desse tipo de dispositivo pode ocorrer no lote (*on-site*), na microdrenagem e na macrodrenagem (ARAÚJO et al., 2000, p. 20).

Existem diversas opções para se efetuar as medidas de detenção de águas pluviais em uma área urbana, o uso de cada uma delas vai depender do estágio de urbanização e impermeabilização da área em questão. Algumas das principais medidas sustentáveis de controle pluvial são a detenção de água no lote e o uso de áreas de infiltração para recuperar a capacidade de infiltração da bacia e controlar a vazão máxima (TUCCI, 1995, p. 22). Entre os dispositivos mais utilizados para esses processos se encontram os micro-reservatórios de detenção para controle na fonte.

Segundo Tucci (1995, p. 108), os métodos utilizados nos estudo hidrológicos em relação a drenagem para uma bacia urbanizada, normalmente, utiliza o procedimento ilustrado na figura 7.

Figura 7 – Sequência de passos de um estudo de drenagem



(fonte: TUCCI, 1995, p. 108)

Tucci (1995, p. 289) salienta que existem três classificações para as medidas de controle do escoamento, em relação aos efeitos causados na bacia hidrográfica, são elas:

- a) **distribuída ou na fonte:** é o tipo de medida que controla o escoamento em lotes, passeios e praças;
- b) **na microdrenagem:** é o controle que atua no hidrograma produzido por um conjunto de loteamentos;
- d) **na macrodrenagem:** é à medida que controla os principais riachos urbanos.

Segundo Costa et al. (2007, p. 87), a tendência atual em relação ao controle de escoamento é a busca pela sustentabilidade, utilizando métodos de controle na fonte capazes de retomar a capacidade de infiltração ou deter o escoamento adicional gerado pelas superfícies impermeabilizadas pelas áreas urbanas.

O PDDrU (PORTO ALEGRE, 2005, p. 28) afirma que:

O dimensionamento da drenagem proveniente de um lote, condomínio ou outro empreendimento individualizado, estacionamento, parques e passeios são denominados de drenagem na fonte. De acordo com a regulamentação municipal, a drenagem desta área deve possuir uma vazão máxima de saída igual ou menor que a vazão de pré-desenvolvimento.

De acordo com o PDDrU (PORTO ALEGRE, 2005, p. 30), para que a vazão de saída do lote seja igualada ou rebaixada em relação à vazão de pré-desenvolvimento, podem ser utilizados dispositivos que tem a função de aumentar a área de infiltração, ou que tenham a capacidade de armazenar temporariamente a água em reservatórios.

Urbonas e Stahre (1993, p. 80) salientam as seguintes vantagens e desvantagens do controle local de escoamento:

- a) compostas de pequenas unidades que podem ser padronizadas;
- b) custos de operação podem ser elevados devido ao grande número de unidades;
- c) aumento de eficiência do sistema de drenagem a jusante dos locais controlados;
- d) aumento da capacidade de controle de enchentes do sistema.

4 MICRO-RESERVATÓRIOS DE DETENÇÃO

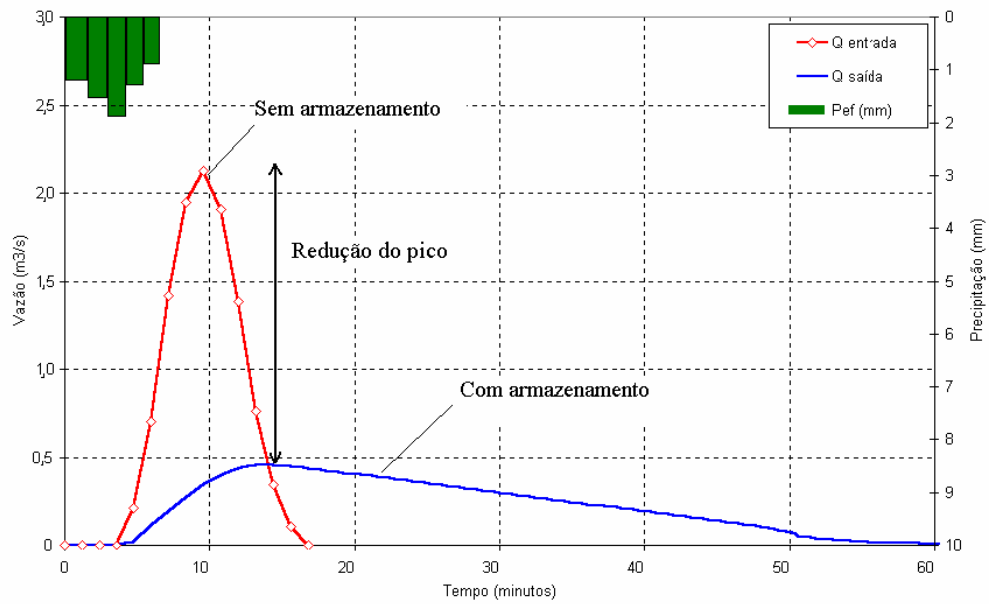
Atualmente o uso de reservatórios de detenção é uma das alternativas com melhor aceitação para o controle de cheias urbanas. O principal objetivo dessa solução é promover a redução do pico das enchentes, através do amortecimento conveniente das ondas de cheia, pelo armazenamento temporário das ondas de cheia.

Os micro-reservatórios de detenção são tanques com pequena capacidade volumétrica construídos dentro de lotes, concebidos com o objetivo de amortecer picos de cheia a jusante, ocasionando uma diminuição do impacto hidrológico causado pela diminuição de áreas permeáveis. São constituídos de alvenaria de concreto e tijolos, podendo ser instalados ao ar livre ou sob o terreno. Esse tipo de reservatório torna possível a utilização de águas pluviais para usos domésticos não potáveis, contribuindo para a reserva de águas de abastecimento além do amortecimento de cheias (COSTA et al., 2007, p. 88).

Tucci (2007, p. 838) afirma que esse tipo de dispositivo não reduz o volume do escoamento que ocorre superficialmente, apenas faz com que as vazões sejam distribuídas em um período maior, criando assim um volume útil temporário, com uma determinada parcela do escoamento superficial.

O PDDrU (PORTO ALEGRE 2005, p. 64) destaca que em superfícies urbanas o escoamento tem um curto tempo de concentração em lotes, devido as áreas serem muito pequenas. Dessa maneira, o hidrograma apresenta um patamar de escoamento para precipitações elevadas com duração média. A tentativa da retenção de volume é diminuir o pico, como mostrado na figura 8.

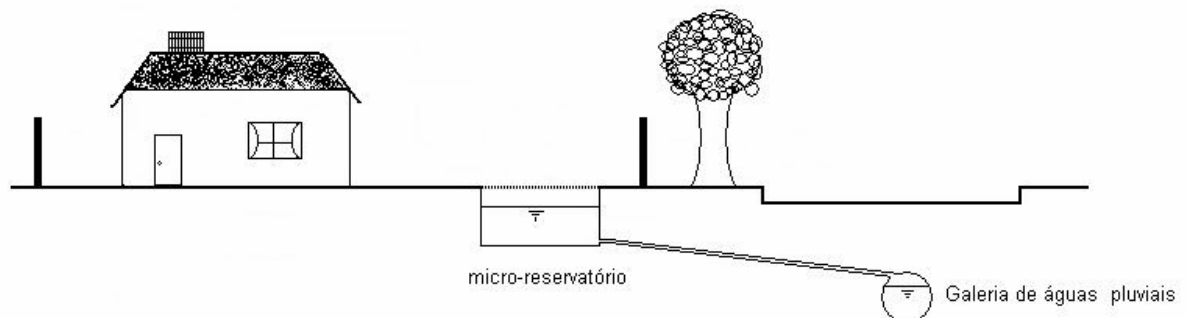
Figura 8 – Hidrogramas típicos de pequenas áreas urbanas



(fonte: PORTO ALEGRE, 2005, p. 65)

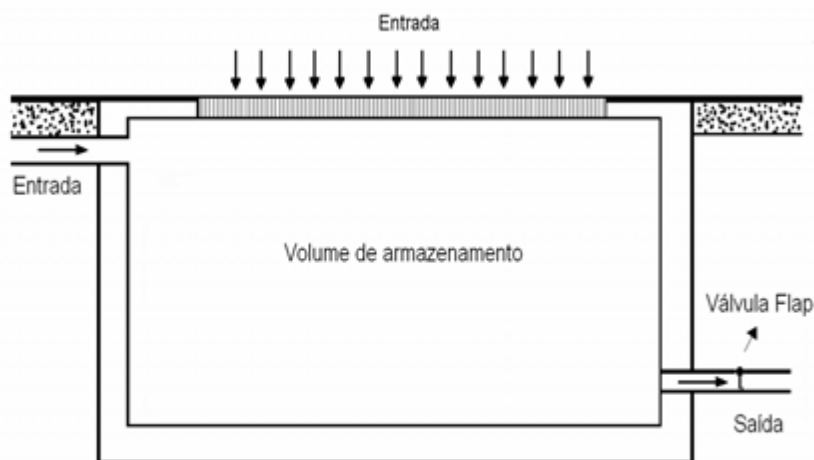
Costa et al. (2007, p. 89) salientam que quando são utilizados micro-reservatórios, a água de precipitação pode ser coletada de toda área do lote ou somente das partes impermeabilizadas, tais como pisos e telhados. Esta água recolhida é acumulada no reservatório e, aos poucos, é enviada para a rede de drenagem a uma taxa que não ultrapasse a capacidade limite do escoamento das tubulações pluviais ou da vazão de pré-urbanização. As figuras 9 e 10 ilustram um micro-reservatório ligado à rede de drenagem.

Figura 9 – Esquema de micro-reservatório



(fonte: COSTA et al., 2007, p. 89)

Figura 10 – Detalhe da entrada e saída de um micro-reservatório



(fonte: COSTA et al., 2007, p. 89)

Esse tipo de reservatório pode ser classificado, de acordo com o seu posicionamento no sistema de drenagem. O micro-reservatório pode ser *on-line*, quando é conectado em série com o sistema de drenagem; ou *off-line*, quando implantado em paralelo com o sistema de drenagem, com a função de desviar escoamentos.

COSTA et al. (2007, p. 90) salientam que:

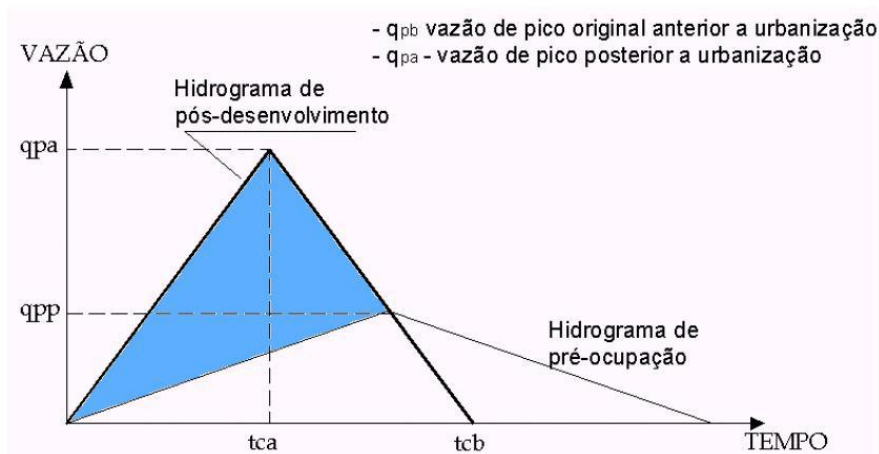
Um outro tipo de micro-reservatório existente é aquele que coleta água da chuva e a encaminha para um reservatório não conectado à rede de drenagem. Como neste reservatório não existe uma tubulação de saída, todo o volume de água armazenado servirá para usos diversos dentro do próprio lote, tais como irrigação de vegetação existente e lavagem de áreas e veículos.

