

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO,
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

**TENDÊNCIAS EM EVENTOS EXTREMOS DE
PRECIPITAÇÃO NA REGIÃO METROPOLITANA
DE BELO HORIZONTE: DETECÇÃO, IMPACTOS
E ADAPTABILIDADE**

Aline de Araújo Nunes

Belo Horizonte
2018

**TENDÊNCIAS EM EVENTOS EXTREMOS DE
PRECIPITAÇÃO NA REGIÃO METROPOLITANA
DE BELO HORIZONTE: DETECÇÃO, IMPACTOS
E ADAPTABILIDADE**

Aline de Araújo Nunes

Aline de Araújo Nunes

**TENDÊNCIAS EM EVENTOS EXTREMOS DE
PRECIPITAÇÃO NA REGIÃO METROPOLITANA
DE BELO HORIZONTE: DETECÇÃO, IMPACTOS
E ADAPTABILIDADE**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Recursos Hídricos

Linha de pesquisa: Modelagem Hidrológica

Orientador: Prof. Dr. Márcio Benedito Baptista

Coorientador: Prof. Dr. Eber José de Andrade Pinto

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG

2018

N972t	<p>Nunes, Aline de Araújo. Tendências em eventos extremos de precipitação na região metropolitana de Belo Horizonte [manuscrito] : detecção, impactos e adaptabilidade / Aline de Araújo Nunes. - 2018. x, 191 f., enc : il.</p> <p>Orientador: Márcio Benedito Baptista. Coorientador: Eber José de Andrade Pinto.</p> <p>Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Apêndices: f. 142-191.</p> <p>Bibliografia: f. 124-141.</p> <p>1. Engenharia sanitária - Teses. 2. Recursos hídricos - Desenvolvimento - Teses. 3. Mudanças climáticas - Teses. 4. Precipitação (Meteorologia) - Teses. I. Baptista, Márcio Benedito. II. Pinto, Eber José de Andrade. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 628(043)</p>
-------	--



FOLHA DE APROVAÇÃO

“Tendências Em Eventos Extremos de Precipitação Na Região Metropolitana de Belo Horizonte: Detecção, Impactos e Adaptabilidade”

ALINE DE ARAÚJO NUNES

Tese defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:

Prof. MÁRCIO BENEDITO BAPTISTA

Prof. EBER JOSÉ DE ANDRADE PINTO

Prof. WILSON DOS SANTOS FERNANDES

Profª. PRISCILLA MACEDO MOURA

Prof. ANDRÉ LUIZ LOPES DA SILVEIRA

Prof. DEMETRIUS DAVID DA SILVA

Aprovada pelo Colegiado do PG SMARH

Prof. Nilo de Oliveira Nascimento
Coordenador

Versão Final aprovada por

Prof. Márcio Benedito Baptista
Orientador

Belo Horizonte, 13 de março de 2018.

*"O único lugar onde o sucesso vem
antes do trabalho é no dicionário."*

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

A DEUS, por me amparar nos momentos difíceis, por me dar força para superar as dificuldades e sempre mostrar o caminho nas horas incertas.

Ao meu orientador, Prof. Márcio Benedito Baptista, pelos ensinamentos, incentivo, amizade e, acima de tudo, pela excelente orientação ao longo destes 4 anos. Serei eternamente grata!

Ao meu coorientador, Prof. Éber José de Andrade Pinto, pelo incentivo, por ter aceitado o desafio deste trabalho e ter colaborado expressivamente com seus conhecimentos estatísticos.

Aos meus pais, Edson e Magali, pelo apoio nessa importante etapa da minha “eterna busca”. Meus amores, meus exemplos, minha vida!

À minha irmã Isabela, pelo amor, amizade e eterno companheirismo.

Ao meu marido e amigo, Guilherme Tiganá, por todo amor, paciência, carinho e confiança dedicados ao longo dessa jornada.

Às minhas estagiárias Bárbara, Edilaine e Renata pela grande ajuda na realização deste trabalho.

Aos amigos do Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos (EHR), especialmente à Sarah, Nathália, Jaildo, Hidelano, Deyvid, Karine e Nívia, pelo convívio, pela amizade e por todos os momentos vividos.

A todos os professores do EHR que me ajudaram, especialmente à Talita, Wilson e Priscilla. Aos funcionários do EHR e SMARH, especialmente ao Deivison, Júlio, Jussara e Kajsa, pelo afeto e pelo suporte.

Aos familiares e amigos da PUC Minas, especialmente à Raquel, de Belo Horizonte, Viçosa, Montes Claros, Cataguases e desse “mundão afora”, pela amizade fraterna e pela convivência maravilhosa.

Ao Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement (LTHE), especialmente aos professores Juliette e Jean-Dominique, pela realização do doutorado sanduíche.

À Ilda e todos os funcionários da Sudecap que prontamente ajudaram. Ao Marco Túlio e Lizandro do Inmet.

À Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), por intermédio do EHR, pela oportunidade de realização do Curso.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro.

A todos aqueles que contribuíram, de alguma forma, o meu sincero agradecimento.

RESUMO

Eventos climáticos extremos têm emergido como uma das principais manifestações de mudanças climáticas, sendo que a adaptação e minimização dos impactos inerentes passam pelo estudo da magnitude e frequência de suas ocorrências. Neste contexto, a presente pesquisa busca identificar tendências para eventos extremos de precipitação na Região Metropolitana de Belo Horizonte, à luz da crescente preocupação com o aumento da sua ocorrência na região e, ainda, delinear medidas de minimização dos riscos decorrentes das tendências observadas. A primeira etapa do trabalho consistiu na busca dos eventos de alagamento ocorridos na região, analisando-se, também, dados de precipitação diária correspondentes aos dias de ocorrência dos alagamentos, a fim de estabelecer um limiar indicativo de chuva extrema. Neste sentido, foram estudadas tendências nos índices de precipitação recomendados pelo *Expert Team for Climate Change Detection Monitoring and Indices* (ETCCDMI), incluindo a série temporal do número anual de dias chuvosos acima do limiar estabelecido, para 14 estações pluviométricas. Nas etapas posteriores, foram investigadas as tendências em máximos anuais de chuva com durações inferiores a 24 horas, e diante das mudanças observadas foi proposta uma nova curva IDF, assim como medidas de resiliência urbana, considerando o uso de técnicas compensatórias. A pesquisa realizada permitiu o levantamento de 104 casos de alagamentos para a cidade de Belo Horizonte, sendo determinado um limiar de 40 mm, que é um indicativo de evento com potencialidade em causar impactos associados à drenagem urbana. Não foi detectado um padrão regional nos índices de precipitação diária analisados, no entanto, quando detectada significância estatística, os índices apresentaram tendência de aumento de forma predominante. A estação localizada na cidade de Belo Horizonte sinalizou o aumento dos eventos de precipitação associados a maior parte dos índices analisados, sendo um indicativo de mudança local. No que se refere às chuvas subdiárias, foram detectadas tendências de aumento a partir do ano de 2000 apenas para durações inferiores a 1 hora. Neste contexto, foi proposta uma adaptação do conceito "*Minimax Design Life Level: the $T_1 - T_2$ p% bounded yearly risk level*" para quantificar as intensidades de chuva e ajustar uma equação IDF não-estacionária, sendo estimado para o ano de 2040 intensidades de chuva até 48% superiores às estimativas atuais. Considerando tal fato, foi avaliado o impacto da implantação de telhados verdes e pavimentos permeáveis em uma bacia de Belo Horizonte, sob uma perspectiva de renovação urbana, observando-se que o aumento da vazão de pico obtido quando da comparação dos cenários que contemplam as diferentes perspectivas de IDF (atual e não-estacionária), embora bastante expressivo, pode ser atenuado com a implantação de técnicas que venham a contribuir com a redução do escoamento. Os resultados deste estudo evidenciam os benefícios hidrológicos que a implantação de técnicas compensatórias pode promover diante de um cenário de mudanças nos padrões de precipitação.

Palavras-Chave: Precipitações extremas; Mudanças Climáticas; Resiliência Urbana.

ABSTRACT

Extreme climatic events have emerged as one of the main manifestations of climate changes, being that the adaptation and minimization of inherent impacts demand studies of the magnitude and frequency of their occurrence. In this context, the present research seeks to identify trends for extreme precipitation events in the Metropolitan Region of Belo Horizonte, in function of the growing concern about its occurrence in the region and also to plan measures to minimize the risks arising from the observed trends. The first stage of the work consisted in the research for flood events in the region, also analyzing daily precipitation data corresponding to the days of floods occurrence, in order to establish an indicative threshold of extreme rainfall. In this sense, trends in precipitation indexes recommended by the Expert Team for Climate Change Detection Monitoring and Indices (ETCCDMI) were studied, including the time series of the annual number of rainy days above the established threshold, for 14 rainy seasons. In the later stages, the trends in maximum annual precipitation with durations less than 24 hours were investigated, and considering the observed changes it was proposed a new IDF curve, as well as measures of urban resilience, by the use of compensatory techniques. The research carried out allowed to obtain 104 flooding cases for the city of Belo Horizonte, with a threshold of 40 mm being determined, which is an indicative of an event with the potential to cause impacts associated with urban drainage. A regional pattern was not detected in the daily precipitation indexes analyzed, however when statistical significance was detected, the indexes showed a predominant positive trend. The station located in the city of Belo Horizonte pointed the increase in precipitation events associated with most of the indices analyzed, being an indication of local change. With regard to sub-daily rains, increases were detected from 2000 onwards only for durations less than 1 hour. In this context, an adaptation of the concept "Minimax Design Life Level: the T1 -T2 p% bounded yearly risk level" was proposed to quantify the rain intensities and to adjust a non-stationary IDF equation, being estimated for the year of 2040 rain intensities up until 48% higher than current estimates. Considering this fact, it was evaluated the impact of the implantation of green roofs and permeable pavements in a watershed of Belo Horizonte, from a perspective of urban renewal, being possible to observe that the increase of the peak flow obtained when comparing the scenarios that contemplate the different prospects of IDF (current and non-stationary), although quite expressive, can be attenuated with the implantation of techniques that will contribute to the reduction of the flow. The results of this study show the hydrological benefits that the implantation of compensatory techniques can promote in face of a scenario of changes in precipitation patterns.

