

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA



Bruno Ferreira do Nascimento

Análise de macrodrenagem utilizando SIG e modelo de
previsão-vazão. Estudo de caso: enchentes no Museu
Aeroespacial

Trabalho de Graduação
2011

Civil

Bruno Ferreira do Nascimento

**ANÁLISE DE MACRODRENAGEM UTILIZANDO SIG E MODELO DE
PREVISÃO-VAZÃO. Estudo de caso: enchentes no Museu Aeroespacial**

Orientadora
Prof. Dr. Nadiane Smaha Kruk (ITA)

Divisão de Engenharia Civil

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA AEROESPACIAL
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA

2011

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**Divisão de Informação e Documentação**

Nascimento, Bruno Ferreira
Análise de macrodrenagem utilizando SIG e modelo previsão-vazão. Estudo de caso: enchentes no Museu Aeroespacial / Bruno Ferreira do Nascimento.

São José dos Campos, 2011.
115f.

Trabalho de Graduação – Divisão de Engenharia Civil –
Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2011. Orientadora: Prof. Dr Nadiane Smaha Kruk.

1. Macrodrenagem urbana. 2. Sistema de Informações Geográficas (SIG). 3. Modelagem indireta precipitação-vazão (IPHS1). I. Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. II. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. III. Estudo de macrodrenagem utilizando Sistema de Informações Geográficas e modelos indiretos de previsão de vazão. Estudo de caso: enchentes no Museu Aeroespacial.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

NASCIMENTO, Bruno Ferreira. **Análise de macrodrenagem utilizando SIG e modelo previsão-vazão. Estudo de caso: enchentes no Museu Aeroespacial.** 2011. 115f. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Bruno Ferreira do Nascimento.

TÍTULO DO TRABALHO: Análise de macrodrenagem utilizando SIG e modelo previsão-vazão.
Estudo de caso: enchentes no Museu Aeroespacial.

TIPO DO TRABALHO/ANO : Graduação / 2011.

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias deste trabalho de graduação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de graduação pode ser reproduzida sem a autorização do autor.

Bruno Ferreira do Nascimento
Rua h20b, 116 - Campus do CTA
12228-470 - São José dos Campos/SP

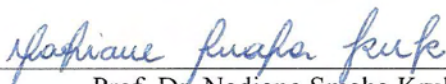
**ANÁLISE DE MACRODRENAGEM UTILIZANDO SIG E MODELO PREVISÃO-
VAZÃO. ESTUDO DE CASO: ENCHENTES NO MUSEU AEROESPACIAL**

Essa publicação foi aceita como Relatório Final de Trabalho de Graduação



Bruno Ferreira do Nascimento

Autor



Prof. Dr. Nadiane Smaha Kruk (ITA)

Orientadora



Prof. Dr. Eliseu Lucena Neto (ITA)

Coordenador do Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica

São José dos Campos, 27 de outubro de 2011.

*Dedico esse trabalho a minha família
que sempre apostou no meu sucesso
e me formou como homem, para a vida.*

Agradecimentos

Agradeço a Deus, que durante toda a minha vida, deu-me muitas oportunidades, tranquilidade e força para lutar.

Agradeço a minha família querida, que sempre me forneceu todo o suporte necessário para realizar os meus projetos e até funcionou como um amortecedor para os problemas que, naturalmente, surgiram.

Agradeço a uma pessoa muito especial na minha vida, que me acompanha sempre e que tenta absorver para si todos os meus inúmeros problemas e variações de humor.

Aos meus amigos de quarto que demonstraram respeito, amizade e companheirismo durante esses breves 5 anos de ITA.

Agradeço a orientação recebida da orientadora desse trabalho, que se mostrou uma excelente profissional na parte técnica somada com uma dedicação e comprometimento em orientar, que faz jus a esse agradecimento.

Finalmente, ao doutorando dessa mesma escola Demerval, por sua vontade e atenção em ajudar na parte inicial desse trabalho.

Resumo

Alguns aeródromos do país sofrem com problema de macrodrenagem, causados por diversos fatores, tais como: crescimento da urbanização; falta de capacidade ou de manutenção do sistema de macrodrenagem e até mesmo a intensificação dos regimes de chuvas decorrentes das mudanças climáticas. O Museu Aeroespacial (MUSAL), localizado na área do Campo dos Afonsos, apresenta um histórico de enchentes com consequente prejuízo ao patrimônio da União. A Diretoria de Engenharia da Aeronáutica (DIRENG) realizou uma análise preliminar do problema, ficando identificada a necessidade de estudos mais aprofundados sobre o tema. O presente Trabalho de Graduação (TG) identificou e quantificou os fatores geradores das enchentes, por meio: de visitas a campo; de análises, utilizando uma ferramenta de Sistema de Informações Geográficas (SIG), das bacias de contribuições para o ponto em estudo; do levantamento das variáveis físicas da área de contribuição, tais como, regime de chuvas, tipo de solo, tipo de ocupação do solo e topografia precisa das regiões mais relevantes. Para as análises de precipitações, adotou-se como caso a ser simulado a chuva do dia 31/01/2006, para validar a modelagem implementada, e estabeleceu-se a equação IDF e a chuva de projeto, para os redimensionamentos necessários. A partir das informações geradas no modelo precipitação-vazão (IPHS1), observou-se que os cursos d'água não comportam a vazão de projeto, preconizada para um período de retorno 25 anos. Foi dada uma proposta de solução para o problema das enchentes nos hangares do MUSAL, que deve ser idealmente integrada à bacia como um todo.

Abstract

Some airfields in the country suffer from macro drainage problem caused by several factors, such as: increasing urbanization, lack of capacity or maintenance the macro drainage system and even intensification of the rainfall patterns due to climate change. The Museu Aeroespacial (MUSAL), located in the Campo dos Afonsos, presents a history of flooding and consequent damage to the patrimony of the country. The Diretoria de Engenharia da Aeronáutica (DIRENG) conducted a preliminary analysis of the problem, being identified the need for deeper studies on the subject. This work identified and quantified the factors causing the floodings through: field visits, analysis of watershed contributions to the point under consideration, using a Geographic Information System (GIS); the survey of the physical variables of contribution area such as rainfall, soil type, type of land use and precise topography of the most important regions. For the analysis of rainfall, the case to be simulated was the rain of the day 31/01/2006, to validate the model implemented, and was established the IDF equation and the rain design, required for the resizing. From the information generated in the rainfall-runoff model (IPHS1) was observed that the water courses do not support the design flow, adopted for a return period of 25 years. A proposed solution was given to the problem of floodings in the hangars of MUSAL, which should ideally be integrated into the basin as a whole.

Lista de Figuras

1.1	Nível de água atingido na parte de trás do hangar, em 31/01/2006. Fonte: MUSAL.	21
1.2	Fluxo de água na parte da frente do hangar, em 31/01/2006. Fonte: MUSAL.	21
1.3	Aeronave arrastada pela enxurrada até a entrada do hangar, em 31/01/2006. Fonte: MUSAL.	22
2.1	Exemplo de elementos em representação vetorial. Fonte: [5].	25
2.2	Exemplo de grade regular como estrutura do MNT e representação matricial. Fonte: [5].	26
2.3	Hidrograma unitário triangular estabelecido pelo Método do SCS. Fonte: [13].	38
3.1	Imagem de satélite do local em estudo. Norte Geográfico apontado para cima e escala representada na imagem. Fonte: Google Earth (modificada).	43
3.2	Rede de esgoto e águas pluviais. Norte Geográfico apontado para cima. Escala: 1:10.000. Fonte: Plano Diretor UNIFA (2005).	43
3.3	Nível máximo identificado atingido na parte de trás do hangar, em 31/01/2006. Fonte: MUSAL.	44
3.4	Diagrama do método definido.	47
4.1	Mapa SRTM recortado para a localidade do Campo dos Afonsos. Datum: WGS-84; Projeção: UTM Zona 23; Escala: 1:250.000; Norte Geográfico apontado para cima e Escala de cinza: -15 m (preto) :1012 m (branco).	49
4.2	Preenchimento de um sumidouro artificial do (MNE). Fonte: [12].	50
4.3	Definição da correlação numérica com as direções e escala de cor adotada. Norte Geográfico apontado para cima. Fonte: [12] (modificada com escala de cores utilizada na Figura 4.4).	50
4.4	Mapa de direções de fluxo. Datum: WGS-84; Projeção: UTM Zona 23; Escala: 1:250.000 e Norte Geográfico apontado para cima.	51

4.5	Mapa da quantidade acumulada de fluxo. Datum: WGS-84; Projeção: UTM Zona 23; Escala: 1:250.000; Norte Geográfico apontado para cima e Escala de cinza: 0 (preto) : 31668 (branco).	52
4.6	Rede de fluxo, com área de contribuição superior a 1,5 Km ² . Datum: WGS-84; Projeção: UTM Zona 23; Escala: 1:250.000; Norte Geográfico apontado para cima e Escala binária de cores: verdadeiro (preto) : falso (branco).	53
4.7	Conexão e segmentação da rede de fluxo. Datum: WGS-84; Projeção: UTM Zona 23; Escala: 1:250.000; Norte Geográfico apontado para cima e Escala de cinza: 1 (preto) : 567 (branco).	54
4.8	Identificação e vetorização das áreas de captações. Datum: WGS-84; Projeção: UTM Zona 23; Escala: 1:250.000; Norte Geográfico apontado para cima e Escala de cinza: 1 (preto) : 567 (branco).	55
4.9	Caminhos naturais de drenagem nas áreas de captações. Datum: WGS-84; Projeção: UTM Zona 23; Escala: 1:250.000; Norte Geográfico apontado para cima e Escala de cinza: 1 (preto) : 567 (branco).	56
4.10	Caminho mais longo de drenagem para o fluxo da área de captação (linha marrom). Datum: WGS-84; Projeção: UTM Zona 23; Escala: 1:50.000 e Norte Geográfico apontado para cima.	57
4.11	Pontos de interesse e, respectivas, áreas de contribuições. Datum: WGS-84; Projeção: UTM Zona 23; Escala: 1:50.000 e Norte Geográfico apontado para cima.	58
4.12	Visualização 3D das curvas de níveis e do caminho natural obtidos. Datum: WGS-84; Projeção: UTM Zona 23 e Norte Geográfico indicado pela letra “N” no canto superior direito.	59
4.13	Áreas de contribuições, caminhos naturais de drenagem e Arroio dos Afonsos. Datum: WGS-84; Projeção: UTM Zona 23 e Norte Geográfico apontado para cima e escala representada na figura.	60
4.14	Método de Thiessen, para as estações da Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro mais próximas do MUSAL, escala 1:125.000.	62
4.15	Comparação gráfica das observações históricas dos registros de totais diários máximos para cada ano das duas estações analisadas.	70
4.16	Ajuste de Equação 2.5. Eixos em escala logaritmica.	71
4.17	Ajuste de Equação 2.4. Escala bilogarítimo.	72

4.18	Chuva de projeto estabelecida para o tempo de retorno (TR) de 25 anos. . . .	74
4.19	Hietograma de chuva simulada. Fonte:[17].	75
4.20	Modelagem adotada, implementada no programa IPHS1, com imagem de fundo obtida por tratamento com ArcGIS do mapeamento do Google Earth. .	76
4.21	Seção natural próximo à nascente (Trecho Natural 1, Figura 4.20 trecho 1-2). Data da visita: 19/04/2011.	76
4.22	Seção natural, no trecho paralelo à pista (Trecho Natural 4, Figura 4.20 trecho 6-8). Data da visita: 19/04/2011.	77
4.23	Seção natural, no trecho ao lado do hangar no MUSAL (Vala do MUSAL, Figura 4.20 trecho 4-5). Data da visita: 20/06/2008.	77
4.24	Dimensionamento estabelecido para as seções dos trechos d'água. Escala: 1:10.	85
A.1	Código fonte, em VBA, para a separação dos dados de precipitação.	94
A.2	Saída do programa implementado em excel VBA, para separação das precipi- tações.	95
C.1	Hidrograma de entrada (Qe) e saída (Qs), para a chuva de projeto e Trecho Natural 1, nas condições atuais. Cada intervalo: 15 minutos. Programa: IPHS1.	101
C.2	Hidrograma de entrada (Qe) e saída (Qs), para a chuva de projeto e Trecho Concreto, nas condições atuais. Cada intervalo: 15 minutos. Programa: IPHS1.	101
C.3	Hidrograma de entrada (Qe) e saída (Qs), para a chuva de projeto e Trecho Natural 2, nas condições atuais. Cada intervalo: 15 minutos. Programa: IPHS1.	102
C.4	Hidrograma de entrada (Qe) e saída (Qs), para a chuva de projeto e Vala MUSAL, nas condições atuais. Cada intervalo: 15 minutos. Programa: IPHS1.	102
C.5	Hidrograma de entrada (Qe) e saída (Qs), para a chuva de projeto e Trecho Natural 3, nas condições atuais. Cada intervalo: 15 minutos. Programa: IPHS1.	103
C.6	Hidrograma de entrada (Qe) e saída (Qs), para a chuva de projeto e Trecho Natural 4, nas condições atuais. Cada intervalo: 15 minutos. Programa: IPHS1.	103
C.7	Hidrograma de entrada (Qe) e saída (Qs), para a chuva de projeto e Trecho Enterrado, nas condições atuais. Cada intervalo: 15 minutos. Programa: IPHS1.	104
C.8	Hidrograma de entrada (Qe) e saída (Qs), para a chuva simulada (31/01/2006) e Trecho Natural 1, nas condições atuais. Cada intervalo: 15 minutos. Pro- grama: IPHS1.	104

C.9	Hidrograma de entrada (Qe) e saída (Qs), para a chuva simulada (31/01/2006) e Trecho Concreto, nas condições atuais. Cada intervalo: 15 minutos. Programa: IPHS1.	105
C.10	Hidrograma de entrada (Qe) e saída (Qs), para a chuva simulada (31/01/2006) e Trecho Natural 2, nas condições atuais. Cada intervalo: 15 minutos. Programa: IPHS1.	105
C.11	Hidrograma de entrada (Qe) e saída (Qs), para a chuva simulada (31/01/2006) e Vala MUSAL, nas condições atuais. Cada intervalo: 15 minutos. Programa: IPHS1.	106
C.12	Hidrograma de entrada (Qe) e saída (Qs), para a chuva simulada (31/01/2006) e Trecho Natural 3, nas condições atuais. Cada intervalo: 15 minutos. Programa: IPHS1.	106
C.13	Hidrograma de entrada (Qe) e saída (Qs), para a chuva simulada (31/01/2006) e Trecho Natural 4, nas condições atuais. Cada intervalo: 15 minutos. Programa: IPHS1.	107
C.14	Hidrograma de entrada (Qe) e saída (Qs), para a chuva simulada (31/01/2006) e Trecho Enterrado, nas condições atuais. Cada intervalo: 15 minutos. Programa: IPHS1.	107
C.15	Hidrograma de entrada (Qe) e saída (Qs), para a chuva de projeto e Trecho Natural 1, após dimensionamento proposto. Cada intervalo: 15 minutos. Programa: IPHS1.	108
C.16	Hidrograma de entrada (Qe) e saída (Qs), para a chuva de projeto e Trecho Concreto, após dimensionamento proposto. Cada intervalo: 15 minutos. Programa: IPHS1.	108
C.17	Hidrograma de entrada (Qe) e saída (Qs), para a chuva de projeto e Trecho Natural 2, após dimensionamento proposto. Cada intervalo: 15 minutos. Programa: IPHS1.	109
C.18	Hidrograma de entrada (Qe) e saída (Qs), para a chuva de projeto e Trecho Vala MUSAL, após dimensionamento proposto. Cada intervalo: 15 minutos. Programa: IPHS1.	109
C.19	Hidrograma de entrada (Qe) e saída (Qs), para a chuva de projeto e Trecho Natural 3, após dimensionamento proposto. Cada intervalo: 15 minutos. Programa: IPHS1.	110

C.20	Hidrograma de entrada (Q _e) e saída (Q _s), para a chuva de projeto e Trecho Natural 4 , após dimensionamento proposto. Cada intervalo: 15 minutos. Programa: IPHS1.	110
C.21	Hidrograma de entrada (Q _e) e saída (Q _s), para a chuva de projeto e Trecho Enterrado , após dimensionamento proposto. Cada intervalo: 15 minutos. Programa: IPHS1.	111
C.22	Hidrograma de entrada (Q _e) e saída (Q _s), para a chuva simulada (31/01/2006) e Trecho Natural 1 , após dimensionamento proposto. Cada intervalo: 15 minutos. Programa: IPHS1.	111
C.23	Hidrograma de entrada (Q _e) e saída (Q _s), para a chuva simulada (31/01/2006) e Trecho Concreto , após dimensionamento proposto. Cada intervalo: 15 minutos. Programa: IPHS1.	112
C.24	Hidrograma de entrada (Q _e) e saída (Q _s), para a chuva simulada (31/01/2006) e Trecho Natural 2, após dimensionamento proposto. Cada intervalo: 15 minutos. Programa: IPHS1.	112
C.25	Hidrograma de entrada (Q _e) e saída (Q _s), para a chuva simulada (31/01/2006) e Vala MUSAL, após dimensionamento proposto. Cada intervalo: 15 minutos. Programa: IPHS1.	113
C.26	Hidrograma de entrada (Q _e) e saída (Q _s), para a chuva simulada (31/01/2006) e Trecho Natural 3, após dimensionamento proposto. Cada intervalo: 15 minutos. Programa: IPHS1.	113
C.27	Hidrograma de entrada (Q _e) e saída (Q _s), para a chuva simulada (31/01/2006) e Trecho Natural 4, após dimensionamento proposto. Cada intervalo: 15 minutos. Programa: IPHS1.	114
C.28	Hidrograma de entrada (Q _e) e saída (Q _s), para a chuva simulada (31/01/2006) e Trecho Enterrado, após dimensionamento proposto. Cada intervalo: 15 minutos. Programa: IPHS1.	114

Lista de Tabelas

2.1	Fatores de frequência k para a distribuição de Gumbel [10]. (Calculado por M.D. Reid, em 1942).	29
4.1	Precipitações máximas anuais da estação de Jacarepaguá/Tanque até a duração de 60 minutos [mm].	63
4.2	Precipitações máximas anuais da estação de Jacarepaguá/Tanque a partir da duração de 60 minutos em [mm].	64
4.3	Precipitações estabelecidas estatisticamente, para a estação de Jacarepaguá/Tanque até a duração de 60 minutos [mm].	64
4.4	Precipitações estabelecidas estatisticamente, para a estação de Jacarepaguá/Tanque a partir da duração de 60 minutos [mm].	65
4.5	Intensidades máximas anuais, para estação de Jacarepaguá/Tanque, até a duração de 60 minutos [mm/min].	65
4.6	Intensidades máximas anuais, para estação de Jacarepaguá/Tanque a partir de 60 minutos [mm/min].	66
4.7	Precipitações diárias anuais e o dia de sua ocorrência (Parte 1). Estação Meteorológica de Afonsos (SBAF). Fonte: ICEA.	67
4.8	Precipitações diárias anuais e o dia de sua ocorrência (Parte 2). Estação Meteorológica de Afonsos (SBAF). Fonte: ICEA	68
4.9	Precipitações diárias anuais e o dia de sua ocorrência. Estação Pluviométrica Jacarepaguá/Tanque. Fonte: ALERTA RIO.	69
4.10	Pontos (i,t) obtidos para determinação da constante “c”.	71
4.11	Períodos de retorno mínimos estabelecido pela Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro, para cada tipo de obra de drenagem urbana.	73
4.12	Características dos trechos d’água (Parte 1).	78
4.13	Características dos trechos d’água (Parte 2).	78
4.14	Características dos trechos d’água (Parte 3).	79

4.15	Características das áreas de contribuição (Parte 1).	79
4.16	Características das áreas de contribuição (Parte 2).	80
4.17	Resultados obtidos para o CN nas três condições de umidade dos solo.	80
4.18	Máximo de vazão e capacidade de transporte, considerando o sistema de drenagem existente.	82
4.19	Características das seções dimensionadas.	86
4.20	Picos de vazão atualizados e capacidade de vazão para os trechos dimensionados.	86
4.21	Lâmina líquida e borda livre para as chuvas de projeto e simulada.	87
B.1	Características da área de contribuição (Nascente), para efeito do cálculo do CN.	97
B.2	Características da área de contribuição (Trecho Natural 1), para efeito do cálculo do CN.	97
B.3	Características da área de contribuição (Trecho Concreto), para efeito do cál- culo do CN.	97
B.4	Características da área de contribuição (Trecho Natural 2), para efeito do cálculo do CN.	98
B.5	Características da área de contribuição (Vala do MUSAL), para efeito do cál- culo do CN.	98
B.6	Características da área de contribuição (Trecho Natural 3) , para efeito do cálculo do CN.	98
B.7	Características da área de contribuição (Hangar), para efeito do cálculo do CN.	99

Lista de siglas

CN - Número-Curva

DIRENG - Diretoria de Engenharia da Aeronáutica

EB - Exército Brasileiro

ICEA - Instituto de Controle do Espaço Aéreo

IDF - Intensidade duração frequência

IPH - Instituto de Pesquisas Hidráulicas

MNE - Modelos Numéricos de Elevação

MNT - Modelos Numéricos de Terreno

MUSAL - Museu Aeroespacial

PMRJ - Polícia Militar do Rio de Janeiro

SBAF - Estação Meteorológica de Afonsos

SCS - Soil Conservation Service

SIG - Sistema de Informações Geográficas

SRTM - Shuttle Radar Topography Mission

SRTM - Shuttle Radar Topography Mission

TG - Trabalho de Graduação

TR - Tempo de retorno

UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UNIFA - Universidade da Força Aérea

UTM - Universal Transverse Mercator

VBA - Visual Basic for Applications

WGS - World Geodetic System

ZCAS - Zona de Convergência do Atlântico Sul

Sumário

1	Introdução	19
1.1	Objetivos	23
2	Revisão da literatura	24
2.1	Enchentes	24
2.2	Sistema de Informações Geográficas (SIG)	26
2.3	Precipitações em uma bacia	27
2.3.1	Série histórica	26
2.3.2	Geração de Equações Intensidade-Duração-Frequência (IDF)	28
2.3.3	Precipitação média em uma bacia	31
2.3.4	Definição da chuva de projeto	32
2.4	Modelagem Precipitação-Vazão	33
2.4.1	Número-Curva (CN - SCS) para determinação da chuva excedente	34
2.4.2	Tempo de concentração	36
2.4.3	Hidrogramas Unitários Sintéticos	37
2.4.4	Hidrograma de projeto	39
2.5	Dimensionamento em rios e canais	39
2.5.1	Amortecimento de enchentes em canais	40
3	Formulação teórica do problema	42
3.1	Descrição do problema	42
3.2	Hipóteses formuladas	44
3.3	Metodologia	45
4	Resultados	48
4.1	Sistema de informações geográficas (SIG)	48
4.1.1	Operações realizadas	48

4.2	Análise das precipitações históricas.....	60
4.2.1	Comparação entre as fontes de dados de precipitação	66
4.3	Determinação da Equação IDF	70
4.4	Chuva de projeto	72
4.4.1	Simulação da enchente de 31/01/2006	74
4.5	Vazão de projeto	75
4.5.1	Caracterização dos canais existentes	75
4.5.2	Caracterização das áreas de contribuição	78
4.5.3	Vazões resultantes	81
4.6	Verificação da modelagem	82
4.7	Dimensionamento de solução	84
5	Conclusões	88
5.1	Sugestões de Continuação de Trabalho	89
	Referências	90
	Apêndice A - Código fonte do programa implementado em Excel/VBA para análise das séries históricas de precipitações.....	93
	Apêndice B - Características das áreas de contribuição para cálculo do CN	96
	Apêndice C - Hidrogramas resultantes	100
	Anexo A - Levantamento topográfico da Base Aérea dos Afonsos - RJ	115

Capítulo 1

Introdução

Em 1943 o então Ministro Dr. Salgado Filho, primeiro Ministro da Aeronáutica, determinou o começo dos trabalhos para a criação de um museu aeronáutico, sendo esses interrompidos, porque um museu desse tipo requer um hangar com uma grande área para exposição de aeronaves e não havia local disponível no momento.

Nos primórdios da aviação brasileira, a região do Campo dos Afonsos, na cidade do Rio de Janeiro, era considerada longínqua e não povoada, por isso em 1919 foi fundada, pelo Exército Brasileiro (EB) nessa região, a Escola de Aviação Militar, a qual foi incorporada pelo Ministério da Aeronáutica logo após a sua criação em 1941. No local, passou a funcionar a Escola de Aeronáutica.

Devido a aspectos, tais como: rápida expansão da atividade aérea, desenvolvimento urbano da região, aumento da demanda das aeronaves por mais infra-estrutura, topografia do entorno bastante acidentada e condições meteorológicas adversas, a região escolhida mostrou-se limitada e já em 1949 iniciou-se estudos para definir o local ideal para uma nova Escola.

Em 1956 foi nomeada uma comissão para elaborar o projeto de transferência da academia do Campo dos Afonsos para Pirassununga no Estado de São Paulo. Essa transferência aconteceu em duas fases, a primeira com a inauguração das instalações iniciais e transferência dos alunos do último ano e a segunda com a transferência definitiva em 1971.

Com a transferência da academia, surgiu espaço para a instalação de um museu, que ganhou o nome de Museu Aeroespacial (MUSAL) e foi inaugurado em 18 de outubro de 1976, após reforma do hangar da antiga “Divisão de Instrução de Voo” da Escola de Aeronáutica.

Atualmente, em 2011, o museu possui um valioso acervo tecnológico e de aeronaves. Esse acervo se encontra em constante crescimento, uma parte desse crescimento é devido a peças que são confiadas ao museu por meio de doações.

As instalações estão compreendidas em uma área de 15.195 m², sendo composta de um prédio de dois andares e cinco hangares interligados, lado a lado, com o prédio principal.

Toda essa experiência histórica e cultural da memória da aeronáutica brasileira possui entrada gratuita.

Fica a cargo do Comando da Aeronáutica a administração e a manutenção das condições de excelência em padrões internacionais em que se encontra o museu.

A região do Campo dos Afonsos é situada na Zona Oeste da cidade do Rio de Janeiro. O local, quando da escolha para construção de um aeródromo, era uma região pouco urbanizada.

O crescimento urbano dessa região da cidade contribuiu para diminuir a capacidade de infiltração das águas pluviais, provocando um aumento do escoamento superficial e a redução do tempo desse escoamento em ocorrências chuvosas.

Segundo [1], que é um relatório técnico gerado após a enchente do dia 31 de janeiro de 2006, é frequente a ocorrência de enchentes nos hangares do MUSAL, causando prejuízos e danos ao acervo do museu e ao patrimônio da União. Esse documento bosqueja baseado em estudo preliminar e superficial, que seja formada uma comissão de estudos para diagnosticar e levantar o sistema de drenagem existente na região e bairros vizinhos, a fim de definir as ações e obras necessárias para cada órgão competente envolvido.

Em outubro de 2010 a Subsecretaria de Gestão das Bacias Hidrográficas da Prefeitura do Rio de Janeiro (Rio-Águas) identificou a região em estudo como um dos “Pontos críticos de enchentes” da cidade do Rio de Janeiro, de acordo com a referência [2].

Relatos do comandante, do engenheiro e dos funcionários do MUSAL, afirmam que o problema persiste até a atualidade, acontecendo com frequência de duas ou três vezes ao ano.

O cenário futuro de mudanças climáticas e aquecimento global podem tornar mais críticos, os máximos anuais e os regimes de chuvas e, conseqüentemente, agravar ainda mais o problema de enchentes no local.

Portanto, é de total relevância a confecção do presente trabalho de graduação, para compreender os fatores geradores do problema e sugerir formas de extinguir ou mitigar os danos causados por chuvas intensas.

Obteve-se uma filmagem da enchente do dia 31 de janeiro de 2006, além de fotos que mostram as dimensões que as enchentes atingem e alguns danos provocados. As Figuras 1.1 e 1.2 demonstram o nível que a água atingiu nessa data.



Figura 1.1: Nível de água atingido na parte de trás do hangar, em 31/01/2006. Fonte: MUSAL.



Figura 1.2: Fluxo de água na parte da frente do hangar, em 31/01/2006. Fonte: MUSAL.



Figura 1.3: Aeronave arrastada pela enxurrada até a entrada do hangar, em 31/01/2006.

Fonte: MUSAL.

O fluxo de água na parte da frente do hangar é tamanho que tem energia para arrastar aeronaves estacionadas no pátio externo, sendo jogadas ao encontro das paredes do hangar. A Figura 1.3, mostra uma aeronave com asa e empenagem danificadas e uma das portas do hangar também destruída pelo fluxo mencionado.

Na parte traseira do hangar, é localizada uma casa de força com transformadores de alta tensão a poucos centímetros do nível do terreno, que em ocasião de inundação fica parcialmente submersa, causando risco de curto circuito e falta de energia.

Dentro dos limites do Campo, a responsabilidade pela operação e conservação da área e do patrimônio nele existente é do Comando da Aeronáutica. Na bacia hidrográfica em estudo, existem áreas de responsabilidade de outros órgãos, tais como: áreas urbanas, que possuem sistema de drenagem operado pela Prefeitura do Rio de Janeiro, área da Polícia Militar do Rio de Janeiro (PMRJ), que é de responsabilidade do Governo do Estado do Rio de Janeiro, além da área do EB.

O fato da região ser administrada por diferentes instituições dificulta a solução definitiva para o problema. Por isso, na medida do possível serão propostas alternativas de soluções dentro dos limites territoriais, das informações disponíveis e de orçamento do Comando da

Aeronáutica.

1.1 Objetivos

O presente Trabalho de Graduação (TG) tem como objetivos identificar os fatores causadores de enchentes nos hangares do MUSAL, quantificá-los por meio de modelagem computacional da bacia em estudo, utilizando modelos hidrológicos para se obter dados de vazão a partir de dados de chuvas observados e de uma chuva de projeto estabelecida e, finalmente, propor alternativas de soluções dentro dos limites territoriais, das informações disponíveis e de orçamento do Comando da Aeronáutica.

Para atingir o objetivo principal, foram estabelecidos os seguintes objetivos secundários: analisar a topografia da área de contribuição de águas pluviais que atingem os hangares do MUSAL, por meio de uma ferramenta (SIG); definir a equação intensidade-duração-frequência (IDF) para as estações pluviométricas que influenciam as áreas de contribuição em estudo; equacionar o fluxo de água dado por chuvas observadas e a chuva de projeto na bacia modelada e avaliar os efeitos de medidas que desviem o fluxo da água que atingem os hangares do MUSAL para outro local menos nobre.

Capítulo 2

Revisão da literatura

2.1 Enchentes

O problema de enchentes é crítico em áreas urbanas e em aeródromos. O local em estudo, um aeródromo encravado em uma área urbana, deve ser tratado com conceitos válidos para ambas as características.

Segundo [3], “Planejar ou gerenciar sistemas de drenagem urbana envolve administrar um problema de alocação de espaço”. Como, tipicamente, a urbanização se dá de jusante para montante, impermeabilizando cada vez mais o solo, faz-se necessário o planejamento da alocação do volume de água, que infiltraria no solo e não infiltrará mais.

As medidas de controle são classificadas por [4], como Estruturais e Não Estruturais. As primeiras são intervenções, por meio de obras, visando a correção e/ou prevenção dos problemas das enchentes. As segundas, não utilizam obras, mas são constituídas pela introdução de normas, regulamentos e programas, que buscam a conscientização da população e o disciplinamento do uso e ocupação do solo.

2.2 Sistema de Informações Geográficas (SIG)

A disciplina de geoprocessamento, que trata as informações georreferenciadas, tem como ferramenta de análise o Sistema de Informações Geográficas (SIG).

O SIG pode ser definido como uma ferramenta que realiza tratamento computacional e análises complexas para dados geográficos, conforme [6]. Essa característica possui diversas aplicações, pois o SIG manipula de forma adequada informações cadastrais ou atributos georreferenciados com informações numéricas georreferenciadas, tais como, limites de lotes.