4.1 PARÂMETROS DE DIMENSIONAMENTO

Segundo o PDDrU (PORTO ALEGRE, 2005, p. 101), para que se possa dimensionar um reservatório de controle de escoamento é necessário conhecer o hidrograma de pré-ocupação, pois é ele que indicará quais as condições que devem ser mantidas no período de pós-ocupação. Assim, é imprescindível conhecer também o hidrograma após a urbanização. Conhecidos esses dois hidrogramas: pré-ocupação x pós-ocupação, se o dispositivo a ser instalado for do tipo *on-line*, o volume que deverá ser reservado corresponde à área em azul da figura 11. No entanto, se o dispositivo for do tipo *off-line*, é necessário que se dimensione um *by-pass* e um descarregador de fundo, para que a vazão de pré-ocupação não seja

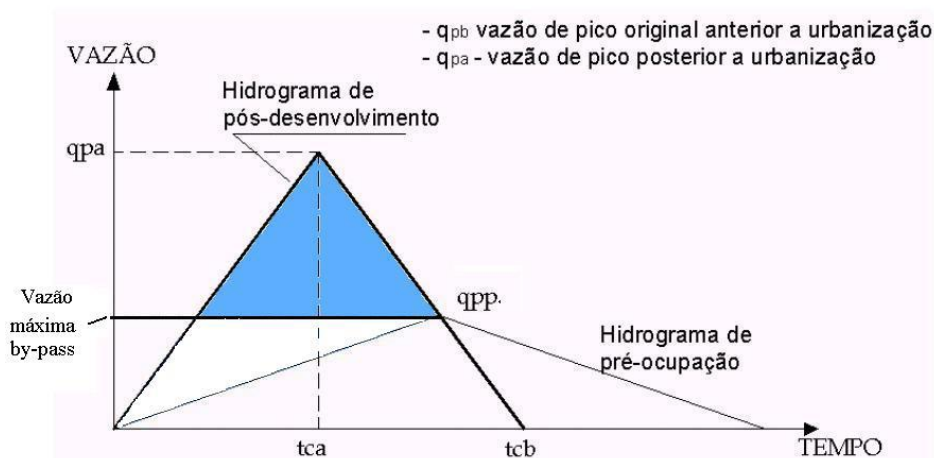
ultrapassada pela soma das vazões. Neste último caso, a estimativa de armazenamento pode ser vista na figura 12.

Figura 11 – Hidrograma de pré e pós-ocupação *on-line*



(fonte: PORTO ALEGRE, 2005, p. 101)

Figura 12 – Hidrograma de pré e pós-ocupação *off-line*



(fonte: PORTO ALEGRE, 2005, p. 102)

4.2 VANTAGENS E DESVANTAGENS DA UTILIZAÇÃO

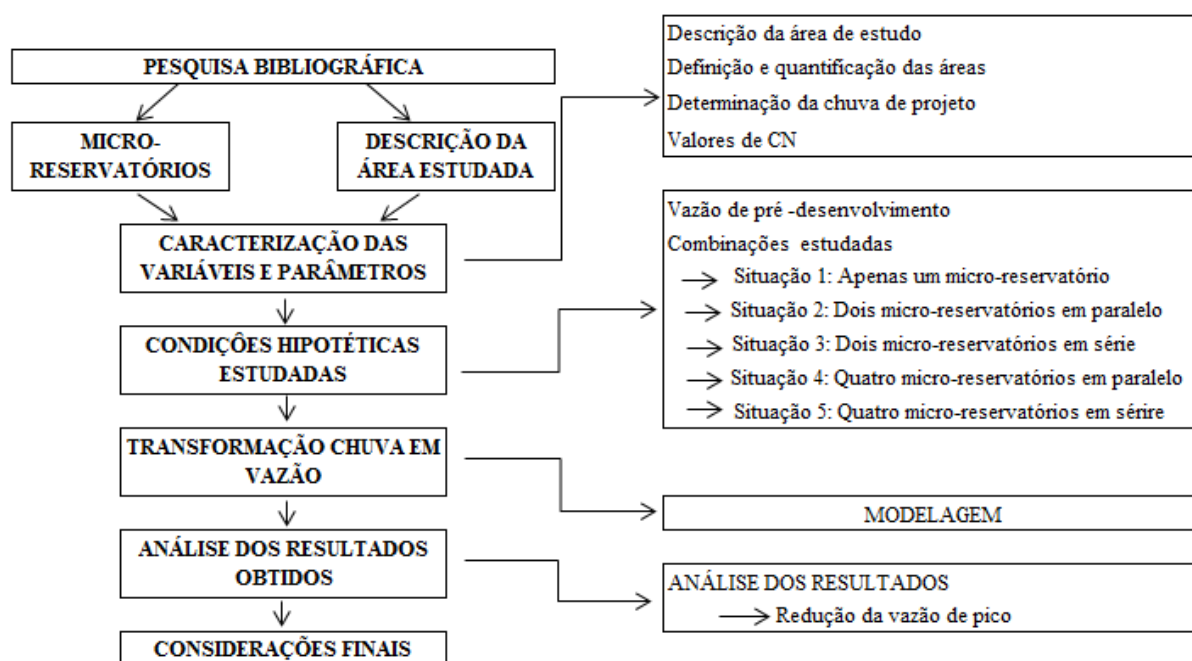
O'Loughlin et al. (1998, p. 555-556) desenvolveram um estudo na cidade de Sydney, com o intuito de analisar o uso de micro-reservatórios de retenção na saída de lotes residenciais. Os autores identificaram algumas vantagens e desvantagens da utilização deste tipo de solução, listadas a seguir:

- a) previne impactos adversos do desenvolvimento, restaurando a detenção natural perdida pelo terreno;
- b) os impactos da urbanização não são transferidos para jusante;
- c) o sistema coloca a responsabilidade do controle para quem está implantado a urbanização;
- d) os problemas são solucionados na sua origem;
- e) os métodos e critérios de projeto são normalmente muito simplificados;
- f) em decorrência de algumas situações hidrológicas, armazenamentos localizados em partes baixas de bacias podem aumentar o escoamento à jusante devido aos hidrogramas retardados;
- g) a manutenção nas estruturas deve ser feita regularmente, impondo obrigações muito pesadas aos proprietários.

5 CARACTERIZAÇÃO E MODELAGEM

Nos capítulos anteriores do trabalho foi apresentada a base conceitual para a formulação e o equacionamento do procedimento utilizado nesse trabalho. A avaliação de redução dos valores de vazão de pico com a utilização de dispositivos de controle pluvial no lote foi desenvolvida conforme fluxograma da figura 13. O método do hidrograma de projeto foi utilizado, sendo estimada a precipitação efetiva pelo método do SCS e a transformação da precipitação efetiva em vazão pelo método do hidrograma unitário sintético triangular do SCS.

Figura 13 – Fluxograma detalhado do trabalho



(fonte: elaborado pelo autor)

Este capítulo discorre sobre a simulação matemática de cenários hipotéticos de utilização dos micro-reservatórios de retenção como dispositivos de controle de drenagem pluvial para uma área residencial, de forma a avaliar os efeitos que estes proporcionam na redução das vazões de pico escoadas. Para isso, é necessário que todas as variáveis envolvidas na pesquisa sejam definidas e caracterizadas.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS

Nesta seção são definidos os cenários hipotéticos que foram avaliados para a área estudada, além disso, são apresentadas e caracterizadas as variáveis que serviram para o desenvolvimento do modelo do trabalho.

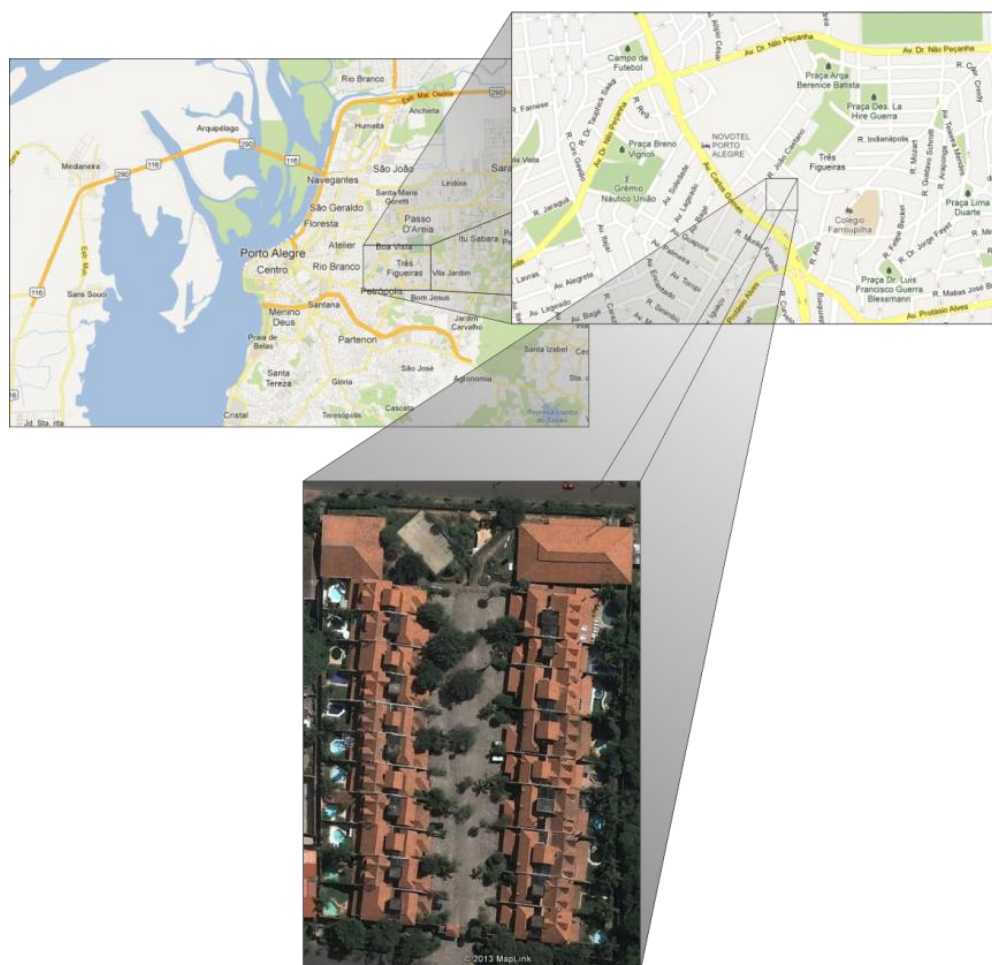
5.1.1 Descrição da área estudada

O loteamento escolhido para realizar o estudo hipotético está situado na Zona Norte da cidade de Porto Alegre, no bairro Três Figueiras, como pode ser visto na figura 14. A escolha foi realizada através de imagens de satélite fornecidas pelo *software* Google Earth, onde se procurou uma área com alta taxa de impermeabilização e com boa definição de composição de suas superfícies. Na área escolhida está situado um condomínio residencial, situado entre as Rua Engenheiro Ildefonso Simões Lopes e a Rua Balduino Roehrig.

Esta área é composta em grande parte por edificações e ruas pavimentadas, tendo baixa taxa de áreas com vegetação. Estes elementos tornam viáveis os cenários hipotéticos analisados como a utilização dos dispositivos abordados no presente trabalho.

Este estudo considera um cenário hipotético enquanto ao estudo de caso ao supor que os escoamentos gerados nessa área são propagados diretamente para a rede de drenagem pluvial, sem que qualquer outra medida de controle diferente a aquelas aqui analisadas seja utilizada.

Figura 14 – Localização da área estudada no município de Porto Alegre



(fonte: adaptado de GOOGLE EARTH, 2013)

5.1.2 Estimativa do parâmetro CN do método do SCS

A definição e composição da área estudada são de grande importância em decorrência de que são essas características que influenciam o processo de transformação da chuva em vazão superficial. Foi possível classificar as superfícies que compõem a área em estudo, através das imagens de satélite, obtidas pelo *software* Google Earth, sendo estas classificadas em três tipos:

- a) **pavimentos** – áreas destinadas a estacionamentos e passeios, compostas de concreto, asfalto ou pedras;
- b) **coberturas** – constituídas basicamente por telhas de barro e por lajes de concreto;
- c) **vegetação** – principalmente composta por gramas e arbustos de pequeno porte.