Keywords: Extreme precipitation; Climate changes; Urban Resilience.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	VI
LISTA DE TABELAS.....	VIII
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	IX
1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVAS	1
2 OBJETIVOS E ETAPAS METODOLÓGICAS.....	6
2.1 OBJETIVO GERAL	6
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	6
2.3 ETAPAS METODOLÓGICAS	6
3 REVISÃO DA LITERATURA	8
3.1 EVENTOS CLIMÁTICOS EXTREMOS.....	8
3.2 IDENTIFICAÇÃO DE TENDÊNCIA EM SÉRIES TEMPORAIS	11
3.3 ESTUDOS DE ANÁLISE DE TENDÊNCIA EM SÉRIES HIDROLÓGICAS	16
3.4 ANÁLISE DE FREQUÊNCIA EM SÉRIES HIDROLÓGICAS SOB A HIPÓTESE DE NÃO-ESTACIONARIEDADE	21
3.5 IMPACTO DA NÃO-ESTACIONARIEDADE DE SÉRIES HIDROLÓGICAS EM BACIAS URBANAS – O CONCEITO DE RESILÊNCIA URBANA	29
3.6 TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS EM DRENAGEM URBANA	32
3.6.1 <i>Telhados Verdes</i>	33
3.6.2 <i>Pavimentos Permeáveis</i>	35
3.6.3 <i>Trincheiras de Infiltração</i>	37
3.6.4 <i>Reservatórios Individuais</i>	38
3.6.5 <i>Sistemas de biorretenção (Jardins de chuva)</i>	39
3.7 MODELAGEM MATEMÁTICA E COMPUTACIONAL DE FENÔMENOS HIDROLÓGICOS – SIMULAÇÃO DA IMPLANTAÇÃO DE TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS	41
4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	44
4.1 ASPECTOS GERAIS DA RMBH	44
4.2 EXPANSÃO URBANA DA RMBH E DE BELO HORIZONTE.....	46
4.3 CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS.....	48
5 ESTUDO DE TENDÊNCIAS EM EVENTOS DIÁRIOS DE CHUVA COM POTENCIALIDADE EM CAUSAR ALAGAMENTOS NA RMBH	51
5.1 INTRODUÇÃO	51
5.2 ANÁLISE DE TENDÊNCIAS NAS SÉRIES DE TEMPERATURA DA RMBH.....	51
5.3 AQUISIÇÃO E ANÁLISE PRELIMINAR DOS DADOS DE ALAGAMENTOS DA RMBH	55
5.4 AQUISIÇÃO E ANÁLISE PRELIMINAR DOS DADOS DE PRECIPITAÇÃO DA RMBH.....	55
5.4.1 <i>Aquisição dos Dados de Precipitação da RMBH</i>	55
5.4.2 <i>Análise Preliminar dos Dados de Precipitação selecionados na RMBH</i>	58
5.5 ANÁLISE DE EVENTOS DIÁRIOS DE CHUVA COM POTENCIALIDADE EM CAUSAR INUNDAÇÕES NA RMBH	58
5.6 ANÁLISE DE TENDÊNCIAS NAS SÉRIES DE EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO DA RMBH.....	61
5.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS DA ANÁLISE DE TENDÊNCIAS EM EVENTOS EXTREMOS DIÁRIOS DE CHUVA NA RMBH	68
6 ANÁLISE DE ESTACIONARIEDADE PARA O ESTUDO DE CHUVAS INTENSAS EM BELO HORIZONTE	70
6.1 INTRODUÇÃO	70
6.2 AQUISIÇÃO E ANÁLISE PRELIMINAR DOS DADOS DE PRECIPITAÇÃO SUBDIÁRIA DA CIDADE DE BELO HORIZONTE	70
6.2.1 <i>Aquisição dos dados de precipitação subdiária</i>	70
6.2.2 <i>Análise preliminar dos dados de precipitação subdiária</i>	72
6.3 ANÁLISE E MODELAGEM DE TENDÊNCIAS NAS SÉRIES DE MÁXIMOS ANUAIS DE PRECIPITAÇÃO SUBDIÁRIA DA ESTAÇÃO DO INMET (83587).....	74
6.4 DEFINIÇÃO DE RELAÇÕES IDF PARA SITUAÇÕES DE NÃO-ESTACIONARIEDADE	79

6.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS DA ANÁLISE DE ESTACIONARIEDADE PARA O ESTUDO DE CHUVAS INTENSAS EM BELO HORIZONTE	88
7	ADAPTABILIDADE DA CIDADE DE BELO HORIZONTE FRENTE ÀS MUDANÇAS NOS PADRÕES DE CHUVA – ESTUDO DE CASO PARA A BACIA DO CÓRREGO RESSACA	90
7.1	INTRODUÇÃO	90
7.2	DEFINIÇÃO DA BACIA DE ESTUDO.....	90
7.3	MODELAGEM DOS FENÔMENOS HIDROLÓGICOS – CONSTRUÇÃO DE CENÁRIOS DE ADAPTAÇÃO VIA RENOVAÇÃO URBANA	94
7.3.1	<i>Características do modelo hidrológico</i>	<i>95</i>
7.3.2	<i>Construção dos cenários de modelagem hidrológica.....</i>	<i>97</i>
7.3.3	<i>Chuvas de Projeto</i>	<i>100</i>
7.3.4	<i>Parâmetros para modelagem das técnicas compensatórias e seleção das áreas disponíveis para implantação</i>	<i>103</i>
7.3.4.1	Telhados Verdes	103
7.3.4.2	Pavimentos Permeáveis.....	106
7.4	RESPOSTA HIDROLÓGICA AOS CENÁRIOS PROPOSTOS	111
7.4.1	<i>Modelagem dos cenários para precipitação de projeto – IDF atual (PINHEIRO; NAGHETTINI, 1998)</i>	<i>111</i>
7.4.2	<i>Modelagem dos cenários para precipitação de projeto – IDF não-estacionária.....</i>	<i>114</i>
7.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS DA MODELAGEM DE CENÁRIOS DE ADAPTAÇÃO VIA RENOVAÇÃO URBANA	118
8	CONCLUSÕES.....	120
	REFERÊNCIAS	124
	APÊNDICE A	142
	APÊNDICE B	154
	APÊNDICE C	159
	APÊNDICE D	162
	APÊNDICE E	165

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Fluxograma das etapas metodológicas	7
Figura 3.1 – Inundações no município de Belo Horizonte em 1979, no córrego Vilarinho (a), e em 1987, no Ribeirão Arrudas (b).....	10
Figura 3.2 – Risco do Nível de 11,5 m (a) e Nível para o risco constante de 0,1% (2015 a 2065) (b)	28
Figura 3.3 – Camadas de um telhado verde.....	33
Figura 3.4 – Telhado Verde no prédio do Banco do Brasil, em Belo Horizonte	34
Figura 3.5 - Comparação da temperatura da superfície entre o telhado sem cobertura e o telhado verde da Prefeitura de Chicago	35
Figura 3.6 - Camadas do pavimento permeável.....	36
Figura 3.7 - Implantação de blocos de concreto vazado em garagem	37
Figura 3.8 - Implantação de trincheira de infiltração.....	38
Figura 3.9 – Esquema do reservatório individual	39
Figura 3.10 – Sistemas de biorretenção em vias e estacionamentos em Melbourne	40
Figura 4.1 – Evolução da População em Belo Horizonte: Período 1900 a 2010	44
Figura 4.2 - Localização da área de estudo.....	45
Figura 4.3 - Planta Geral da cidade de Belo Horizonte, em 1895	46
Figura 4.4 – Mapa da classificação climática do IBGE para a RMBH	48
Figura 4.5 – Precipitação total mensal média na RMBH – Período - 1941 a 2014	49
Figura 4.6 – Normais Climatológicas (1961-1990) das temperaturas média, máxima e mínima para Belo Horizonte.	50
Figura 5.1– Localização das estações climatológicas.....	52
Figura 5.2– Evolução da temperatura média anual para as estações Belo Horizonte e Florestal	53
Figura 5.3– Evolução da temperatura mínima média anual para as estações Belo Horizonte e Florestal	53
Figura 5.4– Evolução da temperatura máxima média anual para as estações Belo Horizonte e Florestal	53
Figura 5.5– Localização das estações pluviométricas selecionadas na RMBH	57
Figura 5.6– - Distribuição espacial das tendências por índice de precipitação	63
Figura 5.7 - Variação temporal dos índices de precipitação.....	65
Figura 5.8 - Representação temporal da ocupação e desenvolvimento da cidade de Belo Horizonte	66
Figura 6.1 - Fragmento do pluviograma do dia 16/03/2009.....	71
Figura 6.2 – Localização da estação pluviográfica do INMET.....	71
Figura 6.3 – Análise de média móvel de 10 anos para as intensidades máximas registradas, considerando todas as durações de chuva.....	73
Figura 6.4 – Períodos com diferentes tendências definidas (variações cíclicas), considerando a média móvel de 10 anos para as intensidades máximas registradas para a duração de 10 min	73
Figura 6.5 – Log-verossimilhança para os três modelos não-estacionários em relação ao ano de mudança para as séries de precipitações máximas com durações de 10 (a), 15 (b), 30 (c), 45 (d) e 60 (e) min.....	76
Figura 6.6 – Variação temporal do parâmetro de posição da GEV para cada duração	79
Figura 6.7 – Quantis de intensidade de chuva, em mm/h, para diferentes durações e probabilidades de excedência	82
Figura 6.8 - Valores do parâmetro α	83
Figura 6.9 - Quantis adimensionais $\mu T, d$	85