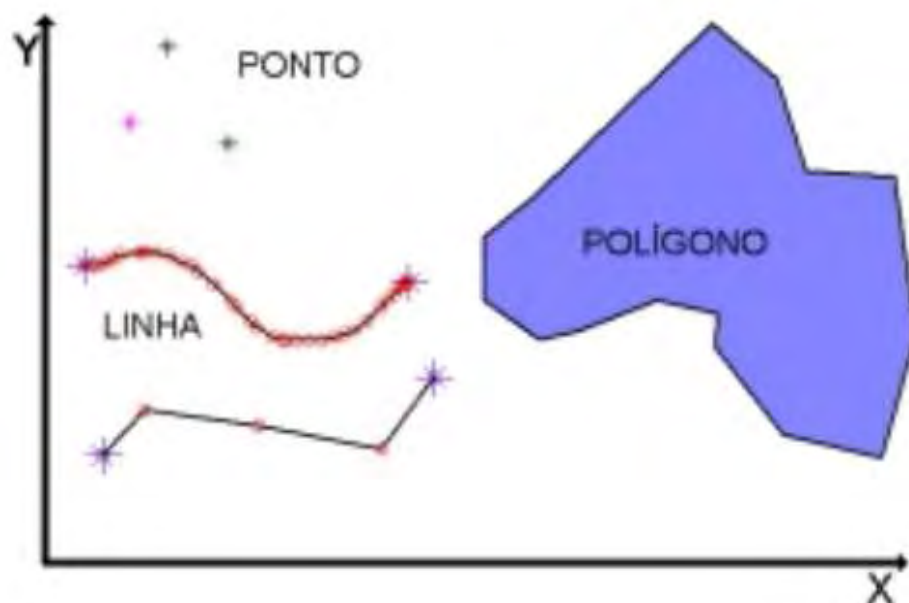


Figura 2.1: Exemplo de elementos em representação vetorial. Fonte: [5].

A representação do espaço é feita de forma vetorial ou matricial. A primeira é precisa e tenta representar o objeto o mais próximo da realidade possível, utilizando pontos, retas, áreas ou polígonos. A segunda utiliza uma malha quadriculada regular, na qual cada célula recebe o atributo em análise.

A Figura 2.1 exemplifica os elementos em representações vetoriais e a Figura 2.2 exemplificará a representação matricial.

A topografia do terreno e o relevo da região entram na análise em SIG, por meio dos Modelos Numéricos de Terreno (MNT), que são definidos em [5], como “uma representação matemática computacional da distribuição de um fenômeno espacial que ocorre dentro de uma região da superfície terrestre”, são utilizados para representar quantitativamente uma grandeza que varia no espaço.

Os Modelos Numéricos de Elevação (MNE) são um caso particular dos MNT, onde as informações armazenadas em cada célula da malha é a cota representativa da elevação da célula.

Nesse trabalho utilizou-se um gradeamento regular, ou seja, igualmente espaçado nos dois eixos. A Figura 2.2 exemplifica a estrutura de dados do MNT utilizada. É importante observar, que quanto menor for os espaçamentos mais preciso é o modelo.

A utilização de geoprocessamento utilizando ferramentas de SIG em problemas de drenagem vem ficando cada vez mais confiável e popular, a medida que inúmeros trabalhos

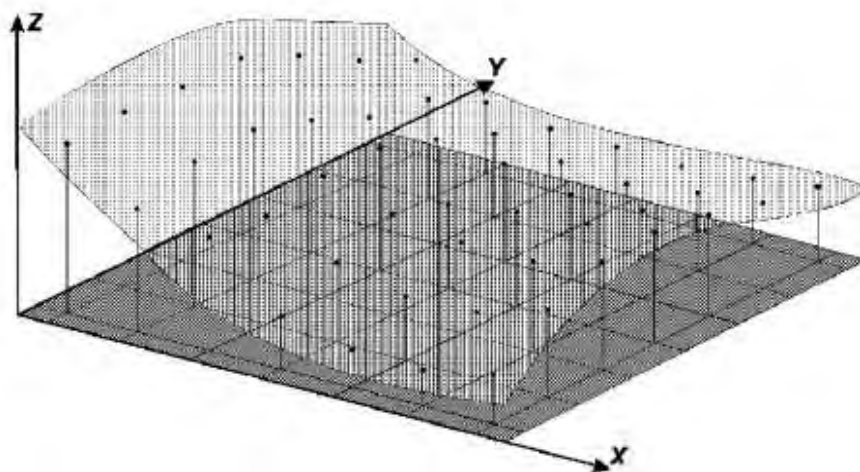


Figura 2.2: Exemplo de grade regular como estrutura do MNT e representação matricial. Fonte: [5].

e pesquisas, utilizando essa técnica, estão sendo desenvolvidos e publicados.

Observa-se que a maioria dos trabalhos analisados, tais como, [7], [8] e [9] possuem estudos de caso em áreas não urbanizadas, pois em áreas urbanizadas com sistema de drenagem adequado, a drenagem urbana modifica bastante o problema, gerando um complicador para a análise.

Entretanto, para áreas urbanas em que o sistema de drenagem existente é deficiente ou praticamente inexistente, e em situações onde não é possível levantar o sistema existente, essa técnica pode ter validade para resolução de problemas também em áreas urbanas.

2.3 Precipitações em uma bacia

As ocorrências de precipitações são registradas em estações pluviométricas ou pluviográficas. Nas primeiras, as precipitações são lidas de forma discreta ao longo do tempo, por meio de um pluviômetro, sendo a maior limitação desse equipamento a falta de capacidade de registro de chuvas de pequenas durações. Já nas estações pluviográficas, os registros são obtidos de forma contínua, por meio dos pluviógrafos, que possuem mecanismos para confecção de gráficos de precipitações. Como esse mecanismo está mais sujeito a falhas, em geral, instala-se um pluviômetro para monitoramento dos totais precipitados, que não devem diferir em mais de 10%.

Os registros das estações são obtidos ao longo dos anos de observações, constituindo

um banco de dados para o estabelecimento de análises.

Os estudos hidrológicos fazem uso desses registros para prever as frequências de ocorrência de determinado evento chuvoso.

2.3.1 Série histórica

Os valores de precipitações observados, ou amostras, são registros feitos ao longo do tempo, constituindo séries de dados.

Em estudos hidrológicos, tipicamente, segundo [10] são utilizados um dos seguintes tipos de séries:

Série total

Todas as ocorrências de precipitações são consideradas. A principal desvantagem da utilização dessa série é o grande volume de dados a serem analisados, deve-se atentar ainda para que não se considere mais de uma vez uma mesma chuva, considerando apenas a parcela mais intensa e garantindo assim a independência entre os eventos.

Série parcial

É uma simplificação da série total, considerando apenas precipitações acima de certo valor tido como intenso. As séries parciais devem ser usadas se os segundos valores dos anos afetarem o projeto, segundo Ven Te Chow [11]. Essas séries possuem a limitação de não se ajustarem às distribuições estatísticas de valores extremos, logo não podendo ser utilizadas para grandes períodos de retorno.

A análise dos dados dessa série para a estimativa do período de retorno de uma precipitação pode ser feita de forma simples, ordenando os eventos, de maneira decrescente, e obtendo-se o número de observações maiores ou igual à precipitação analisada. O período de retorno estimado é dado pela divisão do número de precipitações maiores ou iguais à analisada pelo número de anos de observações. Segundo [10] não deve ser analisado para período de retorno maior que a metade do tempo observado.

Série anual

Considera a maior precipitação observada de cada ano. Essa série, em geral, ajusta-se bem às distribuições de valores extremos, entretanto, recomenda-se utilização apenas quando se tem mais de 10 anos de observações.

Da teoria dos valores extremos, tem-se que à medida que o número de observações cresce, os máximos anuais se aproximam de uma distribuição de frequência.

A fórmula de Ven Te Chow associa o valor de precipitação ao período de retorno, sendo apresentada em 2.1:

$$P_T = \bar{P} + K_T \cdot \sigma_x \quad (2.1)$$

onde

P_T = valor da variável precipitação, em mm, associado ao período de retorno T_r , em anos;

$\bar{P}$ = precipitação média das amostras [mm];

σ_x = desvio padrão das amostras [mm] e

K_T = fator de frequência, um parâmetro cujo valor depende do número de dados de chuva e do período de retorno.

Com a distribuição de Gumbel, é possível obter um valor teórico para k, dado pela equação 2.2:

$$k = \frac{-\sqrt{6}}{\pi} \cdot \left[\gamma + \ln \ln \left(\frac{T_r}{T_r - 1} \right) \right] \quad (2.2)$$

onde

γ : Constante de Euler e

T_r : Período de retorno esperado [anos].

No entanto, para situações reais, o valor de k é algo superior ao valor teórico, uma vez que se deve considerar a influência do tamanho finito da amostra no cálculo desse parâmetro. A Tabela 2.1 apresenta o fator de frequência k de acordo com o tamanho da amostra e o período de recorrência.

2.3.2 Geração de Equações Intensidade-Duração-Frequência (IDF)

A referência [11] recomenda o procedimento abaixo para busca do ajuste da equação de chuvas.

Após a separação e leitura das ocorrências de precipitações históricas, torna-se possível estabelecer, para efeito de projeto na localidade estudada, uma relação entre as seguintes variáveis: a intensidade, duração e frequência ou período de retorno.

Para cada série de dados, deve-se verificar o ajuste de uma equação que envolva essas três variáveis.

Número de observações	Período de retorno [anos]						
	5	10	15	20	25	50	100
10	1,058	1,848	2,289	2,606	2,847	3,588	4,323
11	1,034	1,809	2,242	2,553	2,789	3,516	4,238
12	1,013	1,777	2,202	2,509	2,741	3,456	4,166
13	0,996	1,748	2,168	2,47	2,699	3,405	4,105
14	0,981	1,724	2,138	2,437	2,663	3,36	4,052
15	0,967	1,703	2,112	2,41	2,632	3,321	4,005
16	0,955	1,682	2,087	2,379	2,601	3,283	3,959
17	0,943	1,664	2,066	2,355	2,575	3,25	3,921
18	0,934	1,649	2,047	2,335	2,552	3,223	3,888
19	0,926	1,636	2,032	2,317	2,533	3,199	3,86
20	0,919	1,625	2,018	2,302	2,517	3,179	3,836
21	0,911	1,613	2,004	2,286	2,5	3,157	3,81
22	0,905	1,603	1,992	2,272	2,484	3,138	3,787
23	0,899	1,593	1,98	2,259	2,47	3,121	3,766
24	0,893	1,584	1,969	2,247	2,457	3,104	3,747
25	0,888	1,575	1,958	2,235	2,444	3,088	3,729
26	0,883	1,563	1,949	2,224	2,432	3,074	3,711
27	0,879	1,56	1,941	2,215	2,422	3,061	3,696
28	0,874	1,553	1,932	2,205	2,412	3,048	3,681
29	0,87	1,547	1,924	2,196	2,402	3,037	3,667
30	0,866	1,541	1,917	2,188	2,393	3,026	3,653
31	0,863	1,535	1,91	2,18	2,385	3,015	3,641
32	0,86	1,53	1,904	2,173	2,377	3,005	3,629
33	0,856	1,525	1,897	2,166	2,369	2,996	3,618
34	0,853	1,52	1,892	2,16	2,362	2,987	3,608
35	0,851	1,516	1,886	2,152	2,354	2,979	3,598

Tabela 2.1: Fatores de frequência k para a distribuição de Gumbel [10]. (Calculado por M.D. Reid, em 1942).

A Equação 2.3 apresenta a forma geral observada em estudos hidrológicos.

$$I = \frac{a.Tr^b}{(t+c)^d} \quad (2.3)$$

onde

a,b,c,d são constantes a serem determinadas pelo método dos mínimos quadrados aplicado aos dados históricos separados;

Tr : Período de retorno esperado [anos] e

I : Intensidade média [mm/min] da chuva de duração t [min].

Determinação da constante “c” da equação de chuva

A determinação da constante “c” é feita por tentativa e erro, não existindo regra específica para sua determinação.

Define-se a frequência mais próxima de 1/5 do número de anos de observações, por exemplo, se existirem 25 anos de observações, utiliza-se os dados referentes à frequência de 5 anos que é o período de 1/5 do tempo observado.

Para essa frequência, plota-se no gráfico bilogaritmo as intensidades pelas durações dos pontos obtidos, ajusta-se de forma provisória, uma curva passando por esses pontos. Como a variável Tr foi, temporariamente, fixada define-se a variável A conforme a equação 2.4.

$$A = a.Tr^b \quad (2.4)$$

Substituindo a Equação 2.4 em 2.3, tem-se a Equação 2.5.

$$I = \frac{A}{(t+c)^d} \quad (2.5)$$

Define-se os pontos (I_1, t_1) e (I_2, t_2) , como sendo os pontos extremo inicial e final da curva, respectivamente.

Da curva provisória estabelecida, retira-se o ponto (I_3, t_3) , que possui intensidade dada pela equação 2.6 e t_3 lido da curva.

$$I_3 = \sqrt{I_1 \cdot I_2} \quad (2.6)$$

Logo, das equações 2.3, 2.5 e 2.6, tem-se:

$$\frac{A}{(t_3+c)^d} = \sqrt{\frac{A}{(t_1+c)^d} \frac{A}{(t_1+c)^d}}$$

$\Rightarrow$

$$c = \frac{t_3^2 - t_1 \cdot t_2}{t_1 + t_2 - 2t_3} \quad (2.7)$$

O valor adotado para a constante “c” deve ser verificado. Para isso, plota-se no gráfico bilogarítimo de intensidade por duração os pontos obtidos com durações deslocadas de c para a direita, ou seja, $(I, t + c)$. Os pontos resultantes devem estar alinhados, sendo aproximadamente uma reta.

Determinação das constantes “A” e “d”

Para cada um dos períodos de retorno ajusta-se, pelo método dos mínimos quadrados, uma reta no gráfico bilogarítimo de $(I, t + c)$, onde os coeficientes lineares e angulares são, respectivamente, $\log A$ e $-d$, conforme equação 2.8, que é obtida da aplicação do logaritmo dos dois lados da equação 2.5.

$$\log I = \log A - d \cdot \log(t + c) \quad (2.8)$$

Para as observações inferiores a 50 anos, não é esperado que o parâmetro “d” varie com o período de retorno.

Determinação das constantes “a” e “b”

Para a série de valores de “A” obtidas para cada período de retorno considerado, ajusta-se, pelo método dos mínimos quadrados, uma reta no gráfico bilogarítimo de (A, Tr) , onde os coeficientes lineares e angulares são, respectivamente, $\log(a)$ e b , conforme equação 2.8, que é obtida da aplicação do logaritmo dos dois lados da equação 2.4.

$$\log A = \log a + b \cdot \log(Tr) \quad (2.9)$$

Finalmente, todas as retas ajustadas, pelo método dos mínimos quadrados, devem ter seus ajustes verificados pelos valores da variável estatística R^2 , que mede a proporção dos dados explicados (ordenadas) pelas variáveis explicativas (abscissas).

2.3.3 Precipitação média em uma bacia

Nos casos das aplicações dos estudos nas bacias de grandes dimensões, é preciso estabelecer metodologia para considerar áreas de influências dos postos de medições. Esses métodos respeitam o balanço hídrico da bacia estudada.

Segundo a referência [10], são três os métodos mais usados para a determinação da precipitação média nas bacias de grandes extensões: Aritmético; de Thiessen e das Isoietas.

O método escolhido nesse trabalho foi o método de Thiessen, que não exige estações igualmente espaçadas, sendo utilizada média ponderada para cada estação. Os pesos são dados pelas áreas de influência da estação.

Nesse método considera-se que cada ponto está sob influência da estação mais próxima, sendo desconsideradas as características do relevo da região.

2.3.4 Definição da chuva de projeto

A definição de chuva de projeto tem o objetivo de obter uma precipitação hipotética, que seja típica do local em análise. Segundo a referência [4], essa tormenta deve ser representativa de muitos eventos registrados, possuindo intensidade, volume e duração iguais a uma ocorrência de mesma frequência.

A obtenção da chuva de projeto é feita definindo um período de retorno de projeto e estabelecendo uma duração longa o suficiente para que produza contribuição de todos os pontos da bacia na seção de interesse e produza máxima vazão. Em bacias pequenas o tempo de concentração definido na Seção 2.4.2 é utilizado como duração crítica, em bacias maiores esse tempo pode ser diferente.

Utiliza-se a equação de chuvas IDF para obter as intensidades das durações discretizadas. A escala temporal nesse estudo foi discretizada em intervalos de tempo de 15 min.

Uma análise crítica desse método revela que provavelmente ocorrerá uma maximização das precipitações para cada duração, pois raramente ocorrerão em um único evento todos os máximos de precipitações para todas as durações consideradas.

Para finalizar a montagem do hietograma de projeto, as intensidades das durações discretizadas precisam ser desagregadas e realocadas ao longo da escala temporal, compondo finalmente a chuva de projeto. Segundo [4], os métodos mais utilizados para essa desagregação são: Bloco Tormenta; Método de Sifalda; Método de Chicago; Método dos Blocos Alternados; Método de Yen e Chow e Método de Huff (1967).

Nesse estudo foi escolhido o Método dos Blocos Alternados, pois nesse método todos os valores acumulados de precipitações são representados para todas as durações consideradas, ou seja, o somatório dos volumes de precipitação é consistente com o valor definido pela equação de chuvas IDF, para cada bloco acrescentado ao hietograma.

A colocação dos blocos de precipitações no hietograma é arbitrária, existindo apenas regras empíricas para a procura de picos mais elevados.

Para melhor caracterizar os eventos da bacia, é escolhido o tempo de pico conforme as observações dos registros disponíveis, sendo sugerido por [4], a colocação do pico entre $1/3$ e $1/2$ da duração para que se obtenham picos maiores de vazões.

Quanto menor o intervalo da discretização, maior será a intensidade de pico. Esse intervalo de tempo deve ser menor que o tempo de concentração considerado e deve ainda ser múltiplo ou submúltiplo da discretização utilizada na modelagem precipitação-vazão que será discutido na Seção 2.4.

2.4 Modelagem Precipitação-Vazão

A utilização de modelos indiretos de determinação de hidrogramas é comum em áreas urbanas onde os dados fluviométricos são inexistentes ou insuficientes, segundo a referência [4].

Outro fator que gera vantagens na utilização desses modelos em áreas urbanizadas consiste no possível ajuste do modelo com relação às mudanças nas características das bacias. Com esses modelos é possível considerar, por exemplo, o crescimento da urbanização, alterando a ocupação e uso do solo ao longo dos anos.

A modelagem indireta utilizada em drenagem urbana no presente estudo é classificada como Discreta, quando se analisa os dados extremos do histórico das chuvas ou utiliza-se a equação de chuva IDF para estimar as vazão de projeto, nessas situações assume-se que os hidrogramas obtidos também possuem frequências iguais às análises estatísticas realizadas para a determinação de picos. A modelagem classificada como Contínua utiliza dados históricos contínuos, em geral, não disponíveis para soluções não convencionais.

Os hidrogramas obtidos por meio dos métodos indiretos são chamados de Hidrogramas Sintéticos. Esses são função da precipitação excedente ou excesso de precipitação, que será discutida na Seção 2.4.1, e do estabelecimento de uma forma tipo, que será discutida na Seção 2.4.3.

2.4.1 Número-Curva (CN - SCS) para determinação da chuva excedente

Define-se chuva excedente como a parcela da precipitação que escoará superficialmente em uma bacia.

Segundo [12], existem pelo menos quatro conceitos para determinação da parcela de precipitação que infiltrará no terreno.

Escolheu-se, nesse trabalho de graduação, a teoria do Soil Conservation Service (SCS) para determinação da capacidade de armazenamento das bacias. As dimensões das áreas de contribuição, as análises empíricas de mais de 3 mil tipos de solos e vegetações, realizadas nas definições do Número-Curva (CN), e um estudo dos parâmetros necessários em cada conceito, fizeram com que fosse escolhida essa teoria.

A teoria empírica estabelece que o armazenamento máximo da bacia é função do CN, que indica a capacidade de armazenamento da bacia. A Equação 2.10 mostra a relação entre as variáveis, onde se observa, que quanto maior o Número-Curva, menor é o armazenamento, respeitando o valor limite de 100.

$$S_D = \frac{25.400 - 254 \text{ CN}}{\text{CN}} \quad (2.10)$$

onde

S_D : Armazenamento máximo [mm] e

CN : Número-Curva (≤ 100).

Os valores de CN são tabelados em função do tipo de solo, das condições de umidade inicial do solo e do uso e ocupação do solo. Em seguida, são apresentadas essas classificações segundo [13].

Tipo de solos e condições de ocupação

O solo é classificado em quatro grupos hidrológicos:

Grupo A - Solos arenosos com baixo teor de argila totais, inferior a 8%, não há rocha nem camadas argilosas, e nem mesmo densificadas até a profundidade de 1,5 m. O teor de húmus é muito baixo, não atingindo 1%;

Grupo B - Solos arenosos menos profundos que os do Grupo A e com maior teor de argila total, porém ainda inferior a 15%. No caso de terras roxas, este limite pode subir a 20% graças a maior porosidade. Os dois teores de húmus podem subir, respectivamente, a

1,2 e 1,5%. Não pode haver pedras e nem camadas argilosas até 1,5 m, mas é, quase sempre, presente camada mais densificada do que a camada superficial;

Grupo C - Solos barrentos com teor total de argila de 20 a 30%, mas sem camadas argilosas impermeáveis ou contendo pedras até a profundidade de 1,2 m. No caso de terras roxas, estes dois limites máximos podem ser 40% e 1,5 m. Nota-se a cerca de 60 cm de profundidade, camada mais densificada que no Grupo B, mas ainda longe das condições de impermeabilidade e

Grupo D - Solos argilosos (30-40% de argila total) e ainda com camada densificada a uns 50 cm de profundidade. Ou solos arenosos como B, mas com camada argilosa quase impermeável ou horizonte de seixos rolados.

Condições de umidade inicial do solo

As condições iniciais de umidade do solo são divididas em três:

Condição I - Solos secos - as chuvas, nos últimos dias não ultrapassam 15 mm;

Condição II - Situação média na época das cheias - as chuvas, nos últimos 5 dias, totalizam de 15 a 40 mm e

Condição III - Solo úmido (próximo da saturação): as chuvas, nos últimos dias, foram superiores a 40 mm, e as condições meteorológicas foram desfavoráveis a altas taxas de evaporação.

As Tabela 4.4 e 4.5 da referência [13] apresentam, respectivamente, os valores de CN em função da cobertura e do tipo hidrológico de solo, na condição II de umidade e a conversão das curvas CN para as diferentes condições de umidade do solo.

Em bacias não homogêneas, trabalha-se como o valor médio de CN, ponderados os valores pelas respectivas áreas.

Considerando-se que o armazenamento ao longo do tempo é proporcional ao volume precipitado, tem-se a Equação 2.11.

$$R = \frac{(P - I_A)^2}{(P - I_A) + S_D} \quad (2.11)$$

onde

R : Precipitação excedente [mm];

P : Precipitação [mm];

I_A : Abstração inicial [mm], que é a parcela de água interceptada pela vegetação, ou retida em depressões do terreno, infiltrada ou evaporada antes do início do escoamento,

segundo [4] e

S_D : Armazenamento máximo [mm].

Como estimativa para o valor da abstração inicial, utiliza-se $I_A = 0,2S_D$, obtendo-se a Equação 2.12, sendo válida para $P > 0,2S_D$.

$$R = \frac{(P - 0,2S_D)^2}{(P - 0,8S_D)} \quad (2.12)$$

Como o objetivo de determinação da chuva excedente é a aplicação em modelos que fornecem hidrogramas sintéticos, é importante que seja obtida a distribuição temporal do hietograma excedente.

Entretanto, a Equação 2.12 fornece apenas o valor da precipitação acumulada excedente, não distinguindo a distribuição das precipitações no tempo. Para que seja considerada tal distribuição faz-se necessária a utilização da Equação 2.12 várias vezes, para o total acumulado de cada intervalo de tempo.

2.4.2 Tempo de concentração

O tempo de concentração é definido como sendo o tempo, a partir do qual toda a área da bacia contribui para o escoamento em uma seção de análise.

A definição do tempo de concentração em bacias urbanas deve ser feita de forma cuidadosa, pois segundo [4] a maioria dos métodos existentes para determinação do tempo de concentração foram gerados a partir de observações e medições experimentais em bacias rurais e as diferenças entre os resultados obtidos por cada um dos métodos pode provocar variações significativas das vazões.

O cuidado mencionado pelo autor consiste na separação de trechos com velocidades de escoamento distintas, tais como, trechos de escoamento em superfície, trechos de escoamento em canais rasos e trechos de escoamento em canais ou galerias definidos.

Para as áreas de contribuição divididas em sub-bacias consideradas homogêneas e contendo apenas escoamento superficial, que é o caso de áreas urbanas sem sistema de drenagem efetivo, utilizou-se a Fórmula de Kirpich-1940.

A Equação 2.13 apresenta a fórmula utilizada, que foi desenvolvida com dados de bacias com declividades entre 3% e 10% e áreas inferiores a 0,5 km², o que indica a representação do escoamento em superfícies. Segundo [13], a fórmula parece subestimar o valor do tempo de concentração para comprimentos de talvegues superiores a 10 km. Essa situação não é encontrada no presente estudo.

$$t_c = 3,989.L^{0,77}.S^{-0,385} \quad (2.13)$$

onde

t_c : tempo de concentração [min];

L : comprimento do talvegue [km] e

S : Declividade do talvegue [m/m].

O tempo de concentração dos rios e canais da área urbana, foram utilizados de forma indireta, por meio da modelagem de propagação de ondas de cheias em rios, canais e em reservatórios. Essa metodologia será apresentada na Seção 2.5.1.

2.4.3 Hidrogramas Unitários Sintéticos

Os hidrogramas unitários sintéticos são função da chuva excedente, sendo utilizados para transformar esses hietogramas em hidrogramas de projeto.

Assumindo-se válida a hipótese que uma bacia ideal se comporta como um reservatório linear, o hidrograma resultante possuirá tempo de pico e duração constantes, sendo o deflúvio proporcional à altura da precipitação excedente de intensidade constante e determinada duração.

Logo, se for determinado um hidrograma para uma chuva efetiva de 1 cm, que é chamado de hidrograma unitário, pode ser determinado por proporção o hidrograma de outras ocorrências de mesma duração e intensidade constante.

A forma do hidrograma unitário é função das características de escoamento nas bacias.

A duração da chuva que define esse hidrograma é chamada de duração de chuva unitária.

Método do SCS

As dimensões das áreas de contribuição analisadas nesse estudo, a falta de elementos de drenagem urbana efetivos e a consolidação do método do SCS para confecção de hidrogramas unitários fizeram com que fosse escolhido esse método no presente estudo.

Segundo [4], nesse método a forma estabelecida representa a média de muitas observações em bacias de diferentes características.

O hidrograma unitário definido por esse método tem formato triangular como mostra a Figura 2.3. Os parâmetros necessários para sua definição são definidos pelas Equações 2.14,

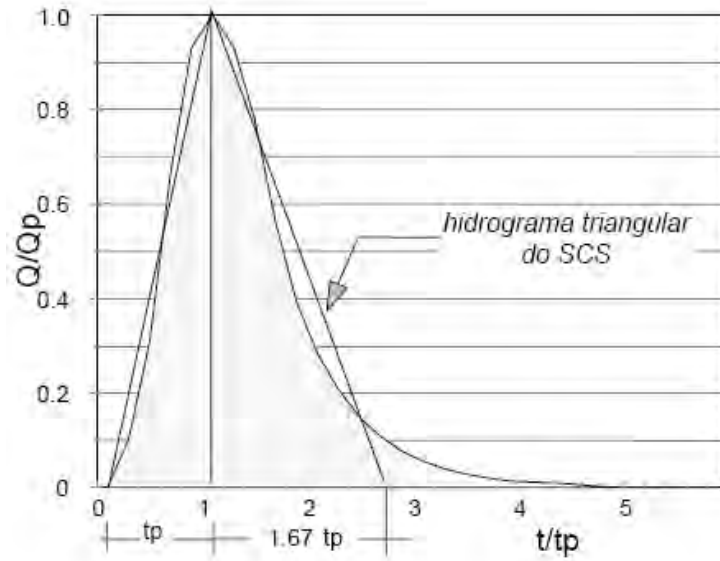


Figura 2.3: Hidrograma unitário triangular estabelecido pelo Método do SCS. Fonte: [13].

2.16, 2.15 e 2.17, conforme [14].

$$t_R = 0,6 t_c \quad (2.14)$$

$$t_p = \left(\frac{D}{2} + 0,6 t_c \right) \quad (2.15)$$

$$q_p = \frac{2,08 A}{t_p} \quad (2.16)$$

$$t_b = 2,67 t_p, \quad (2.17)$$

onde

t_c : tempo de concentração [h];

t_R : tempo de retardo [h], que é o tempo compreendido entre o centro de massa do hidrograma excedente até o pico do hidrograma;

q_p : vazão do pico do hidrograma unitário [m³/s];

A : área da bacia em [km²];

D : duração da chuva unitária [h];

t_b : tempo de base do hidrograma unitário [h] e

t_p : tempo de pico do hidrograma unitário [h].

Como na definição do hidrograma unitário do SCS a forma é fixada, a aplicação desse método é restrita a bacias entre 3 e 250 km². Para bacias maiores, ocorrem maiores decaimentos do pico de vazão, sendo a forma do gráfico da Figura 2.3 modificada.

2.4.4 Hidrograma de projeto

A obtenção do hidrograma de projeto da forma sintética passa pela aceitação de duas hipóteses.

A primeira é conhecida como princípio da proporcionalidade ou constância do tempo de base, onde o tempo de base do hidrograma não varia com a altura da precipitação, sendo a vazão proporcional à altura da chuva excedente de duração fixada.

A segunda hipótese adota o princípio da superposição, onde se entende viável a combinação por somatório dos diferentes hidrogramas, gerados ao longo do tempo, e com vazões de pico distintas.

Combinando-se essas duas hipóteses torna-se possível obter o hidrograma resultante para qualquer chuva excedente, dividindo a precipitação em intervalos de mesma duração e somando as parcelas proporcionais equivalentes, por meio, dos hidrogramas unitários. Esse processo de combinação linear dos hidrogramas defasados no tempo é chamado de convolução [13].

Pela forma de obtenção desse hidrograma, definida acima, o tempo de base resultante será dado pelo tempo de base do hidrograma unitário somado com o tempo de duração da chuva excedente e diminuindo da duração da chuva unitária.

2.5 Dimensionamento em rios e canais

Nos trechos urbanos e com seção razoavelmente uniforme, é considerado, por simplicidade matemática, escoamento Permanente Uniforme para o dimensionamento e verificação da vazão dos canais, conforme [4].

O regime Permanente Uniforme é caracterizado pela linha de energia, definida pela Equação 2.18, ser paralela à linha d'água, em um trecho com geometria, declividade, profundidade, área molhada e velocidade constantes.

$$E = \frac{V^2}{2g} + y \quad (2.18)$$

onde:

E : energia específica [m];

V : velocidade média do escoamento [m/s];

g : aceleração da gravidade [m/s²] e

y : profundidade média [m].

Em condutos livres, o escoamento uniforme é representado pela Equação 2.19 de Chézy:

$$V = C \sqrt{R_H \cdot I_f} \quad (2.19)$$

onde:

V : velocidade média do escoamento [m/s];

C : coeficiente de Chézy, fator de resistência [m^{1/2}/s];

R_H : raio hidráulico [m] e

I_f : declividade do fundo do canal [m/m].

Para escoamentos turbulentos em superfícies rugosas, onde o coeficiente de resistência ao fluxo independe do número de Reynolds, aplica-se a Equação 2.20 de Manning à Equação 2.19, obtendo a Equação 2.21.

$$C = \frac{1}{n} (R_H)^{\frac{1}{6}} \quad (2.20)$$

$$Q = \frac{1}{n} A_H (R_H)^{\frac{2}{3}} \sqrt{I_f} \quad (2.21)$$

onde:

Q : vazão no regime uniforme [m³/s];

A_H : seção hidráulica [m²];

R_H : raio hidráulico [m];

I_f : declividade do fundo do canal [m/m] e

n : coeficiente de resistência de Manning [s/m^{1/3}].