A partir da imagem de satélite, com a definição da composição de área, foi possível quantificar a parcela de cada superfície. Este procedimento foi realizado com o auxílio do *software* AutoCad. Cada superfície formada pelas classificações citadas anteriormente foi delimitada por polígonos envoltórios de diferentes cores, os pavimentos por um polígono de cor azul, as coberturas das edificações com cor amarela e a vegetação com a cor vermelha, conforme pode ser visto na figura 15. Ainda, foi adotada a hipótese de que os pátios das casas não apresentavam piscinas e apenas existia vegetação.

Para os fins de cálculo das situações analisadas foram utilizados os valores de CN apresentados anteriormente na tabela 4, que podem ser vistos de forma reduzida na tabela 6.

Figura 15 – Composição da área do loteamento em estudo



(fonte: adaptado de GOOGLE EARTH, 2013)

Tabela 6 – Valor de CN para a ocupação inicial

CN	Ocupação
98	Cobertura de edificações impermeabilizada
98	Pavimento de estacionamento e passeio impermeabilizado
75	Vegetação

(fonte: elaborado pelo autor)

Com a identificação das composições que fazem parte da área em estudo, tornou-se possível quantificar as áreas e determinar proporcionalmente quanto cada uma delas representa do total, assim encontrando o CN ponderado para a área em questão, conforme apresentado na tabela 7.

Tabela 7 – Quantificação e percentual da composição das áreas

Loteamento estudado					
Ocupação	Área		Percentual		CN
Coberturas	12900	m ²	79,14	%	98
Pavimentos					
Vegetação	3400	m ²	20,86	%	75
Área total	16300	m²	CN ponderado		90,07

(fonte: elaborado pelo autor)

Analisando os resultados apresentados na tabela 7, nota-se que atualmente as áreas impermeabilizadas, coberturas e pavimentos, quantificam quase 80% do total das áreas estudadas, o que viabiliza as análises da utilização dos dispositivos de controle de escoamento propostas neste trabalho.

Em um segundo momento a área em estudo foi subdividida em duas regiões, criando duas sub-bacias, e em uma terceira etapa em quatro regiões, criando quatro sub-bacias, como pode ser visualizado nas figuras 16 e 17. Essas subdivisões do terreno foram efetuadas para levar

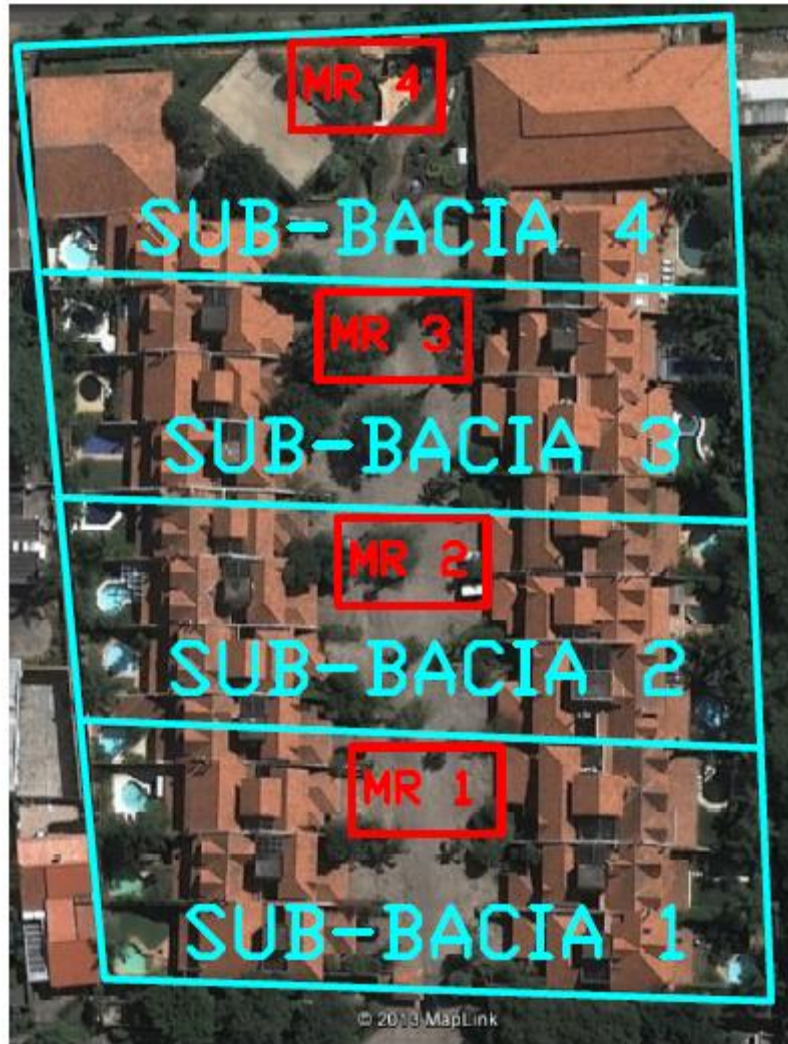
em conta os diferentes locais e configurações em que os dispositivos de controle de escoamento foram avaliados.

Figura 16 – Divisão do terreno em duas sub-bacias



(fonte: adaptado de GOOGLE EARTH, 2013)

Figura 17 – Divisão do terreno em quatro sub-bacias



(fonte: adaptado de GOOGLE EARTH, 2013)

Uma vez identificadas as sub-bacias foram estimadas as áreas de cada polígono de classificação do uso do solo no interior de cada uma destas. Posteriormente foi estimado o valor do CN ponderado de cada uma dessas áreas, conforme apresentado nas tabelas 8 e 9.

Tabela 8 – Quantificação e percentual da composição das áreas para duas divisões do terreno

Loteamento estudado (sub-bacia 1)					
Ocupação	Área		Percentual		CN
Coberturas	6600	m ²	81,48	%	98
Pavimentos					
Vegetação	1500	m ²	18,52	%	75
Área total	8100	m²	CN ponderado		90,96

Loteamento estudado (sub-bacia 2)					
Ocupação	Área		Percentual		CN
Coberturas	6300	m ²	76,83	%	98
Pavimentos					
Vegetação	1900	m ²	23,17	%	75
Área total	8200	m²	CN ponderado		89,2

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 9 – Quantificação e percentual da composição das áreas para quatro divisões do terreno

Loteamento estudado (sub-bacia 1)					
Ocupação	Área		Percentual		CN
Coberturas	3250	m ²	81,25	%	98
Pavimentos					
Vegetação	750	m ²	18,75	%	75
Área total	4000	m²	CN ponderado		90,87

Loteamento estudado (sub-bacia 2)					
Ocupação	Área		Percentual		CN
Coberturas	3450	m ²	16,87	%	98
Pavimentos					
Vegetação	700	m ²	83,13	%	75
Área total	4150	m²	CN ponderado		91,59

Loteamento estudado (sub-bacia 3)					
Ocupação	Área		Percentual		CN
Coberturas	3250	m ²	81,25	%	98
Pavimentos					
Vegetação	750	m ²	18,75	%	75
Área total	4000	m²	CN ponderado		90,87

Loteamento estudado (sub-bacia 4)					
Ocupação	Área		Percentual		CN
Coberturas	2950	m ²	71,08	%	98
Pavimentos					
Vegetação	1200	m ²	28,92	%	75
Área total	4150	m²	CN ponderado		87,01

(fonte: elaborado pelo autor)

5.2 HIETOGRAMA DE PROJETO

O cálculo do hietograma de projeto foi feito através da equação da curva Intensidade-Duração-Frequência presente no PDDrU de Porto Alegre (2005), sendo que esta foi construída com os dados do pluviógrafo localizado no 8º Distrito, em decorrência de sua proximidade com a bacia em análise, respeitando a seguinte equação:

$$i = (1297,9 \times T^{0,171}) / (t + 11,6)^{0,859} \quad (\text{fórmula 4})$$

Onde:

i = intensidade de chuva (mm/h);

T = período de retorno (anos);

t = duração da chuva (minutos).

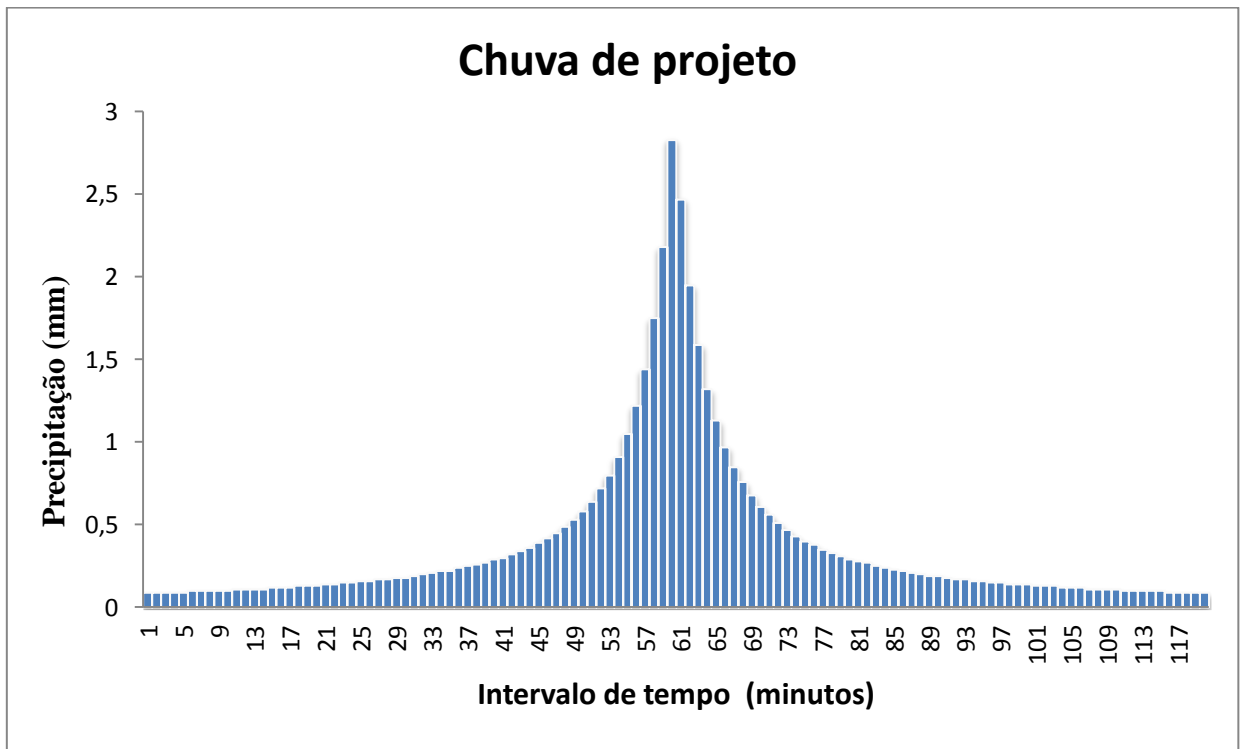
Dessa maneira, como a análise é feita sobre o efeito da utilização de dispositivos de controle pluvial sobre a saída da rede de drenagem do loteamento para a microdrenagem, e a área em questão é uma área residencial, de acordo com a tabela 3, o período de retorno que deve ser utilizado é de dois anos e a duração da chuva de projeto adotada foi de 120 minutos, utilizando um intervalo de tempo de um minuto. Os totais precipitados em cada intervalo de tempo do hietograma de projeto são apresentados na tabela 10. A obtenção do hietograma de projeto foi feita através do Método dos Blocos Alternados, mencionado anteriormente, este se trata de um método geral e que leva em consideração as escolhas de cada projetista, de maneira a criar um cenário crítico de precipitação. Neste trabalho, o valor de pico foi posicionado na metade do tempo de duração da chuva, apresentado na figura 18.