Figura 6.10 – Intensidades de chuva para as durações de 15 (a) e 60 (b) minutos, estimadas para 2018, considerando as diferentes IDF's ajustadas para o município de Belo Horizonte .	85
Figura 6.11 – Intensidades de chuva para as durações de 15 (a) e 60 (b) minutos, estimadas para 2040, considerando as diferentes IDF's ajustadas para o município de Belo Horizonte .	87
Figura 7.1 – Localização da sub-bacia do córrego Ressaca	91
Figura 7.2 – Mapa de litologia de Belo Horizonte	92
Figura 7.3 – Mapa de declividade de Belo Horizonte	93
Figura 7.4 – Imagem de satélite da bacia do Ressaca (uso e ocupação do solo)	94
Figura 7.5 – Mapa de sub-bacias.....	95
Figura 7.6 - Relatório mensal de processos de licenciamento e regularização da Prefeitura de Belo Horizonte	97
Figura 7.7 - Hidrogramas resultantes de precipitações de projeto de diferentes durações para os períodos de retorno de 10 (a) e 25 anos (b).	100
Figura 7.8 - Distribuição isoietal padrão para cálculo da chuva de projeto	101
Figura 7.9 - Fator de abatimento da altura de chuva pontual	102
Figura 7.10 - Áreas potencialmente tratadas com telhado verde por sub-bacia.....	105
Figura 7.11 - Bairros com maior concentração de áreas selecionadas para telhados verdes .	106
Figura 7.12 - Mapas de declividade das vias (a) e áreas selecionadas para pavimentos permeáveis (b)	108
Figura 7.13 - Bairros com maior concentração de áreas selecionadas para pavimentos permeáveis	110
Figura 7.14 - Áreas tratadas com pavimento permeável por sub-bacia.....	110
Figura 7.15 - Hidrograma no exutório da bacia do córrego Ressaca, resultado da modelagem dos cenários 1, 2 e 3 – TR 2 anos.....	111
Figura 7.16 - Hidrograma no exutório da bacia do córrego Ressaca, resultado da modelagem dos cenários 1, 2 e 3 – TR 10 anos.....	112
Figura 7.17 - Hidrograma no exutório da bacia do córrego Ressaca, resultado da modelagem dos cenários 1, 2 e 3 – TR 50 anos.....	112
Figura 7.18 - Hidrograma no exutório, resultado da modelagem dos cenários 4, 5 e 6 – PE = 50%	115
Figura 7.19 - Hidrograma no exutório, resultado da modelagem dos cenários 4, 5 e 6 – PE = 10%	116
Figura 7.20 - Hidrograma no exutório, resultado da modelagem dos cenários 4, 5 e 6 – PE = 2%.....	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Resultado do exemplo de cálculo do DLL citado em Rootzén e Katz (2013)	27
Tabela 5.1- Análise de tendência para as séries de temperatura a partir do teste de Mann-Kendall, no nível de significância de 5%	54
Tabela 5.2 – Caracterização das estações pluviométricas selecionadas na RMBH	57
Tabela 5.3 – Alturas diárias de precipitação registradas em dias de ocorrência de alagamentos	59
Tabela 5.4 – Características descritivas das séries temporais de alturas diárias de precipitação registradas em dias de ocorrência de alagamentos	60
Tabela 5.5 – Índices de Precipitação	62
Tabela 5.6- Análise de tendência para os índices de precipitação realizada pelo teste de Mann-Kendall, considerando o nível de significância de 5%	62
Tabela 5.7- Resultados dos testes de mudanças abruptas, considerando o nível de significância de 5%	67
Tabela 6.1 – Limiares de chuvas intensas	72
Tabela 6.2 - Análise de tendência para as séries de precipitação subdiária	74
Tabela 6.3 - Parâmetros da distribuição GEV não estacionária ajustada	78
Tabela 6.4 - Quantis de intensidade de chuva para diferentes durações e probabilidades de excedência, considerando 2040 como o ano de fim de vida do projeto	81
Tabela 6.5 – Valores do parâmetro β	83
Tabela 7.1- Quantis de precipitação de projeto para a duração de 45 minutos e diferentes Tempos de Retorno/ Probabilidades de Excedência (mm)	102
Tabela 7.2- Parâmetros de entrada dos telhados verdes	104
Tabela 7.3- Características dos telhados verdes por sub-bacia	105
Tabela 7.4- Parâmetros de entrada dos pavimentos permeáveis	107
Tabela 7.5- Características dos pavimentos permeáveis por sub-bacia	109
Tabela 7.6 - Variações nos picos de vazão	113
Tabela 7.7- Variações nos volumes escoados	114
Tabela 7.8- Variações nos picos de vazão	117
Tabela 7.9- Variações nos volumes escoados	117

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AIC - Critério de Informação de Akaike

ANA - Agência Nacional de Águas

BMPs - Best Management Practices

CDD - Número anual de dias secos consecutivos

CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais

COPASA - Companhia de Saneamento de Minas Gerais

CPRM - Companhia de Pesquisa em Recursos Minerais

CPTEC - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

CRCCCH- Cooperative Research Center for Catchment Hydrology

CWD- Número anual de dias chuvosos consecutivos

DLL - Design Life Level

EPA - Environment Protection Agency

ETCCDMI - Expert Team for Climate Change Detection Monitoring and Indices

GEV - Generalizada de Valores Extremos

HIDROWEB - Sistema de Informações Hidrológicas da ANA

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICEA - Instituto de Controle do Espaço Aéreo

IDF - Intensidade-duração-frequência

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IPCC - Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

IPCC-AR4 - Quarto Relatório de Avaliação de Mudanças no Clima do Planeta

LID - Low Impact Development

OMM - Organização Meteorológica Mundial

PE - Probabilidade de Excedência

PIB - Produto Interno Bruto

PrcpTot - Total anual de dias chuvosos

Rx1d - Precipitação máxima mensal em 1 dia

Rx5d - Precipitação máxima mensal em 5 dias consecutivos

R10mm - Número anual de dias chuvosos acima de 10 mm

R20mm - Número anual de dias chuvosos acima de 20 mm

R30mm - Número anual de dias chuvosos acima 30 mm

R95p - Dias muito chuvosos

R99p - Dias extremamente chuvosos

RMBH - Região Metropolitana de Belo Horizonte

SDII - Índice de intensidade diária

SEEBLA - Serviços de Engenharia Emilio Baumgart Ltda

SMARU - Secretaria Municipal Adjunta de Regulação Urbana

SUDECAP - Superintendência de Desenvolvimento da Capital

SWMM - Storm Water Management Model

WMO - World Meteorological Organization

ZCAS - Zona de Convergência do Atlântico Sul

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVAS

A relação das cidades com os cursos d'água vem se alterando com o decorrer dos anos. A proximidade entre rios e aglomerações urbanas era considerada como fator determinante para o desenvolvimento das cidades, uma vez que os cursos d'água forneciam a água para o abastecimento, eram o corpo receptor de resíduos e facilitavam a comunicação e transporte. As eventuais inundações eram relativamente bem aceitas como uma forma de compensação pelos benefícios advindos da água junto à cidade (BAPTISTA; NASCIMENTO, 2002).

De acordo com Silveira (1998), o crescimento das aglomerações urbanas a partir do século XIX evidenciou os problemas resultantes da precariedade da infraestrutura de controle da presença de águas nas cidades. Em paralelo, a partir da segunda metade do século XX ocorreu, em escala mundial, a intensificação da concentração da população em áreas urbanas, a qual deverá superar 60% no ano 2025, segundo IAURIF (1997). No Brasil, este fenômeno não é diferente, sendo que a população urbana já supera 84%, segundo dados censitários do IBGE (2010).

Os impactos hidrológicos da urbanização já foram amplamente descritos na literatura técnica: a redução dos processos de infiltração, com o conseqüente aumento dos volumes escoados superficialmente e a aceleração do escoamento, que vem acentuar os picos dos hidrogramas. A combinação dos aspectos urbanização e canalização, sendo esta considerada ainda nos dias de hoje como uma alternativa tecnicamente viável para solucionar os problemas de drenagem, leva à obsolescência gradual das redes de drenagem e ao aumento na frequência de inundações.

Tendo em vista a expressiva concentração das populações em grandes áreas urbanas, a questão da vulnerabilidade das cidades em face da possível não-estacionariedade das condições hidroclimatológicas precisa ser trabalhada, tanto em função da possível indução de ocorrência de tempestades pela urbanização como também de mudanças climáticas de cunho global. Urge, portanto, a busca de evidências de tendências, com sua quantificação, ensejando o desenvolvimento de ferramentas e estratégias visando o incremento da resiliência das cidades.

Muitos estudos comprovam mudanças significativas nas características climáticas em escalas regional e local e como as transformações no ambiente têm afetado o clima. Embora os controles atmosféricos de cada escala sejam distintos, os vários níveis escalares estão interligados, de forma a interferirem uns nos outros. Alterações do clima regional, por exemplo,

ocorreriam a partir de mudanças nos controles atmosféricos que organizam essa escala, a exemplo de centros de ação e sistemas atmosféricos associados e atributos geográficos. Na escala local, a abrangência contempla áreas onde a ação antrópica está entre os principais fatores de organização, culminando em inúmeras transformações no ambiente atmosférico (NUNES, 2003).