2.5.1 Amortecimento de enchentes em canais

As seções dos trechos d'água funcionam também como reservatórios, para o problema de alocação do volume de água que esco superficialmente. As calhas dos canais armazenam volume não desprezível de líquido, amortecendo os picos de vazão dos hidrogramas afluentes e retardando os picos dos hidrogramas efluentes.

Para quantificar esse efeito, [4] apresenta três métodos: Muskingum; Muskingum - Cunge e Att - Kin.

Nesse trabalho adotou-se o método de Muskingum - Cunge, pois esse método expressa as variáveis utilizadas com significado físico e em termos das características do canal.

Esse método permite calcular o hidrograma efluente, tendo como dados de entrada o hidrograma afluente e as características da seção.

As seções consideradas devem se uniformes, sendo possível dividir os trechos na quantidade necessária para atender essa condição. Para divisão dos canais, o hidrograma de saída do trecho mais a montante serve como entrada para o mais a jusante.

A principal limitação é a não consideração dos efeitos de jusante no escoamento do fluxo, não podendo ser utilizado para cursos d'água que deságuam em lagoas ou no mar.

Maiores detalhes sobre esse método podem ser encontrados nas referências [4] e [13].

Capítulo 3

Formulação teórica do problema

Nesse capítulo serão apresentadas as descrições específicas do problema considerado no estudo de caso, as hipóteses formuladas na modelagem do problema real e o método de análise utilizado nesse trabalho.

3.1 Descrição do problema

A área em estudo está contida na macrobacia da Baía de Guanabara do Rio de Janeiro, na sub-bacia dos rios Acari (Marangá)/Pavuna/Meriti. Essa sub-bacia tem o Arroio dos Afonsos como um dos cursos d'água. Esse arroio é canalizado, por uma seção construída em concreto, no trecho urbano a montante do aeródromo e volta a ser de seção natural perto do início do Campo dos Afonsos.

A Figura 3.1 mostra a região em análise com indicações do hangar do MUSAL, do ponto em que o Arroio dos Afonsos volta a ser de seção natural e de uma tubulação subterrânea que atravessa a pista e é responsável pela drenagem de esgoto e águas pluviais captadas pelo sistema apresentado na Figura 3.2, a qual apresenta a rede de esgoto e águas pluviais.

O hangar em estudo está compreendido entre as coordenadas geográficas a seguir, com relação ao *Datum* WGS-84:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Longitude : } 43^{\circ}23'29'' \text{ O} \\ \text{Latitude : } 22^{\circ}53'01'' \text{ S} \end{array} \right. \text{ e } \left\{ \begin{array}{l} \text{Longitude : } 43^{\circ}23'15'' \text{ O} \\ \text{Latitude : } 22^{\circ}52'52'' \text{ S} \end{array} \right. .$$

A extensão do Arroio é de 7,8 km e possui o Morro Barata como vertente e o Rio Sapopemba como Foz.

O Arroio dos Afonsos limita a área patrimonial do Comando da Aeronáutica em um dos seus lados e corre paralelo à pista de pousos e decolagens. A área em estudo está situada



Figura 3.1: Imagem de satélite do local em estudo. Norte Geográfico apontado para cima e escala representada na imagem. Fonte: Google Earth (modificada).



Figura 3.2: Rede de esgoto e águas pluviais. Norte Geográfico apontado para cima. Escala: 1:10.000. Fonte: Plano Diretor UNIFA (2005).



Figura 3.3: Nível máximo identificado atingido na parte de trás do hangar, em 31/01/2006.

Fonte: MUSAL.

à direita do arroio e é delimitada também pela Avenida Marechal Fontinelli e pelas áreas onde funciona a Academia de Polícia Militar D. João VI.

A região em estudo é bastante acidentada, imprimindo ao escoamento superficial altas velocidades de escoamento, e a área de contribuição transcende os limites territoriais do Comando da Aeronáutica.

Na ocasião da enchente mais severa que se tem registro, no dia 31 de janeiro de 2006, a área alagada da parte de trás do hangar atingiu a cota máxima indicada na Figura 3.3.

A árvore mostrada foi identificada em visita a campo e observou-se que o nível d'água atingiu 1,5 m nesse ponto.

Na parte da frente do hangar, a filmagem mostra que um verdadeiro rio passa no pátio externo.

3.2 Hipóteses formuladas

Como a região em estudo é cercada por uma cadeia montanhosa, não é esperado que seja recebido pela bacia de contribuição grande fluxo de água proveniente de outras bacias. Isso geraria uma dificuldade construtiva que é maciçamente evitada em projetos de drenagem.

Devido a dificuldades de obtenção da rede de drenagem existente, somado às características mencionadas acima, assumiu-se como hipótese a não existência de despejo de efluente proveniente de outras bacias para a bacia em estudo.

A evaporação e evapotranspiração da área de contribuição foi considerada, de forma indireta, com a aplicação do método Soil Conservation Service (SCS), para separação do escoamento superficial. Esse método calcula e utiliza a precipitação efetiva, que retira, indiretamente, a parcela responsável pela evaporação, infiltração e pela retenção nas depressões do terreno, conforme referência [15].

Segundo relatos dos funcionários do local, obtidos por meio de entrevistas durante as visitas técnicas, a enchente do dia 31 de janeiro de 2006 foi uma das maiores já ocorridas, logo adotou-se essa ocorrência, que é a mais rica de informações com fotos e filmagem, como o caso a ser analisado e simulado, a fim de, testar e validar os modelos utilizados nesse trabalho.

O tipo de solo da região é uma das variáveis de entrada do modelo de precipitação-vazão utilizado. Como se tornou inviável o levantamento preciso dessa variável, utilizou-se informações disponibilizadas pela Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro, que classifica o solo da região com do Grupo - B até a cota de 75 metros e do Grupo - C nas áreas acima desse valor. Levantamentos obtidos na região do aeródromo (planície, cota abaixo de 70 metros) comprovaram que o solo da região é arenoso e classificado como do Grupo - B. Fora da área patrimonial da aeronáutica, não foram obtidos levantamentos para validação das informações utilizadas.

A representação de rios dentro do modelo de precipitação-vazão a ser utilizado não considera as curvas dos rios, pois a análise realizada é bidimensional. Para levar em consideração as curvaturas dos cursos d'água faz-se necessária uma modelagem hidrodinâmica com três dimensões (3D), o que seria mais complexo e exigiria uma série de dados, condições iniciais e de contorno. Dados estes que não temos, ficando o levantamento preciso dos dados e a modelagem (3D) do problema como sugestão para trabalhos futuros.

3.3 Metodologia

O método utilizado para análise do problema das enchentes nos hangares, em estudo, foi definido aplicando os mais modernos conhecimentos existentes.

Os procedimentos utilizados são temas de muitos estudos a nível de pós-graduação, portanto são atuais e em constante desenvolvimento.

As bases teóricas desses estudos foram apresentadas no item 2.

Na fase de identificação dos fatores causadores do problema foram realizadas visitas a campo para verificar a existência e conformidade do sistema de drenagem do local com as plantas e planos diretores obtidos. Dessa forma, foi possível balizar as hipóteses geradas para algumas áreas sem informações ou com informações conflitantes a respeito do sistema de drenagem da região.

As visitas foram realizadas em toda a área de contribuição, percorrendo e efetuando medições em áreas urbanas, áreas da PMRJ dentro da Academia de Polícia Militar D. João VI, áreas do Exército Brasileiro (EB) e dentro do Campo dos Afonsos, onde se localiza o MUSAL. Os locais de mata fechada e de difícil acesso, que possuíam cursos d'água, também foram visitados, sendo verificadas as condições da passagem do fluxo de água por esses caminhos de drenagem.

Nessas visitas foram ainda identificadas as condições de conservação e funcionamento de cada trecho da rede de drenagem existente e foram definidas as malhas e efetuados os levantamentos topográficos mais precisos necessários. Portanto, as visitas foram importantes para a fase de identificação dos fatores geradores das enchentes, e também para levantar dados que foram utilizados na modelagem computacional do problema.

Para a modelagem do problema real, da forma mais precisa possível, as bacias de contribuições da área em estudo foram definidas e analisadas utilizando o programa ArcMAPTM9.2 de plataforma SIG alimentado por levantamentos altimétricos realizados por satélites.

As previsões das vazões foram realizadas utilizando métodos indiretos de determinação de vazões por meio do programa IPHS1, que é um modelo estabelecido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Para alimentar esse método foi identificado o tipo e a ocupação do solo além de, estabelecida a chuva de projeto para a região.

A Figura 3.4 apresenta a sequência de tarefas realizadas, a fim de, atingir os objetivos desse trabalho.

Dentre as alternativas analisadas, será sugerida como proposta mais adequada a que apresentar os menores impactos nos orçamentos e nas operações aéreas da Guarnição dos Afonsos.

Como se trata de um trabalho acadêmico, o escopo se limitará aos hangares do MUSAL, eventualmente, as soluções propostas gerarão problemas de enchentes em outros locais menos nobres ou precisarão de ações complementares realizados por outros órgãos, que

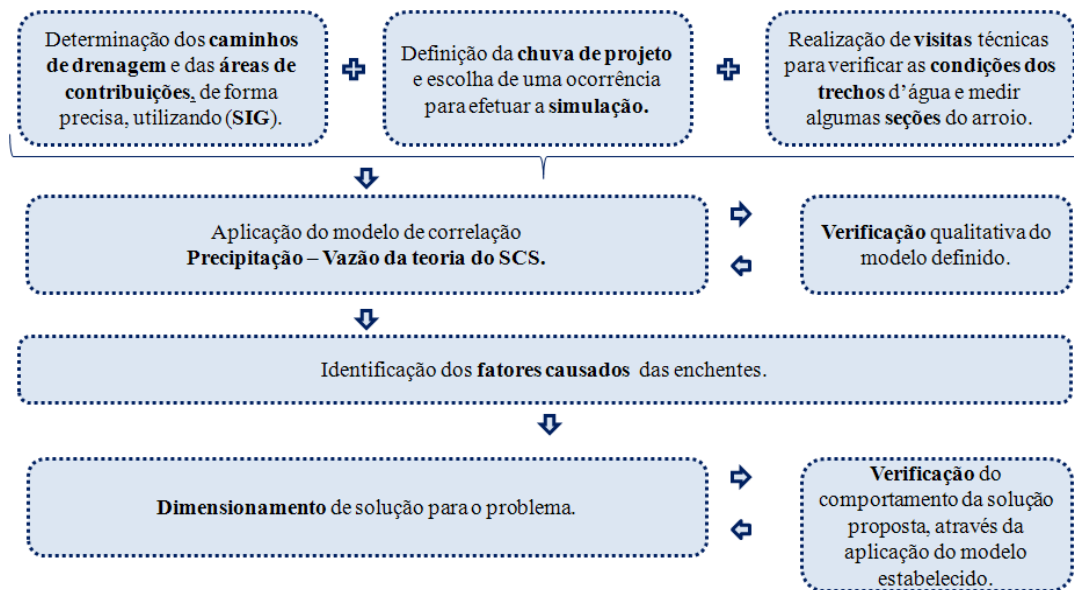


Figura 3.4: Diagrama do método definido.

não o Comando da Aeronáutica.

Capítulo 4

Resultados

Nesse Capítulo será realizado um paralelo entre as equações e teorias estabelecidas no Capítulo 2 e os métodos, hipóteses e formulações apresentadas no Capítulo 3.

4.1 Sistema de informações geográficas (SIG)

As análises da altimetria da região, de forma macro, foram realizadas utilizando como base de dados o levantamento “*Shuttle Radar Topography Mission*” (SRT M) realizado por meio de satélites e disponibilizado pela NASA, o qual utiliza o *datum* “*World Geodetic System*” (WGS-84) e o sistema de coordenadas geográficas. Esse arquivo possui formato “tiff” e foi obtido da referência [16], com resolução de 3”, ou cerca de 90 metros de aresta.

A mudança do sistema de coordenadas geográficas para algum projeção cartesiana é um pré-requisito do modelo precipitação-vazão utilizado, para que sejam efetuadas as análises hidráulicas, entretanto, o *datum* utilizado não foi modificado.

O Modelo Numérico de Elevação (MNE) gerado a partir da resolução de 90 m, foi transformado em projeção Universal Transverse Mercator (UTM). A região em estudo está localizada na zona 23S.

4.1.1 Operações realizadas

As operações computacionais e matemáticas dos dados de altimetria foram realizadas pela plataforma ArcMAPTM9.2 da seguinte forma:

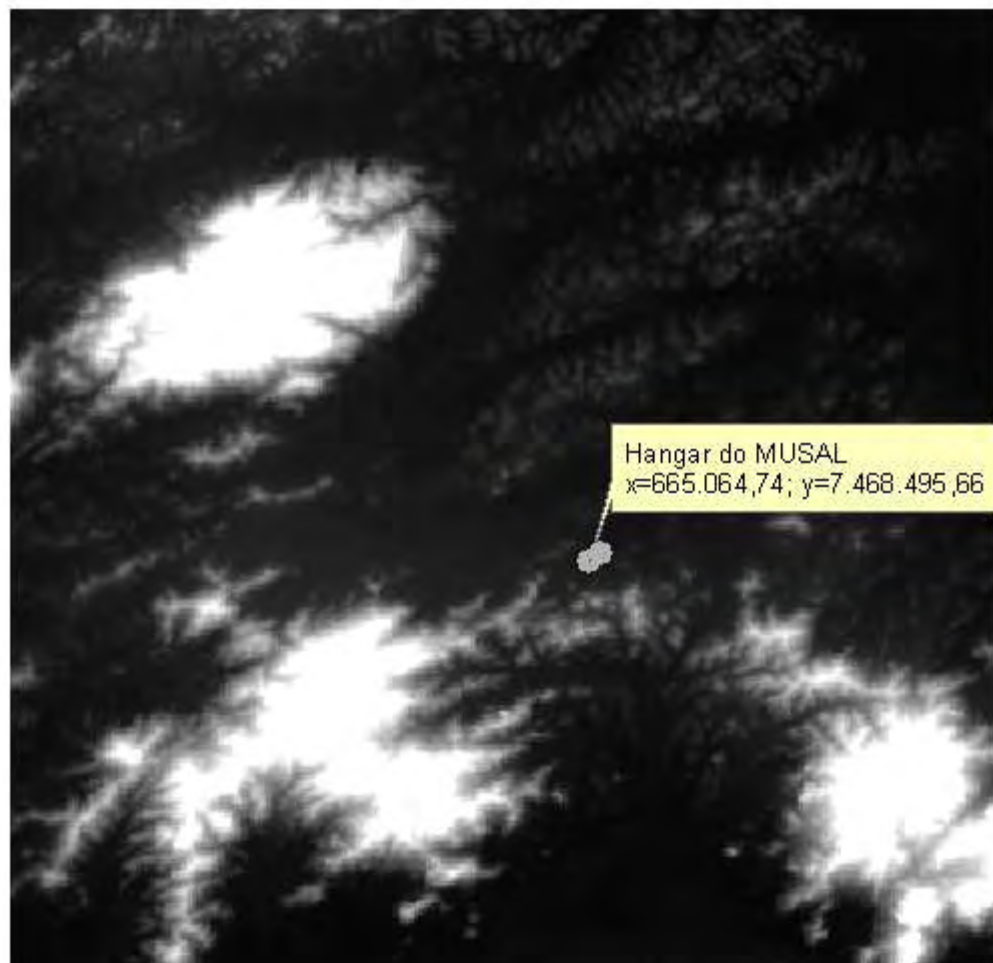


Figura 4.1: Mapa SRTM recortado para a localidade do Campo dos Afonsos. Datum: WGS-84; Projeção: UTM Zona 23; Escala: 1:250.000; Norte Geográfico apontado para cima e Escala de cinza: -15 m (preto) :1012 m (branco).

Corte da área de interesse

Os arquivos obtidos cobrem uma área de 1° de latitude e 1,5° de longitude. Como era esperado que a região em estudo se limitasse à cadeia de montanhas existente no entorno do aeródromo, realizou-se um corte no arquivo base a fim de diminuir o tamanho dos arquivos gerados e aumentando a velocidade de processamento das análises realizadas.

A Figura 4.1 apresenta a imagem SRTM recortada para a região em estudo.

A escala de cinza representa a altitude do ponto de grade, sendo mais claros os que possuem maior valor de cota. Logo, fica visível que o local do hangar é cercado de morros.



Figura 4.2: Preenchimento de um sumidouro artificial do (MNE). Fonte: [12].

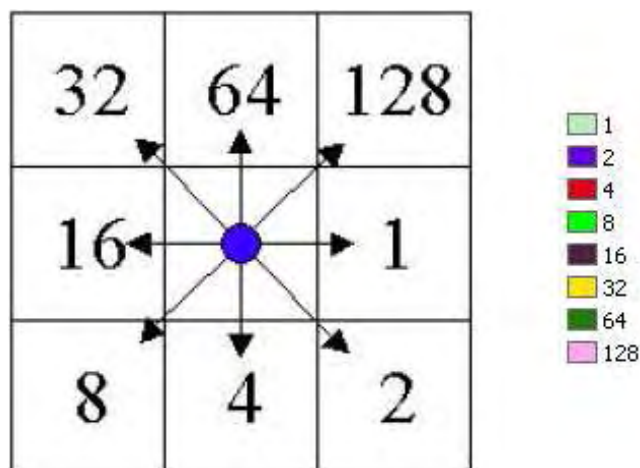


Figura 4.3: Definição da correlação numérica com as direções e escala de cor adotada. Norte Geográfico apontado para cima. Fonte: [12] (modificada com escala de cores utilizada na Figura 4.4).

Preenchimento de depressões (*Sinks*)

Foram removidas as depressões do terreno, causadas por pontos de grade sem informações, e as micro-bacias interiores do MNE, para que possa ser determinado o caminho completo de drenagem natural. Essa função altera as elevações por meio de interpolação das células da vizinhança. A Figura 4.2 ilustra a operação.

Mapa das direções de fluxo

Esse algoritmo indica para cada pixel a direção que o escoamento seguirá, obedecendo a premissa que escoará na direção de maior gradiente para baixo. Os resultados são discretos e assumem no máximo 8 valores de acordo com a direção da célula vizinha a ser seguida, os valores são potências de 2, $\{2, 4, 8, 16, 32, 64, 128\}$. A Figura 4.3 correlaciona os valores das potências de 2 com as direções e apresenta a escala de cores utilizada na Figura 4.4.

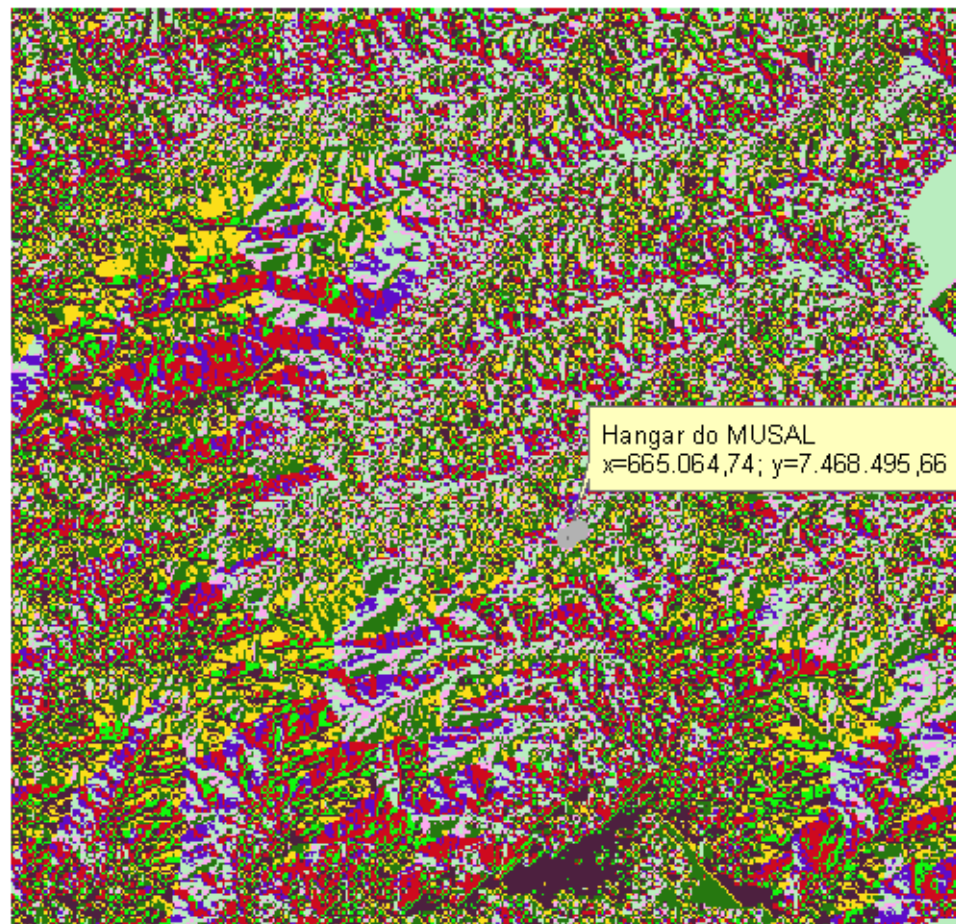


Figura 4.4: Mapa de direções de fluxo. Datum: WGS-84; Projeção: UTM Zona 23; Escala: 1:250.000 e Norte Geográfico apontado para cima.

A figura 4.4 apresenta o mapa de direções de fluxo obtido.

Mapa do fluxo acumulado

Essa operação resulta em um mapa com o número de células a montante que contribuem para o escoamento de cada célula.

A Figura 4.5 apresenta o mapa resultante, onde a escala de cinza adotada representa o número de células contribuintes para o fluxo, sendo as mais claras as que possuem maior número de células contribuintes.

Definição da rede de fluxo

Foram identificadas as células que possuíam um fluxo de drenagem dado por uma área de mais de 1,5 km². Para as células que atendem a condição, o valor assumido no mapa

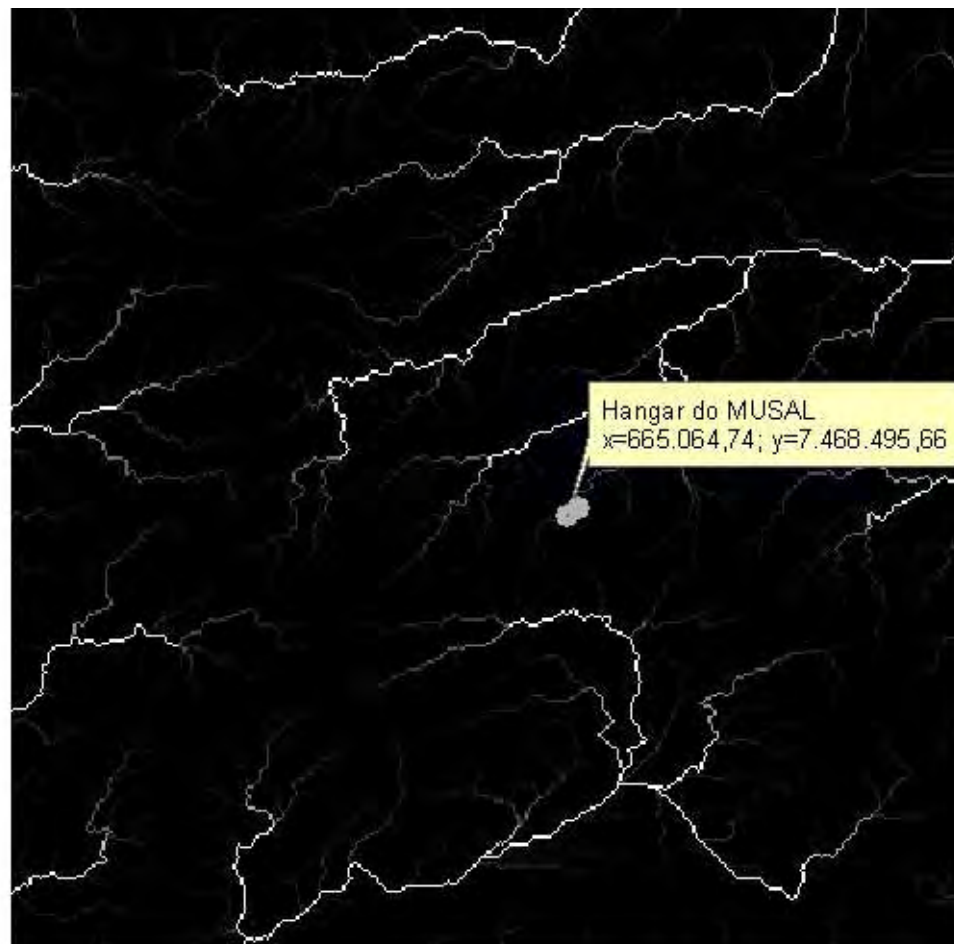


Figura 4.5: Mapa da quantidade acumulada de fluxo. Datum: WGS-84; Projeção: UTM Zona 23; Escala: 1:250.000; Norte Geográfico apontado para cima e Escala de cinza: 0 (preto) : 31668 (branco).

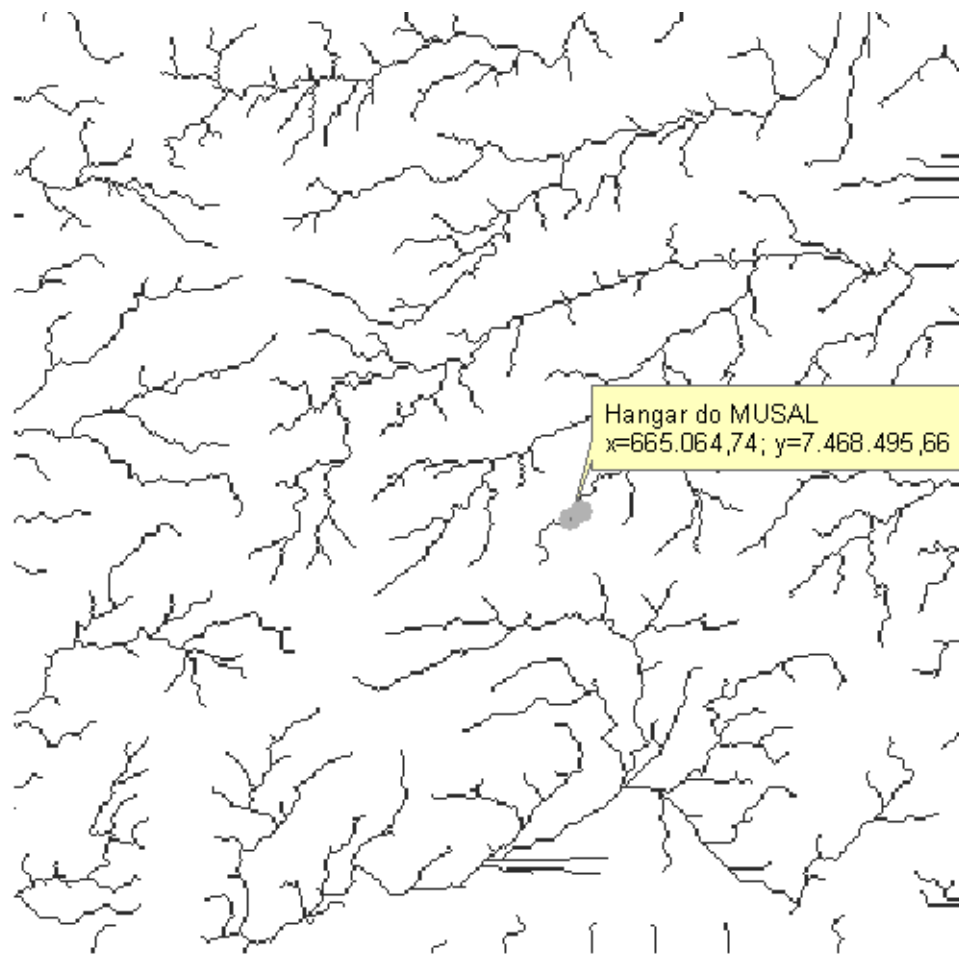


Figura 4.6: Rede de fluxo, com área de contribuição superior a 1,5 Km². Datum: WGS-84; Projeção: UTM Zona 23; Escala: 1:250.000; Norte Geográfico apontado para cima e Escala binária de cores: verdadeiro (preto) : falso (branco).

resultante é 1 (cor preta) e as demais ficam sem informação (cor branca).

A Figura 4.6 apresenta o resultado da operação.

Conexão e segmentação do fluxo

Foram conectados os cruzamentos dos fluxos utilizando a rede de fluxo obtida no item anterior.

A segmentação é dada atribuindo um valor para cada ramificação da rede de escoamento, ou seja, para cada sub-bacia os valores das células da rede recebem um identificador de sua sub-bacia.

O mapa resultante da Figura 4.7 torna possível a análise das sub-bacias em separado, que será realizada em itens posteriores. A escala de cinza utilizada mostra que os

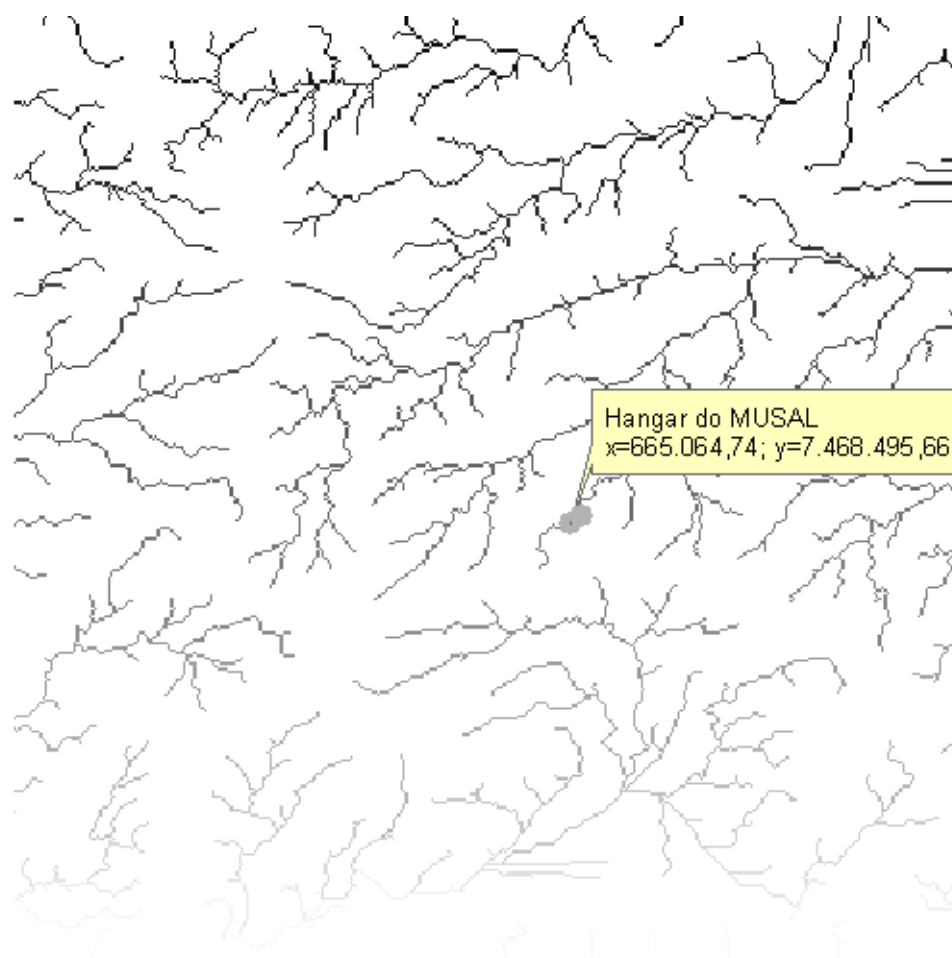


Figura 4.7: Conexão e segmentação da rede de fluxo. Datum: WGS-84; Projeção: UTM Zona 23; Escala: 1:250.000; Norte Geográfico apontado para cima e Escala de cinza: 1 (preto) : 567 (branco).

identificadores foram definidos gradualmente da parte inferior para a superior.