Tabela 10 – Chuva de projeto

t	I	P acumulada	P desacumulada	t	I	P acumulada	P desacumulada
min	mm/h	mm	mm	min	mm/h	mm	mm
1	169,59	2,83	2,83	61	38,28	38,91	0,18
2	158,93	5,3	2,47	62	37,83	39,09	0,18
3	149,63	7,48	2,18	63	37,4	39,27	0,18
4	141,44	9,43	1,95	64	36,98	39,45	0,17
5	134,16	11,18	1,75	65	36,57	39,62	0,17
6	127,65	12,77	1,59	66	36,17	39,79	0,17
7	121,8	14,21	1,44	67	35,78	39,95	0,17
8	116,49	15,53	1,32	68	35,39	40,11	0,16
9	111,67	16,75	1,22	69	35,02	40,27	0,16
10	107,26	17,88	1,13	70	34,66	40,43	0,16
11	103,21	18,92	1,05	71	34,3	40,59	0,16
12	99,48	19,9	0,97	72	33,95	40,74	0,15
13	96,03	20,81	0,91	73	33,61	40,89	0,15
14	92,84	21,66	0,85	74	33,27	41,04	0,15
15	89,86	22,47	0,8	75	32,95	41,18	0,15
16	87,09	23,22	0,76	76	32,63	41,33	0,14
17	84,49	23,94	0,72	77	32,31	41,47	0,14
18	82,06	24,62	0,68	78	32,01	41,61	0,14
19	79,77	25,26	0,64	79	31,71	41,75	0,14
20	77,62	25,87	0,61	80	31,41	41,88	0,14
21	75,59	26,46	0,58	81	31,12	42,02	0,13
22	73,68	27,01	0,56	82	30,84	42,15	0,13
23	71,86	27,55	0,53	83	30,56	42,28	0,13
24	70,14	28,06	0,51	84	30,29	42,41	0,13
25	68,51	28,55	0,49	85	30,03	42,54	0,13
26	66,96	29,02	0,47	86	29,76	42,66	0,13
27	65,48	29,47	0,45	87	29,51	42,78	0,12
28	64,07	29,9	0,43	88	29,25	42,91	0,12
29	62,73	30,32	0,42	89	29,01	43,03	0,12
30	61,45	30,72	0,4	90	28,76	43,15	0,12
31	60,22	31,11	0,39	91	28,53	43,26	0,12
32	59,04	31,49	0,38	92	28,29	43,38	0,12
33	57,91	31,85	0,36	93	28,06	43,5	0,11
34	56,83	32,21	0,35	94	27,84	43,61	0,11
35	55,79	32,55	0,34	95	27,61	43,72	0,11
36	54,8	32,88	0,33	96	27,4	43,83	0,11
37	53,84	33,2	0,32	97	27,18	43,94	0,11
38	52,91	33,51	0,31	98	26,97	44,05	0,11
39	52,02	33,81	0,3	99	26,76	44,16	0,11
40	51,16	34,11	0,29	100	26,56	44,26	0,11
41	50,34	34,4	0,29	101	26,36	44,37	0,1
42	49,54	34,68	0,28	102	26,16	44,47	0,1
43	48,76	34,95	0,27	103	25,97	44,58	0,1
44	48,02	35,21	0,27	104	25,78	44,68	0,1
45	47,3	35,47	0,26	105	25,59	44,78	0,1
46	46,6	35,72	0,25	106	25,4	44,88	0,1
47	45,92	35,97	0,25	107	25,22	44,98	0,1
48	45,26	36,21	0,24	108	25,04	45,07	0,1
49	44,63	36,45	0,24	109	24,86	45,17	0,1
50	44,01	36,68	0,23	110	24,69	45,27	0,1
51	43,41	36,9	0,22	111	24,52	45,36	0,09
52	42,83	37,12	0,22	112	24,35	45,45	0,09
53	42,27	37,34	0,22	113	24,18	45,55	0,09
54	41,72	37,55	0,21	114	24,02	45,64	0,09
55	41,19	37,76	0,21	115	23,86	45,73	0,09
56	40,67	37,96	0,2	116	23,7	45,82	0,09
57	40,16	38,16	0,2	117	23,54	45,91	0,09
58	39,67	38,35	0,19	118	23,39	46	0,09
59	39,2	38,54	0,19	119	23,24	46,09	0,09
60	38,73	38,73	0,19	120	23,09	46,17	0,09

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 18 – Hietograma de projeto obtido pelo Método dos Blocos Alternados



(fonte: elaborado pelo autor)

5.3 VAZÃO DE PRÉ-DESENVOLVIMENTO

A vazão de saída de qualquer novo empreendimento deve manter as condições de pré-desenvolvimento. Para calcular essa vazão limite que não deve ser ultrapassada, o PDDrU de Porto Alegre (2005) fornece a seguinte equação:

$$Q_{pd} = 20,8 \times A \quad (\text{fórmula 5})$$

Onde:

Q_{pd} = vazão de pré-desenvolvimento (l/s);

A = área do lote ou loteamento (ha);

Com base nesta informação foi calculada a vazão de pré-desenvolvimento da área em questão, resultando em 0,034m³/s.

5.4 PROJETO E DIMENSIONAMENTO DOS MICRO-RESERVATÓRIOS

Todos os micro-reservatórios projetados nesse trabalho são cúbicos com apenas um orifício de saída, tendo este um coeficiente de descarga de 0,61, independentemente de seu diâmetro, além disso a vazão de descarga desses orifícios segue a relação apresentada na fórmula 6. Em todos os dispositivos a parte inferior do orifício de saída coincide com o fundo do micro-reservatório, como pode ser visto na figura 19.

$$Q = K \times A \times (2 \times g)^{1/2} \quad (\text{fórmula 6})$$

Onde:

Q= vazão de descarga (l/s);

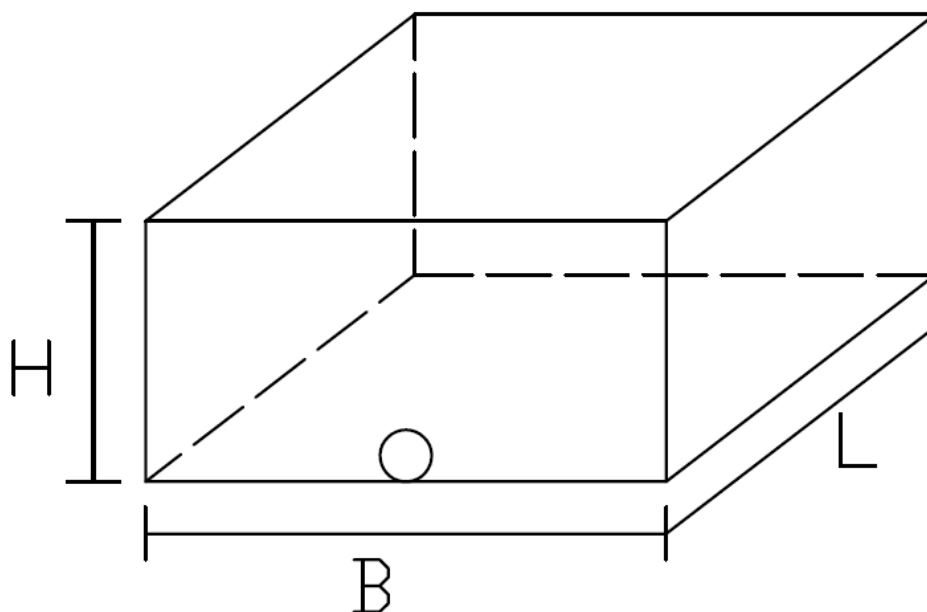
A= área da seção transversal do orifício (m²);

g= aceleração da gravidade (g=9,81m/s²);

h= altura de água sobre a geratriz superior do orifício (m);

K= coeficiente de descarga do orifício (adimensional).

Figura 19 – Modelo de micro-reservatório usado nas simulações



(fonte: elaborado pelo autor)

5.5 CENÁRIOS HIPOTÉTICOS ESTUDADOS

Foram considerados cinco cenários hipotéticos para análises, ou seja, a implantação de:

- a) apenas um micro-reservatório;
- b) de dois micro-reservatórios em paralelo;
- c) dois micro-reservatórios em série;
- d) de quatro micro-reservatórios em paralelo;
- e) de quatro micro-reservatórios em série.

Para cada um dos cenários estudados, foi proposta a solução que melhor se enquadrava para manter a vazão de saída do loteamento inferior a vazão de pré-desenvolvimento. A hipótese inicial da utilização de apenas um dispositivo serviu como referência para os demais casos estudados. Isto é, com a verificação de um volume para apenas um micro-reservatório que satisfizesse as condições de pré-desenvolvimento, para o cenário de dois dispositivos esse volume foi dividido em dois, criando dois micro-reservatórios com metade do volume proposto anteriormente e para o cenário utilizando quatro dispositivos o volume foi dividido por quatro, criando quatro micro-reservatórios com um quarto do volume referido cada. No entanto, como essas alternativas iniciais de cada cenário não correspondiam às exigências de pré-desenvolvimento, outras modelagens tiveram que ser testadas, alterando as dimensões dos reservatórios e seus orifícios de saída, fato esse refletido diretamente nos resultados das vazões de saída obtidas. A tabela 11 apresenta as configurações testadas para cada uma das hipóteses.

Tabela 11 – Hipóteses de sistema de micro-reservatórios avaliados

Cenário	Hipótese	Número de dispositivos	Tipo de ligação entre os dispositivos	Diâmetro do orifício de saída m	Dimensões do dispositivo			Volume do dispositivo m ³	Soma do volume dos dispositivos m ³
					Base m	Largura m	Altura m		
1	1	1		0,12	15	1,5	337,5	337,5	
2	1	2	paralelo	0,12	10,6065	1,5	168,75	337,5	
	2	2	paralelo	0,095	15	1,5	337,5	675	
3	1	2	série	0,12	10,6065	1,5	168,75	337,5	
	2	2	série	0,12	15	1,5	337,5	675	
4	1	4	paralelo	0,12	7,5	1,5	84,375	337,5	
	2	4	paralelo	0,12	10	1,5	150	600	
5	1	4	série	0,12	7,5	1,5	84,375	337,5	
	2	4	série	0,12	10	1,5	150	600	

(fonte: elaborado pelo autor)

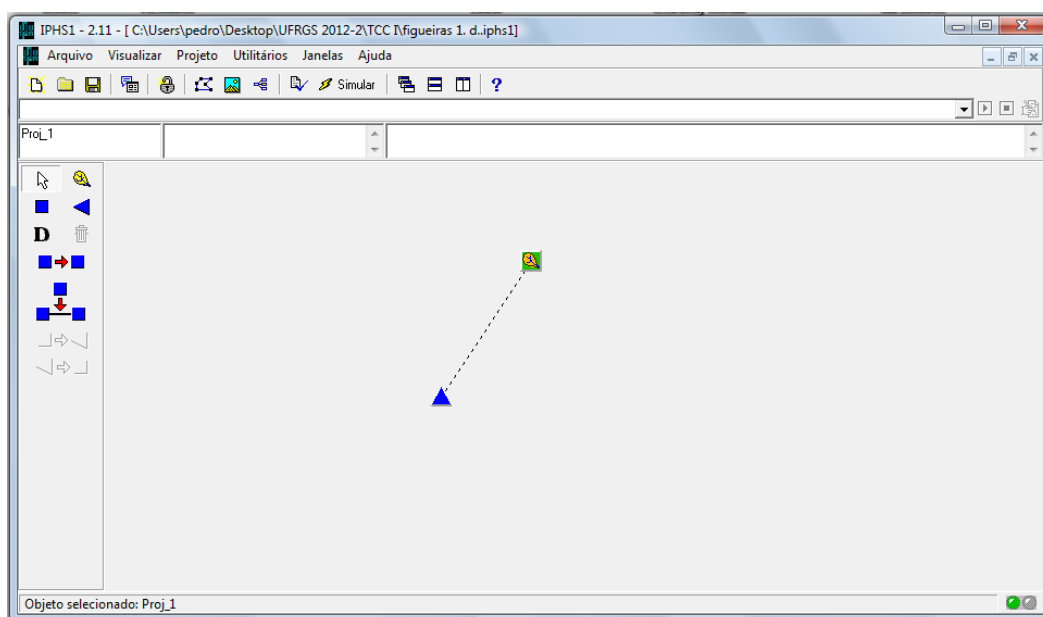
5.6 MODELAGEM CHUVA-VAZÃO

Com a definição e caracterização das variáveis e parâmetros relevantes para a realização do trabalho, teve início a etapa de desenvolvimento do modelo. Durante essa seção é apresentado o procedimento utilizado no processo de transformação da precipitação em vazão para posterior dimensionamento hidráulico dos dispositivos de controle de escoamento. Nessa etapa foi utilizado o software IPHS1.