Em nível local, o processo de crescimento desordenado de áreas urbanas tem provocado um fenômeno peculiar, denominado “ilha de calor”. Este processo caracteriza-se pelo incremento da temperatura nos centros urbanos em relação às áreas de entorno, acompanhado do aumento da turbulência e da presença de núcleos de condensação na atmosfera favorecendo a ocorrência de tempestades (SHAW; SHARMA, 2011).

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) se destaca no contexto dos modelos climáticos, uma vez que, ligado às Nações Unidas, procura avaliar o conhecimento existente no mundo sobre a mudança climática global (ALEXANDRE, 2009; TUCCI; BRAGA, 2003). Segundo IPCC (2014), que se refere ao Quinto Relatório de Avaliação de Mudanças no Clima do Planeta (IPCC-AR5), é projetado, para até o ano de 2100, um aumento da temperatura global, entre 2,6° a 4,8° C. Em decorrência deste fato é prevista uma alteração que influenciará fortemente o regime de chuvas no mundo. Ainda de acordo com o relatório, esse aquecimento global influenciado, muito provavelmente, pelas atividades humanas, lideradas pela queima de combustível fóssil, provocará o aumento da incidência de eventos extremos, como por exemplo, verões ou invernos excepcionalmente chuvosos ou secos.

Zhang *et al.* (2007) afirmaram, também, que a mudança no regime de chuvas observada em todo o mundo ao longo do último século é consequência do aquecimento global, causado, sobretudo, pela ação antrópica. Além disso, o trabalho alerta para a tendência de áreas secas ficarem mais secas e áreas chuvosas mais chuvosas.

O Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos, juntamente com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE), assumiram a tarefa de produzir os cenários contrastantes de mudanças climáticas sugeridos pelo IPCC para o Brasil e América do Sul (A2 - altas emissões e B2 - baixas emissões de gases de efeito estufa), como parte das atividades do Programa Nacional de Mudança Climática do Ministério da Ciência e Tecnologia do Brasil. Segundo Marengo (2007), com o aquecimento global, algumas regiões do Brasil e da América do Sul terão seus índices de temperatura e chuva aumentados e, em outras, diminuídos. De

acordo com esse autor, juntamente com a mudança ou não dos padrões pluviiais anuais, as chuvas isoladas poderão ser mais intensas e os temporais mais frequentes.

Considerando que os efeitos das possíveis mudanças do clima podem afetar o ciclo hidrológico, Milly *et al.* (2008) afirmaram que "*a estacionariedade está morta*". Esta afirmação tem sido amplamente divulgada tanto no setor de recursos hídricos, como na ecologia (WOLKOVICH *et al.*, 2014), na conservação e no gerenciamento de recursos naturais (WIENS *et al.*, 2012) e na legislação ambiental e de recursos naturais (CRAIG, 2010; RUHL; SALZMAN, 2013). A proposição também tem sido questionada em uma série de artigos que apresentam um ponto de vista oposto (LINS; COHN, 2011; MATALAS, 2012; KOUTSOYIANNIS; MONTANARI, 2014; MONTANARI; KOUTSOYIANNIS, 2014), ou seja, como afirmaram Montanari e Koutsoyiannis (2014), "*a estacionariedade é imortal*".

Todavia, Milly *et al.* (2015) discutem as críticas apresentadas, refutando e concordando com algumas colocações, mas reiterando que o momento é oportuno para atualizar as estratégias analíticas utilizadas para o planejamento de uso dos recursos hídricos sob um clima incerto e em mudança. Os mesmos autores mencionam que encontrar abordagens para lidar com a situação qualitativamente diferente durante o chamado "*Antropoceno*" (CRUTZEN, 2002; STEFFEN *et al.*, 2015) é um grande desafio e que essas abordagens devem combinar várias ferramentas que estão à nossa disposição, incluindo métodos determinísticos, baseados em processos estocásticos. O debate mencionado acima evidencia a importância do tema que se pretende estudar.

Sendo assim, diante desse cenário de especulações e incertezas quanto aos impactos causados pelas eventuais mudanças climáticas em séries hidrológicas, o presente trabalho visa contribuir para a análise de tendências na ocorrência de eventos extremos de precipitação na Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) que, supostamente, demonstra estar sendo afetada por tempestades cada vez mais frequentes, mediante utilização de testes estatísticos, e delinear medidas de minimização dos riscos decorrentes das tendências observadas.

Neste sentido três questões-chave poderiam representar as hipóteses deste trabalho: existem evidências de mudanças climáticas nas séries hidrológicas que representam a RMBH? As eventuais alterações identificadas podem estar associadas aos efeitos da urbanização? Como levar em conta as eventuais mudanças em estudos e projetos de infraestrutura urbana? É

possível minimizar os impactos destas mudanças em bacias urbanas com a implantação de técnicas alternativas no manejo de águas pluviais?

Visando uma melhor organização e apresentação, a tese está estruturada em oito capítulos, incluindo o presente tópico – *Introdução*. Foram acrescentados, ainda, apêndices ao final do texto, de forma a complementar as informações inseridas no decorrer dos capítulos.

No capítulo 2, *Objetivos e Etapas Metodológicas*, são destacados os objetivos geral e específicos da pesquisa. São descritas, também, as etapas metodológicas propostas para o trabalho, sendo utilizado como ferramenta de auxílio um fluxograma que sintetiza os tópicos que serão explorados em cada etapa.

No capítulo 3, *Revisão da Literatura*, é apresentado o estado da arte associado ao tema da pesquisa. São abordados tópicos relacionados às técnicas estatísticas utilizadas na detecção e quantificação de tendências em séries hidrológicas, medidas mitigadoras dos impactos associados a eventos extremos de chuva, sendo importante destacar que as informações contidas neste capítulo balizaram o desenvolvimento do trabalho.

Na sequência, o capítulo 4, *Caracterização da Área de Estudo*, refere-se a uma descrição das principais características da região que constitui o estudo de caso desta tese. São abordados os aspectos gerais da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), como localização e área, histórico de ocupação e características climatológicas, sendo estes considerados dados importantes para o entendimento das análises posteriores.

O capítulo 5, *Estudo de tendências em eventos diários de chuva com potencialidade em causar alagamentos na RMBH*, concentra-se na identificação de tendências em eventos extremos de precipitação diária na região, sendo identificadas, primeiramente, as chuvas consideradas “extremas”, ou seja, chuvas com potencialidade em causar alagamentos. Neste capítulo são levantados dados de alagamentos na cidade de Belo Horizonte, sendo analisados, posteriormente, os totais diários de chuva registrados nas datas de ocorrência destes eventos. São descritas as etapas de aquisição e análise preliminar das séries de precipitação, sendo apresentado, na sequência, o estudo de identificação de tendências utilizando métodos estatísticos. Foram analisadas também tendências em duas séries de temperatura da RMBH, a fim de identificar a possível associação entre as alterações identificadas nestas séries e a formação de eventos extremos de chuva.

No capítulo 6, *Análise de estacionariedade para o estudo de chuvas intensas em Belo Horizonte*, será apresentado o estudo de tendência de dados subdiários de chuva a partir de métodos estatísticos. A etapa inicial será de aquisição e análise de consistência dos registros pluviográficos da região, para que, posteriormente, sejam definidos os máximos anuais a serem estudados. Visando ainda quantificar as eventuais tendências observadas será apresentada a proposta de uma nova curva IDF, que contempla alterações nas intensidades das chuvas que ocorrem na cidade, sob uma ótica de não-estacionariedade.

Em seguida, no capítulo 7, *Adaptabilidade da cidade de Belo Horizonte frente às mudanças nos padrões de chuva – estudo de caso para a bacia do córrego Ressaca*, propõe-se a implantação de Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana, buscando benefícios relacionados ao controle do escoamento, diante dos impactos decorrentes das tendências detectadas nas séries de precipitação diária e subdiária da cidade de Belo Horizonte e, sobretudo, da alteração da equação de chuvas intensas (IDF) proposta no capítulo anterior. Para tal, serão apresentados cenários que contemplam a condição atual de ocupação de uma bacia localizada no município, verificando as possíveis técnicas a serem adotadas, e uma situação futura, que vislumbra um novo padrão de desenvolvimento urbano e uma equação IDF que incorpora as condições de não-estacionariedade já verificadas neste trabalho.

No capítulo 8, *Conclusões e Recomendações*, serão discutidas as conclusões pertinentes aos resultados apresentados neste trabalho. Serão apresentadas, de forma sucinta, as principais informações discutidas ao longo dos demais capítulos, destacando, ao final, as principais recomendações para pesquisas futuras.

Na sequência, serão listadas as referências que embasaram e justificaram o trabalho.

2 OBJETIVOS E ETAPAS METODOLÓGICAS

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa é identificar e quantificar tendências na ocorrência de eventos extremos de precipitação na Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) e delinear medidas de minimização dos impactos decorrentes das tendências observadas.