Identificação e vetorização das áreas de captações

Cada área de captação foi identificada e vetorizada. A Figura 4.8 mostra as áreas de captações identificadas, pela escala de cinza, com seus limites vetorizados, em vermelho.

Caminhos naturais de drenagem

Converteram-se as redes, do formato matricial para o formato vetorial. Essa conversão guarda informações das características das bacias em que se encontram.

A Figura 4.9 apresenta os caminhos naturais de drenagem pela superfície do terreno e os limites das áreas de captações.

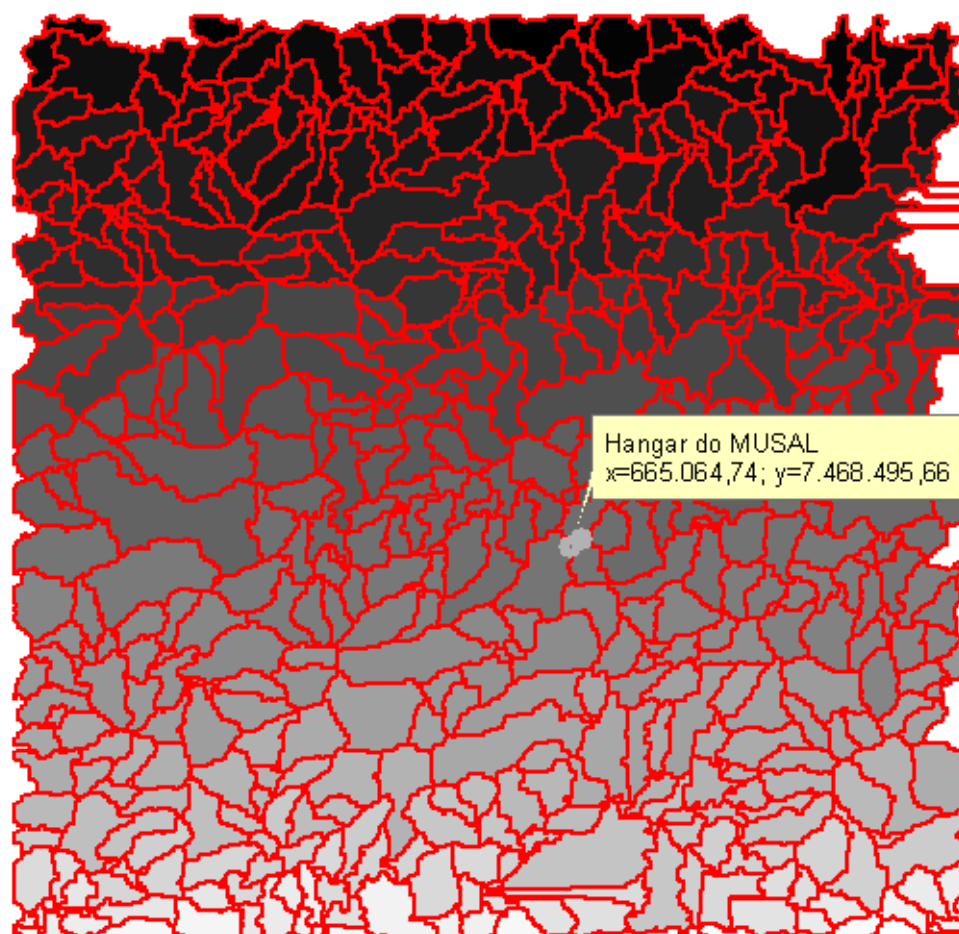


Figura 4.8: Identificação e vetorização das áreas de captações. Datum: WGS-84; Projeção: UTM Zona 23; Escala: 1:250.000; Norte Geográfico apontado para cima e Escala de cinza: 1 (preto) : 567 (branco).

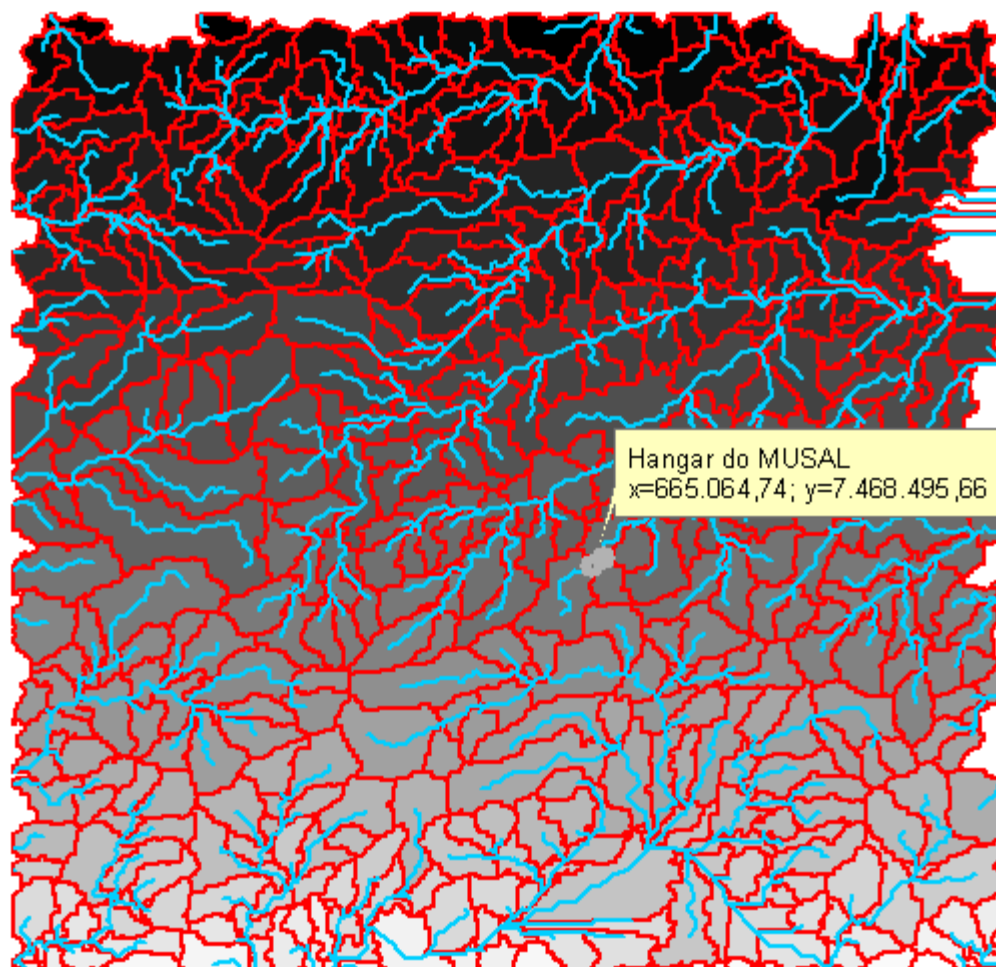


Figura 4.9: Caminhos naturais de drenagem nas áreas de captações. Datum: WGS-84; Projeção: UTM Zona 23; Escala: 1:250.000; Norte Geográfico apontado para cima e Escala de cinza: 1 (preto) : 567 (branco).

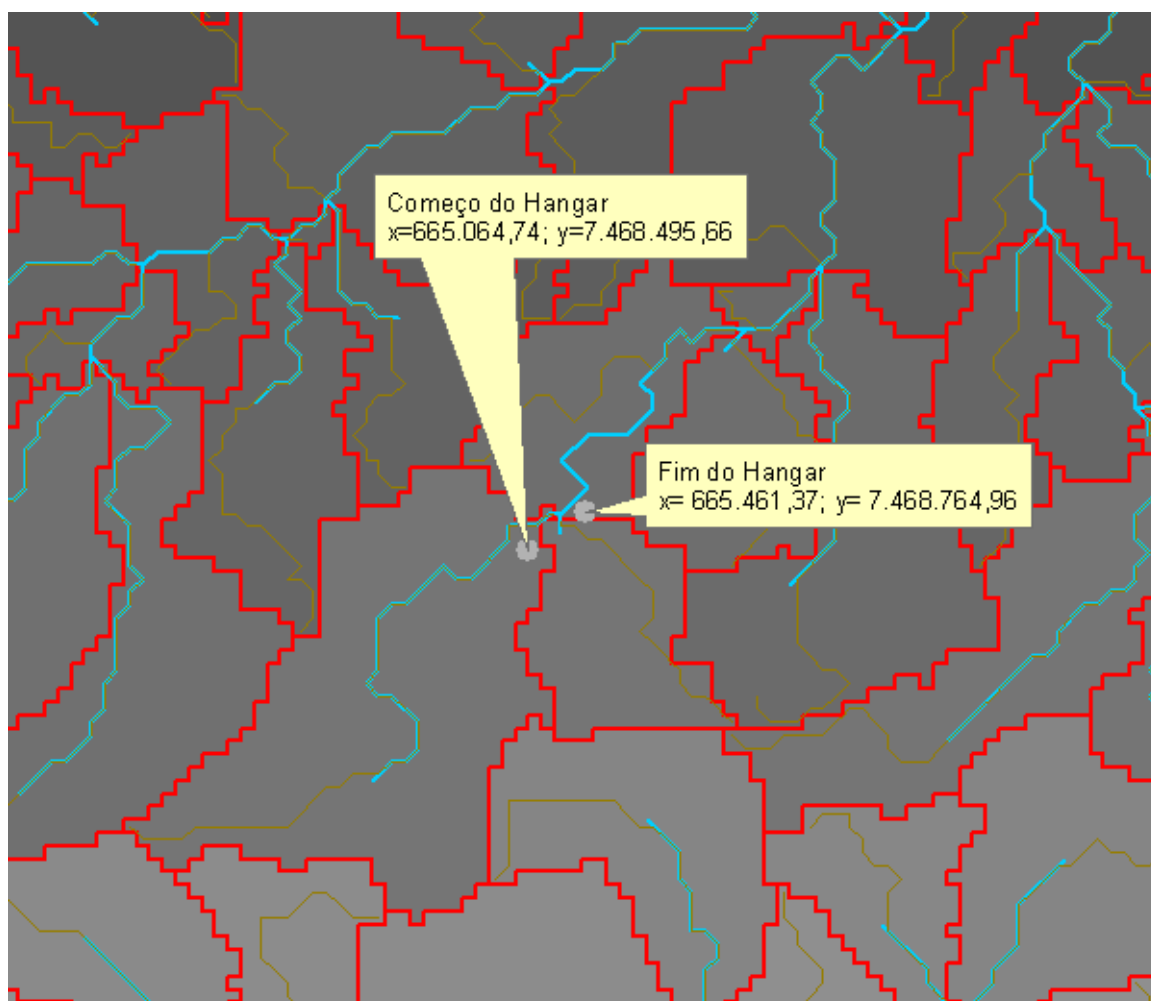


Figura 4.10: Caminho mais longo de drenagem para o fluxo da área de captação (linha marrom). Datum: WGS-84;Projeção: UTM Zona 23; Escala: 1:50.000 e Norte Geográfico apontado para cima.

Definição do caminho mais longo de drenagem

Definiu-se o maior caminho contínuo que o escoamento percorre em cada sub-bacia.

A Figura 4.10 apresenta em cor marrom o caminho mais longo para o fluxo da área de captação.

Definição dos pontos de interesse e das áreas de contribuição

Os pontos de interesse, para a análise das áreas de contribuição, foram escolhidos em uma célula que pertence ao caminho de escoamento em análise, o mais próximo possível das coordenadas de referência.

Foram gerados então, polígonos das áreas que contribuem hidrologicamente para esses pontos.

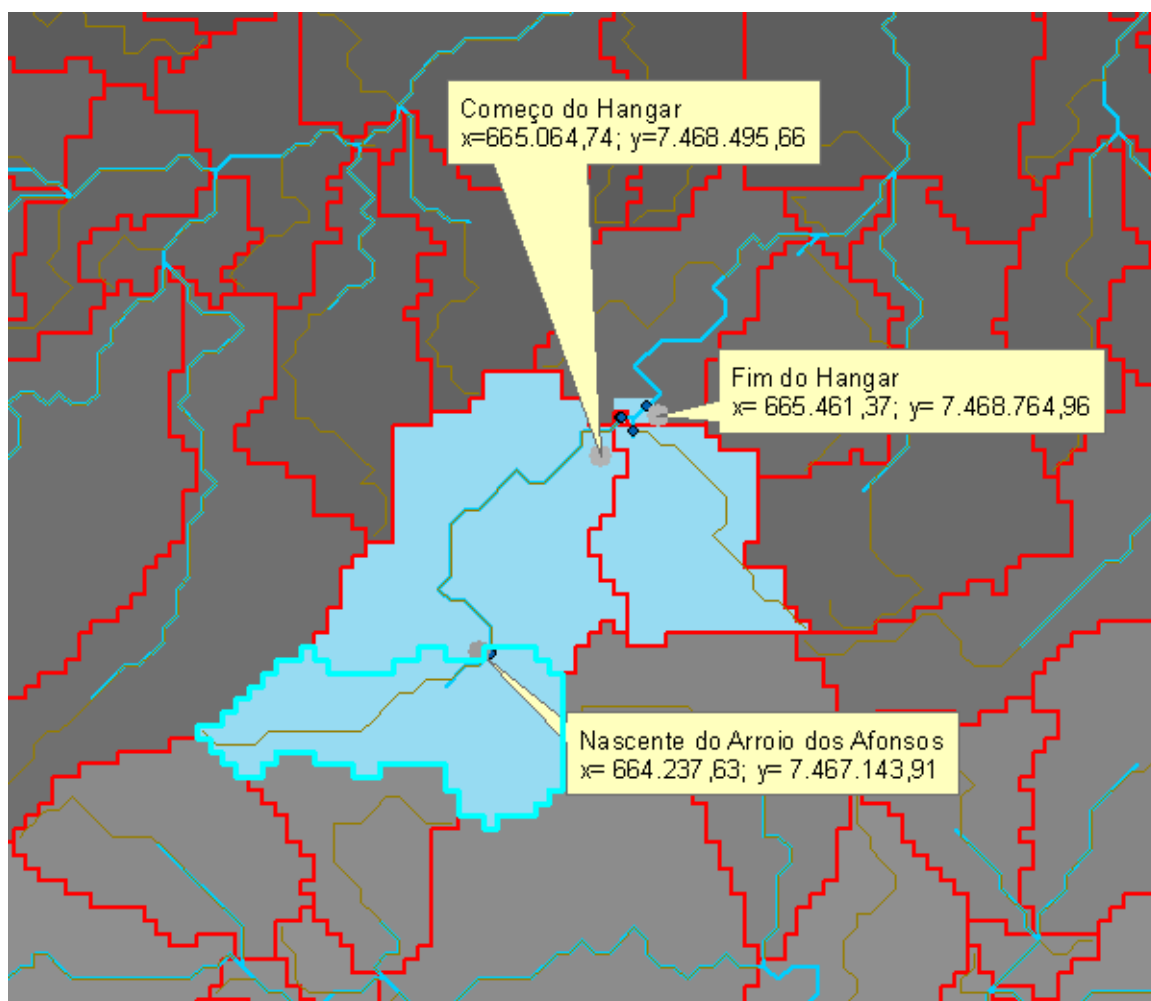


Figura 4.11: Pontos de interesse e, respectivas, áreas de contribuições. Datum: WGS-84; Projecção: UTM Zona 23; Escala: 1:50.000 e Norte Geográfico apontado para cima.

A Figura 4.11 apresenta duas áreas de contribuição para linhas de fluxo, sendo a maior delas subdividida pela área que contribui para a nascente do Arroio dos Afonsos. Os pontos em azul são as células da rede de fluxo consideradas.

Traçado de curvas de nível (8 m)

O traçado das curvas de nível serviu para verificação dos resultados obtidos pelas análises em SIG. Devido à precisão do MNE, o desnível adotado para o traçado das curvas foi de 8 m, pois valores menores que esse não aumentaria a confiança, pois seriam apenas interpolação matemática.

A visualização desse resultado será apresentada junto com o resultado da próxima operação, que é a imagem de satélite do local, Figura 4.13.



Figura 4.12: Visualização 3D das curvas de níveis e do caminho natural obtidos. Datum: WGS-84; Projeção: UTM Zona 23 e Norte Geográfico indicado pela letra “N” no canto superior direito.

Exportação para verificação e investigação no .kml

Para visualizar e verificar os resultados gerados, foram exportados todos os arquivos gerados, para o programa Google Earth 4.3.

A transformação do sistema de coordenadas não foi necessária, pois configurou-se esse programa para usar o mesmo sistema de coordenadas, com projeção UTM e *datum* WGS-84.

A Figura 4.12 apresenta, apenas para efeito de ilustração, a visualização 3D das curvas de níveis geradas e o caminho natural de drenagem.

Esse procedimento torna possível a visualização e mensuração de alguns parâmetros, que serão necessários na Seção 4.5, tais como, tipo de ocupação do solo e subdivisão das áreas de contribuição dos trechos de interesse¹.

As áreas de contribuição, os caminhos naturais de drenagem e a localização do Arroio dos Afonsos são mostrados na Figura 4.13.

Nessa figura, pode-se verificar que o caminho natural de drenagem coincide com o curso do Arroio dos Afonsos até o começo do trecho de curvas acentuadas, logo antes da cabeceira da pista. A partir desse ponto ocorre um afastamento do caminho natural de drenagem

¹Os trechos de interesse são trechos de mesmas características e serão apresentados na Seção 4.5.

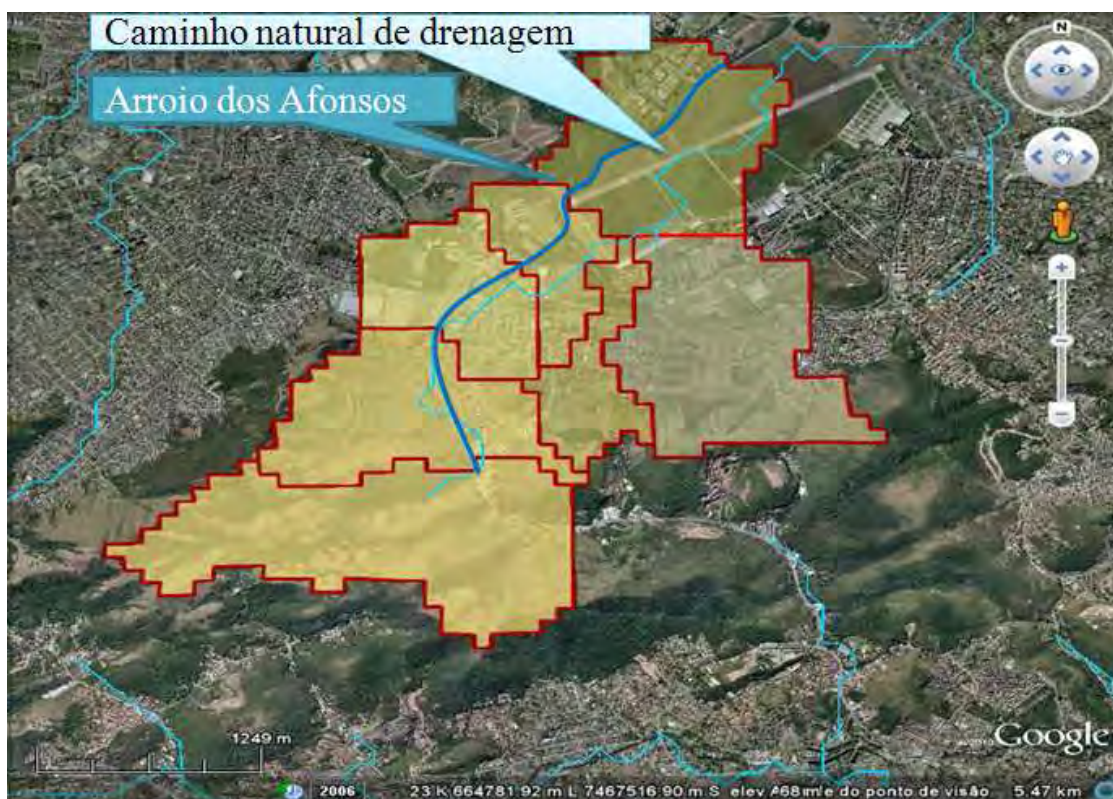


Figura 4.13: Áreas de contribuições, caminhos naturais de drenagem e Arroio dos Afonsos. Datum: WGS-84; Projeção: UTM Zona 23 e Norte Geográfico apontado para cima e escala representada na figura.

do arroio, posteriormente esse afastamento diminui. A combinação dessas características gera fortes evidências que o curso natural do arroio foi desviado para construção ou ampliação do aeródromo.

O caminho natural de drenagem obtido pela análise em SIG foi comprovado pelo levantamento topográfico apresentado no anexo A, realizado durante as visitas a campo.

Teve-se acesso a filmagens do dia simulado, essas imagens comprovam que em ocasiões de forte chuva, o fluxo de água segue exatamente o caminho natural de drenagem obtido.

Na Figura 4.13, é possível observar ainda que o hangar do MUSAL é uma barreira física ao escoamento superficial de uma das áreas de contribuição, represando um grande volume de água conforme já mostrado na figura 1.1.

4.2 Análise das precipitações históricas

As séries históricas utilizadas foram disponibilizadas pela Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro [17]. Esse banco de dados consiste em registros com intervalos de 15 em

15 minutos do período entre 1997 até 2010, fornecendo um total de 14 anos completos de observações.

A Figura 4.14 contém a aplicação do método de Thiessen para as estações pluviométricas da prefeitura mais próximas do local em estudo. Observa-se que as áreas de contribuição estão contidas na área de influência da estação de Jacarepaguá/Tanque, de acordo com o método.

A estação de Jacarepaguá/Tanque fica 3,9 km do hangar. Entre os dois pontos existe o Morro do Catonho, com cota de topo de 300 m em relação ao nível do mar. Como a estação possui cota de 73 m em relação ao nível do mar, existe um desnível de 227 m entre a estação e o topo do morro.

Assumiu-se que essa barreira física não provocará mudanças significativas, nas distribuições de chuvas entre os dois pontos considerados.

Para analisar o comportamento das precipitações, o grande desafio é a separação das ocorrências em suas durações, pois para cada duração as chuvas se comportam de maneira diferente, segundo a referência [4]. Nesse sentido, a duração das precipitações foi considerada, por meio da implementação de um programa na linguagem Excel/VBA apresentado no apêndice A.

O programa possibilita a análise por séries anuais e uma pré-análise do tempo de retorno por séries parciais. Sempre que possível [10] recomenda comparar os resultados do tempo de retorno obtidos pelos dois métodos.

Para estabelecer a duração das precipitações adotou-se o Princípio das Durações Prolongadas, o qual estabelece que se um evento de uma duração qualquer for intenso o suficiente, para também resultar em uma intensidade média relevante para uma duração superior, então essa ocorrência deve ser considerada para ambas as durações. No entanto, deve-se atentar para manter a independência dos eventos, logo não se deve considerar mais de um evento de mesma duração em uma mesma chuva, separando-se apenas o mais intenso deles [10].

Nesse estudo, respeitou-se as limitações apresentadas na Seção 2.3.1 para a confiabilidade da estimativa do período de retorno para as análises de séries parciais. Como o período de registros utilizado é de 14 anos de observações e o período de retorno de projeto é de 25 anos, utilizou-se a análise de séries anuais para a determinação da equação de chuvas IDF.

Para a análise de séries anuais, o programa separa os máximos anuais para cada duração, escolhidas pelo usuário. As intensidades de referência para cada duração são cal-

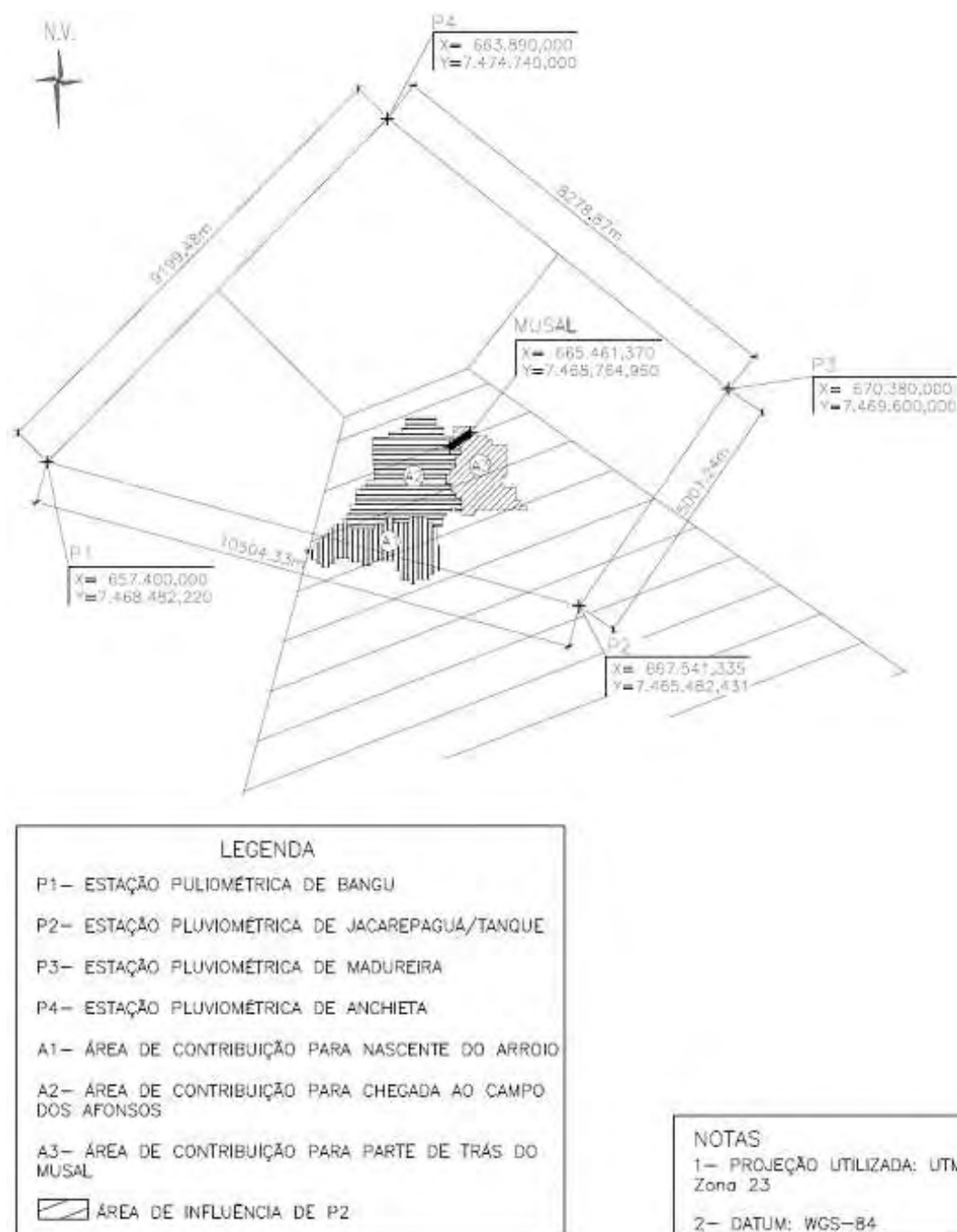


Figura 4.14: Método de Thiessen, para as estações da Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro mais próximas do MUSAL, escala 1:125.000.

Duração	[min]	15	30	45	60
Ano	1997	34,0	61,4	74,7	78,4
	1998	27,1	38,5	50,1	59,4
	1999	17,7	25,2	28,1	33,5
	2000	28,0	40,4	46,4	51,4
	2001	18,6	36,4	40,8	42,4
	2002	13,6	19,8	27,2	29,8
	2003	18,0	23,0	28,2	29,6
	2004	15,0	19,8	22,4	22,4
	2005	39,6	51,0	58,6	59,4
	2006	34,0	45,8	67,4	76,6
	2007	17,0	19,2	21,0	27,0
	2008	18,0	26,4	32,6	33,2
	2009	23,8	40,8	52,6	63,8
	2010	21,6	32,2	38,2	42,4
Média	[mm]	23,3	34,3	42,0	46,4
Desvio	[mm]	8,1	12,9	16,9	18,6

Tabela 4.1: Precipitações máximas anuais da estação de Jacarepaguá/Tanque até a duração de 60 minutos [mm].

culadas considerando as variações estatísticas definidas por Ven Te Chow e a distribuição de Gumbel.

As Tabelas 4.1 e 4.2 apresentam os valores das máximas precipitações anuais da estação de Jacarepaguá/Tanque, para cada duração escolhida e suas médias e desvios-padrão.

Aplicando-se a equação 2.1 para alguns períodos de retorno, tem-se os valores de precipitação estatisticamente considerados. Esses valores estão presentes nas Tabelas 4.3 e 4.4.

Dividiu-se a precipitação pela sua duração, obtendo-se as intensidades médias das Tabelas 4.5 e 4.6.

No caso das análises por séries parciais realizadas de maneira prévia pelo programa², são separadas ocorrências de precipitações consideradas intensas em São Paulo, conforme página 18 da referência [11], servindo apenas como critério inicial de separação de dados.

²Os comentários do programa informam suas limitações.

Duração	[min]	90	120	180	240	360	720	1440
Ano	1997	81,6	82,5	84,6	84,6	84,6	84,6	84,6
	1998	68,8	86,3	114,2	133,2	148,7	162,8	163,4
	1999	38,4	48,6	57,4	57,6	59,3	59,5	72,8
	2000	56,2	56,2	56,4	56,4	56,4	56,4	65,6
	2001	43,6	53,0	71,0	83,6	98,6	113,2	114,8
	2002	31,8	32,8	32,8	33,8	39,0	49,8	59,0
	2003	34,4	39,0	46,8	55,8	64,0	66,0	66,0
	2004	22,4	24,6	30,2	37,2	40,8	41,4	48,8
	2005	60,6	60,6	60,8	60,8	60,8	61,2	61,2
	2006	84,2	85,0	85,4	85,6	85,8	85,8	85,8
	2007	31,0	33,6	33,6	39,6	53,2	96,6	102,0
	2008	33,2	33,2	41,6	41,8	42,6	42,8	48,6
	2009	70,0	72,0	76,8	77,2	77,2	105,2	112,2
	2010	49,8	55,0	78,0	82,8	84,6	120,2	130,4
Média	[mm]	50,4	54,5	62,1	66,4	71,1	81,8	86,8
Desvio	[mm]	20,0	20,8	24,4	26,9	29,1	34,9	33,8

Tabela 4.2: Precipitações máximas anuais da estação de Jacarepaguá/Tanque a partir da duração de 60 minutos em [mm].

Tr	K	Duração [min]			
[anos]		15	30	45	60
5	1,0	31,2	47,0	58,6	64,6
10	1,7	37,2	56,6	71,2	78,4
15	2,1	40,5	61,9	78,2	86,1
20	2,4	43,0	65,8	83,2	91,6
25	2,7	44,8	68,7	87,1	95,8
50	3,4	50,4	77,7	98,9	108,8
100	4,1	56,0	86,7	110,6	121,6

Tabela 4.3: Precipitações estabelecidas estatisticamente, para a estação de Jacarepaguá/Tanque até a duração de 60 minutos [mm].

Tr	K	Duração [min]						
[anos]		90	120	180	240	360	720	1440
5	1,0	70,1	74,8	86,0	92,8	99,6	116,0	119,9
10	1,7	85,0	90,3	104,1	112,8	121,2	141,9	145,1
15	2,1	93,3	98,9	114,2	123,9	133,3	156,4	159,0
20	2,4	99,3	105,1	121,5	132,0	142,0	166,8	169,1
25	2,7	103,8	109,8	127,0	138,1	148,5	174,7	176,8
50	3,4	117,8	124,2	143,9	156,8	168,8	199,0	200,3
100	4,1	131,7	138,6	160,8	175,4	188,9	223,1	223,7

Tabela 4.4: Precipitações estabelecidas estatisticamente, para a estação de Jacarepaguá /Tanque a partir da duração de 60 minutos [mm].

Tr	Duração [min]			
[anos]	15	30	45	60
5	2,080	1,565	1,303	1,077
10	2,480	1,886	1,582	1,307
15	2,703	2,064	1,737	1,435
20	2,863	2,193	1,850	1,527
25	2,985	2,290	1,935	1,597
50	3,360	2,591	2,197	1,813
100	3,732	2,889	2,457	2,027

Tabela 4.5: Intensidades máximas anuais, para estação de Jacarepaguá/Tanque, até a duração de 60 minutos [mm/min].