Para executar esse processo, os dados de entrada empregados foram o hietograma de projeto e as características e informações da bacia e sub-bacias a representação topológica do sistema. O método do coeficiente CN do SCS foi utilizado para a estimativa da precipitação efetiva. Contudo, na transformação de precipitação efetiva em vazão foi utilizado o método do hidrograma unitário sintético também do SCS, ainda, as tubulações de ligação entre os reservatórios são suficientemente grandes para não interferir nos escoamentos. A vazão de saída do loteamento varia basicamente em função do número de micro-reservatórios utilizados e da maneira como ocorre a ligação entre eles, além das dimensões dos dispositivos e suas estruturas de saída.

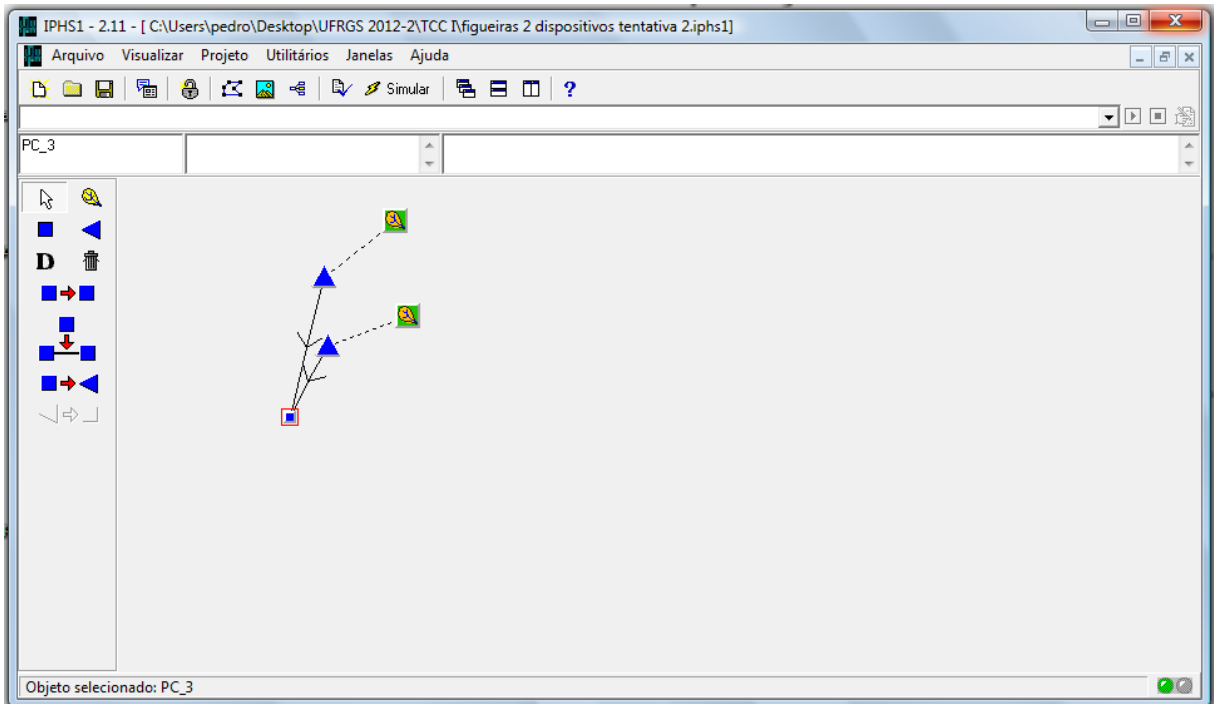
A representação topológica do sistema no programa IPHS1 em cada cenário hipotético avaliado é apresentada nas figuras 20, 21, 22, 23 e 24.

Figura 20 – Representação topológica do sistema no programa IPHS1 para o cenário com a utilização de um micro-reservatório



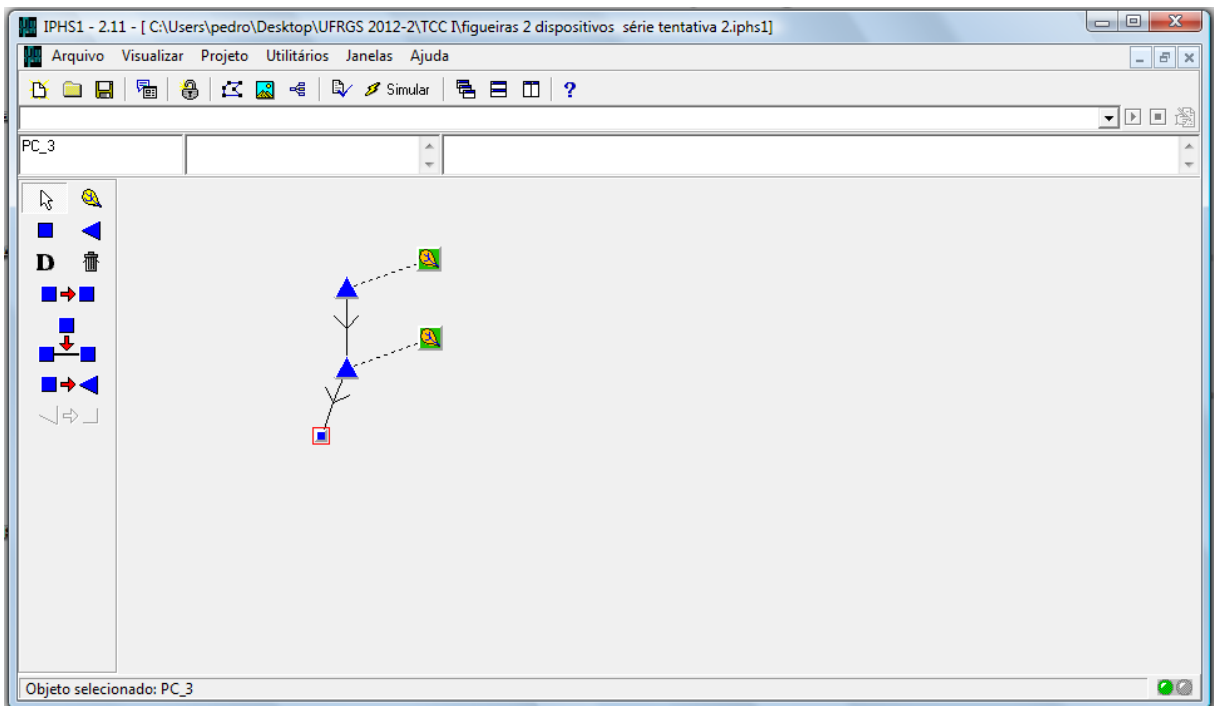
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 21 – Representação topológica do sistema no programa IPHS1 para o cenário com a utilização de dois micro-reservatórios em paralelo



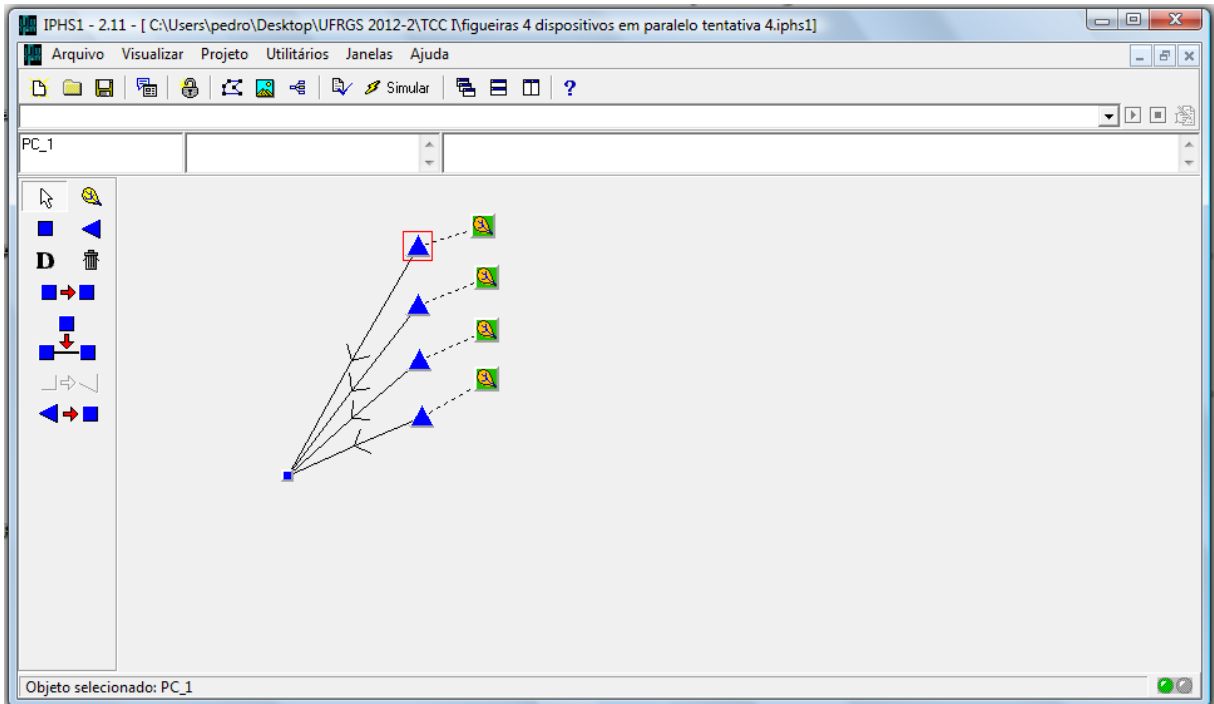
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 22 – Representação topológica do sistema no programa IPHS1 para o cenário com a utilização de dois micro-reservatórios em série