2.2 Objetivos específicos

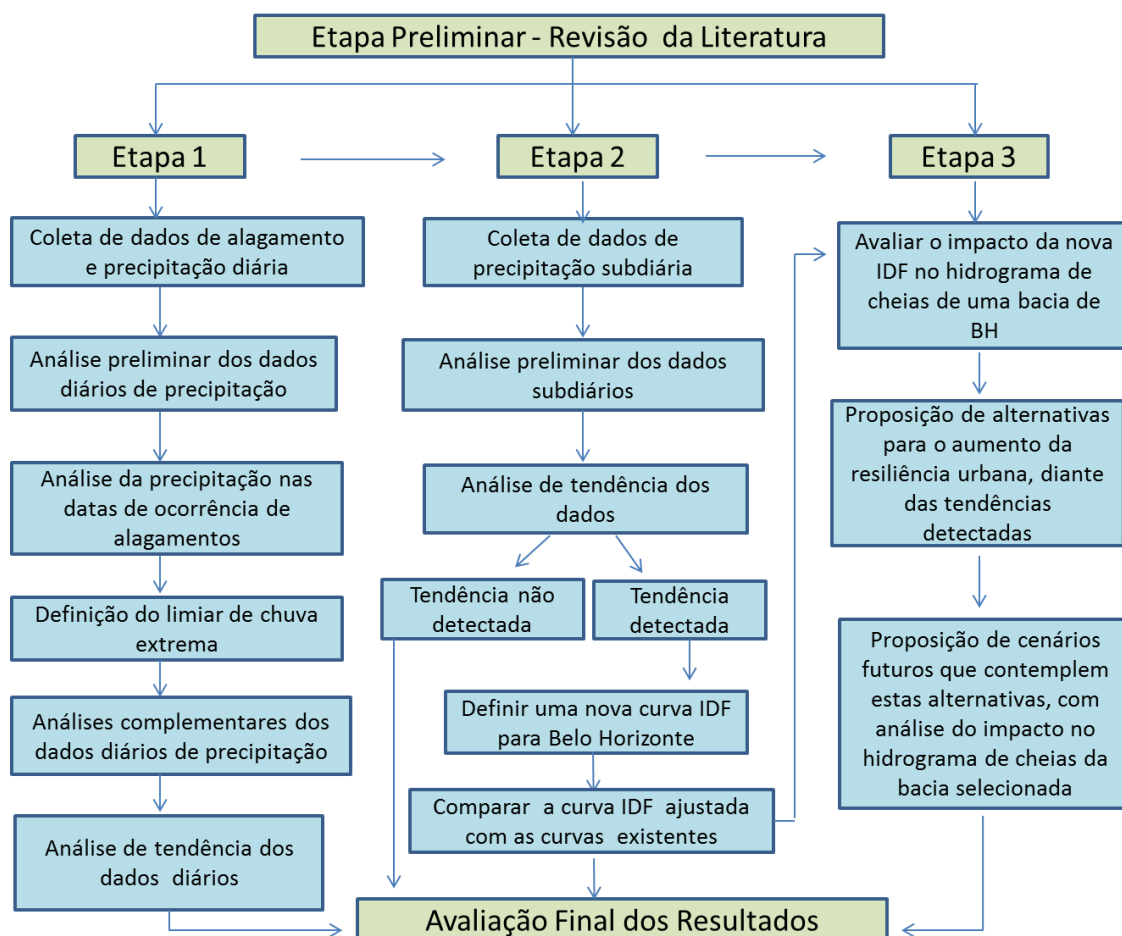
- Analisar os eventos diários de chuva com potencialidade em causar alagamentos na RMBH;
- Verificar se há tendência monotônica ou mudanças abruptas em máximos anuais de chuva com durações inferiores a 24 horas;
- Propor uma nova curva IDF (Intensidade-duração-frequência) diante das possíveis mudanças observadas;
- Avaliar o impacto da implantação de Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana em uma bacia localizada no município de Belo Horizonte sob uma perspectiva de renovação urbana.

2.3 Etapas Metodológicas

Tendo em vista os objetivos da pesquisa e tomando a RMBH como estudo de caso, são propostas, em linhas gerais, as diretrizes metodológicas apresentadas no fluxograma da Figura 2.1, a serem consideradas e aplicadas, visando a estruturação necessária para a obtenção de resultados.

O trabalho foi desenvolvido em três etapas distintas e complementares. A etapa preliminar corresponde a uma revisão de literatura, que foi estendida durante todas as etapas da pesquisa. Na sequência, a primeira etapa buscou identificar tendências em chuvas extremas diárias para a RMBH. Para definir as chuvas extremas foram levantados dados de alagamentos na cidade de Belo Horizonte e estabelecido um limiar a partir das alturas pluviométricas diárias registradas nas datas de ocorrência dos alagamentos.

Figura 2.1 – Fluxograma das etapas metodológicas



A segunda etapa objetivou a análise de chuvas subdiárias na cidade de Belo Horizonte. Inicialmente foi realizada a análise de consistência dos dados, de forma a serem selecionadas as máximas alturas pluviométricas, por ano hidrológico (outubro a setembro), associadas a durações relevantes para a drenagem urbana (inferiores a 24 horas), para que, posteriormente, fossem estudadas as tendências relacionadas a esses dados. Na sequência, diante das tendências detectadas nos dados subdiários, procedeu-se para a proposta de uma nova curva Intensidade-Duração-Frequência (IDF) sob condições de não-estacionariedade.

Na terceira e última etapa foi proposta a implantação de Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana, buscando benefícios relacionados ao controle do escoamento, diante dos impactos decorrentes da alteração da equação de chuvas intensas (IDF) proposta na etapa anterior. Para tal, foram apresentados cenários em situações futuras, que vislumbram um novo padrão de desenvolvimento urbano.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta a contextualização e a fundamentação teórica do trabalho. Inicialmente faz-se uma apresentação de eventos climáticos extremos que ganharam destaque nos últimos anos e que, conseqüentemente, motivaram esta pesquisa. Na sequência são apresentadas metodologias para detecção, análise e quantificação de tendências em séries hidrológicas, que são identificadas a partir de estudos realizados em diferentes partes do mundo. Considerando, ainda, o impacto das tendências observadas no âmbito dos sistemas de drenagem urbana, são apresentadas pesquisas que avaliam a eficiência da implantação de técnicas compensatórias na redução do escoamento superficial e vazões de pico.

3.1 *Eventos climáticos extremos*

Eventos climáticos extremos têm emergido como uma das principais manifestações de mudanças climáticas em diversas regiões do mundo. Os eventos extremos são geralmente definidos por valores atipicamente elevados ou baixos considerando um intervalo de observações (IPCC, 2012).

Neste contexto, o aquecimento global, processo de aumento da temperatura média do planeta, tem o potencial de causar taxas mais elevadas de evaporação e, conseqüentemente, transportar grandes quantidades de vapor de água para a atmosfera, acelerando, assim, o ciclo hidrológico global (SEMENOV; BENGTSSON, 2002; LABAT et al., 2004; XU et al., 2006; TRENBERTH et al., 2007).

Uma das conseqüências mais expressivas do aquecimento global seria o aumento na magnitude e frequência de eventos extremos de precipitação, provocado pelo aumento dos níveis de umidade da atmosfera e/ou atividades convectivas de grande escala (SHOURASENI; ROBERT, 2004). Esta hipótese foi validada considerando a tendência de aumento da umidade específica em nível mundial desde 1970 (DAI, 2006; WILLETT et al., 2008). Além disso, Frich et al. (2002) encontraram uma tendência de diminuição no número de dias secos consecutivos em uma grande proporção da área terrestre global.

Intensos debates relativos a possíveis mudanças climáticas vêm acontecendo, assim como se observa, com frequência, o desenvolvimento de estudos e técnicas diversas com o intuito de evidenciar eventuais tendências na ocorrência de eventos climáticos extremos. Neste sentido,

Groisman *et al.* (2005) analisaram em seus estudos a tendência cada vez mais difundida da ocorrência de chuvas intensas em regiões de latitudes médias, seguido por Alexander *et al.* (2006) que relataram um aumento significativo de eventos extremos de precipitação em uma escala global.

Nos Estados Unidos, a análise de tendências em eventos de chuvas intensas revelou uma sobreposição de áreas que sofreram umidade excessiva com áreas experimentando tendências de aumento na frequência de dias com precipitação superior a 50,8 milímetros (KARL *et al.*, 1996). Vários estudos posteriores mostraram uma tendência de aumento na ocorrência de eventos extremos de precipitação diária nos EUA (KARL; KNIGHT, 1998; EASTERLING *et al.*, 2000; GROISMAN *et al.*, 2012).

Já na Europa, mudanças na frequência e intensidade de eventos extremos como ondas de calor, chuvas torrenciais e tempestades de vento se tornam cada vez mais motivo de preocupação (BENISTON *et al.*, 2007). Alguns exemplos relativamente recentes são a “Onda de calor de 2003”, considerada como a pior dos últimos 500 anos (BENISTON, 2004; SCHÄR *et al.*, 2004), a “Tempestade de vento do século” que ocorreu em 1999 (GOYETTE *et al.*, 2003; ULBRICH *et al.*, 2001) e as inundações recorrentes em muitas partes do continente (KUNDZEWICZ *et al.*, 1999; CHRISTENSEN; CHRISTENSEN, 2003).

Os eventos extremos recentes no Brasil, no que se refere a cheias e precipitações intensas, ocorreram na Região Serrana do Rio de Janeiro em 2011, nos estados do Sul ao final de 2008, nos estados do Nordeste em 2009 (LIMA, 2011), além das recorrentes inundações em grandes cidades como São Paulo, Rio de Janeiro, Porto Alegre e Belo Horizonte, causando inúmeras vítimas, além do desalojamento de muitas famílias, prejuízos econômicos e materiais e aumento dos casos de doenças de veiculação hídrica.