Tr	Duração [min]						
[anos]	90	120	180	240	360	720	1440
5	0,779	0,624	0,478	0,387	0,277	0,161	0,083
10	0,944	0,752	0,578	0,470	0,337	0,197	0,101
15	1,037	0,824	0,634	0,516	0,370	0,217	0,110
20	1,103	0,875	0,675	0,550	0,394	0,232	0,117
25	1,154	0,915	0,705	0,575	0,413	0,243	0,123
50	1,309	1,035	0,800	0,653	0,469	0,276	0,139
100	1,463	1,155	0,893	0,731	0,525	0,310	0,155

Tabela 4.6: Intensidades máximas anuais, para estação de Jacarepaguá/Tanque a partir de 60 minutos [mm/min].

4.2.1 Comparação entre as fontes de dados de precipitação

O Instituto de Controle do Espaço Aéreo (ICEA) possui uma estação pluviográfica na região do Campo dos Afonsos, com as seguintes características: coordenadas geográficas: latitude=22°53'S e longitude=43°32'O; altitude da estação meteorológica: 33 m acima do nível do mar e a distância aos hangares do MUSAL: 463 m.

A utilização dos dados dessa estação para determinação da equação de chuvas aumentaria a precisão das análises, ficando como sugestão para trabalhos futuros.

Como para o presente trabalho o instituto só disponibilizou, em tempo hábil, os dados compilados de máximas precipitações diárias anuais, as separações dos dados dessa estação em suas durações ficaram comprometidas. Essa caracterização é um dos passos de maior importância segundo [4], pois para cada duração o comportamento das tormentas pode variar bastante para uma mesma estação de medição.

Entretanto, a segurança em considerar a estação de Jacarepaguá/Tanque e não a estação do ICEA foi analisada.

As Tabelas 4.7 e 4.8 apresentam os valores das máximas precipitações diárias anuais e o dia de sua ocorrência, em cada ano de observação. A estação utilizada é chamada de Estação Meteorológica de Afonsos (SBAF), fornecida pelo ICEA.

Para a estação de Jacarepaguá/Tanque, utilizada no trabalho, foram obtidas as máximas precipitações diárias anuais e seus, respectivos, dias de ocorrência, por meio do programa computacional implementado em VBA apresentado no Apêndice A. A Tabela 4.9 apresenta os valores obtidos, onde a última coluna representa a coincidência dos dias de

ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DE AFONSOS (SBAF)			
ANO	MÊS	DIA	PRECIPITAÇÃO [mm]
			TOTAL DIÁRIO MÁXIMO
1951	3	25	51,0
1952	6	10	50,0
1953	11	20	34,0
1954	4	6	29,0
1955	11	11	54,0
1956	11	28	35,6
1957	2	5	38,0
1958-1972	Dados inconsistentes		
1973	2	6	37,9
1974	12	14	71,0
1975	1	8	50,9
1976	1	31	27,1
1977	11	15	35,9
1978	2	8	45,9
1979	6	26	27,2
1980	1	25	49,6
1981	11	16	46,8
1982	12	3	49,7
1983	12	25	37,2
1984	10	19	35,5
1985	4	19	59,4
1986	4	23	76,3
1987	4	4	75,0
1988	2	2	59,5
1989	6	11	72,9
1990	4	19	82,4

Tabela 4.7: Precipitações diárias anuais e o dia de sua ocorrência (Parte 1). Estação Meteorológica de Afonsos (SBAF). Fonte: ICEA.

ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DE AFONSOS (SBAF)			
ANO	MÊS	DIA	PRECIPITAÇÃO [mm]
			TOTAL DIÁRIO MÁXIMO
1991	2	18	59,2
1992	4	26	60,6
1993	12	17	36,2
1994	3	27	60,4
1995	5	10	40,1
1996	2	13	57,4
1997	1	9	54,9
1998	1	8	105,5
1999	4	9	38,0
2000	1	2	57,5
2001	12	24	129,5
2002	2	2	54,3
2003	3	21	67,2
2004	1	16	59,6
2005	4	21	36,9
2006	1	31	58,2
2007	10	24	73,2
2008	2	24	35,9
2009	1	21	52,8
2010	4	5	74,2

Tabela 4.8: Precipitações diárias anuais e o dia de sua ocorrência (Parte 2). Estação Meteorológica de Afonsos (SBAF). Fonte: ICEA

ESTAÇÃO PLUVIOMÉTRICA JACAREPAGUÁ/TANQUE				
ANO	MÊS	DIA	PRECIPITAÇÃO [mm]	Dias coincidentes?
			TOTAL DIÁRIO MÁXIMO	
1997	1	9	84,6	SIM
1998	1	8	163,4	SIM
1999	1	15	72,8	NÃO
2000	1	2	65,6	SIM
2001	12	24	114,8	SIM
2002	6	23	59,0	NÃO
2003	3	8	66,0	NÃO
2004	11	28	48,8	NÃO
2005	4	21	61,2	SIM
2006	1	31	85,8	SIM
2007	10	24	102,0	SIM
2008	2	26	48,6	NÃO
2009	12	30	112,2	NÃO
2010	4	5	130,4	SIM

Tabela 4.9: Precipitações diárias anuais e o dia de sua ocorrência. Estação Pluviométrica Jacarepaguá/Tanque. Fonte: ALERTA RIO.

máximas precipitações ou não, entre as duas estações.

Foram obtidos 8 anos com dias de máximas precipitações diárias coincidentes e 6 anos com dias não coincidentes.

Dos 14 anos analisados, apenas os anos de 2001, 2003 e 2004 possuem registros da estação de Jacarepaguá/Tanque inferiores aos registros da estação meteorológica de Afonsos, sendo a diferença, respectivamente, de 11%, 2% e 18%. A diferença entre as estações possuem valores 41% maiores para a estação utilizada, com desvio padrão de 39%, estando dessa forma a favor da segurança.

A Figura 4.15 mostra que para o período observado as duas estações tem comportamentos sazonais parecidos, com relação ao total diário máximo de cada ano. Nessa mesma figura, chama a atenção, a aparente mudança no regime de chuvas, registrando recentemente maiores alturas pluviométricas, talvez devido às mudanças climáticas que vêm ocorrendo nas últimas décadas.

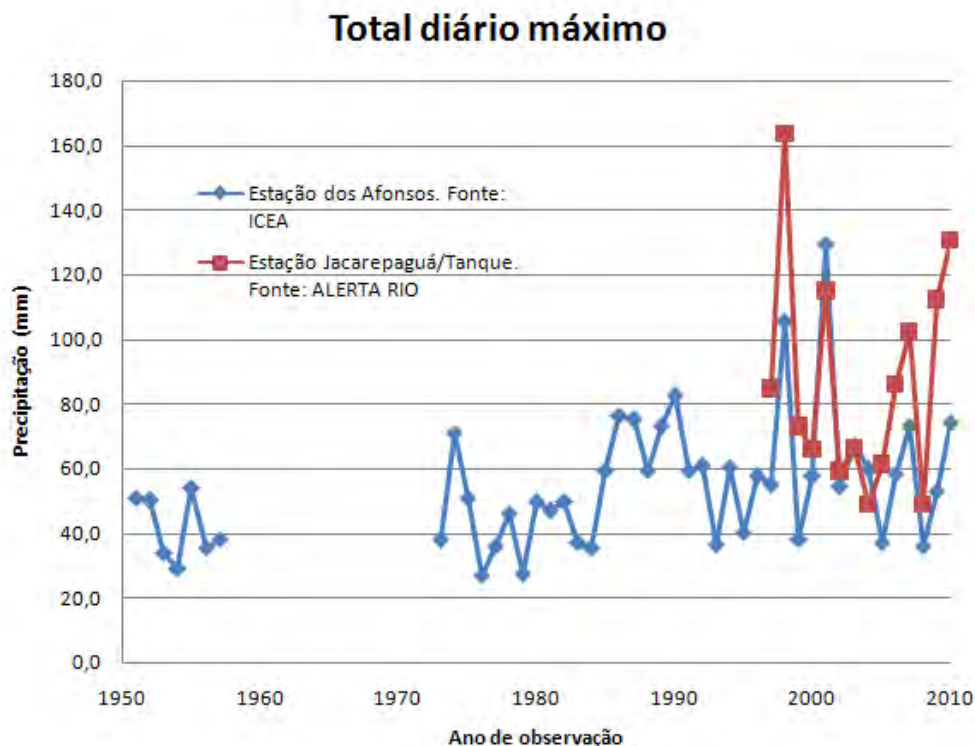


Figura 4.15: Comparação gráfica das observações históricas dos registros de totais diários máximos para cada ano das duas estações analisadas.

Nesse ponto do estudo, fica como sugestão para trabalhos futuros uma investigação de forma qualitativa e quantitativa, a fim de, observar se em análise com séries longas os valores obtidos são menores que os observados, por não considerar efeitos como aquecimento global e efeito estufa. Caso esse viés se confirme, torna-se contra a segurança para efeitos de projetos de drenagem a utilização sem algum tipo de correção dessas séries.

4.3 Determinação da Equação IDF

Utilizando o procedimento sugerido na Seção 2.3.2, para o período de retorno de 5 anos, obtém-se os valores da Tabela 4.10. Aplicando a equação 2.7, para esses valores, tem-se $c = 23,34$ mm.

A Figura 4.16 apresenta o gráfico de intensidade pela duração deslocada do c . Os valores de R^2 ficaram bem próximos da unidade, mostrando que os ajustes das equações, também apresentados na mesma figura, produzem bom ajuste. Por comparação das equações do gráfico com a Equação 2.5, obtém-se que $d = 0,87$.

A Figura 4.17 mostra o resultado do ajuste, pelo método dos mínimos quadrados, da

I_1	[mm/min]	2,08
t_1	[min]	15
I_2	[mm/min]	0,08
t_2	[min]	1440
I_3	[mm/min]	0,42
t_3	[min]	214

Tabela 4.10: Pontos (i,t) obtidos para determinação da constante “c”.

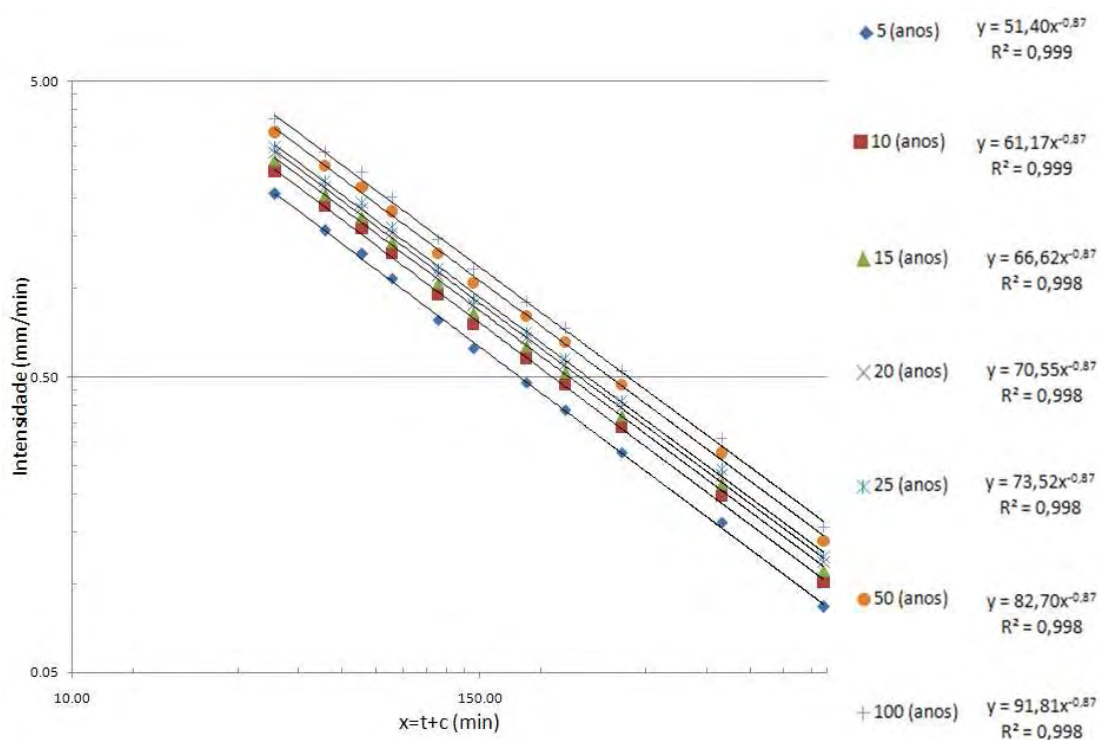


Figura 4.16: Ajuste de Equação 2.5. Eixos em escala logaritmica.

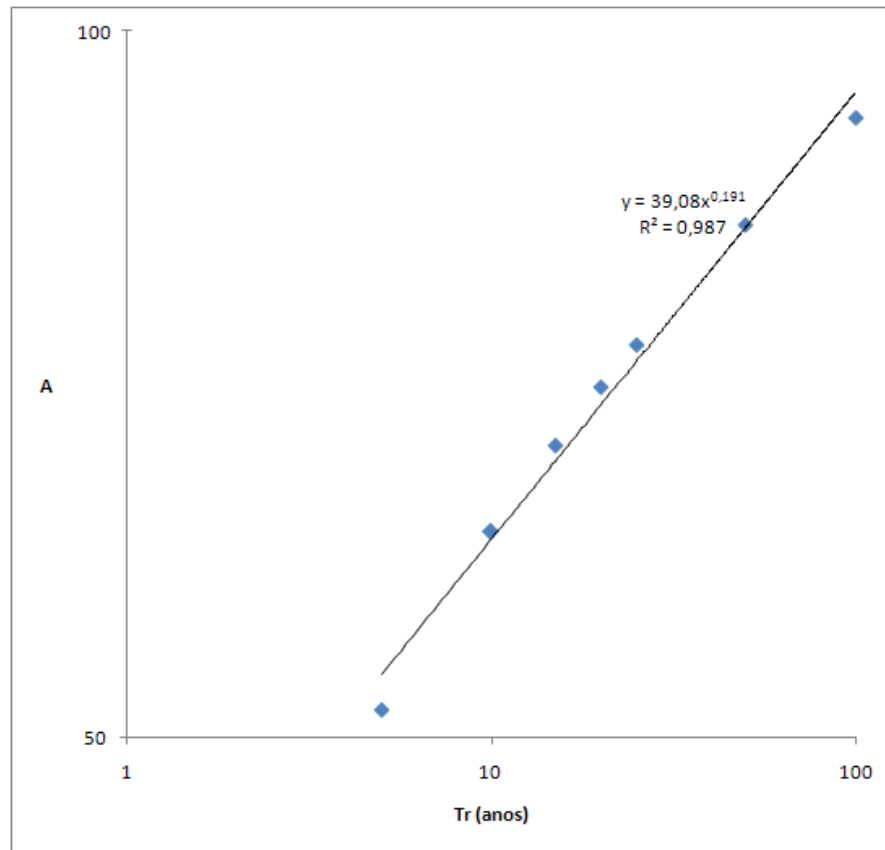


Figura 4.17: Ajuste de Equação 2.4. Escala bilogaritmo.

Equação 2.4. Não foi preciso separar em duas equações, o valor de R^2 próximo da unidade comprova o bom ajuste e os valores obtidos para as constantes são $a = 39,08$ e $b = 0,191$.

Portanto, estabeleceu-se a Equação 4.1 para a equação de chuva IDF utilizada no presente estudo.

$$I = \frac{39,08 Tr^{0,191}}{(t + 23,34)^{0,87}} \quad (4.1)$$

onde

Tr : Período de retorno esperado [anos] e

I : Intensidade média [mm/min] da chuva de duração t [min].

4.4 Chuva de projeto

Define-se a distribuição temporal das intensidades de uma chuva de projeto para que essa seja representativa de muitos eventos registrados e que possua as características citadas na Seção 2.3.4. O objetivo dessa definição é a obtenção do hidrograma de projeto,

Tipo de dispositivo de drenagem	Tr [anos]
Microdrenagem - dispositivos de drenagem superficial, galerias de águas pluviais	10
Aproveitamento de rede existente - microdrenagem	5
Canais de macrodrenagem não revestidos	10
Canais de macrodrenagem revestidos, com verificação para $Tr = 50$ anos sem considerar borda livre	25

Tabela 4.11: Períodos de retorno mínimos estabelecido pela Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro, para cada tipo de obra de drenagem urbana.

por meio da modelagem precipitação-vazão, sendo necessário no modelo o estabelecimento do hietograma da chuva de projeto de forma discretizada no tempo.

A utilização da chuva de projeto no modelo precipitação-vazão servirá como base para o redimensionamento dos canais, caso verifique-se que suas capacidades de transporte não sejam suficientes para atender às vazões modeladas.

Utilizou-se o método dos Blocos Alternados para definir o hietograma de projeto, assumindo-se uma discretização temporal de 15 min, pois os registros de precipitações trabalhados são de intervalos de 15 minutos, não possuindo precisão maior que esse valor.

A equação de chuvas, Equação 4.1, estabelecida nesse estudo, foi utilizada para a determinação das intensidades para cada duração considerada no método dos blocos alternados.

O manual técnico para elaboração de estudos hidrológicos e projetos de sistemas de drenagem urbana [18], da Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro, estabelece a Tabela 4.11 como mínimos tempos de retorno (Tr) a serem utilizados em cada tipo de obra de drenagem urbana na cidade.

O tempo de retorno estabelecido foi de 25 anos, sendo o estudo válido, qualquer que seja sua posterior aplicação em projetos de drenagem, conforme a norma da cidade.

A duração da chuva de projeto foi definida em 3 horas, observando-se em alguns dos muitos eventos dessa duração, que o pico de precipitação acontecia no primeiro quarto da duração. Portanto, o pico da chuva de projeto também será estabelecido nessa posição. A Figura 4.18 apresenta a chuva de projeto estabelecida.

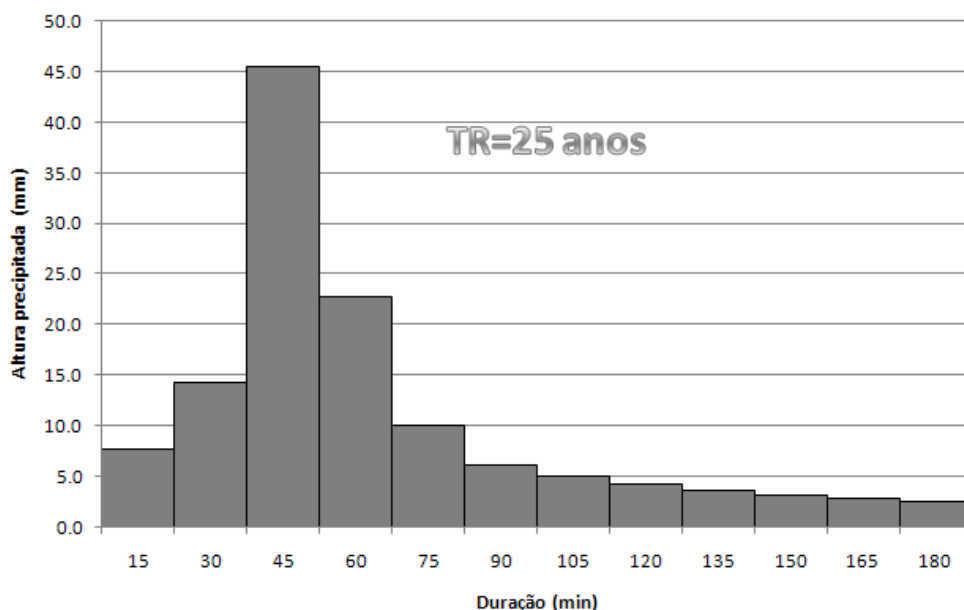


Figura 4.18: Chuva de projeto estabelecida para o tempo de retorno (TR) de 25 anos.

4.4.1 Simulação da enchente de 31/01/2006

Afim de validar a modelagem aplicada nesse estudo e analisar a sensibilidade dos resultados com relação à variação do CN, conforme sugerido em [13], foi simulada a enchente do dia 31/01/2006.

A Figura 4.19 mostra as observações de precipitações no dia simulado.

Nos dias que antecederam o evento simulado, chovera bastante na região, sendo observado na última semana de janeiro, que a região sudeste estava sob influência de uma ZCAS (Zona de Convergência do Atlântico Sul).

Nessas ocasiões a região é atingida por fortes chuvas durante um período prolongado de tempo. Essas condições podem durar dias ou até semanas.

Nesse caso, deve-se considerar a condição de umidade inicial do solo, como um dos fatores mais importantes para os resultados. Os coeficientes CN adotados nessa simulação, foram obtidos considerando a condição III de umidade, ou seja, solo saturado.

O período de retorno da chuva simulada é de 4,3 anos, com base nas análises em séries anuais, bem menor que o de projeto de 25 anos, mas as mudanças nos CN, compensam, em alguns casos, essa diferença.

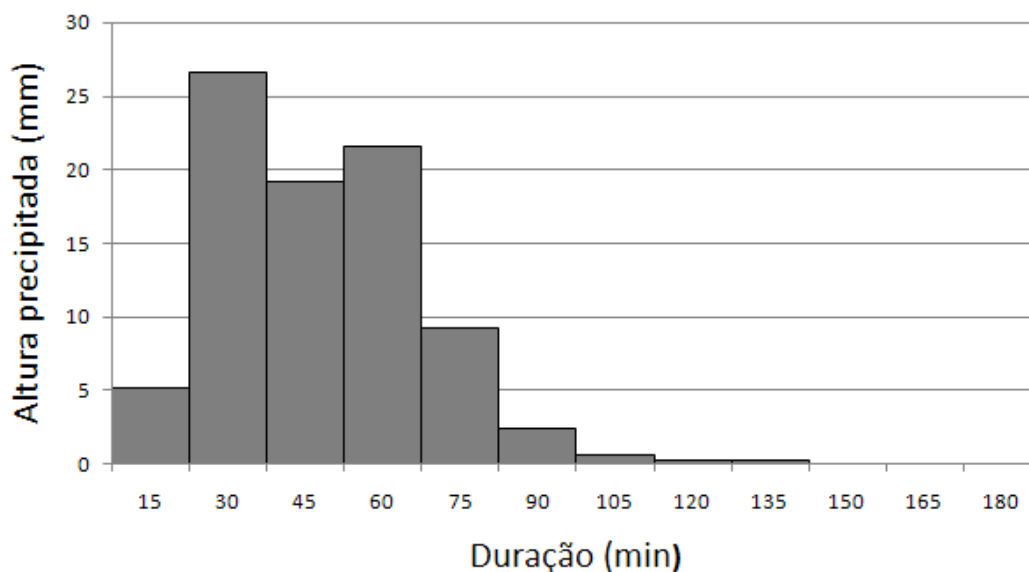


Figura 4.19: Hietograma de chuva simulada. Fonte:[17].

4.5 Vazão de projeto

As vazões de projeto foram determinadas aplicando a modelagem Precipitação-Vazão implementada no programa IPHS1.

Esse programa fornece liberdade na escolha de diferentes teorias, para cada passo da modelagem desejada. Nesse estudo adotou-se a teoria apresentada na Seção 2.

A Figura 4.20 apresenta a modelagem realizada no programa IPHS1, onde os quadradinhos numerados representam pontos de controle de vazão, as retas entre eles representam os trechos d'água, com indicação de sentido dada pelas setas nesses elementos, e os quadrados conectados em trechos d'água ou em pontos de controle, representam a modelagem das áreas de contribuição.

4.5.1 Caracterização dos canais existentes

Os trechos d'água representam os segmentos relativamente homogêneos encontrados em campo, durante as visitas técnicas. Na região em estudo foram modelados parte do Arroio dos Afonsos, dividido em 5 trechos (Figura 4.20 trechos 1-2, 2-3, 3-5, 5-6 e 6-8), a canalização enterrada, que cruza a pista de pousos e decolagens do aeródromo (Figura 4.20 trecho 7-8), e uma vala que atualmente encontra-se assoreada (Figura 4.20 trecho 4-5).

As Figuras 4.21, 4.22 e 4.23 mostram a situação, em que se encontram as seções com assoreamento e invasão da vegetação em algumas trechos.

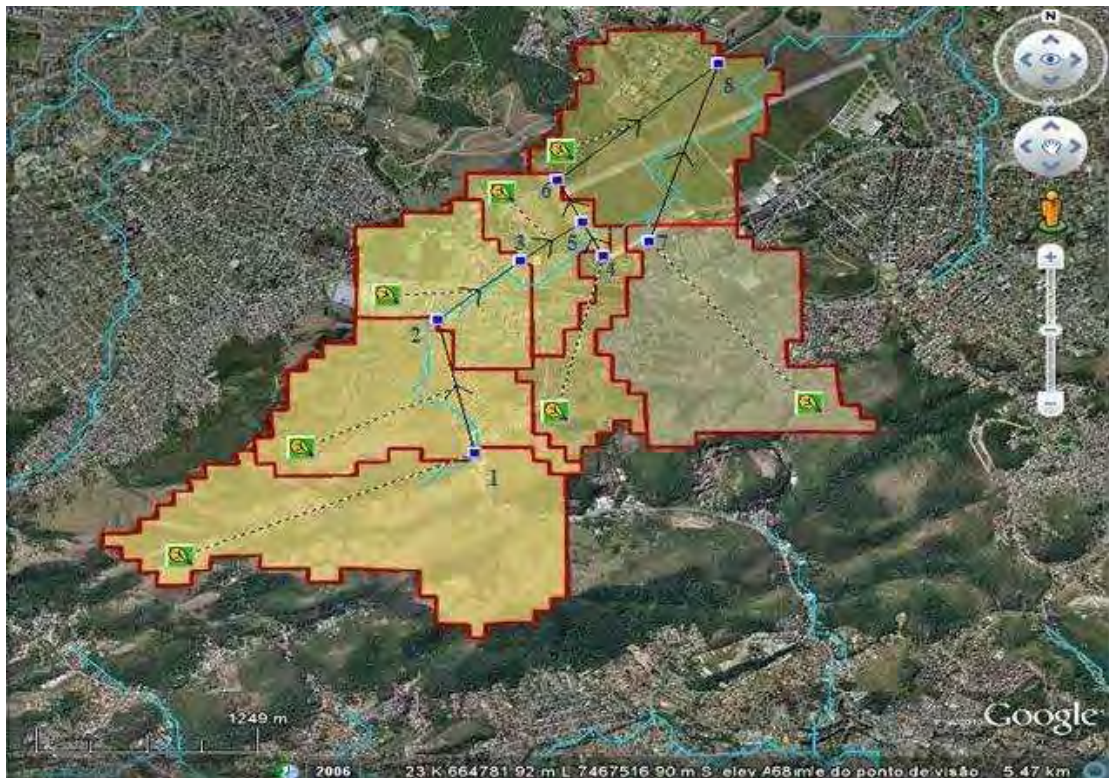


Figura 4.20: Modelagem adotada, implementada no programa IPHS1, com imagem de fundo obtida por tratamento com ArcGIS do mapeamento do Google Earth.



Figura 4.21: Seção natural próximo à nascente (Trecho Natural 1, Figura 4.20 trecho 1-2).
Data da visita: 19/04/2011.

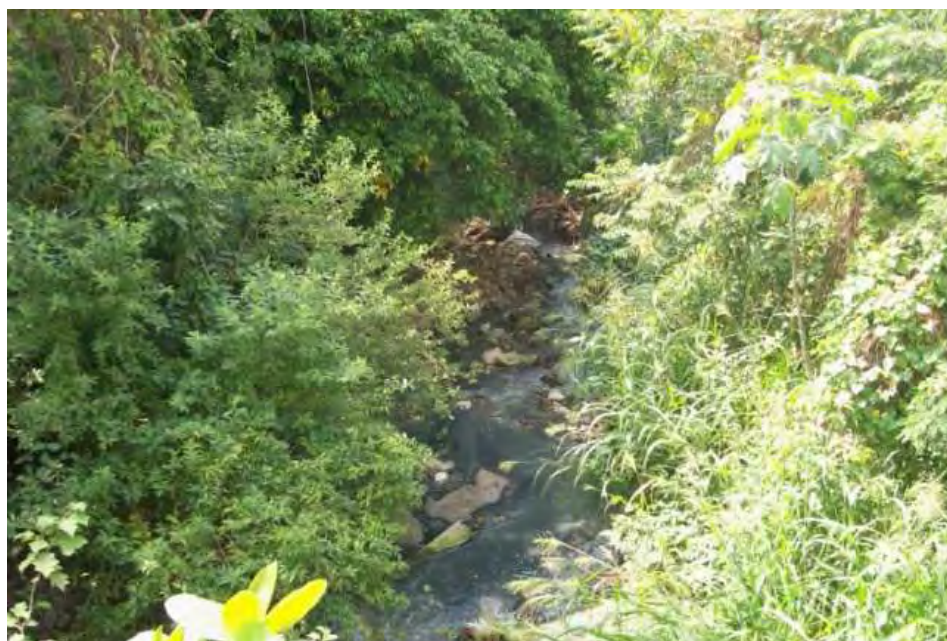


Figura 4.22: Seção natural, no trecho paralelo à pista (Trecho Natural 4, Figura 4.20 trecho 6-8). Data da visita: 19/04/2011.



Figura 4.23: Seção natural, no trecho ao lado do hangar no MUSAL (Vala do MUSAL, Figura 4.20 trecho 4-5). Data da visita: 20/06/2008.

Ponto de controle (Montante -> Jusante)	Nomenclatura	Revestimento	Comprimento [m]
1->2	Trecho Natural 1	Natural	880
2->3	Trecho Concreto	Concreto	621
3->5	Trecho Natural 2	Natural	553
4->5	Vala do MUSAL	Natural	575
5->6	Trecho Natural 3	Natural	208
6->8	Trecho Natural 4	Natural	1304
7->8	Trecho Enterrado	Concreto	1045

Tabela 4.12: Características dos trechos d'água (Parte 1).

Nomenclatura	Cota de fundo de montante [m]	Cota de fundo de jusante [m]	Altura do canal [m]
Trecho Natural 1	48,3	40,0	1,3
Trecho Concreto	40,0	33,8	2,5
Trecho Natural 2	33,8	30,7	4,1
Vala do MUSAL	31,9	31,6	1,5
Trecho Natural 3	30,7	29,6	4,1
Trecho Natural 4	29,6	20,2	5,0
Trecho Enterrado	28,6	20,7	-

Tabela 4.13: Características dos trechos d'água (Parte 2).

As Tabelas 4.12, 4.13 e 4.14 apresentam a nomenclatura e as características medidas e adotadas, para cada trecho modelado. Os valores de rugosidade foram adotados por comparação entre o encontrado em campo e as tabelas e figuras de [4].

O trecho 7-8 da Figura 4.20 é constituído de duas manilhas paralelas de um metro de diâmetro cada. A Figura 3.1 apresentou um esquema da canalização que cruza a pista. Esse trecho também se encontra em situação de má conservação, com invasão da vegetação nos poços de visita e redução da seção efetiva, provocada por assoreamento.

4.5.2 Caracterização das áreas de contribuição

As áreas de contribuição foram determinadas por meio do processamento georreferenciado do modelo numérico de elevação utilizado.

Nomenclatura	Largura superior [m]	Largura do fundo [m]	Rugosidade $[s/m^{1/3}]$	Declividade [m/m]
Trecho Natural 1	4,5	4,5	0,1250	0,0094
Trecho Concreto	4,0	4,0	0,0160	0,0100
Trecho Natural 2	8,7	3,4	0,1000	0,0056
Vala do MUSAL	4,9	0,2	0,1500	0,0005
Trecho Natural 3	10,9	2,4	0,1500	0,0053
Trecho Natural 4	12,5	5,5	0,1100	0,0072
Trecho Enterrado	-	-	0,0170	0,0076

Tabela 4.14: Características dos trechos d'água (Parte 3).