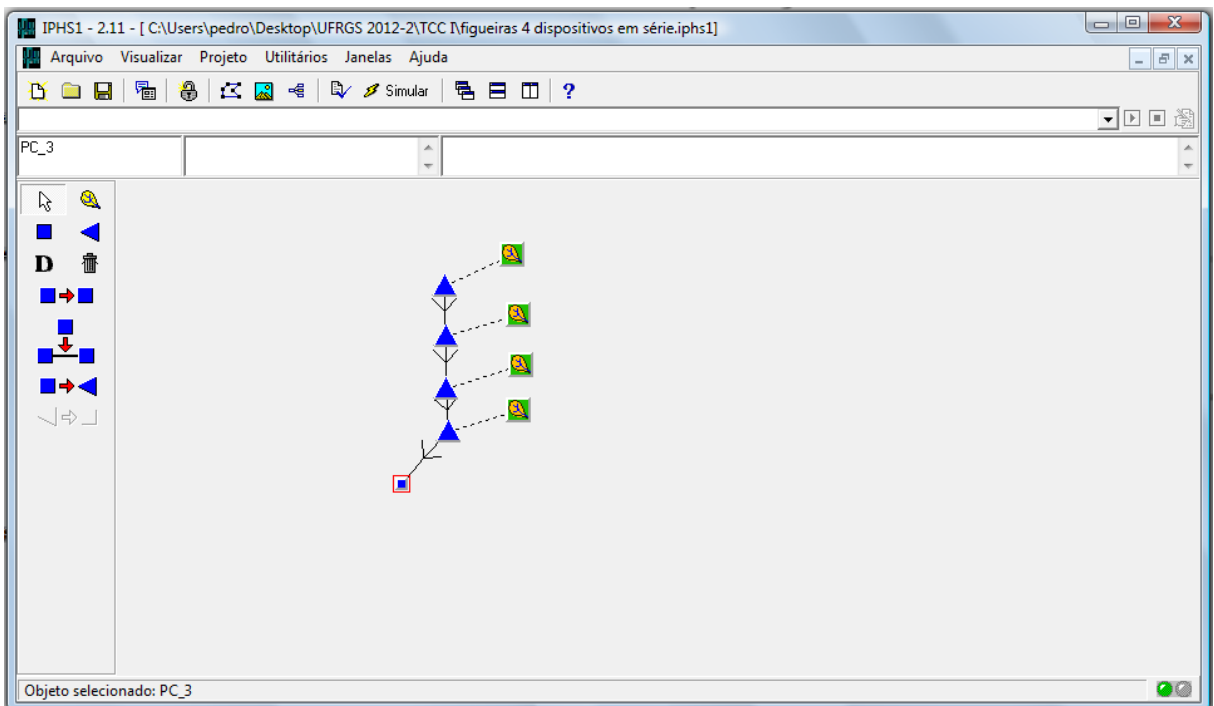
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 23 – Representação topológica do sistema no programa IPHS1 para o cenário com a utilização de quatro micro-reservatórios em paralelo



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 24 – Representação topológica do sistema no programa IPHS1 para o cenário com a utilização de quatro micro-reservatórios em série



(fonte: elaborado pelo autor)

6 ANÁLISE DE RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados da aplicação dos modelos desenvolvidos anteriormente e o dimensionamento hidráulico das diferentes configurações dos dispositivos de controle de escoamento no lote.

6.1 REDUÇÃO DA VAZÃO DE PICO COM UM MICRO-RESERVATÓRIO

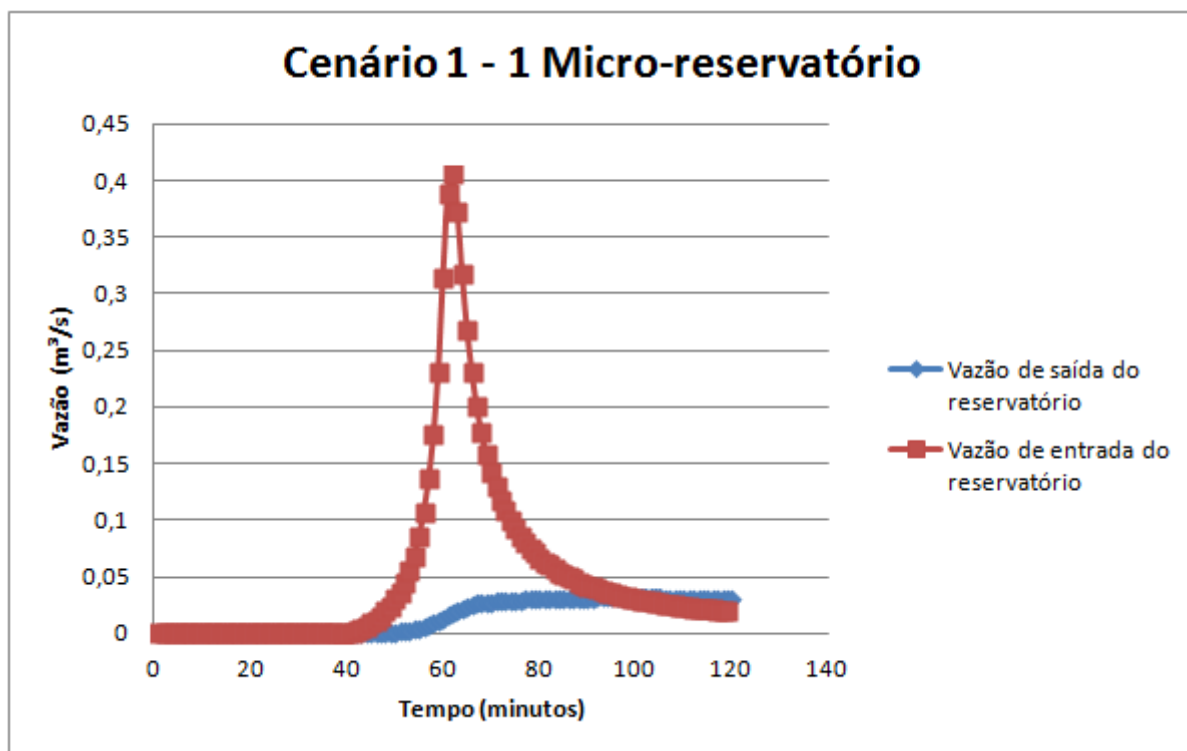
Esta seção tem como objetivo apresentar os resultados encontrados para o abatimento da vazão de pico do loteamento estudado, em um cenário com a utilização de apenas um micro-reservatório de detenção, com volume de 337,5 m³ e orifício de saída de 0,12 m de diâmetro, localizado no ponto de saída do sistema. A tabela 12 apresenta os valores da vazão máxima de saída do loteamento, da cota máxima de água alcançada no interior do reservatório e, conseqüentemente, do volume máximo de água que ocorreu no reservatório, durante o evento de projeto simulado. Ainda, a figura 25 apresenta o hidrograma de saída do loteamento com a utilização de um micro-reservatório e o hidrograma antes da entrada no micro-reservatório.

Tabela 12 – Resultados obtidos para a simulação com um micro-reservatório

Hipótese 1	Micro-reservatório 1	
Cota máxima atingida nos micro-reservatórios	1,22	m
Volume máximo reservado	274,5	m ³
Vazão máxima de saída do loteamento	0,0328	m ³ /s

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 25 – Vazão de saída do loteamento obtida para a simulação com um micro-reservatório



(fonte: elaborado pelo autor)

6.2 REDUÇÃO DA VAZÃO DE PICO COM DOIS MICRO-RESERVATÓRIOS

O objetivo desta seção é apresentar os resultados encontrados para o abatimento da vazão de pico do loteamento estudado com a utilização de dois micro-reservatórios de detenção, subdividindo a área estudada em duas sub-bacias e aplicando um dispositivo por sub-bacia.

6.2.1 Redução da vazão de pico com dois micro-reservatórios em paralelo

O segundo cenário correspondeu à implantação de dois micro-reservatórios em paralelo. Para conseguir chegar a um valor inferior a vazão de pré-urbanização foram necessários duas hipóteses de dimensionamento para os reservatórios. A primeira considerou que cada micro-reservatório utilizado tem metade do volume do micro-reservatório utilizado no cenário um, 168,75 m³, e diâmetro do orifício de saída de 0,12 m. A segunda hipótese considerou que cada micro-reservatório utilizado tem volume igual ao do micro-reservatório utilizado no cenário um, 337,5 m³, e diâmetro do orifício de saída de 0,095 m. Os resultados para a cota máxima e

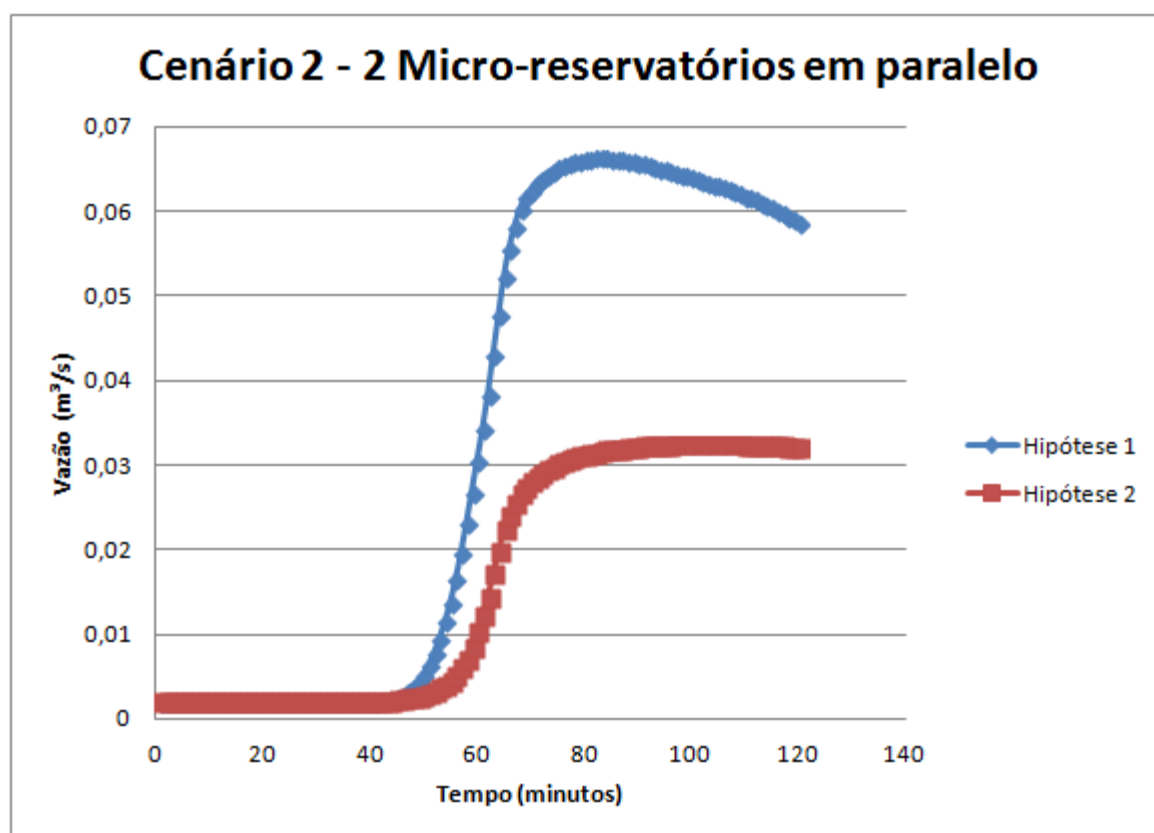
volume máxima atingida em cada dispositivo, além do somatório dos volumes reservados e vazão máxima de saída do loteamento de cada uma dessas hipóteses são fornecidos na tabela 13. Ainda, a figura 26 apresenta os hidrogramas de saída do loteamento, para as duas hipóteses, com a utilização dessa configuração.