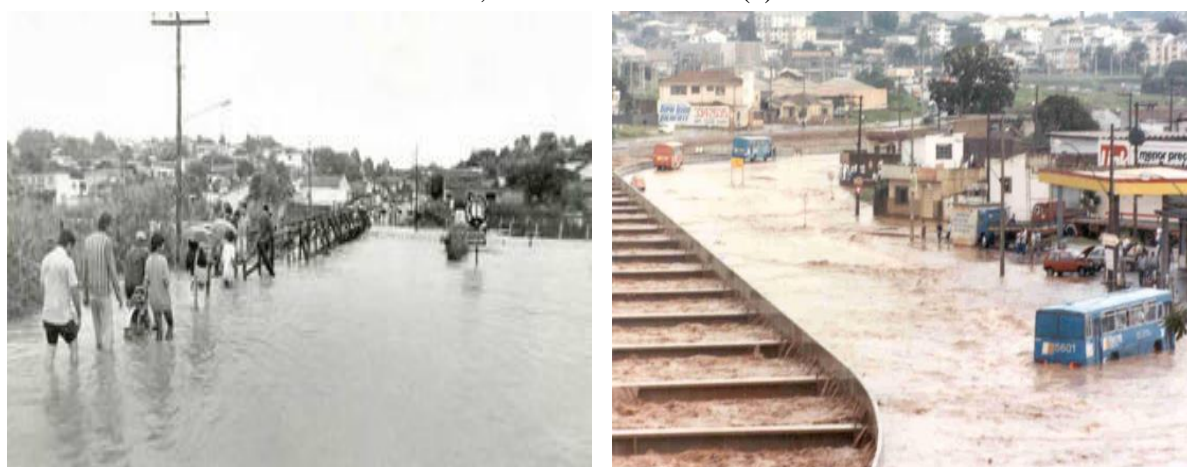
No contexto de Belo Horizonte, a frequência na ocorrência de inundações aumentou com o processo de urbanização (BAPTISTA *et al.*, 1997). Entre 1928 e 2000, por exemplo, foram noticiados 200 eventos expressivos de inundações, sendo que 69,5% destes aconteceram nas duas últimas décadas do século XX (CHAMPS, 2012), conforme exemplos apresentados na Figura 3.1.

Paralelamente a esta situação, muitas regiões também estão se urbanizando rapidamente (KISHTAWAL *et al.*, 2009). Há evidências crescentes de que a urbanização pode ter um

feedback significativo sobre os padrões espaciotemporais de precipitação (DANTAS; SANTOS; OLINDA, 2015; SOUZA; NASCIMENTO; ALVALÁ, 2015).

Cotton e Pielke (2007) citam muitos estudos que associam a urbanização aos padrões de precipitação, evidenciando mudanças na energia convectiva disponível. Além disso, pesquisas recentes continuam a mostrar evidências de como o aumento da temperatura da superfície (FERREIRA; BATISTA; VIANNA, 2015; ARAÚJO; SILVA; MACHADO, 2016) e anomalias de precipitação (RAIMUNDO; SANSIGOLO; MOLION, 2014) podem estar ligados a ambientes urbanos.

Figura 3.1 – Inundações no município de Belo Horizonte em 1979, no córrego Vilarinho (a), e em 1987, no Ribeirão Arrudas (b)



(a)

(b)

Fonte: ESTADO DE MINAS/D.A Press (2012)

Neste sentido, Sigrist, Künsch e Stahel (2012) afirmam que a precipitação é um fenômeno muito complexo, que varia no espaço e no tempo, e há muitos esforços para modelar sua não-estacionariedade. Estudos foram realizados em diferentes partes do mundo a fim de identificar mudanças nas séries hidrológicas temporais, especialmente utilizando testes estatísticos para detectar tendências (por exemplo, DOUGLAS *et al.*, 2000; ALEMAW; CHAOKA, 2002; TUCCI; BRAGA, 2003; XU *et al.*, 2003; LANG; RENARD, 2007; SANTOS; PORTELA, 2007; SANCHES; VERDUM; FISCH, 2013; BLANCHET; MOLINIÉ; TOUATI, 2016; entre outros).

Dessa forma, a adaptação e conseqüente minimização dos impactos de eventos extremos sobre a sociedade passam primariamente pelo estudo e conhecimento científico da magnitude e

frequência de ocorrência desses eventos ao longo do tempo, em particular visando a modelagem da ocorrência dos mesmos (LIMA, 2011).

3.2 Identificação de tendência em séries temporais

A magnitude de um evento extremo é inversamente relacionada à sua frequência de ocorrência, uma vez que os eventos muito severos ocorrem com menor frequência do que os mais moderados. O objetivo da análise de frequência das variáveis hidrológicas é relacionar a magnitude dos eventos com sua frequência de ocorrência por meio do uso de uma distribuição de probabilidade (NAGHETTINI; PINTO, 2007).

A modelação probabilística das variáveis hidrológicas pode ser realizada por meio de duas abordagens gerais. A primeira utilizando as séries de máximos anuais, as quais consideram apenas o maior evento em cada ano hidrológico e, a segunda, empregando as séries de duração parcial, também denominadas de séries de picos acima de um limiar, as quais incluem todos os picos que superaram certo valor de referência ou limiar (NAGHETTINI; PINTO, 2007). Esses dois tipos de séries serão analisados neste estudo para a detecção de eventuais tendências em eventos extremos de precipitação.

Em particular, em se tratando da utilização de testes estatísticos para detecção de tendências, de acordo com Naghettini e Pinto (2007), estes se dividem em paramétricos e não paramétricos. Os testes paramétricos assumem que os dados de séries temporais e os erros (desvios da tendência) seguem uma distribuição específica (geralmente, a distribuição normal) e quantificam as mudanças nas séries (por exemplo, a magnitude da mudança na média). Os testes não-paramétricos, por sua vez, livres de distribuição, detectam tendência/mudança nas séries, porém não visam quantificar a magnitude da mudança. Estes testes são muito importantes, uma vez que os dados de séries hidrológicas temporais, em sua maioria, não são normalmente distribuídos.

Os principais testes estatísticos utilizados em estudos que verificam a significância de mudanças graduais na série de dados hidrológicos são os testes não paramétricos de Mann-Kendall, de Spearman (VILLARINI *et al.*, 2009; VILLARINI *et al.*, 2011) e de Kendall Sazonal, e o teste paramétrico de regressão linear (RAUCH *et al.*, 2009), que testa se há uma tendência linear examinando a relação entre o tempo e a variável de interesse.

O teste não paramétrico de Mann Kendall (MANN, 1945; KENDALL, 1975) é aplicado apenas a séries independentes. A hipótese nula do teste, H_0 , supõe que as observações da série não apresentam tendência e, a hipótese alternativa, H_1 , que as observações da série possuem tendência monotônica no tempo (QUEIROZ, 2013). De acordo com Moraes *et al.* (1997), os n valores das séries temporais ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$) são reorganizados de acordo com sua ordem de classificação ($R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$) (ordem crescente), sendo que a estatística do teste S é:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \left(\sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(R_i - R_j) \right) \quad (3.1)$$

onde,

$\text{sgn}(x) = 1$ para $x > 0$,

$\text{sgn}(x) = 0$ para $x = 0$, e

$\text{sgn}(x) = -1$ para $x < 0$.

Se a hipótese nula (H_0) é verdadeira, então S é aproximadamente normalmente distribuído com:

$\bar{X} = 0$ e

$$s = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (3.2)$$

A estatística Z é:

$$Z = \frac{|S|}{\sqrt{\sigma}} \quad (3.3)$$

Um valor positivo de S indica que existe uma tendência crescente e vice-versa.

O teste não paramétrico Rho de Spearman determina se a correlação entre duas variáveis é significativa. Na análise de tendência, uma variável é tomada como o próprio tempo (anos) e a outra como os dados da série de tempo correspondente. De acordo com Gauthier (2001), o coeficiente de correlação de Spearman ou “rank correlation” é calculado pela seguinte equação:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n^3 - n} \quad (3.4)$$

onde d_i é a diferença entre os números de ordem das observações x_i e y_i , isto é, $d_i = n^\circ$ ordem de x_i - n° ordem de y_i . O coeficiente de correlação r_s é adimensional e situa-se no intervalo $-1 \leq r_s \leq 1$.

Se existem observações empatadas, o valor do coeficiente de correlação corrigido é:

$$(r_s)_c = \frac{\frac{n^3-3}{6} \sum_{i=1}^n d_i^2 - \sum T_x - \sum T_y}{\sqrt{\left(\frac{n^3-3}{6} - 2 \sum T_x\right) \left(\frac{n^3-3}{6} - 2 \sum T_y\right)}} \quad (3.5)$$

sendo,

$$\sum T_x = \frac{\sum_{j=1}^m (t_j^3 - t_j)}{12}, \text{ para } x \quad (3.6)$$

$$\sum T_y = \frac{\sum_{j=1}^m (t_j^3 - t_j)}{12}, \text{ para } y \quad (3.7)$$

onde m é o número de grupos empatados e t_j é o número de dados empatados em cada grupo.

Existem tabelas de significância do coeficiente de correlação de Spearman, contudo, a significância do coeficiente de regressão pode ser estimada pela aproximação da distribuição do coeficiente r_s à função de distribuição normal.

Outros testes importantes para a detecção de mudanças em séries de dados hidrológicos são os testes de mudanças abruptas, que verificam a significância da mudança do valor central da amostra a partir de um ponto da série conhecido ou desconhecido. Nestes testes é declarada como hipótese nula (H_0) a não existência de mudanças abruptas, enquanto a hipótese alternativa (H_1) corresponde a declarações contrárias a H_0 . O valor crítico do teste estatístico é definido em $\alpha/2$ (teste bilateral), sendo que a hipótese nula (H_0) é rejeitada se o valor da estatística de teste é maior do que o valor crítico da estatística de teste (ALEXANDRE, 2009).

Dentro desta abordagem, os principais testes utilizados são: a soma acumulada não paramétrica ou Distribution-Free CUSUM (não paramétrico), desvio acumulado ou Cumulative Deviation (paramétrico), teste da razão de verossimilhança de Worsley ou Worsley Likelihood Ratio (paramétrico), soma das ordens ou RankSum (não paramétrico) e o teste convencional de Student (paramétrico).