Área de contribuição	Área [km ²]	Comprimento principal [m]	Desnível [m]	Cota montante [m]	Cota jusante [m]
0->1	1,90	2320	228	278	50
1->2	1,15	1302	167	210	43
2->3	0,80	868	17	55	38
3->5	0,53	701	45	79	34
0->4	0,52	1542	134	166	33
6->8	1,37	1964	31	55	24
0->7	1,49	2110	223	253	30

Tabela 4.15: Características das áreas de contribuição (Parte 1).

Para cada trecho d'água estabelecido na seção anterior, foram geradas suas respectivas áreas de contribuição, identificadas pela localização entre os pontos de controle numerados na Figura 4.20. Quando as áreas possuem efluente concentrado, em um único ponto de controle, o ponto de controle a montante foi denominado “0” para representar nascentes.

As Tabelas 4.15 e 4.16 apresentam alguns parâmetros utilizados na modelagem das áreas de contribuição.

Como as divisões realizadas não geram áreas de contribuição homogêneas, o valor do CN deve ser determinado pela proporção das áreas para cada tipo, uso e ocupação do solo. As tabelas com as proporções utilizadas para determinação dessa variável são apresentadas no apêndice B e os resultados dessa ponderação estão na Tabela 4.17.

Área de contribuição	Declividade [m/m]	tc [min]
0->1	0,098	15,97
1->2	0,128	9,78
2->3	0,020	15,27
3->5	0,064	7,08
0->4	0,087	6,16
6->8	0,016	25,16
0->7	0,106	12,91

Tabela 4.16: Características das áreas de contribuição (Parte 2).

Área de contribuição	Condição I	Condição II	Condição III
0->1	52,27	74,04	86,87
1->2	54,61	71,66	84,06
2->3	60,75	77,15	87,76
3->5	49,27	67,63	82,12
0->4	62,48	79,34	90,25
6->8	49,72	68,24	82,86
0->7	62,61	79,5	90,43

Tabela 4.17: Resultados obtidos para o CN nas três condições de umidade dos solo.

4.5.3 Vazões resultantes

Para a chuva simulada, foi adotada a Condição III de umidade, pois observou-se precipitações com alturas somadas de 125,6 mm nos cinco dias anteriores, logo considerando-se solo saturado.

No caso da chuva de projeto, com período de retorno de 25 anos, foi assumida a Condição II de umidade, em que o solo se encontra em situação normal de umidade.

A aplicação do modelo resulta nos hidrogramas para cada trecho e bacia modelada. Esses gráficos são apresentados no Apêndice C.

O valor máximo da vazão, para cada trecho, pode ocorrer no hidrograma de entrada ou de saída do mesmo, logo assumiu-se o maior valor entre os picos de entrada e saída como a vazão a ser comparada com a capacidade de transporte da seção. Esse valor também foi utilizado nas eventuais sugestões de redimensionamento.

Para o caso da chuva de projeto, a modelagem ocorre de forma iterativa, ou seja, inicialmente o sistema atual de drenagem fornece dados de entrada para a modelagem e obtêm-se a vazão máxima para cada trecho, posteriormente, dimensiona-se o novo sistema de drenagem para os máximos obtidos. Essas alterações nas dimensões geram necessidade de atualização nos dados de entrada do modelo e, conseqüentemente, modificações nos picos de vazões anteriormente obtidos, sendo necessário, eventualmente, novo redimensionamento. Esse processo se repete, indefinidamente, até que a capacidade de transporte da seção seja suficiente para transportar o pico de vazão do trecho, na situação que os parâmetros de entrada são a própria seção redimensionada.

A Tabela 4.18 apresentam os máximos de vazões para a chuva de projeto e para a chuva simulada de 31/01/2006, tendo como dados de entrada o sistema de drenagem existente. Essa tabela apresenta ainda a capacidade de transporte de cada trecho existente, considerando-se seção plena, conforme Equação 2.21.

Observa-se na Tabela 4.18, que a maioria dos trechos apresentaram vazões maiores para a chuva simulada, mesmo essa tendo um período de retorno bastante inferior ao da chuva de projeto. Esse fato ocorreu devido à variação no CN com as condições iniciais de umidade do solo, pois considerou-se solo normal para a chuva de projeto e solo saturado para a chuva simulada.

Apenas para os trechos “Vala do MUSAL” e “Trecho Enterrado” a vazão máxima da chuva simulada é menor que a da chuva de projeto, esses trechos são localizados nas regiões com maiores taxas de urbanização. Essa observação mostra que o modelo adotado é bastante

Trecho d'água	Vazão máxima Tr=25 anos	Vazão máxima (31/01/2006)	Capacidade do trecho
	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]
Trecho Natural 1	41,39	45,15	4,00
Trecho Concreto	50,74	55,26	66,99
Trecho Natural 2	51,44	56,60	28,59
Vala do MUSAL	10,59	8,84	0,45
Trecho Natural 3	51,54	56,75	20,08
Trecho Natural 4	51,11	53,23	64,81
Trecho Enterrado	33,03	30,87	3,19

Tabela 4.18: Máximo de vazão e capacidade de transporte, considerando o sistema de drenagem existente.

sensível às condições iniciais de umidade do solo.

Outra informação que pode ser retirada da Tabela 4.18, é a falta de capacidade de transporte de vazão de quase todos os trechos, com exceção dos trechos “Trecho Concreto” e “Trecho Natural 4”.

4.6 Verificação da modelagem

O modelo aplicado, em geral, foi verificado de forma qualitativa, pois não há registros de vazões no Arroio dos Afonsos, em nenhum dos trechos de interesse, e o levantamento por meio de medições se tornou inviável para o presente trabalho.

Por se tratar de área urbana, com baixo tempo de concentração, medições usuais de cota do nível d'água, que são realizadas duas vezes por dia, não conseguiriam representar as variações de nível que ocorreriam em uma escala muito menor de tempo. Seria necessária a medição do nível em intervalos curtos de tempo, demandando com isso um sistema automático.

Verificou-se para a chuva simulada que os trechos responsáveis por drenar a região a montante do MUSAL: “Trecho Natural 2”; “Vala do MUSAL”; “Trecho Natural 3” e “Trecho Enterrado”, não possuem capacidade de transportar o fluxo excedente das chuvas, contribuindo para a inundação registrada no dia 31/01/2006.

Para a área de contribuição atrás do hangar, foi possível realizar uma análise quantitativa estimada, para verificar o modelo estabelecido.

Para tanto, assumiu-se que o hangar do MUSAL funciona como uma barragem,

represando todo o volume d'água que não consegue escoar pela canalização subterrânea.

Assumiu-se também, que não existem contribuições e nem fuga de fluxo entre as áreas de contribuição modeladas, sendo a área de contribuição da tubulação subterrânea a única responsável pelo acúmulo de água observado na parte de trás do hangar, no dia simulado.

Logo, obteve-se por diferença entre a vazão de chegada e de saída, o volume represado esperado de 73.737 m^3 . Esse volume ocupa uma área em planta de 73.205 m^2 e atinge um desnível de 1,7 m, segundo análise de volume compreendido entre o terreno e um plano de referência, realizada no ArcGIS.

Sabendo que a lâmina d'água, no dia simulado, atingiu um desnível de 1,5 metros, portanto 11,8 % abaixo do obtido pela presente modelagem. Para essa cota, o volume represado é de 62.160 m^3 , valor 15,7 % menor que o esperado pelo modelo.

Apesar do nível d'água atingido e do volume de água represada, provenientes da modelagem, serem maiores que os estimados pelas fotografias, o modelo foi considerado válido, pois se observou, por meio de filmagem, que o hangar não consegue barrar toda água represada, sendo parte do volume represado perdido para a área de contribuição a jusante. As dimensões das perdas são de difícil mensuração, mas espera-se que sejam próximas das porcentagens obtidas.

4.7 Dimensionamento de solução

Com os resultados obtidos anteriormente, onde se verifica a falta de capacidade de transporte de vazão para vários trechos do Arroio dos Afonsos, constata-se que a solução mais próxima da ideal envolve aplicação de técnicas compensatórias de drenagem para reter ao máximo a vazão precipitada. Essas técnicas são classificadas como não convencionais [4].

A introdução de trincheiras de infiltração, para diminuir o escoamento excedente, a introdução de barreiras e diques a montante, para retardar o fluxo no córrego, ou até a regulamentação, por parte da prefeitura, de leis que obriguem as construções, das áreas urbanas mais afetadas, terem um reservatório de amortecimento de picos de cheias, conhecidas em São Paulo por “Lei das Piscininhas”, são exemplos de medidas que devem ser idealmente tomadas para a resolução do problema.

Nesse trabalho de graduação limitou-se para efeito de solução para o problema proposto o redimensionamento e readequação dos materiais do sistema existente a montante do MUSAL.

Está sendo proposta, pela Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro, a construção de um reservatório de detenção a montante do Campo dos Afonsos. Logo admitiu-se que esse reservatório deverá ser projetado para a vazão de saída encontrada nesse estudo, caso a solução de redimensionamento dos trechos seja adotada, tornando portanto a solução proposta viável e não totalmente teórica.

A solução proposta para o problema foi buscada de forma iterativa, pois mudanças nas características dimensionadas alteram as vazões máximas iniciais dos trechos, sendo necessária, a posterior verificação e, eventual, redimensionamento.

Como as condições de manutenção atuais dos trechos com seções naturais estavam precárias, foi especificado uma readequação das margens e fundo dos trechos, para que seja atingido, para esses trechos, a condição de Coeficiente de Manning de $0,040 \text{ s/m}^{\frac{1}{3}}$, que é o valor máximo estimado para canais naturais, de seção irregular, fundo de solo e margens com mato baixo [4, Página 123].

Todos os trechos do Arroio dos Afonsos a jusante do “Trecho Concreto” foram projetados em seções naturais.

O trecho de concreto, já existente na área urbana, não precisará de modificações. Esse trecho possui capacidade de transporte de vazão, mesmo depois das modificações propostas nesse trabalho.

O trecho mais a montante do sistema (1-2 Figura 4.21) não possui espaço disponível

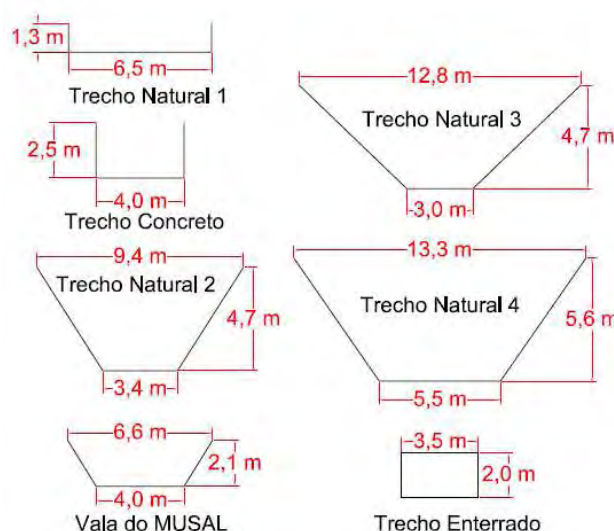


Figura 4.24: Dimensionamento estabelecido para as seções dos trechos d'água. Escala: 1:10.

para continuar em seção natural, logo foi dimensionado em concreto liso com Coeficiente de Manning de $0,015 \text{ s/m}^{\frac{1}{3}}$. É importante ressaltar, que essa solução para o trecho aumenta o pico de vazão nos trechos do arroio a jusante, mas impede que o excesso de fluxo escoe superficialmente atingindo os hangares do MUSAL.

A verificação da existência de uma camada espessa de sedimentos nos trechos a jusante do “Trecho Concreto” motivou a especificação de um afundamento de 60 cm na altura desses trechos. Acredita-se que grande parte, senão todo, acréscimo da altura necessário será dado pelo simples desassoreamento do Arroio.

Propõem-se que as declividades dos trechos “Trecho Natural 2” e “Vala do MUSAL” sejam aumentadas. No primeiro, devido à manutenção da cota de montante, pois o trecho de montante não sofrerá variação de cota e o aprofundamento proposto acontecerá de forma uniformemente distribuído, ao longo do seu comprimento até o total de 60 cm a jusante. No segundo, a cota de montante, também não será alterada e a cota de jusante se ajustará com a cota de jusante do “Trecho Natural 2”.

Para a canalização enterrada, que atravessa a pista de pousos e decolagens, foi dimensionada uma aduela de concreto com dimensões comerciais de 2,0 m de altura e 3,5 m de largura. Essa galeria possui mais de 1 km de extensão e qualquer intervenção pesada nessa galeria pode inviabilizar as operações do aeródromo. Logo, essa foi projetada com altura e pontos de visitas suficientes para que seja possível a entrada para manutenção.

A Figura 4.24 mostra as seções dimensionadas para cada trecho d'água.

A Tabela 4.19 apresenta as características dos trechos dimensionados.

Trecho d'água	Cota de fundo montante	Cota de fundo jusante	Declividade	n
	[m]	[m]	[m/m]	[s/m ^{1/3}]
Trecho Natural 1	48,3	40,0	0,0094	0,0150
Trecho Concreto	40,0	33,8	0,0100	0,0160
Trecho Natural 2	33,8	30,1	0,0067	0,0400
Vala do MUSAL	31,9	30,1	0,0032	0,0400
Trecho Natural 3	30,1	29,0	0,0053	0,0400
Trecho Natural 4	29,0	19,6	0,0072	0,0400
Trecho Enterrado	28,6	20,7	0,0076	0,0150

Tabela 4.19: Características das seções dimensionadas.

Trecho d'água	Vazão máxima $Tr=25$	Vazão máxima (31/01/2006)	Capacidade de Vazão
	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]
Trecho Natural 1	47,26	50,17	52,08
Trecho Concreto	60,49	62,80	66,99
Trecho Natural 2	62,66	66,81	101,35
Vala do MUSAL	10,59	8,84	18,04
Trecho Natural 3	71,38	74,99	113,58
Trecho Natural 4	75,44	84,09	220,30
Trecho Enterrado	33,03	30,87	38,75

Tabela 4.20: Picos de vazão atualizados e capacidade de vazão para os trechos dimensionados.

O dimensionamento proposto altera o pico de vazão de acordo com a Tabela 4.20. Nessa tabela, também é apresentada a capacidade de vazão de cada trecho dada pela Equação 2.21.

Verificada a capacidade de transporte de vazão das seções dimensionadas, foram calculadas as alturas das lâminas líquidas e o percentual de borda livre. Essas informações estão presentes na Tabela 4.21.

Observa-se que os trechos de interesse para os problemas de alagamentos nos hangares do MUSAL, “Trecho Natural 2”, “Vala do MUSAL” e “Trecho Natural 3” possuem borda livre entre 20 % e 30 %, para a chuva de projeto, conforme sugerido por [19], para canais abertos.

Trecho d'água	Lâmina líquida $Tr=25$ anos	Borda Livre	Lâmina líquida (31/01/2006)	Borda Livre
	[m]		[m]	
Trecho Natural 1	1,22	6%	1,27	2%
Trecho Concreto	2,31	8%	2,38	5%
Trecho Natural 2	3,67	22%	3,80	20%
Vala do MUSAL	1,53	27%	1,37	35%
Trecho Natural 3	3,74	20%	3,82	18%
Trecho Natural 4	3,10	45%	3,30	41%
Trecho Enterrado	1,77	11%	1,68	16%

Tabela 4.21: Lâmina líquida e borda livre para as chuvas de projeto e simulada.

O trecho de concreto e o a montante dele não respeitam essa regra, possuindo maior risco de enchentes na parte urbana e consequentemente, de escoamento superficial que pode atingir os hangares do MUSAL. A adoção desse critério de projeto, com menor margem de segurança para os dois trechos iniciais, decorre do fato dos trechos terem capacidade de vazão tanto para a chuva de projeto quanto para a simulada, que se mostrou o evento mais crítico já registrado. A não alteração dos 621 m do trecho existente de concreto impactará bastante na diminuição dos gastos das intervenções e viabilidade desse projeto.

Para o “Trecho Natural 4”, que já possuía capacidade de transporte suficiente, o simples desassoreamento e readequação das margens do trecho, excede a sugestão de folga.

Para tubulações fechadas, [19] recomenda borda livre de 10 % a 20 %, o que foi obedecido no dimensionamento da aduela enterrada.

Para a chuva simulada de 31/01/2006, a seção dimensionada também gera folgas na altura.

Recomenda-se ainda, que seja feita uma manutenção periódica no sistema de drenagem, assim como recomendam diversos autores, entre eles [4] e [13], para que sejam mantidos os coeficientes de Manning utilizados para o dimensionamento.

Capítulo 5

Conclusões

Os fatores causadores de enchentes nos hangares do MUSAL foram identificados e quantificados com sucesso. Conclui-se que as condições precárias de conservação dos trechos d'água da região são as principais fontes de enchentes no local em estudo.

A análise da topografia, para estabelecimento das áreas de contribuição e caminhos naturais de drenagem, utilizando o SIG gerou resultados satisfatórios, mesmo para a região em estudo que possui alta taxa de urbanização.

Os registros de chuva obtidos para a região, após separação dos dados feita pelo programa implementado nesse estudo para o caso geral, resultaram em uma equação IDF, com excelente ajuste $R^2 = 0,987$.

Os métodos indiretos de correlação precipitação-vazão nas bacias possibilitaram a previsão de vazão, de forma macro, sem que fossem consideradas todas as interferências reais dos sistemas de microdrenagem.

O método de amortecimento de enchentes em canais viabilizou a obtenção dos hidrogramas de entrada e saída dos trechos em estudo, sendo adequadamente consideradas as alocações de espaços e os retardamentos dos picos de cheias, que acontecem nas calhas dos canais.

Toda metodologia adotada pôde ser comparada e validada para a região urbanizada em estudo, por meio da simulação do evento chuvoso do dia 31/01/2006, que causou muitos prejuízos ao patrimônio da união e que foi adequadamente registrado, possibilitando a comparação com os resultados da modelagem para efeito de validação.

A falta de dados observados de vazões no Arroio dos Afonsos dificultou a calibração dos parâmetros adotados na modelagem, porém não se mostrou impeditiva para redizer os hidrogramas ou para a realização de projetos de dimensionamentos.

A proposta de solução estabelecida se mostra viável no âmbito do Comando da Aeronáutica, pois com o foco nos hangares do MUSAL, os dimensionamentos propostos são, na maioria dos casos, apenas readequação das condições esperadas para trechos de seção natural, com manutenção, alargamentos e desassoreamentos menores que 60 cm. Apenas na seção da Vala do MUSAL, será necessária uma intervenção que excede esse limite, mas há espaço para o dimensionamento proposto e esse trecho é considerado pequeno, com 575,5 m de extensão, o que impactará pouco o custo total da obra.

5.1 Sugestões de Continuação de Trabalho

A identificação do tipo de solo para aplicação no modelo precipitação-vazão foi realizada por meio dos mapas do projeto RADAMBRASIL. Esses mapas têm escala de 1:1.000.000, e não são capazes de levantar com precisão a variação do solo em toda a área de contribuição analisada.

Para aumentar a precisão do modelo, sugere-se que seja estabelecida uma malha de coleta para análise do solo. As características do relevo devem ser consideradas para otimizar os pontos de coleta. Dessa forma, um novo mapa de solos deve ser gerado para a região.

Essa extensão não aumentará a vazão obtida nesse trabalho, pois foi considerada a condição mais crítica para o escoamento, com solo argiloso em toda a extensão.

Para um projeto real de macrodrenagem do Campo dos Afonsos deve-se considerar toda a bacia em que o hangar está inserido, até a chegada na Baía da Guanabara.

A mudança de foco, do hangar do MUSAL para toda a área urbana, é a continuação natural para trabalhos futuros, sendo necessário para tanto dados como: levantamento do sistema de drenagem urbana de toda a área de contribuição e verificação das hipóteses assumidas na Seção 3.2.

Uma modelagem em três dimensões pode ser utilizada em trabalhos futuros, a fim de considerar as acentuadas curvas nos canais e para avaliar a sensibilidade do modelo aqui aplicado com relação aos efeitos de jusante, no caso de confluência de fluxo.

Referências

- [1] SIMÕES, F. F.; TAMAMOTO, L. A. P. **Estudo do sistema de drenagem do Campos dos Afonsos**. Rio de Janeiro: COMGAP, Diretoria de Engenharia da Aeronáutica, 2006. (Nº 09/EP-30/06).
- [2] RIO DE JANEIRO. Subsecretaria de Gestão das Bacias Hidrográficas (Rio-Águas). **Pontos críticos de enchentes**. 2010. Disponível em: <<http://www.riocomovamos.org.br/arq/pontoscriticosenchentes.pdf>>. Acesso em: 09 mar. 2011.
- [3] SHEAFFER, J. R.; WRIGHT, K. R. **Urban storm drainage management**. New York: Marcel Dekker, 1982.
- [4] CANHOLI, A. P. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005.
- [5] FELGUEIRAS, C. A.; CÂMARA, G. Modelo numérico de terreno. In: CÂMARA, Gilberto; DAVIS, Clodoveu; MONTEIRO, Antônio Miguel Vieira.(Ed.). **Introdução a ciência e a geoinformação**. 2.ed. São José dos Campos; INPE, 2001. Apostila de Curso SER-300 introdução ao geoprocessamento.. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/cap7-mnt.pdf>>. Acesso em: 01 set. 2011.
- [6] CÂMARA, G. Representação computacional de dados geográficos. In: CASANOVA, M.; CÂMARA, Gilberto; DAVIS, Clodoveu; VINHAS, L. ; RIBEIRO, G.(Ed.). **Banco de dados geográficos**. São José dos Campos: Mundo-Geo, 2005. Curso SER-300 introdução ao geoprocessamento. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/livros/bdados/cap1.pdf>>. Acesso em: 01 set. 2011.
- [7] MARTINS, D. **Aplicação de técnicas alternativas na mitigação de inundações na bacia de Ribeirão dos Putins**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia de

- Infra-Estrutura Aeronáutica) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos.
- [8] LOPES, W. A. B. **Análise comparativa de impactos hidrológicos causados pelo adensamento urbano nas bacias hidrográficas do rio Pararangaba e do Ribeirão Vidoca em São José dos Campos, SP.** 2005. 167p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Infra-Estrutura Aeronáutica) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos.
- [9] ENOMOTO, C. F. **Método para elaboração de mapas de inundação estudo de caso na bacia do rio Palmital, Paraná.** 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba
- [10] VENDRAME, I. F.; ARANHA, C. H.; CESCO, D. **Hidrologia.** Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos: 2007. Apostila do curso de HID-41.
- [11] WILKEN, P. S. **Engenharia de drenagem superficial.** São Paulo: Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 1978.
- [12] CENTER FOR IN WATER RESOURCES. **ArcGIS hydro data model documentation.** 2000. Austin: University of Texas at Austin, Consortium for GIS in Water Resources. Disponível em: <www.cwrw.utexas.edu/gis/gishydro00/GISHydro2000.htm>. Acesso em: 09 mar. 2011.
- [13] TUCCI, C. E. M. **Drenagem urbana.** Porto Alegre: Ed. da Universidade/UFRGS/ABRH, 1995.
- [14] VILLANUEVA, A. **Manual de fundamentos IPHS1.** Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS, 2004.
- [15] TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação.** Porto Alegre: Ed. da Universidade/UFRGS/ABRH: EDUSP, 1993.
- [16] GLOBAL LAND COVER FACILITY. **Earth science data interface.** 2004. Disponível em: <<http://glcfapp.glcf.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>>. Acesso em: 04 abr. 2011.
- [17] RIO DE JANEIRO. **Alerta Rio.** 2011. Disponível em: <<http://www0.rio.rj.gov.br/alertario/>>. Acesso em: 20 maio 2011.

-
- [18] EQUIPE TÉCNICA DA RIO-ÁGUAS. **Instruções Técnicas para elaboração de estudos hidrológicos e dimensionamento hidráulico de sistemas de drenagem urbana.** Rio de Janeiro: Subsecretaria de Gestão de Bacias Hidrográficas - Rio-Águas. 2010.
- [19] PORTO, R. M. **Hidráulica básica.** 2ed. São Carlos: EESC/USP, 1999.

Apêndice A

Código fonte do programa implementado em Excel/VBA para análise das séries históricas de precipitações

Esse programa possibilitou a análise da série histórica obtida da estação pluviométrica e a geração de novas séries anuais e parciais em qualquer duração de interesse.

Pode-se utilizar esse programa para separar as ocorrências chuvosas de qualquer estação pluviométrica, que tenha dados de 15 em 15 minutos, com objetivo de gerar equações IDF. Para tanto, a metodologia de separação de séries anuais está completa e a de séries parciais deve-se atentar para o comentário feito no código fonte do programa, pois precisa de um pós-processamento manual.

A Figura A.1 apresenta o código fonte implementado e a Figura A.2 ilustra as saídas do programa, para o ano de 2008, com preenchimento da célula na cor cinza e algumas das entradas com na cor branca.

```

Sub Macro1()
'
' Macro1 Macro
' Macro gravada em 26/5/2011 por Bruno Ferreira do Nascimento.
' Para considerar a continuidade de um dia para outro, foi transposto 240 minutos
' (16 valores) continuando o dia seguinte.
'
For l = 0 To 10
'Variação das durações: 15 30 45 60 90 120 180 240 360 720 1440
duracaochuva = Cells(3, l + 116)
duracao15 = duracaochuva / 15
linha = 4
'Os registros de precipitações começam na linha 4
saida = 0
auxi = 0
auxl = 0
aux = 0
While Cells(linha, 1) <> ""
'Os registros de precipitações terminam em linhas diferentes,
'dependendo se é ano bissexto ou não.
'Esse while resolve essa questão, terminando na linha certa.
For i = 2 To 113 - duracao15 + 1
'Variação da hora que a chuva inicia durante o dia,
'discretizada de 15 em 15 minutos.
chuva = 0
For j = 0 To duracao15 - 1
'Soma da precipitação acumulada para a duração em análise.
chuva = chuva + Cells(linha, i + j)
Next j
If chuva > saida Then
'Atualização da máxima precipitação.
saida = chuva
auxi = i
auxl = linha
'Registro do momento da máxima precipitação.
End If
If chuva > Cells(1, l + 116) Then
'Comparação para saber se o evento é considerado crítico,
'por séries parciais.
Cells(aux + 9, l + 116) = chuva
aux = aux + 1
'Não foi impedido a plotagem de mais de um
'ponto para uma mesma ocorrência chuvosa, pois
' no presente trabalho essa identificação pode
'ser feita em um pós-processamento manual, ficando
'essa tarefa como sugestão para trabalhos futuros.
'

End If
Next i
linha = linha + 1
'Atualização do dia em análise.
Wend
Cells(4, l + 116) = saida
Cells(5, l + 116) = auxi
Cells(6, l + 116) = auxl
'Plotagem dos máximos anuais.
Next l
End Sub

```

Figura A.1: Código fonte, em VBA, para a separação dos dados de precipitação.

DK	DL	DM	DN	DO	DP	DQ	DR	DS	DT	DU	DV
1 Precipitações críticas (mm)	15	20,1	22,95	25,2	27,9	30	32,4	36	40	45	50
2 Numeração das colunas	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126
3 Duração (min.)	15	30	45	60	90	120	180	240	360	720	1440
4 Máximo prec. Anual (mm)	27,1	38,5	50,1	59,4	68,8	86,3	114,2	133,2	148,7	162,8	163,4
5 Coluna do máximo	59	58	77	77	77	58	58	55	55	55	12
6 Linha do máximo	11	11	51	51	51	11	11	11	11	11	11
7 Intensidade média (mm/h)	108,4	77,0	66,8	59,4	45,9	43,2	38,1	33,3	24,8	13,6	6,8
8	Registro de total precipitado acima do considerado crítico para séries parciais (mm)										
9	25	37,2	38,2	38,2	38,2	38,2	38,2	38,2	41,1	55	160,6
10	27,1	27,9	40,1	41,1	41,1	41,1	41,1	41,1	41,1	59,4	160,8
11	16	38,5	27,9	40,1	41,1	41,1	41,1	41,1	41,1	66,4	160,8
12	15,7	31,5	41,2	27,9	41,1	41,1	41,1	41,1	41,1	74,4	161
13	21,9	20,4	42,9	27,5	40,1	41,1	41,1	41,1	41,1	82,4	162,7
14	26,2	20,4	38,5	42,9	54,8	41,1	41,1	41,1	41,1	92,2	163,2
15		21,7	23	45,6	59	40,1	41,1	41,1	41,1	102,8	163,2
16		28,2	25,8	49,9	54,3	54,8	41,1	41,1	41,1	111,8	163,2
17		37,6	28,4	46,5	60,6	59,2	41,1	41,1	41,1	118,5	163,2
18		31,2	29,4	27,4	65,9	66,2	41,1	41,1	41,1	124,5	163,2
19		29,1	26,3	32,8	64,3	74	40,1	41,1	41,1	130,7	163,4
20		32,2	24,1	36,4	47,8	70,3	54,8	41,1	41,1	133,6	163,4
21			25,4	37,4	52,4	78,4	59,2	41,1	41,1	135,1	163,4
22			29,9	36,1	52,1	86,3	66,2	41,1	41,1	136,4	163,4
23			50,1	32,3	50,1	83,9	74,2	40,1	41,1	138,6	163,4
24			46,9	27,9	48,3	63,5	82,2	54,8	41,1	140,3	163,4
25			37,7	27,8	41,4	65,1	92	59,2	41,1	142,3	163,4
26			29,1	26,4	32,3	64,3	102,6	66,2	41,1	144,3	55,8
27			35,1	29,9	28,8	59,2	111,4	74,2	41,1	147,2	56,5
28			32,9	51,8	29	52,7	106,4	82,2	41,1	148,9	57,5
29				59,4	29,9	44,4	110,7	92	41,1	150,6	58,5
30				53,4	51,8	36	114,2	102,6	40,1	150,8	59,2
1998 1999 2000 2001 2002 2003 2004 2005 2006 2007 2008 2009 2010											

Figura A.2: Saída do programa implementado em excel VBA, para separação das precipitações.

Apêndice B

Características das áreas de contribuição para cálculo do CN

As Tabelas B.1, B.2, B.3, B.4, B.5, B.6 e B.7 mostram os resultados das composições das áreas para efeito de cálculo do valor do coeficiente CN, conforme apresentado 2.4.1.

Solo Grupo B		
	[km ²]	[%]
Zonas residenciais: menor que 500 m ² , média 65% impermeável	0,015	0,78%
Espaço Aberto: com relva em mais de 75% da área	0,062	3,28%
Bosques ou Zona Floresta: cobertura boa	0,073	3,83%
Total Solo Grupo B	0,150	7,88%
Solo Grupo C		
Espaço Aberto: com relva em mais de 75% da área	1,049	55,27%
Bosques ou Zona Floresta: cobertura ruim	0,700	36,85%
Total Solo Grupo C	1,749	92,12%

Tabela B.1: Características da área de contribuição (Nascente), para efeito do cálculo do CN.

Solo Grupo B		
	[km ²]	[%]
Zonas residenciais: menor que 500 m ² , média 65% impermeável	0,256	22,29%
Espaço Aberto: com relva em mais de 75% da área	0,423	36,87%
Total Solo Grupo B	0,679	59,16%
Solo Grupo C		
Espaço Aberto: com relva em mais de 75% da área	0,469	40,84%

Tabela B.2: Características da área de contribuição (Trecho Natural 1), para efeito do cálculo do CN.

Solo Grupo B		
	[km ²]	[%]
Zonas residenciais: menor que 500 m ² , média 65% impermeável	0,389	48,69%
Espaço Aberto: com relva de 50 a 75% da área	0,382	47,74%
Total Solo Grupo B	0,771	96,43%
Solo Grupo C		
Espaço Aberto: com relva de 50 a 75% da área	0,029	3,57%

Tabela B.3: Características da área de contribuição (Trecho Concreto), para efeito do cálculo do CN.

Solo Grupo B		
	[km ²]	[%]
Zonas residenciais: menor que 500 m ² , média 65% impermeável	0,142	26,66%
Espaço Aberto: com relva em mais de 75% da área	0,383	71,90%
Total Solo Grupo B	0,526	98,56%
Solo Grupo C		
Bosques ou Zona Floresta: cobertura ruim	0,008	1,44%

Tabela B.4: Características da área de contribuição (Trecho Natural 2), para efeito do cálculo do CN.