Tabela 13 – Resultados obtidos para a simulação com dois dispositivos em paralelo

Hipótese 1		Micro-reservatório 1		Micro-reservatório 2	
Cota máxima atingida nos micro-reservatórios		1,12	m	1,36	m
Volume máximo reservado em cada micro-reservatório		126	m ³	153	m ³
Volume máximo reservado total (MR 1 + MR 2)		279		m ³	
Vazão máxima de saída do loteamento		0,0663		m ³ /s	
Hipótese 2		Micro-reservatório 1		Micro-reservatório 2	
Cota máxima atingida nos micro-reservatórios		0,7	m	0,84	m
Volume máximo reservado em cada micro-reservatório		157,5	m ³	189	m ³
Volume máximo reservado total (MR 1 + MR 2)		346,5		m ³	
Vazão máxima de saída do loteamento		0,0324		m ³ /s	

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 26 – Vazões de saída do loteamento obtidas para a simulação com dois dispositivos em paralelo



(fonte: elaborado pelo autor)

6.2.2 Redução da vazão de pico com dois micro-reservatórios em série

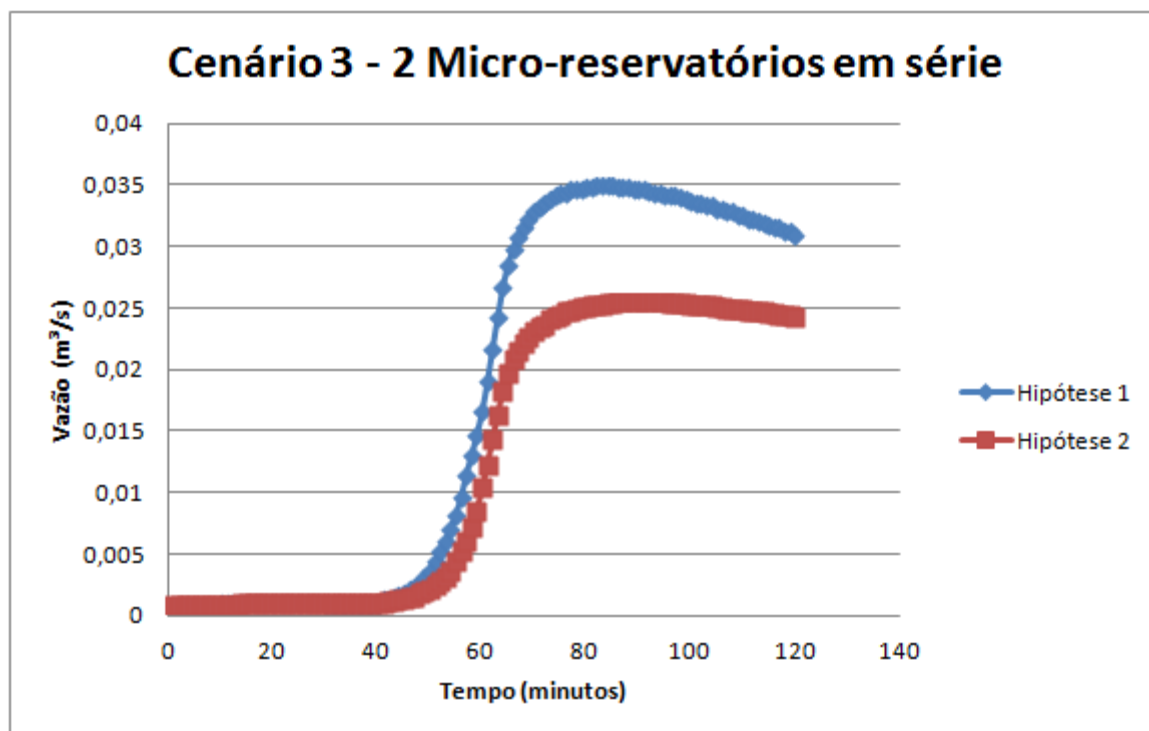
Como alternativa a ligação dos dispositivos em paralelo, foi testada a ligação dos micro-reservatórios em série. Dessa maneira, o terceiro cenário correspondeu à implantação de dois micro-reservatórios em série. Para conseguir chegar a um valor inferior a vazão de pré-urbanização foram necessários duas hipóteses de dimensionamento para os reservatórios. A primeira considerou que cada micro-reservatório utilizado tem metade do volume do micro-reservatório utilizado no cenário um, 168,75 m³, e diâmetro do orifício de saída de 0,12 m. A segunda hipótese considerou que cada micro-reservatório utilizado tem volume igual ao do micro-reservatório utilizado no cenário um, 337,5 m³, e diâmetro do orifício de saída de 0,12 m. Os resultados para a cota máxima e volume máximo atingida em cada dispositivo, além do somatório dos volumes reservados e vazão máxima de saída do loteamento de cada uma dessas hipóteses são fornecidos na tabela 14. Ainda, a figura 27 apresenta os hidrogramas de saída do loteamento, para as duas hipóteses, com a utilização dessa configuração.

Tabela 14 – Resultados obtidos para a simulação com dois dispositivos em série

Hipótese 1	Micro-reservatório 1		Micro-reservatório 2	
Cota máxima atingida nos micro-reservatórios	1,12	m	1,37	m
Volume máximo reservado em cada micro-reservatório	126	m ³	154,12	m ³
Volume máximo reservado total (MR 1 + MR 2)	280,12			m ³
Vazão máxima de saída do loteamento	0,035			m ³ /s
Hipótese 2	Micro-reservatório 1		Micro-reservatório 2	
Cota máxima atingida nos micro-reservatórios	0,61	m	0,76	m
Volume máximo reservado em cada micro-reservatório	137,25	m ³	171	m ³
Volume máximo reservado total (MR 1 + MR 2)	308,25			m ³
Vazão máxima de saída do loteamento	0,0256			m ³ /s

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 27 – Vazões de saída do loteamento obtidas para a simulação com dois dispositivos em série



(fonte: elaborado pelo autor)

6.3 REDUÇÃO DA VAZÃO DE PICO COM QUATRO MICRO-RESERVATÓRIOS

O objetivo desta seção é apresentar os resultados encontrados para o abatimento da vazão de pico do loteamento estudado com a utilização de quatro micro-reservatório de detenção, subdividindo a área estudada em quatro sub-bacias e aplicando um dispositivo por sub-bacia.

6.3.1 Redução da vazão de pico com quatro micro-reservatórios em paralelo

O quarto cenário correspondeu à implantação de quatro micro-reservatórios em paralelo. Para conseguir chegar a um valor inferior a vazão de pré-urbanização foram necessários duas hipóteses de dimensionamento para os reservatórios. A primeira considerou que cada micro-reservatório utilizado tem um quarto do volume do micro-reservatório utilizado no cenário um, 84,375 m³, e diâmetro do orifício de saída de 0,12 m. A segunda hipótese considerou que cada micro-reservatório utilizado tem volume de 150 m³, e diâmetro do orifício de saída de 0,12 m. Os resultados para a cota máxima e volume máximo atingida em cada dispositivo, além do somatório dos volumes reservados e vazão máxima de saída do loteamento de cada

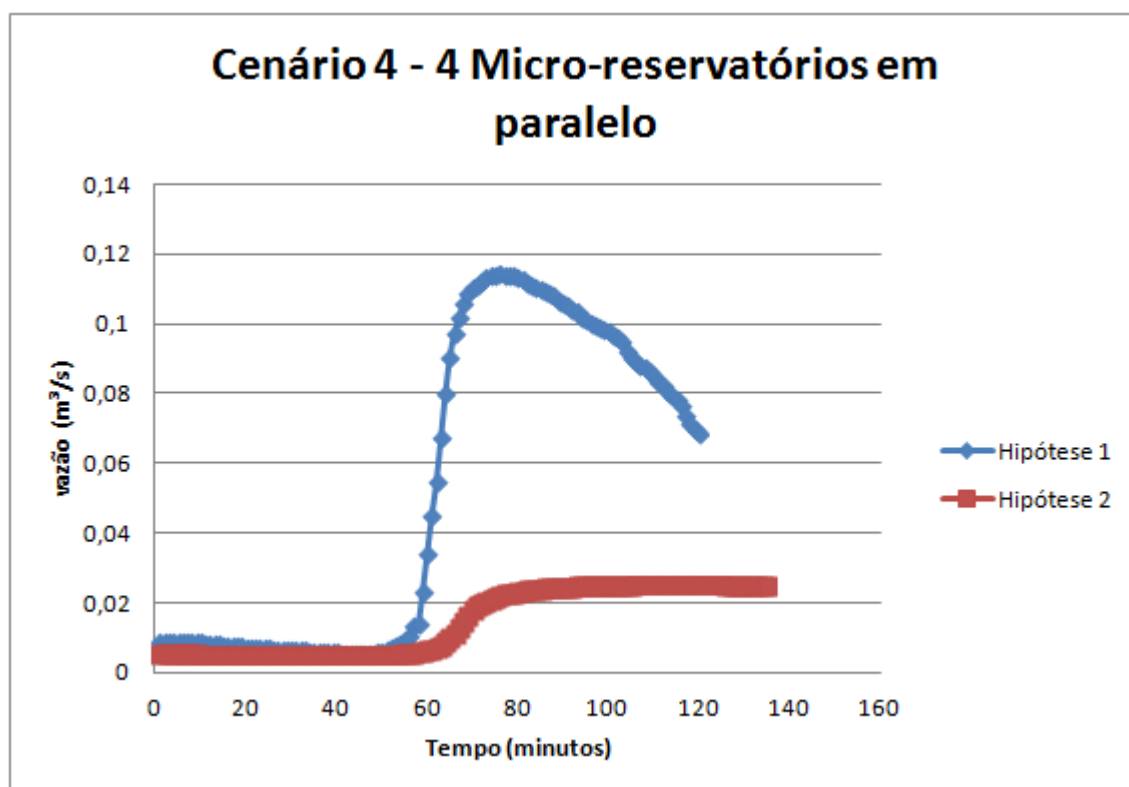
uma dessas hipóteses são fornecidos na tabela 15. Ainda, a figura 28 apresenta os hidrogramas de saída do loteamento, para as duas hipóteses, com a utilização dessa configuração.

Tabela 15 – Resultados obtidos para a simulação com quatro dispositivos em paralelo

Hipótese 1	Micro-reservatório 1		Micro-reservatório 2		Micro-reservatório 3		Micro-reservatório 4	
	Cota máxima atingida nos micro-reservatórios	0,86	m	0,87	m	1,2	m	0,98
Volume máximo reservado em cada micro-reservatório	48,375	m ³	48,938	m ³	67,5	m ³	55,125	m ³
Volume máximo reservado total (MR 1 + MR 2 + MR 3 + MR 4)	219,938							
Vazão máxima de saída do loteamento	0,1143							
Hipótese 2	Micro-reservatório 1		Micro-reservatório 2		Micro-reservatório 3		Micro-reservatório 4	
	0,92	m	0,94	m	1,27	m	1,12	m
Volume máximo reservado em cada micro-reservatório	92	m ³	94	m ³	127	m ³	112	m ³
Volume máximo reservado total (MR 1 + MR 2 + MR 3 + MR 4)	425							
Vazão máxima de saída do loteamento	0,0257							

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 28 – Vazões de saída do loteamento obtidas para a simulação com quatro dispositivos em paralelo



(fonte: elaborado pelo autor)