No âmbito dos testes não paramétricos que serão utilizados neste trabalho, segundo Chiew e Siriwardena (2005) a soma acumulada ou *CUSUM* testa se as medianas em duas partes de um registro de dados são diferentes (para um tempo de mudança desconhecido). Dada uma série de dados $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$, a estatística do teste é definida como:

$$V_k = \sum_{i=1}^k \text{sgn}(x_i - x_{\text{med}}), \text{ com } k = 0, 1, 2, 3, \dots, n \quad (3.8)$$

onde,

$\text{sgn}(x) = 1$ para $x > 0$,

$\text{sgn}(x) = 0$ para $x = 0$,

$\text{sgn}(x) = -1$ para $x < 0$, e

x_{med} = o valor mediano do conjunto de dados x_i .

A distribuição de V_k segue o teste de Kolmogorov-Smirnov, com estatística dada por:

$$KS = \frac{2}{N} \text{máx } |V_k| \quad (3.9)$$

Os valores críticos de $\text{máx } |V_k|$ são dados por:

$\alpha = 0,10 \rightarrow 1,22 \sqrt{n}$,

$\alpha = 0,05 \rightarrow 1,36 \sqrt{n}$,

$\alpha = 0,01 \rightarrow 1,63 \sqrt{n}$.

Um valor negativo de V_k indica que a parte mais recente do registro de dados tem mediana maior que a parte mais antiga.

Já para o teste *Rank-Sum* (não paramétrico), que também verifica se as medianas em dois períodos são diferentes, os dados devem ser ordenados de acordo com sua ordem de classificação de 1 a N (ordem crescente dos dados), sendo N o tamanho da amostra, dividindo a série em dois grupos (para um tempo de mudança conhecido). No caso de valores iguais, deve ser usada a média das ordens de classificação.

Segundo Chiew e Siriwardena (2005), a estatística S é computada como a soma dos ranks de observações do menor grupo (o número de observações no menor grupo é denotado como n e o número de observações no maior grupo é denotado por m).

Em seguida, a média e o desvio padrão de S são calculados a partir das seguintes equações:

$$\bar{X} = n \frac{(N+1)}{2} \quad (3.10)$$

$$s = \left[\frac{n m(N+1)}{12} \right]^{0,5} \quad (3.11)$$

A estatística de teste Z_{rs} é computada a partir das seguintes condições:

$$Z_{rs} = (S - 0,5 - \bar{X})/s \quad , \text{ se } S > \bar{X},$$

$$Z_{rs} = 0 \quad , \text{ se } S = \bar{X},$$

$$Z_{rs} = |S + 0,5 - \bar{X}|/s \quad , \text{ se } S < \bar{X}.$$

Z_{rs} é, aproximadamente, normalmente distribuído e os valores críticos da estatística de teste para vários níveis de significância podem ser obtidos a partir de tabelas de distribuição normal.

Além dos testes mencionados nesta etapa, existem outras opções de testes e análises que podem ser úteis na identificação de tendências. Considerando ainda uma etapa posterior, que se refere à interpretação de eventuais tendências detectadas, Kundzewicz e Robson (2000) afirmam que o melhor caminho para o entendimento desses tipos de mudança é a obtenção de informações adicionais, tais como:

- Histórico de mudanças no represamento hídrico da região;
- Conhecimento dos métodos de coleta dos dados;
- Histórico de dados de estações vizinhas;
- Obtenção de dados de variáveis associadas (como, por exemplo, associar séries de temperatura, precipitação e vazão); e
- Conhecimento dos processos históricos que levaram à concepção do padrão atual da região de estudo (tipo de ocupação, mudanças na morfologia das calhas fluviais, etc).

Ressalta-se, então, que a percepção de um clima em mudança, que impacta também os processos hidrológicos, já é uma ideia disseminada. No entanto, a maneira de lidar com a natureza mutável do clima, principalmente no que se refere às análises estatísticas, ainda é alvo de discussão. Dessa forma, ao realizar a análise de tendência, é essencial que sejam levantadas

as características da região de estudo, que apontem, sobretudo, possíveis motivações para não-estacionariedades nas séries hidrológicas (KOUTSOYIANNIS, 2006).

Neste contexto, serão apresentados na etapa posterior estudos desenvolvidos em diferentes partes do mundo, que buscam identificar, quantificar e analisar tendências em séries temporais de variáveis hidrológicas, principalmente extremos de precipitação.

3.3 Estudos de análise de tendência em séries hidrológicas

A existência de não-estacionariedade em séries hidrológicas, apesar de estar associada a estudos relativamente recentes, já é largamente aceita pela comunidade científica. Dessa forma, a investigação da presença de tendências e outras não-estacionariedades em séries amostrais hidrológicas tornou-se fundamental, sendo foco de muitos estudos desenvolvidos nos últimos anos (MOREIRA; NAGHETTINI, 2016).

Madsen *et al.* (2014) afirmam que o estudo das alterações nos regimes de precipitação e vazão tornou-se uma área de pesquisa muito ativa e a investigação de possíveis mudanças climáticas é um fator básico para estes estudos. No que diz respeito às mudanças sob um clima futuro, estudos de modelagem do clima têm demonstrado que um aumento em precipitações extremas é provável em muitas partes do mundo no século 21 (IPCC, 2012).

Neste contexto, muitos estudos ilustram, por exemplo, a variabilidade espacial das tendências de extremos de precipitação nas últimas décadas. Toreti *et al.* (2010), em estudo realizado para a região costeira do Mediterrâneo, identificaram tendências variáveis na ocorrência de eventos extremos, com uma tendência negativa significativa encontrada em 6 dos 20 locais estudados. Ainda na região do Mediterrâneo, Alpert *et al.* (2002) mostraram que a precipitação diária extrema da Espanha para Israel aumentou no período de 1951 a 1990, apesar da precipitação total ter diminuído.

Por outro lado, Shang *et al.* (2011), com base em uma crescente preocupação acerca da associação entre precipitação extrema e mudanças climáticas na Etiópia, realizou uma análise de tendências com séries diárias de registros de precipitação em Debre Markos, nas Terras Altas do Noroeste da Etiópia, e não encontraram forte evidência de uma tendência crescente de precipitação extrema neste local. Além disso, estudos realizados no Brasil (SALVIANO; GROppo; PELLEGRINO, 2016) e Índia (KRISHNAKUMAR; PRASADA RAO;

GOPAKUMAR, 2009) mostraram resultados contrastantes (tendências positivas, negativas e insignificantes) de acordo com a região.

Em estudo feito para Alegrete (RS), no Brasil, Sanches *et al.* (2013) analisaram as precipitações para diferentes escalas de tempo no período de 1928-2009, buscando a identificação de possíveis tendências. A aplicação do teste de Mann-Kendall aos conjuntos de dados permitiu constatar que as tendências (positivas e negativas) encontradas nos totais trimestrais e mensais de precipitação na região não puderam ser consideradas como decorrentes de modificações climáticas, mas sim como resultado da aleatoriedade normal da própria série. Já os totais anuais demonstraram, após o teste, que podem ter sofrido modificações (redução) significativas.

Minuzzi e Caramori (2011) analisaram o comportamento sazonal e anual da chuva e de veranicos em 21 estações hidrológicas localizadas no estado do Paraná. O teste de Regressão Linear e o teste de Kendall mostraram que, nas últimas décadas, a quantidade de chuva anual tem aumentado, principalmente na primavera, entre 16 e 42 mm/década, na metade leste do Paraná. A mesma tendência foi observada na intensidade dos eventos extremos diários de chuva. O número de tendências significativas (predominantemente negativas) é menor para os veranicos, com duração de 5 a 10 dias, com quantidade acumulada inferior a 10 mm, porém, mais perceptível na primavera e na escala anual.

Em estudo feito para a Região Metropolitana de Belo Horizonte, foco desta pesquisa, Alexandre *et al.* (2010) encontraram tendência de aumento de precipitação no período mais seco do ano (abril-setembro), em contraposição a uma tendência de diminuição de chuvas no período mais chuvoso (outubro-março), apesar de, tanto o regime anual quanto os totais mensais máximos da região, não apresentarem evidências de mudanças em suas séries.

Observa-se que, em geral, as tendências são verificadas por meio da análise de séries históricas de precipitação. Porém, para melhor relacionar a análise de tendência com a verificação de mudanças climáticas, a OMM, por meio de um grupo de especialistas denominado “Expert Team on Climate Change Detection Monitoring and Indices - ETCCDMI”, elaborou índices que podem ser empregados na detecção dessas alterações. Têm-se um total de 27 índices principais, sendo 16 índices de temperatura e 11 índices de precipitação. Os índices de precipitação são listados na sequência:

- CDD: Número anual de dias secos consecutivos
- CWD: Número anual de dias chuvosos consecutivos
- Sdii: Índice de intensidade diária
- Rx1d: Precipitação máxima mensal em 1 dia
- Rx5d: Precipitação máxima mensal em 5 dias consecutivos
- R10mm: Número anual de dias chuvosos acima de 10 mm
- R20mm: Número anual de dias chuvosos acima de 20 mm
- R30mm: Número anual de dias chuvosos acima 30 mm
- R95p: dias muito chuvosos
- R99p: Dias extremamente chuvosos
- PRCPOT: Total anual de dias chuvosos

No que se refere à exploração destes índices, tem-se uma gama de trabalhos que podem ser citados. Na Bulgária, Bocheva *et al.* (2009) estudaram a variabilidade e as tendências associadas a eventos extremos de precipitação durante o período de 1961-2005, utilizando o teste de Mann-Kendall. Os totais diários de precipitação equivalentes ou superiores a 30 mm foram considerados de risco para inundações, definindo os eventos extremos de chuva para a região. Foram comparados os períodos de 1961-1990 e 1991-2005, sendo evidenciado um aumento significativo (mais de 32%) dos dias com precipitação extrema no segundo período, enquanto a precipitação total anual apresentou pouca alteração ou uma ligeira tendência decrescente em muitas regiões do país.