Solo Grupo B		
	[km ²]	[%]
Zonas residenciais: menor que 500 m ² , média 65% impermeável	0,216	41,84%
Espaço Aberto: com relva de 50 a 75% da área	0,112	21,66%
Total Solo Grupo B	0,328	63,50%
Solo Grupo C		
Espaço Aberto: com relva de 50 a 75% da área	0,189	36,50%

Tabela B.5: Características da área de contribuição (Vala do MUSAL), para efeito do cálculo do CN.

Solo Grupo B		
	[km ²]	[%]
Arruamentos e estradas:		
Asfaltadas e com drenagem de águas pluviais	0,126	9,16%
Zonas industrial	0,252	18,36%
Espaço Aberto: com relva em mais de 75% da área	0,742	53,99%
Bosques ou Zona Floresta: cobertura boa	0,254	18,49%
Total Solo Grupo B	1,373	100,00%

Tabela B.6: Características da área de contribuição (Trecho Natural 3), para efeito do cálculo do CN.

Solo Grupo B		
	[km ²]	[%]
Zonas residenciais: menor que 500 m ² , média 65% impermeável	0,629	42,08%
Zonas industrial	0,278	18,60%
Espaço Aberto: com relva em mais de 75% da área	0,199	13,31%
Total Solo Grupo B	1,106	73,98%
Solo Grupo C		
Espaço Aberto: com relva em mais de 75% da área	0,389	26,02%

Tabela B.7: Características da área de contribuição (Hangar), para efeito do cálculo do CN.

Apêndice C

Hidrogramas resultantes

Nesse apêndice são apresentados, entre as Figuras C.1 e C.28, os hidrogramas resultantes, obtidos como resultado da modelagem realizada no programa IPHS1, para as diversas condições estudadas.

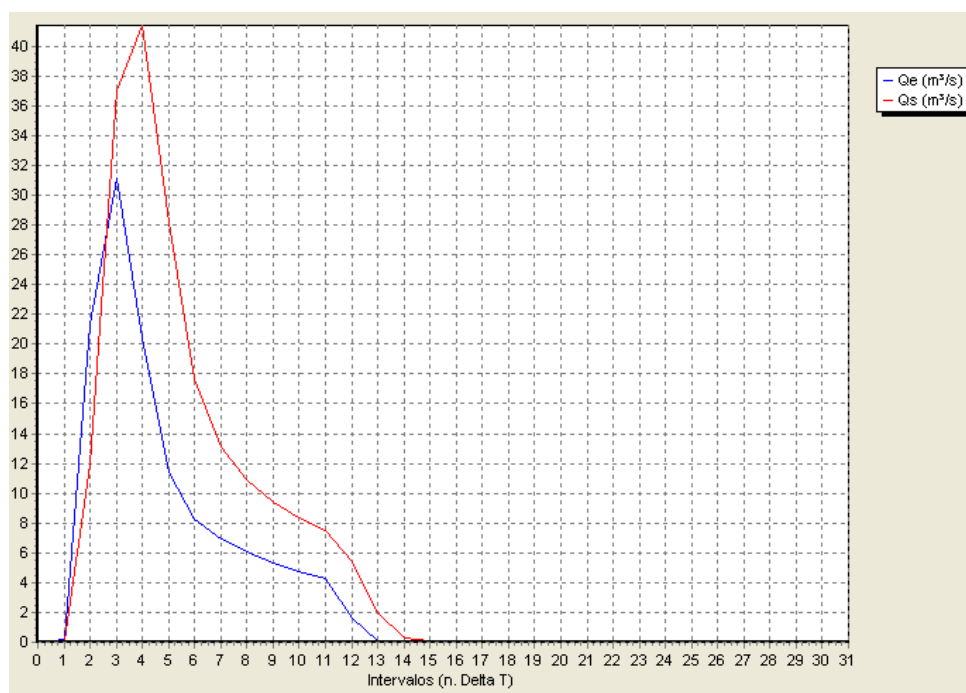


Figura C.1: Hidrograma de entrada (Q_e) e saída (Q_s), para a chuva de projeto e Trecho Natural 1, nas condições atuais. Cada intervalo: 15 minutos. Programa: IPHS1.

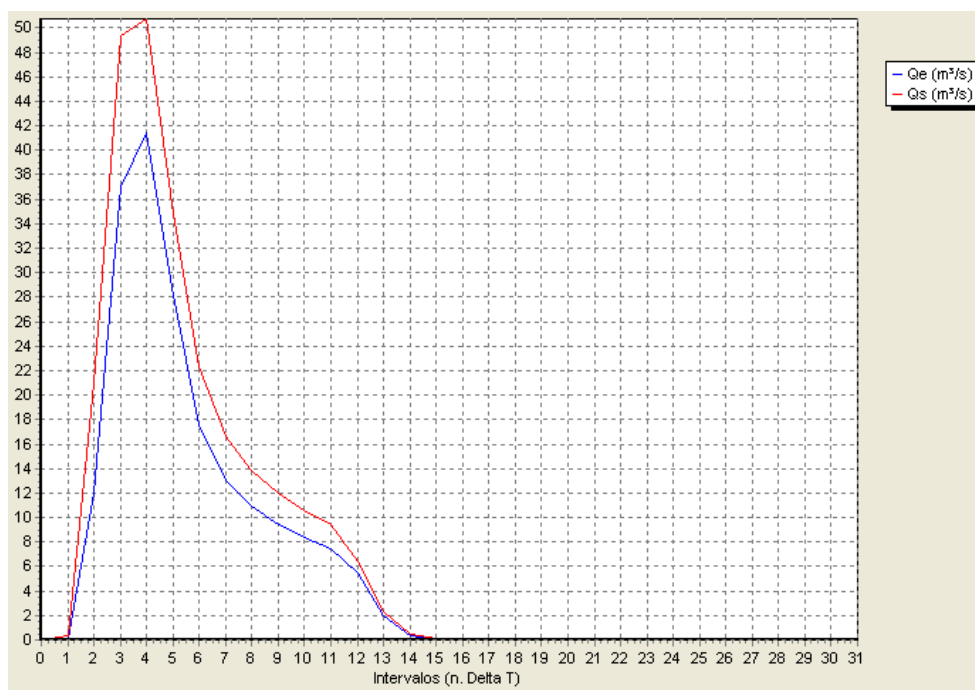


Figura C.2: Hidrograma de entrada (Q_e) e saída (Q_s), para a chuva de projeto e Trecho Concreto, nas condições atuais. Cada intervalo: 15 minutos. Programa: IPHS1.

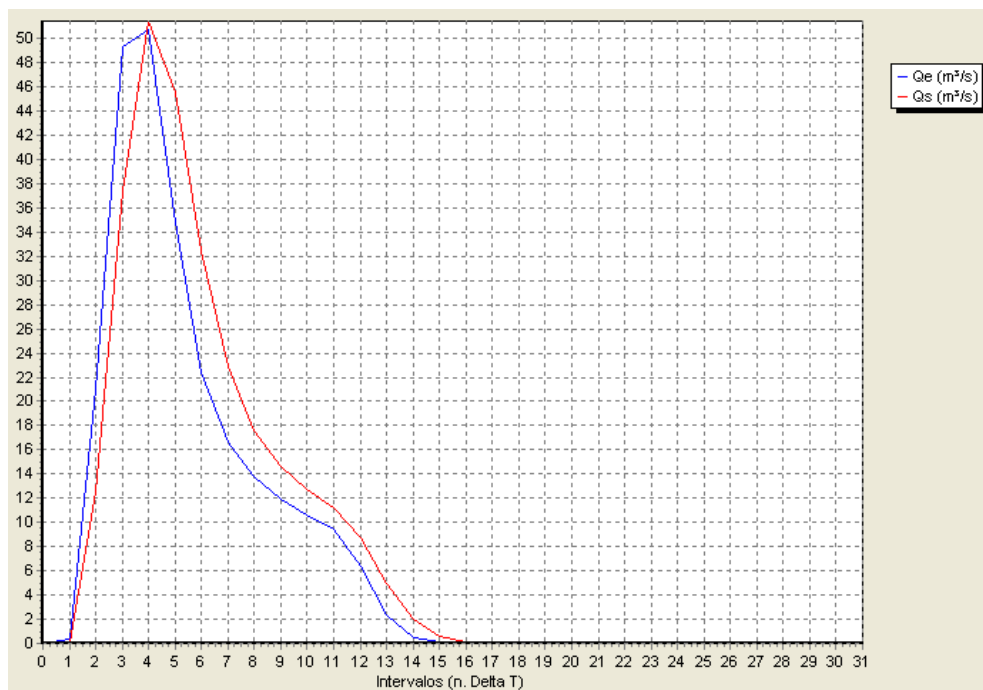


Figura C.3: Hidrograma de entrada (Q_e) e saída (Q_s), para a chuva de projeto e Trecho Natural 2, nas condições atuais. Cada intervalo: 15 minutos. Programa: IPHS1.

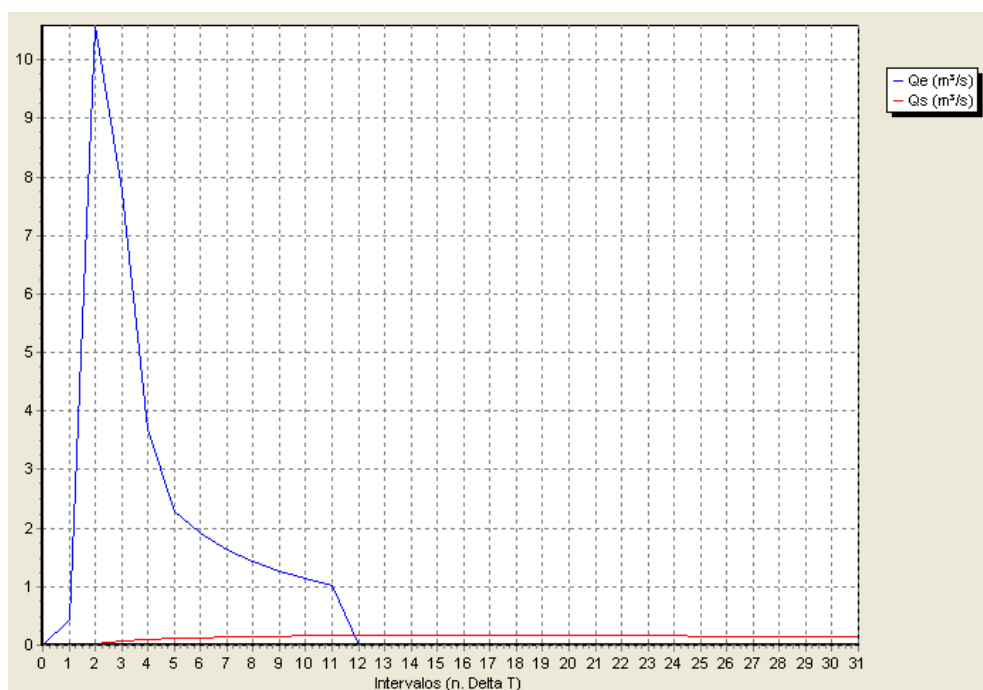


Figura C.4: Hidrograma de entrada (Q_e) e saída (Q_s), para a chuva de projeto e Vala MUSAL, nas condições atuais. Cada intervalo: 15 minutos. Programa: IPHS1.

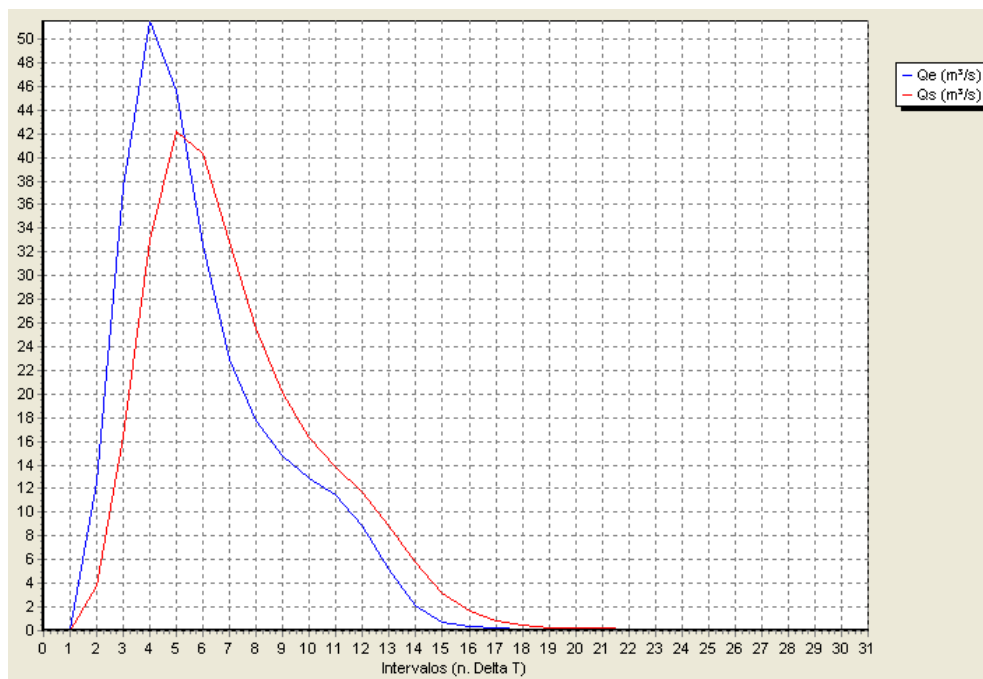


Figura C.5: Hidrograma de entrada (Q_e) e saída (Q_s), para a chuva de projeto e Trecho Natural 3, nas condições atuais. Cada intervalo: 15 minutos. Programa: IPHS1.

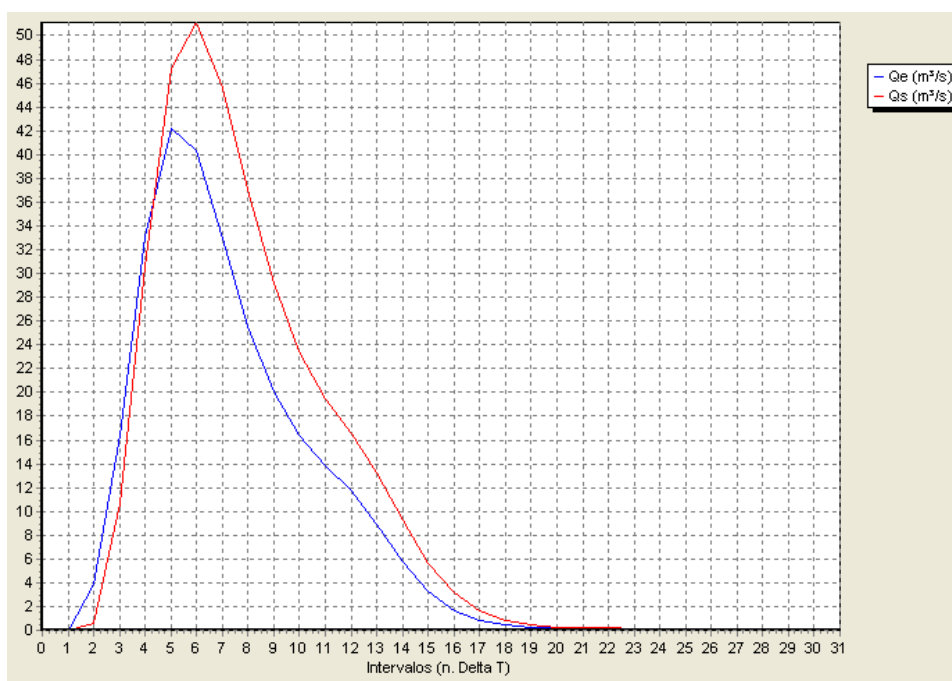


Figura C.6: Hidrograma de entrada (Q_e) e saída (Q_s), para a chuva de projeto e Trecho Natural 4, nas condições atuais. Cada intervalo: 15 minutos. Programa: IPHS1.

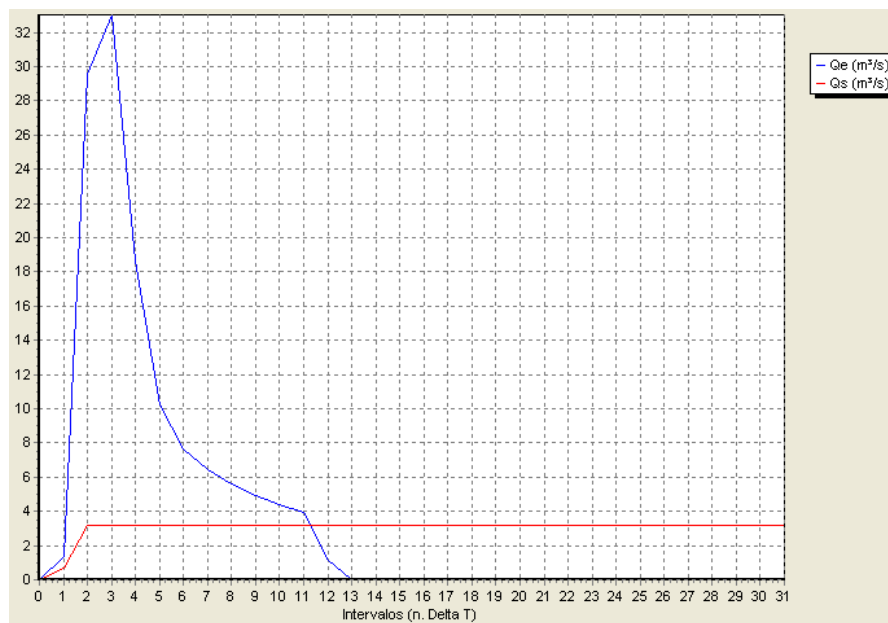


Figura C.7: Hidrograma de entrada (Q_e) e saída (Q_s), para a chuva de projeto e Trecho Enterrado, nas condições atuais. Cada intervalo: 15 minutos. Programa: IPHS1.

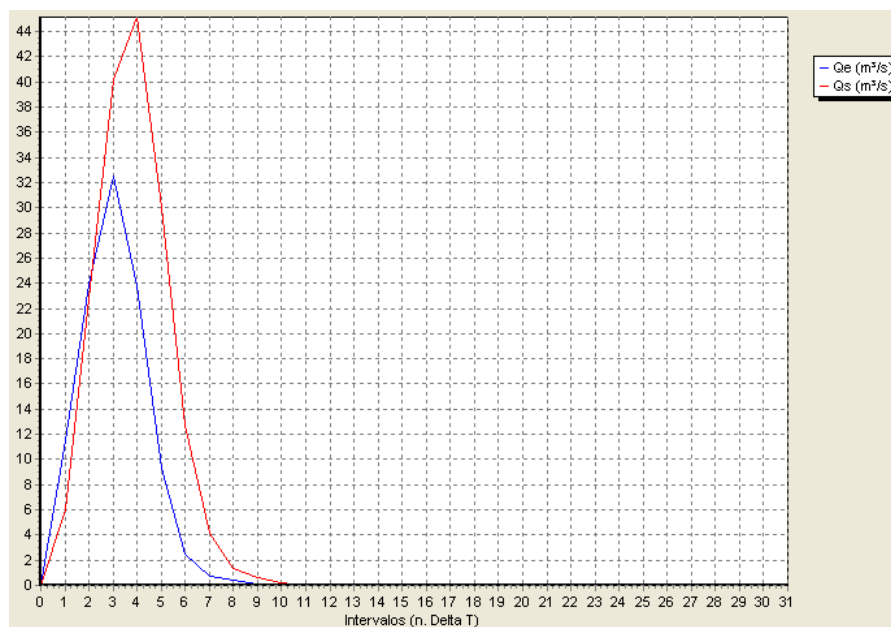


Figura C.8: Hidrograma de entrada (Q_e) e saída (Q_s), para a chuva simulada (31/01/2006) e Trecho Natural 1, nas condições atuais. Cada intervalo: 15 minutos. Programa: IPHS1.

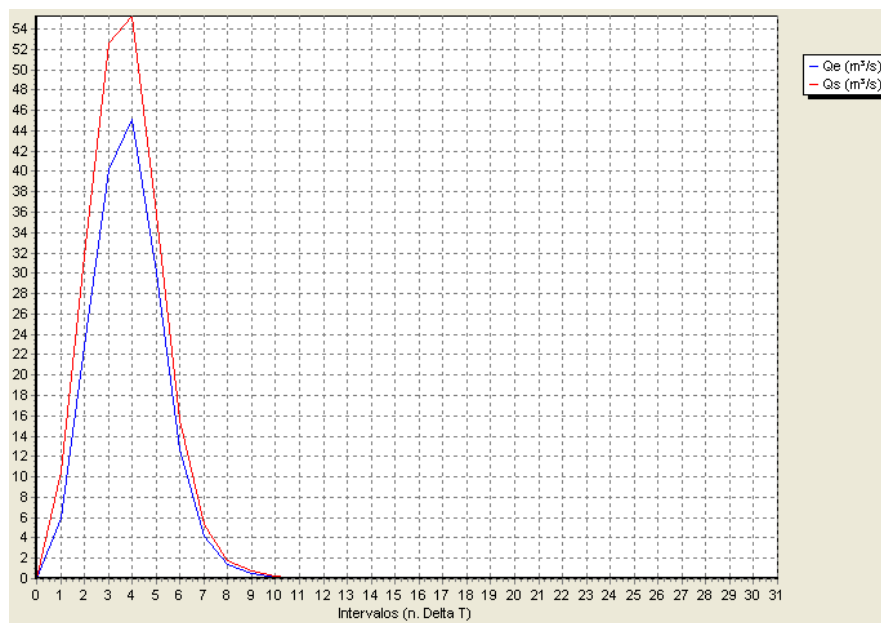


Figura C.9: Hidrograma de entrada (Q_e) e saída (Q_s), para a chuva simulada (31/01/2006) e Trecho Concreto, nas condições atuais. Cada intervalo: 15 minutos. Programa: IPHS1.

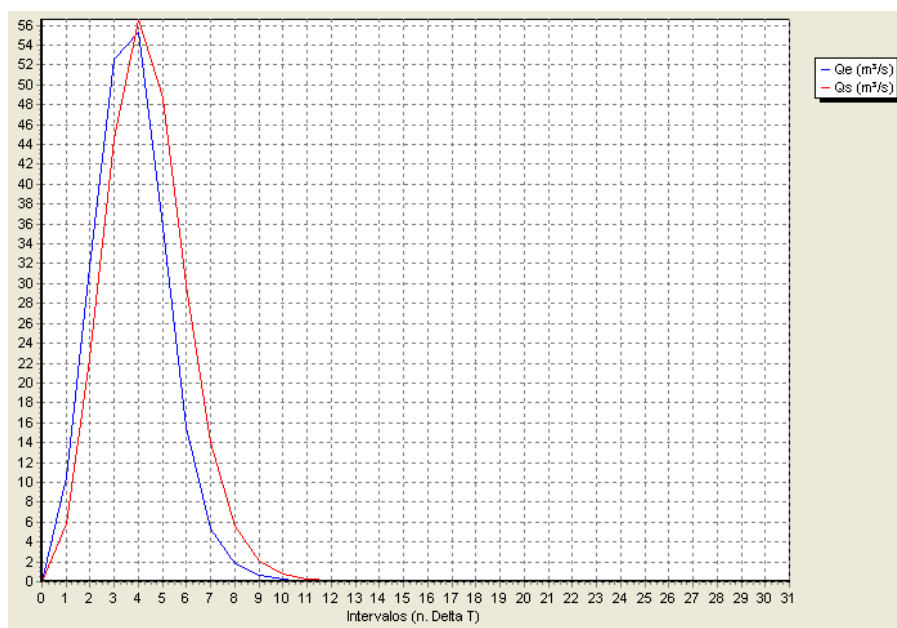


Figura C.10: Hidrograma de entrada (Q_e) e saída (Q_s), para a chuva simulada (31/01/2006) e Trecho Natural 2, nas condições atuais. Cada intervalo: 15 minutos. Programa: IPHS1.

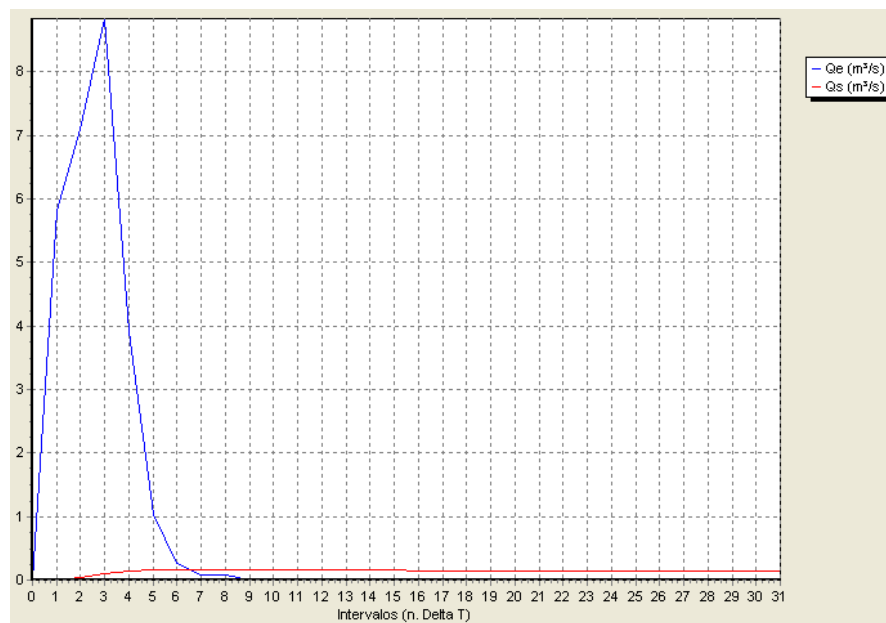


Figura C.11: Hidrograma de entrada (Q_e) e saída (Q_s), para a chuva simulada (31/01/2006) e Vala MUSAL, nas condições atuais. Cada intervalo: 15 minutos. Programa: IPHS1.

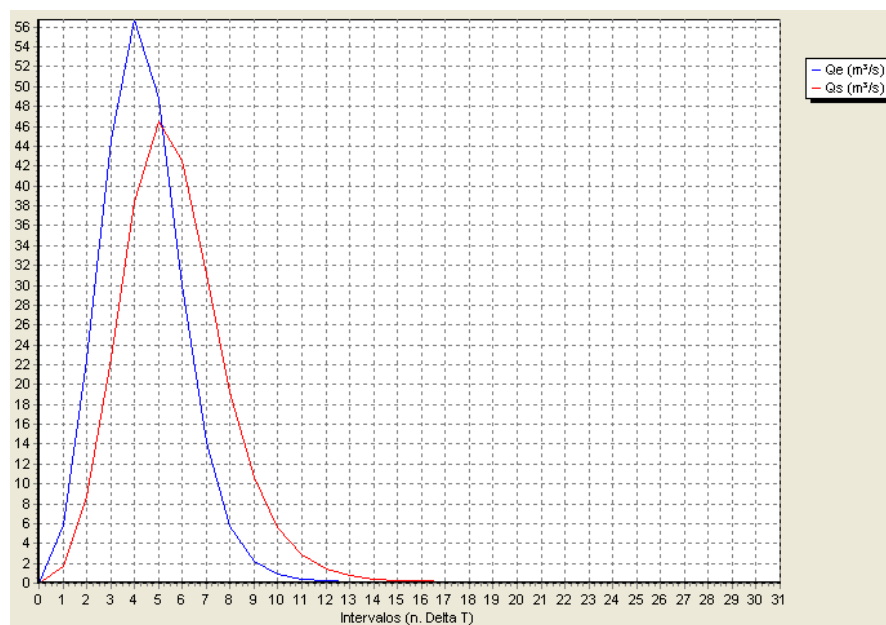


Figura C.12: Hidrograma de entrada (Q_e) e saída (Q_s), para a chuva simulada (31/01/2006) e Trecho Natural 3, nas condições atuais. Cada intervalo: 15 minutos. Programa: IPHS1.

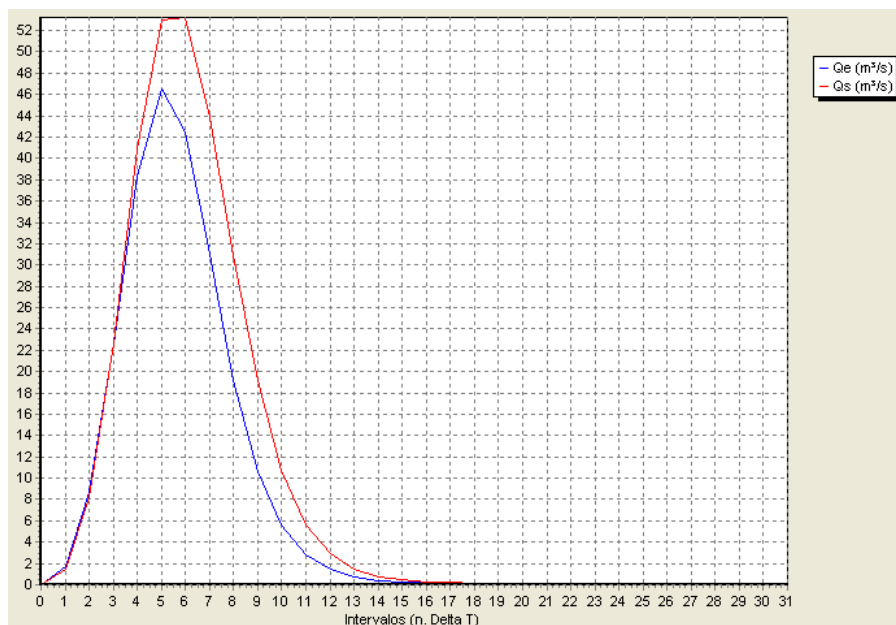


Figura C.13: Hidrograma de entrada (Q_e) e saída (Q_s), para a chuva simulada (31/01/2006) e Trecho Natural 4, nas condições atuais. Cada intervalo: 15 minutos. Programa: IPHS1.

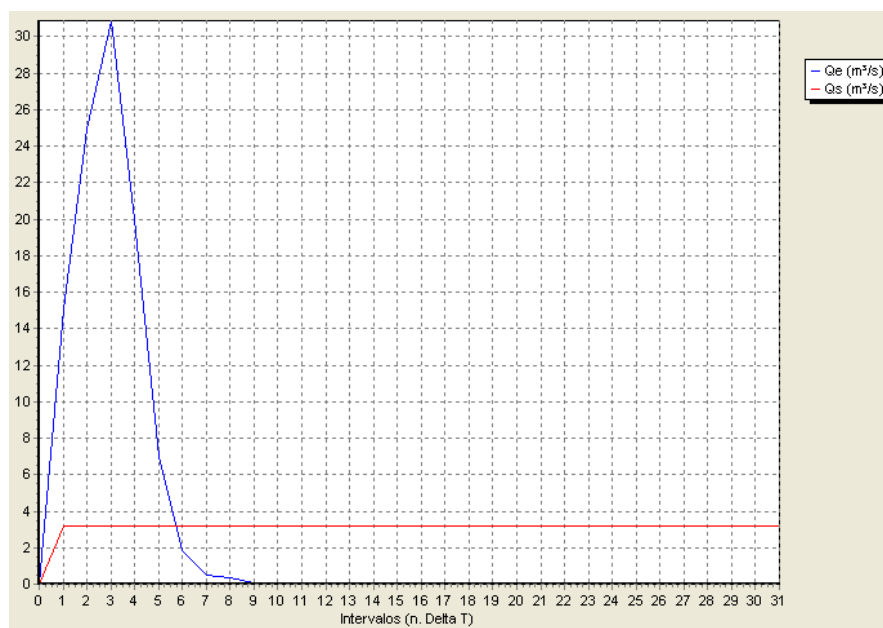


Figura C.14: Hidrograma de entrada (Q_e) e saída (Q_s), para a chuva simulada (31/01/2006) e Trecho Enterrado, nas condições atuais. Cada intervalo: 15 minutos. Programa: IPHS1.