6.3.2 Redução da vazão de pico com quatro micro-reservatórios em série

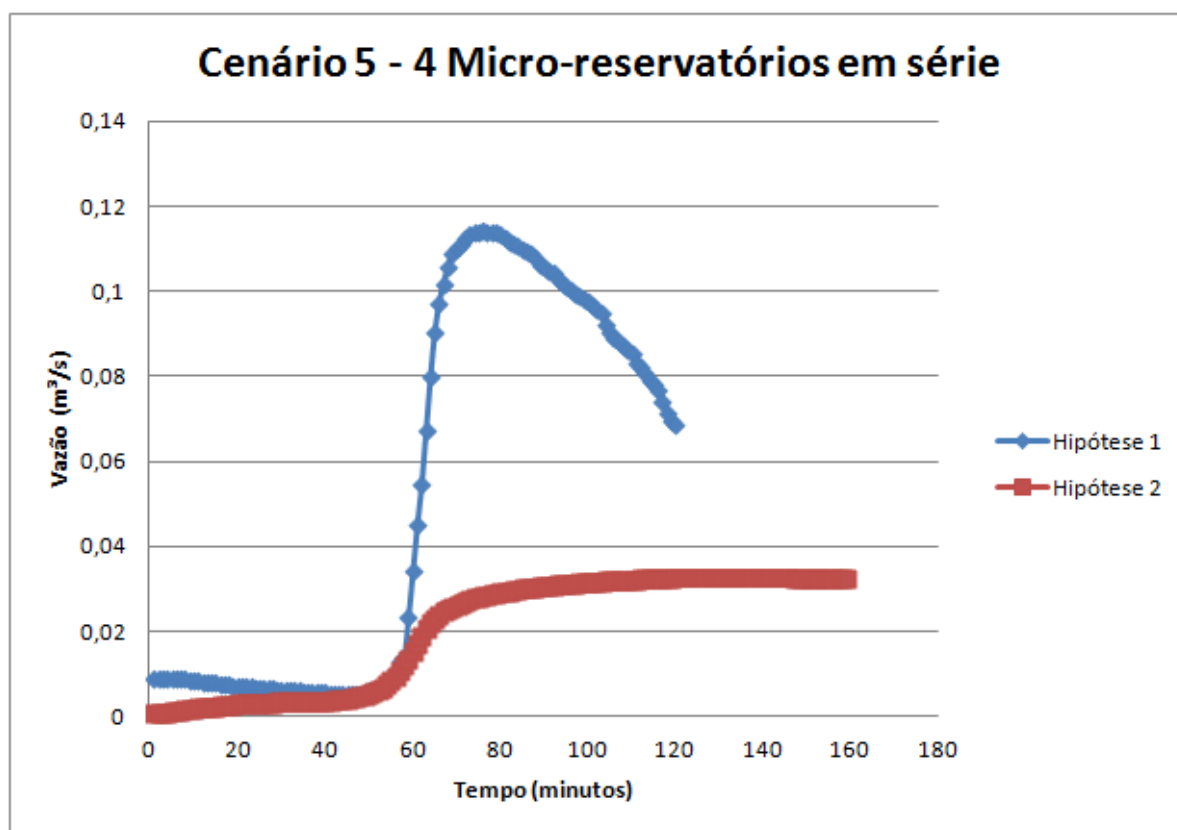
Como alternativa a ligação dos dispositivos em paralelo, foi testada a ligação dos micro-reservatórios em série. Dessa maneira, o quinto cenário correspondeu à implantação de quatro micro-reservatórios em série. Para conseguir chegar a um valor inferior a vazão de pré-urbanização foram necessários duas hipóteses de dimensionamento para os reservatórios. A primeira considerou que cada micro-reservatório utilizado tem um quarto do volume do micro-reservatório utilizado no cenário um, 84,375 m³, e diâmetro do orifício de saída de 0,12 m. A segunda hipótese considerou que cada micro-reservatório utilizado tem volume de 150 m³, e diâmetro do orifício de saída de 0,12 m. Os resultados para a cota máxima e volume máximo atingida em cada dispositivo, além do somatório dos volumes reservados e vazão máxima de saída do loteamento de cada uma dessas hipóteses são fornecidos na tabela 16. Ainda, a figura 29 apresenta os hidrogramas de saída do loteamento, para as duas hipóteses, com a utilização dessa configuração.

Tabela 16 – Resultados obtidos para a simulação com quatro dispositivos em série

Hipótese 1		Micro-reservatório 1		Micro-reservatório 2		Micro-reservatório 3		Micro-reservatório 4	
Cota máxima atingida nos micro-reservatórios		0,82	m	0,82	m	1,3	m	1,41	m
Volume máximo reservado em cada micro-reservatório		46,125	m ³	46,125	m ³	73,125	m ³	79,312	m ³
Volume máximo reservado total (MR 1 + MR 2 + MR 3 + MR 4)		244,687							
Vazão máxima de saída do loteamento		0,1292							
Hipótese 2		Micro-reservatório 1		Micro-reservatório 2		Micro-reservatório 3		Micro-reservatório 4	
Cota máxima atingida nos micro-reservatórios		0,81	m	0,84	m	1,18	m	1,23	m
Volume máximo reservado em cada micro-reservatório		81	m ³	84	m ³	118	m ³	123	m ³
Volume máximo reservado total (MR 1 + MR 2 + MR 3 + MR 4)		406							
Vazão máxima de saída do loteamento		0,033							

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 29 – Vazões de saída do loteamento obtidas para a simulação com quatro dispositivos em série



(fonte: elaborado pelo autor)

6.4 RESUMO DOS RESULTADOS

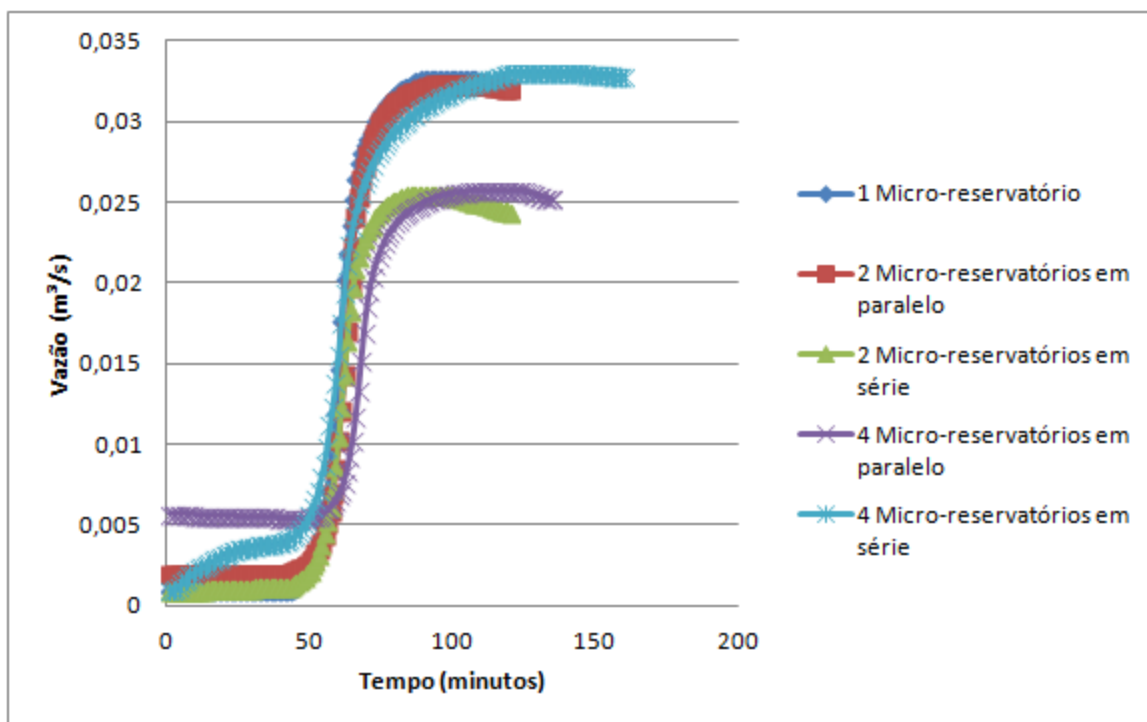
O objetivo desta seção é apresentar de forma resumida os resultados obtidos com a realização deste trabalho. A tabela 17 apresenta o volume total reservado e a máxima vazão de saída para as situações nas quais os micros-reservatórios simulados não ultrapassaram a vazão de pré-desenvolvimento, situações essas, definidas como ideais para cada cenário estudado. Ainda a figura 30 fornece os hidrogramas de saída do loteamento para cada uma destas hipóteses.

Tabela 17 – Resumo dos resultados encontrados

Número de dispositivos	Tipo de ligação entre os dispositivos	Diâmetro do orifício de saída (m)	Volume máximo reservado (m³)	Vazão máxima de saída (m³/s)
1		0,06	272,25	0,033
2	paralelo	0,0475	350	0,0326
2	série	0,06	308,25	0,0256
4	paralelo	0,035	412,5	0,0287
4	série	0,06	380	0,033

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 30 – Vazões de saída do loteamento, inferiores a vazão de pré-desenvolvimento, para cada cenário estudado



(fonte: elaborado pelo autor)

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O intuito da realização deste trabalho era ao seu final observar os efeitos quantitativos da utilização de dispositivos de controle pluvial no lote sobre o sistema de drenagem urbano, no que se refere ao abatimento do pico das vazões. Com a utilização do processo de simulação hidrológica tornou-se possível analisar esses quantitativos para diferentes condições dos dispositivos de controle. Durante a etapa de modelagem ocorreu à definição de um hietograma de projeto, criado a partir da equação IDF definida para a região em estudo, que representa um evento de chuva crítico sobre a área em questão, definida como uma área residencial urbana do município de Porto Alegre. Com a definição desse evento de precipitação foi possível analisar a resposta da bacia em termos de vazões superficiais considerando os cenários hipotéticos estudados.

A análise foi realizada considerando inicialmente a utilização de um dispositivo isoladamente e em seguida, foram testados cenários para a utilização de dois e quatro dispositivos, sendo que nas situações com dois e quatro dispositivos foram testadas as alternativas de ligação dos mesmos em série e paralelo.

Os resultados obtidos foram verificados para o parâmetro vazão de pico do escoamento. Comparando os cenários hipotéticos criados, foi possível verificar que mesmo para uma aplicação dos dispositivos que não proporciona abatimento de vazões para um nível ideal, os resultados alcançados para os parâmetros analisados são significativos, reafirmando a importância da utilização dos mesmos com a finalidade de diminuir os efeitos causados pela urbanização. Ainda, a utilização de apenas um dispositivo foi o cenário que armazenou o menor volume de água para abater a vazão de pico a um nível inferior ao da vazão de pré-desenvolvimento e, os cenários com dois micro-reservatórios em série e quatro micro-reservatórios em paralelo foram os que alcançaram a menor vazão de pico. No entanto, como em todos os cenários testados o volume dos micro-reservatórios não foi utilizado por completo, fator esse que poderia influenciar diretamente na vazão máxima de saída.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, 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. 4, n. 3, p. 21-29, jul./set. 2000.
- BAPTISTA, M.; NASCIMENTO, N.; BARRAUD, S. **Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana**. Porto Alegre: Editora da UFRGS; ABRH, 2005.
- BUFFON, F. T. **Aproveitamento de águas pluviais**: efeito sobre o sistema de drenagem urbana. 2010. 59 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
- CASTRO, A. S.; ALLASIA, D. G.; ORDOÑEZ, J. S.; GONÇALVES, L. S. **Águas pluviais urbanas**: guia da oficina de capacitação. Porto Alegre: Nudeme, 2008.
- CASTRO, A. S.; GOLDENFUM, J. A. Uso de telhados verdes no controle quantitativo do escoamento superficial urbano. **Atitude**: construindo oportunidades, Porto Alegre, v. 4, n. 7, p. 75-81, jan./jun. 2010.
- COSTA, A. R. da.; SIQUEIRA, E. Q. de.; MENEZES FILHO, F. C. M. de. **Águas pluviais urbanas**: curso básico de hidrologia urbana. Brasília: ReCESA, 2007.
- GOOGLE EARTH. [Condomínio residencial]. [S.1], 2013.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **População residente, por situação de domicílio e sexo, segundo os grupos de idade**. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/caracteristica_da_populacao/abelas_pdf?tab1.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2012.
- O'LOUGHLIN, G., BEECHAM, S., LEES, S., ROSE, L., NICHOLAS, D. **Stormwater**: Refining on-site detention practice in Sidney. Lyon: Graie, 1998.
- PORTO ALEGRE. Prefeitura Municipal de Porto Alegre. Departamento de Esgotos Pluviais. **Plano diretor de drenagem urbana**: Manual de drenagem urbana. Porto Alegre, 2005. v. 6.
- TUCCI, C. E. M. Inundações Urbanas, in: TUCCI, C. E. M.; PORTO, R.; BARROS, M. (Org). **Drenagem Urbana**. Porto Alegre: Editora da UFRGS; ABRH, 1995. p. 15-348.
- _____. Coeficiente de escoamento e vazão máxima de bacias urbanas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 5, n. 1, p. 61-68, jan./mar., 2000.
- _____. **Hidrologia**: ciência e aplicação. 4. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2007.
- _____. **Inundações e drenagem urbana**. [S. l.], [20--?]. Disponível em: <http://www.iph.ufrgs.br/pop_ups/LivroInundacoes/cap3-1.pdf>. Acesso em: 23 nov. 2012
- URBONAS, B; STAHR, P. **Stormwater**: best management practices and detection for water quality, drainage and CSO management. New Jersey: Prentice Hall, 1993.