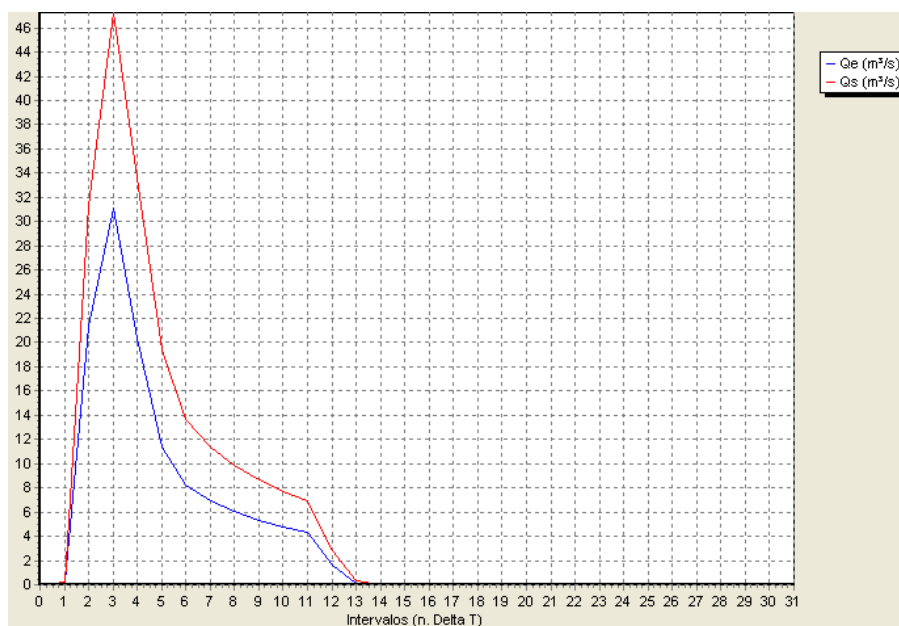


Figura C.15: Hidrograma de entrada (Q_e) e saída (Q_s), para a chuva de projeto e Trecho Natural 1, após dimensionamento proposto. Cada intervalo: 15 minutos. Programa: IPHS1.

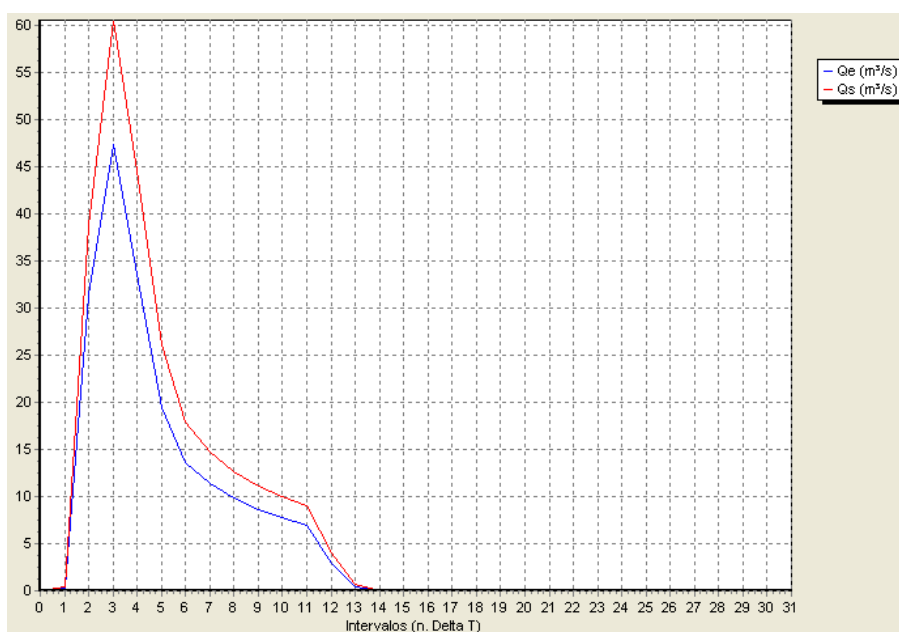


Figura C.16: Hidrograma de entrada (Q_e) e saída (Q_s), para a chuva de projeto e Trecho Concreto, após dimensionamento proposto. Cada intervalo: 15 minutos. Programa: IPHS1.

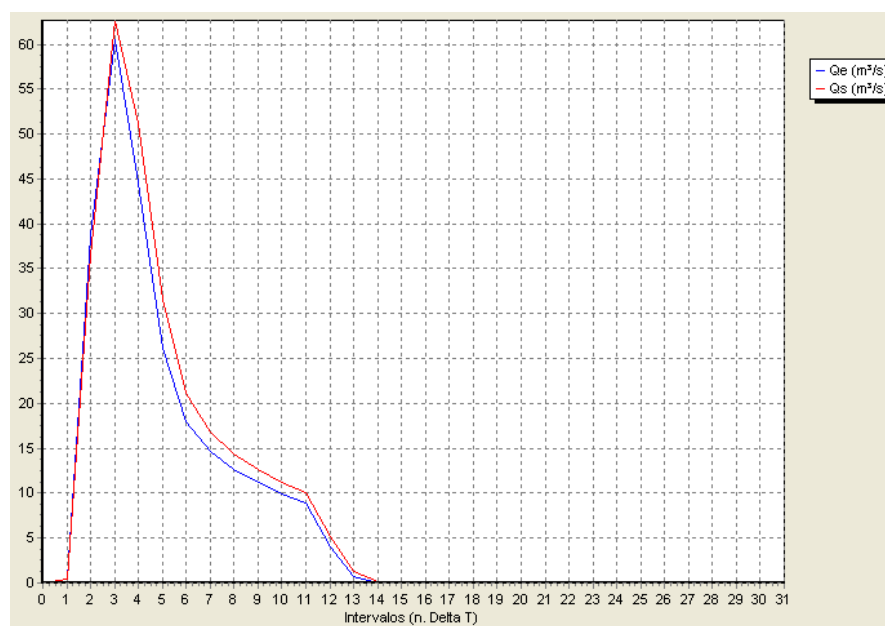


Figura C.17: Hidrograma de entrada (Q_e) e saída (Q_s), para a chuva de projeto e Trecho Natural 2, após dimensionamento proposto. Cada intervalo: 15 minutos. Programa: IPHS1.

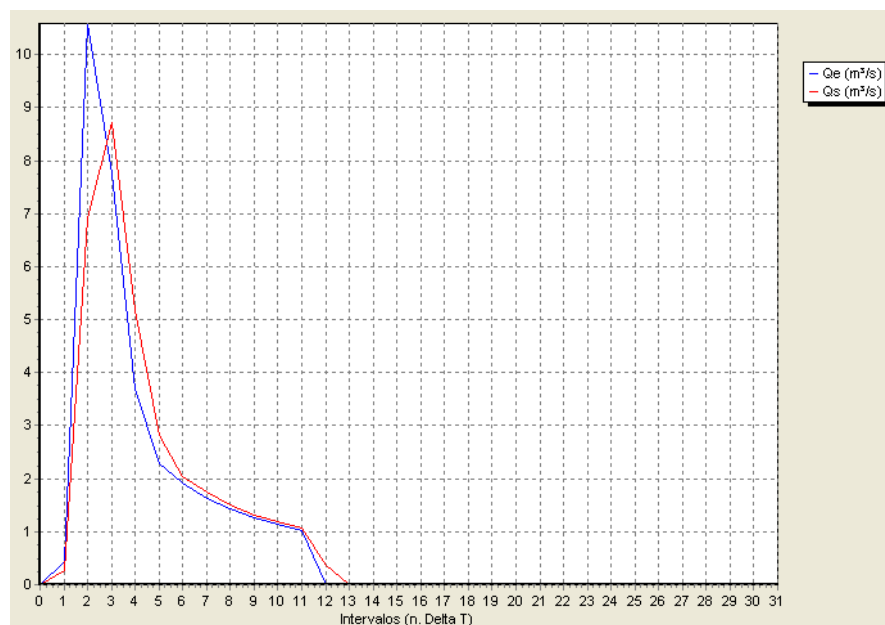


Figura C.18: Hidrograma de entrada (Q_e) e saída (Q_s), para a chuva de projeto e Trecho Vala MUSAL, após dimensionamento proposto. Cada intervalo: 15 minutos. Programa: IPHS1.

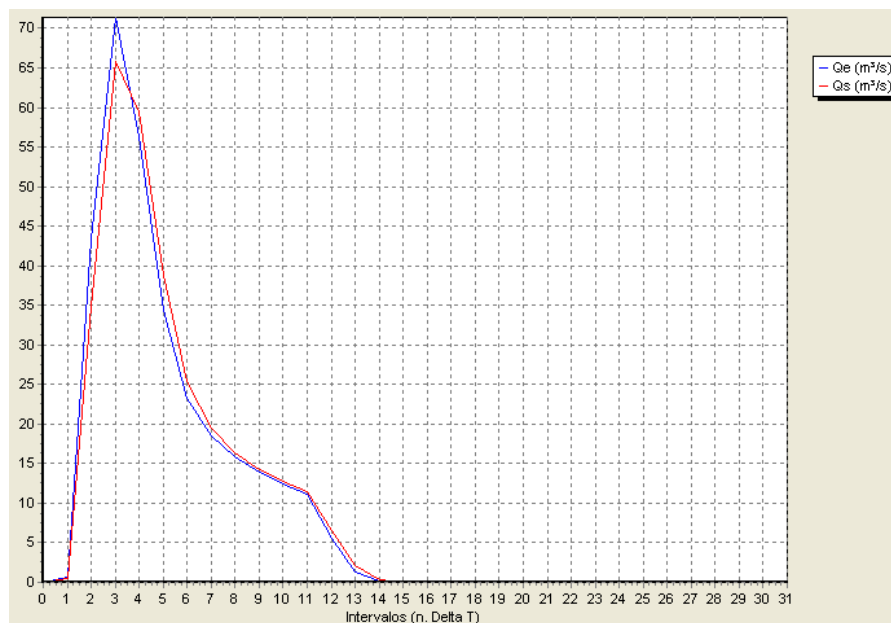


Figura C.19: Hidrograma de entrada (Q_e) e saída (Q_s), para a chuva de projeto e Trecho Natural 3 , após dimensionamento proposto. Cada intervalo: 15 minutos. Programa: IPHS1.

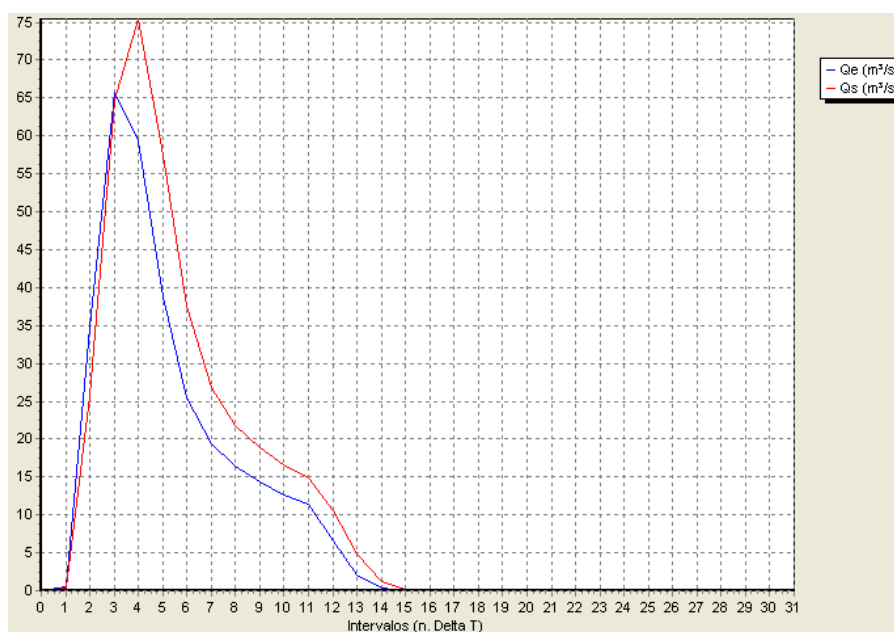


Figura C.20: Hidrograma de entrada (Q_e) e saída (Q_s), para a chuva de projeto e Trecho Natural 4 , após dimensionamento proposto. Cada intervalo: 15 minutos. Programa: IPHS1.

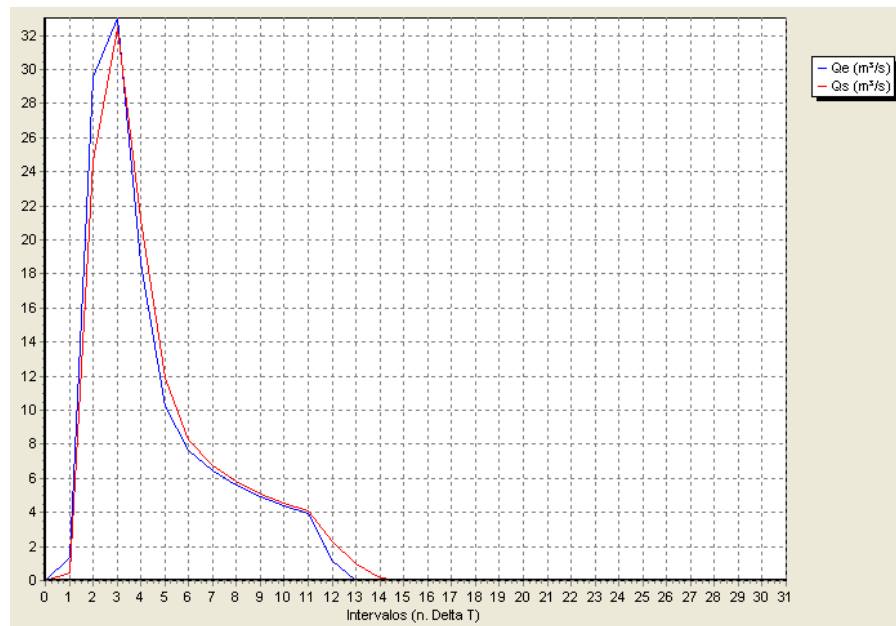


Figura C.21: Hidrograma de entrada (Q_e) e saída (Q_s), para a chuva de projeto e Trecho Enterrado, após dimensionamento proposto. Cada intervalo: 15 minutos. Programa: IPHS1.

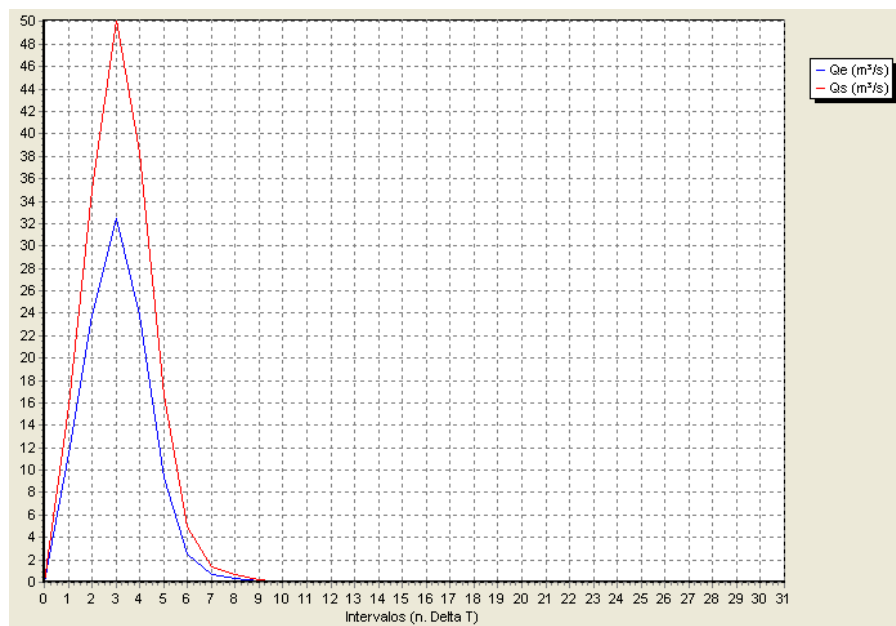


Figura C.22: Hidrograma de entrada (Q_e) e saída (Q_s), para a chuva simulada (31/01/2006) e Trecho Natural 1, após dimensionamento proposto. Cada intervalo: 15 minutos. Programa: IPHS1.

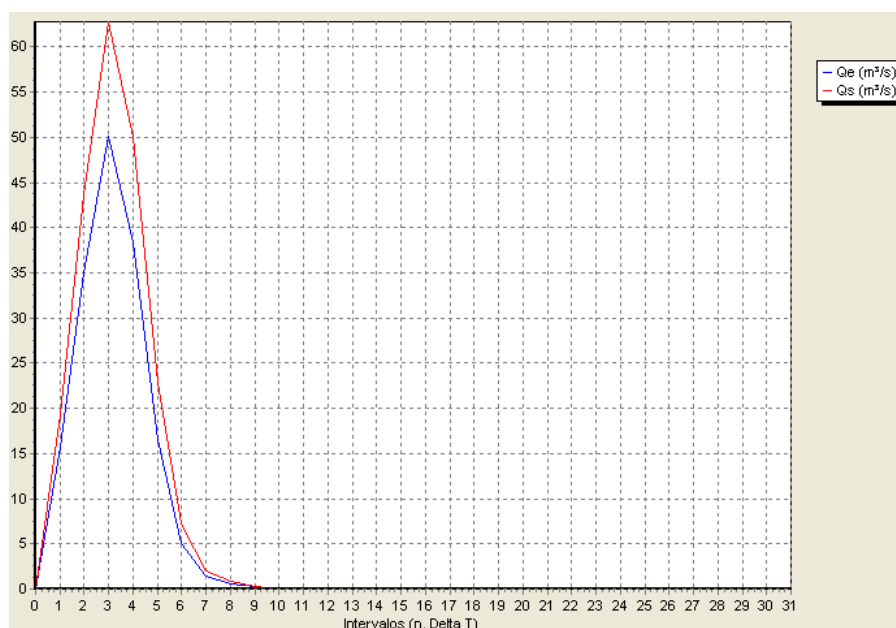


Figura C.23: Hidrograma de entrada (Q_e) e saída (Q_s), para a chuva simulada (31/01/2006) e Trecho Concreto, após dimensionamento proposto. Cada intervalo: 15 minutos. Programa: IPHS1.

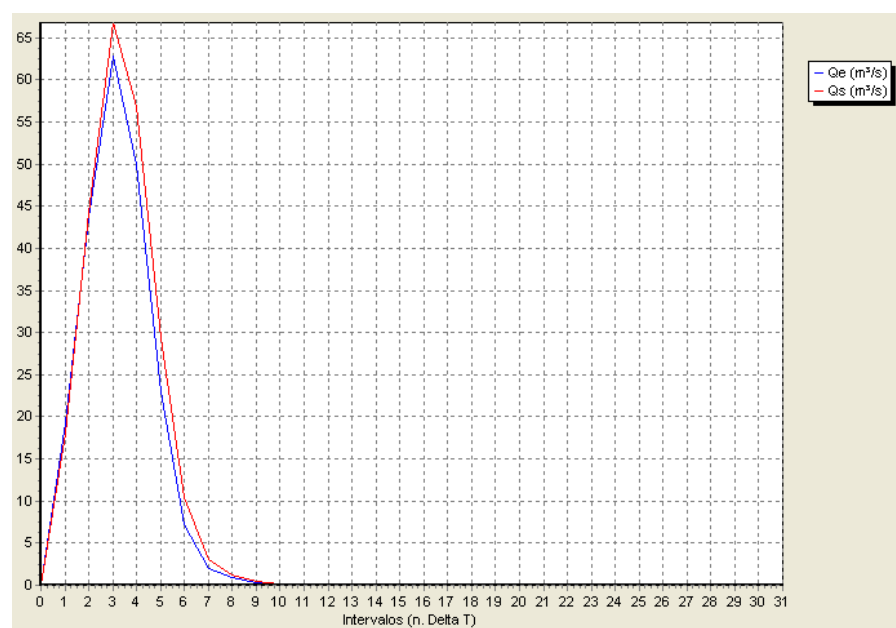


Figura C.24: Hidrograma de entrada (Q_e) e saída (Q_s), para a chuva simulada (31/01/2006) e Trecho Natural 2, após dimensionamento proposto. Cada intervalo: 15 minutos. Programa: IPHS1.

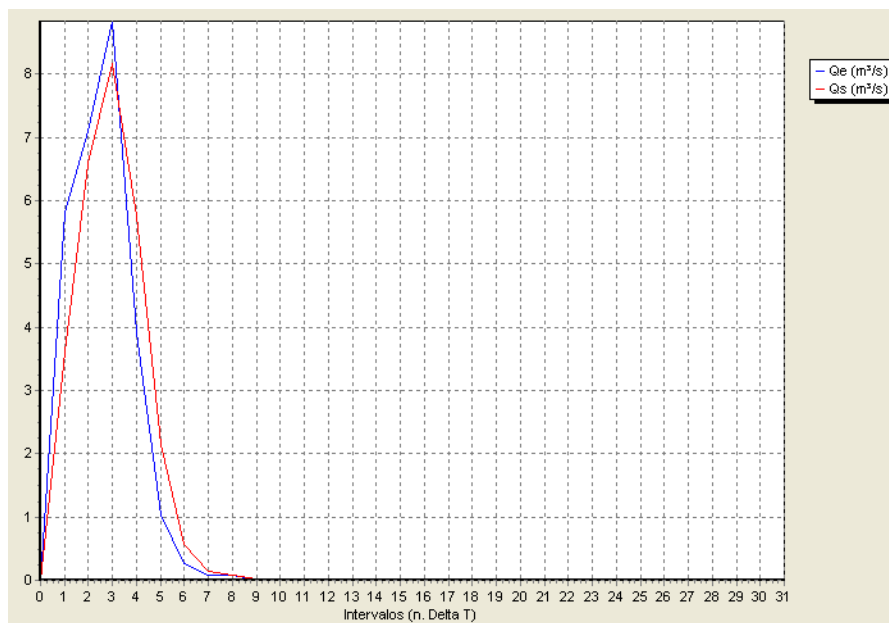


Figura C.25: Hidrograma de entrada (Q_e) e saída (Q_s), para a chuva simulada (31/01/2006) e Vala MUSAL, após dimensionamento proposto. Cada intervalo: 15 minutos. Programa: IPHS1.

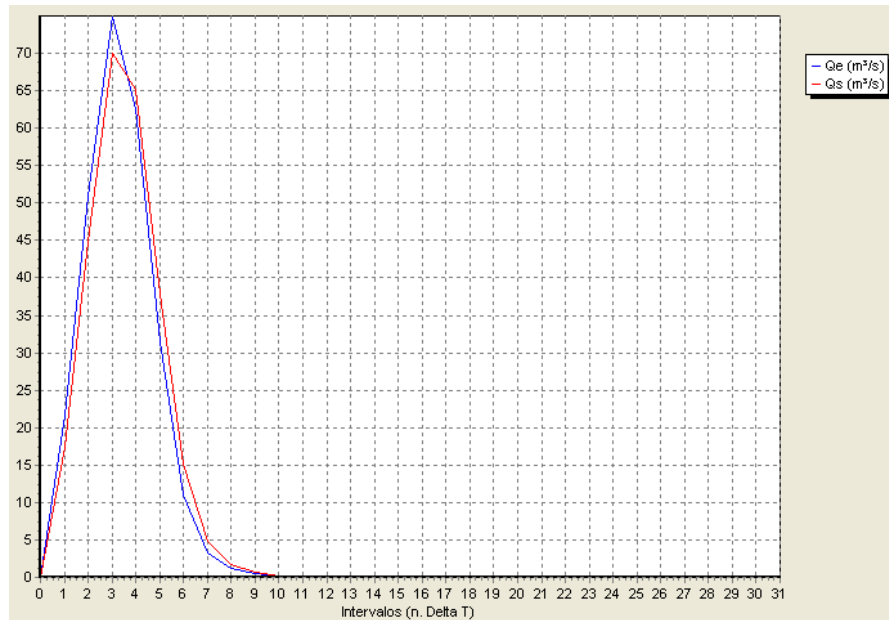


Figura C.26: Hidrograma de entrada (Q_e) e saída (Q_s), para a chuva simulada (31/01/2006) e Trecho Natural 3, após dimensionamento proposto. Cada intervalo: 15 minutos. Programa: IPHS1.

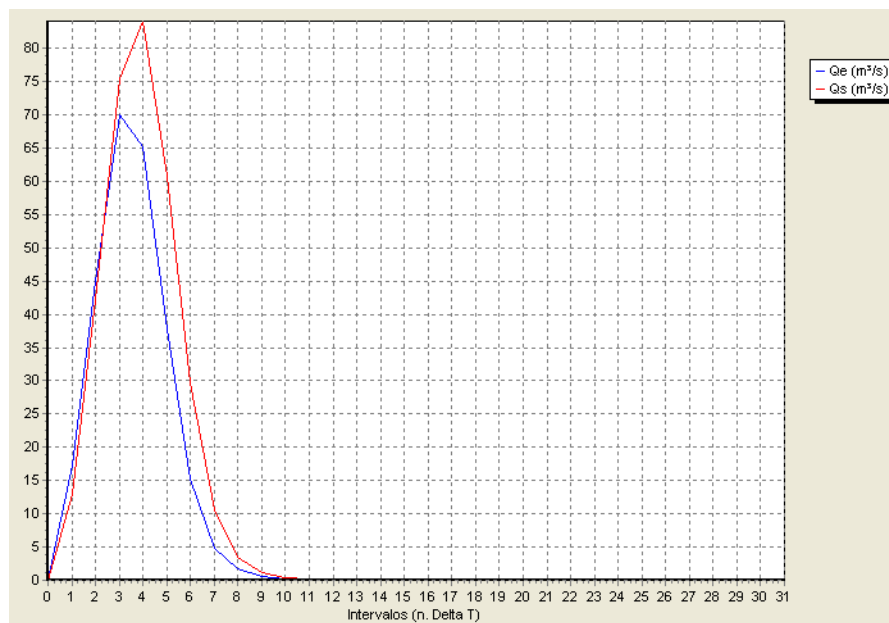


Figura C.27: Hidrograma de entrada (Q_e) e saída (Q_s), para a chuva simulada (31/01/2006) e Trecho Natural 4, após dimensionamento proposto. Cada intervalo: 15 minutos. Programa: IPHS1.

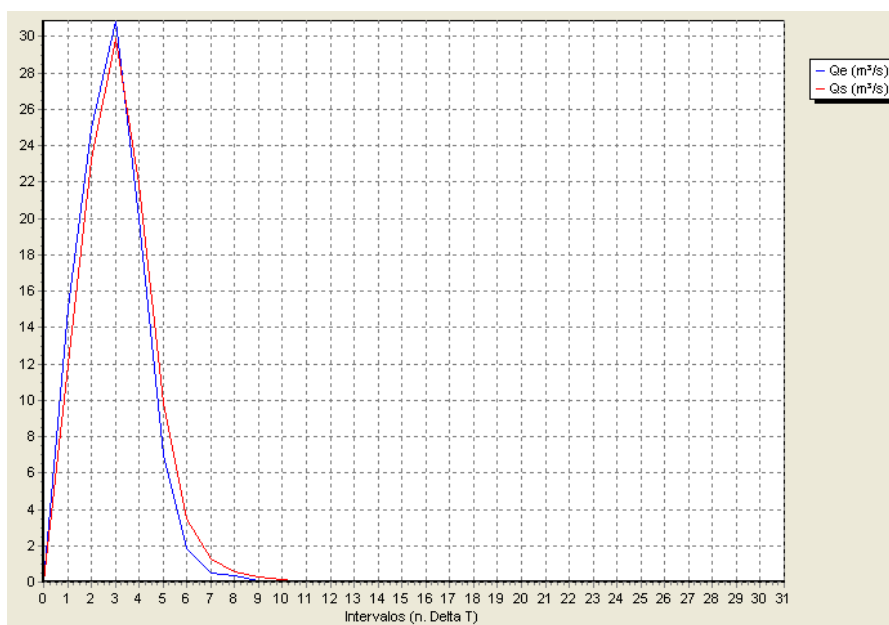


Figura C.28: Hidrograma de entrada (Q_e) e saída (Q_s), para a chuva simulada (31/01/2006) e Trecho Enterrado, após dimensionamento proposto. Cada intervalo: 15 minutos. Programa: IPHS1.

Anexo A

Levantamento topográfico da Base Aérea dos Afonsos - RJ

O levantamento a seguir foi realizado pela Diretoria de Engenharia da Aeronáutica originalmente em 2006, sendo complementado em 2011, para as seções do Arroio dos Afonsos e para a Vala do MUSAL. As especificações de complementação necessárias para utilização nesse projeto foram feitas pelo autor desse Trabalho de Graduação.

E = 2200

COMANDO DA AERONÁUTICA DIRETORIA DE ENGENHARIA SUBDIRETORIA DE ESTUDOS E PROJETOS DIVISÃO DE ENGENHARIA DE INFRA-ESTRUTURA EP-30			BASE AÉREA DOS AFONSOS – RJ PISTA DE POUSO DRENAGEM LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO		
UNIDADE	DATA	ESCALA	VISTO	1Ten Eng IES Batista	CREA
METRO	JUN/2006	1/2000	CONFERIDO	SO STP Hélio	CREA 02253-7 RJ
RJ014.26.UD001			TOPOGRAFO	3S SCF Acácio/3S STP Valiatti	CREA
			DESENHO	1S SDE Edilton	CREA
			EQUIPE	3S Acácio / 3S Valiatti / 3S Quitete	
			SUBSTITUI A		
FOI SUBSTITUIDO POR					
			MODIFICAÇÃO	DATA	RESPONSÁVEL

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO

1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO TC	2. DATA 20 de outubro de 2011	3. REGISTRO Nº DCTA/ITA/TC-028/2011	4. Nº DE PÁGINAS 115
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: Estudo de caso: enchentes no Museu Aeroespacial - análise de macrodrenagem utilizando SIG e modelo de previsão-vazão.			
6. AUTOR(ES): Bruno Ferreira do Nascimento			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: Enchentes; macrodrenagem; modelo precipitação-vazão; Sistema de Informações Geográficas; SIG; equação IDF; MUSAL; Campo dos Afonsos.			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Enchentes; Drenagem; Precipitação (Meteorologia); Áreas urbanas; Sistemas de informação geográfica; Estudo de casos; Engenharia civil.			
10. APRESENTAÇÃO: X Nacional Internacional ITA, São José dos Campos. Curso de Graduação em Engenharia Civil-Aeronáutica. Orientadora: Prof. Dr. Nadiane Smaha Kruk; co-orientador: Brig. Eng. Luiz Sérgio Heinzelmann. Defesa em 27 de outubro de 2011. Publicado em 2011.			
11. RESUMO: Alguns aeródromos do país sofrem com problema de macrodrenagem, causados por diversos fatores, tais como: crescimento da urbanização; falta de capacidade ou de manutenção do sistema de macrodrenagem e até mesmo a intensificação dos regimes de chuvas decorrentes das mudanças climáticas. O Museu Aeroespacial (MUSAL), localizado na área do Campo dos Afonsos, apresenta um histórico de enchentes com consequente prejuízo ao patrimônio da União. A Diretoria de Engenharia da Aeronáutica (DIRENG) realizou uma análise preliminar do problema, ficando identificada a necessidade de estudos mais aprofundados sobre o tema. O presente Trabalho de Graduação (TG) identificou e quantificou os fatores geradores das enchentes, por meio: de visitas a campo; de análises, utilizando uma ferramenta de Sistema de Informações Geográficas (SIG), das bacias de contribuições para o ponto em estudo; do levantamento das variáveis físicas da área de contribuição, tais como, regime de chuvas, tipo de solo, tipo de ocupação do solo e topografia precisa das regiões mais relevantes. Para as análises de precipitações, adotou-se como caso a ser simulado a chuva do dia 31/01/2006, para validar a modelagem implementada, e estabeleceu-se a equação IDF e a chuva de projeto, para os redimensionamentos necessários. A partir das informações geradas no modelo precipitação-vazão (IPHS1), observou-se que os cursos d'água não comportam a vazão de projeto, preconizada para um período de retorno 25 anos. Foi dada uma proposta de solução para o problema das enchentes nos hangares do MUSAL, que deve ser idealmente integrada à bacia como um todo.			
12. GRAU DE SIGILO: (X) OSTENSIVO () RESERVADO () CONFIDENCIAL () SECRETO			