Kysely (2009) analisou tendências associadas a eventos extremos de precipitação na República Checa, utilizando totais diários de precipitação e índices de precipitação extrema, durante o período de 1961-2005. Foi verificado um aumento significativo da precipitação extrema no inverno na parte ocidental do país (20-30%), sendo, para tal análise, utilizado o teste de Mann-Kendall.

Zolina (2012) estudou as mudanças em precipitações intensas na Europa, analisando, para tal, 1158 estações pluviométricas. Avaliou-se por meio do teste de regressão linear o índice de percentil 95 de precipitação diária, sendo observado um aumento geral da precipitação de inverno extremo na Europa e um aumento da precipitação de verão extremo na Europa Oriental. Foi observada, também, uma diminuição da precipitação de verão extremo em muitos locais da Europa ocidental e central.

Ainda na Europa, Van den Besselaar *et al.* (2013) analisaram tendências em eventos de precipitação extrema aplicando o teste de regressão linear aos índices de precipitação *1-day*, precipitação máxima mensal em 1 dia consecutivo, e *5-day*, precipitação máxima mensal em 5 dias consecutivos, de 478 estações pluviométricas no período de 1951-2010, verificando que no norte da Europa ocorreu o aumento de precipitações extremas no outono, inverno e primavera, e no sul da Europa um pequeno aumento de precipitações extremas em todas as estações.

Na Grécia, Nastos e Zerefos (2008) analisaram as alterações nos totais diários de precipitação durante um período de 45 anos (1957-2001). O conjunto de dados de precipitação totalizaram totais diários registrados em 21 estações meteorológicas, distribuídas uniformemente sobre a região grega. Foram estimadas as tendências para o número de dias com precipitação superior a 30 mm (igual ao percentil de 95% da precipitação diária para as regiões oriental e ocidental e igual ao percentil de 97,5% para o resto do país) e 50 mm, que é o limite para eventos muito extremos e raros. A análise de regressão linear demonstra a existência de tendências positivas, não estatisticamente significativas, observadas nos totais diários de precipitação superior a 30 e 50 mm nas regiões leste e sudeste do país.

Já na África Ocidental, Ly *et al.* (2013) analisaram a evolução de alguns índices de temperatura e de extremos de precipitação sobre uma grande área que cobre latitudes de 10 – 25° N e longitudes de 17° O – 15° L. Os resultados mostraram uma tendência geral de aquecimento em toda a região durante o período de 1960 a 2010, através de uma tendência negativa no número de noites frescas, e tendência positiva de dias quentes e períodos quentes. As tendências nos índices de precipitação não foram tão uniformes quanto os de temperatura

No Brasil, Santos *et al.* (2009) analisaram para o estado do Ceará os diferentes índices de precipitação, baseados em dados de precipitação pluvial diária de 18 postos, no período de 1935 a 2006, representando todas as microrregiões do Estado. Os resultados obtidos permitiram concluir que ocorreram mudanças locais na precipitação, assim como um visível aumento nas condições de umidade sobre o Ceará.

Na cidade de Manaus, Santos *et al.* (2012) estudaram tendências nos índices de extremos climáticos baseados em dados de precipitação de três estações localizadas na cidade e na região circunvizinha para o período de 1971-2007. Foi observado um aumento da precipitação total anual sobre a região estudada. A estação localizada na zona urbana de Manaus teve aumento,

com significância estatística, dos eventos de precipitação iguais ou superiores a 50 mm (R50mm), na precipitação máxima acumulada em cinco dias consecutivos (Rx5day) e nos dias úmidos (R95p), indicando que Manaus poderá sofrer com o aumento das chuvas extremas.

Ainda neste contexto, Queiroz (2013) estudou as tendências em séries de precipitação diária máxima anual na faixa central do estado de Minas Gerais, por meio de índices de precipitação que podem ser empregados na detecção de mudanças climáticas. Os índices de dias extremamente chuvosos (R99p), número de dias com precipitações superiores a 30 mm (R30mm), quantidade de precipitação máxima em 5 dias (Rx5day) e o índice de intensidade diária (Sdii) apresentaram tendência significativa, predominando a positiva.

Todos os estudos mencionados trabalharam com dados de precipitação diária para analisar as tendências em eventos extremos de precipitação, no entanto, a maioria destes eventos ocorre em escalas de tempo mais curtas, podendo ser, até mesmo, em menos de uma hora. Portanto, as análises de tendências de eventos extremos de precipitação em escalas de tempo menores podem melhor revelar as tendências em nível local (KANAE *et al.*, 2004), principalmente para estudos em áreas urbanizadas.

De acordo com Paixão *et al.* (2015), a intensidade da precipitação que atinge a superfície terrestre é dependente da quantidade de umidade no ar e da velocidade com a qual os processos de elevação atmosférica podem converter esta umidade em precipitação. Uma variedade de processos dinâmicos da atmosfera pode elevar o ar úmido e resultar em uma variedade de intensidades de precipitação, durações e tendências sazonais sobre uma determinada área.

Zolina (2014) considera a duração das chuvas extremas uma característica relevante a ser considerada, uma vez que as tendências em diferentes durações são altamente variáveis em toda a Alemanha. Também em Ontário, no Canadá, Adamowski e Bougadis (2003) detectaram tendências significativas nos dados de precipitação máxima anual para durações variando de 5 min a 12 h, utilizando o teste estatístico de Mann-Kendall.

Na Dinamarca, Arnbjerg-Nielsen (2006) estudou as variações na precipitação extrema durante duas décadas. A análise de tendência foi realizada para três variáveis durante o período de observação: intensidade máxima média de 10 minutos de duração, a intensidade máxima média de 6h e o volume total de eventos de chuva individuais. Para a intensidade máxima de 10 min há uma tendência estatisticamente significativa de ocorrência de eventos ainda mais extremos

e, também, mais frequentes. Para a intensidade máxima de 6 horas e volume total de eventos as tendências são menos pronunciadas. Os resultados são confirmados por comparação com modelos climáticos.

Ainda neste contexto, Crisci *et al.* (2002) estudaram as incertezas devidas às tendências relacionadas com a estimativa das tempestades de projeto para Toscana (Itália) e detectaram que a existência de consequências hidrológicas relacionadas à variabilidade climática tem um impacto importante sobre o projeto de obras hidráulicas na bacia. Tal consideração se associa ao fato de que o processo de decisão sobre os sistemas desenvolvidos no âmbito da gestão dos recursos hídricos parte, em geral, da premissa de que não ocorreram mudanças nas características estatísticas das séries hidrológicas, a exemplo das distribuições que melhor se ajustam a estas séries, ao longo do tempo (MOREIRA, 2016).

Dessa forma, quando as séries hidrológicas apresentam características contrárias à premissa de estacionariedade – previamente verificada por meio dos testes estatísticos anteriormente mencionados – torna-se necessária, então, a aplicação de métodos adequados para a análise de frequência, dado que os parâmetros distributivos apresentam variabilidade no tempo e, por conseguinte, as probabilidades de excedência dos quantis de referência também estão sujeitas à variação (CLARKE, 2007; OBEYSEKERA; SALAS, 2014).

3.4 Análise de frequência em séries hidrológicas sob a hipótese de não-estacionariedade

No contexto da análise de frequência de variáveis hidrológicas, a hipótese de não-estacionariedade implica na variação temporal da função densidade de probabilidades. Considerando que o presente estudo se concentra nos máximos anuais, a distribuição abordada será a Distribuição Geral de Valores Extremos (GEV). No caso estacionário, a função de distribuição cumulativa dos dados é representada pela equação 3.12:

$$G(x; \mu, \sigma, \xi) = \begin{cases} \exp \left\{ - \left(1 + \xi \frac{x-\mu}{\sigma} \right)^{-\frac{1}{\xi}} \right\} & \text{se } \xi \neq 0, \text{ para } 1 + \xi \frac{x-\mu}{\sigma} > 0, \\ \exp \left\{ - \exp \left(- \frac{x-\mu}{\sigma} \right) \right\} & \text{se } \xi = 0 \end{cases} \quad (3.12)$$

onde μ , σ e ξ são os parâmetros de posição, escala e forma, respectivamente, e x a precipitação máxima anual.

No caso não-estacionário, os parâmetros da distribuição GEV variam com o tempo (anos). Uma das possibilidades é o parâmetro de posição ser assumido como uma função $\mu(t)$, enquanto os parâmetros de escala e forma são constantes. Neste sentido, podem ser testados três modelos para $\mu(t)$: uma tendência linear monotônica (KATZ *et al.*, 2002; BLANCHET *et al.*, 2016), apresentado na equação 3.13; uma tendência linear a partir do ano t_0 (BLANCHET *et al.*, 2016), apresentado na equação 3.14; e uma tendência linear que se encerra no ano t_0 (BLANCHET *et al.*, 2016), apresentado na equação 3.15

Tendência linear monotônica:

$$\mu(t) = \mu_0 + \mu_1 t \quad (3.13)$$

Tendência linear a partir do ano t_0 :

$$\mu(t) = \begin{cases} \mu_0, & t \leq t_0 \\ \mu_0 + \mu_1(t - t_0), & t \geq t_0 \end{cases} \quad (3.14)$$

Tendência linear até o ano t_0 :

$$\mu(t) = \begin{cases} \mu_0 + \mu_1(t - t_0), & t \leq t_0 \\ \mu_0, & t \geq t_0 \end{cases} \quad (3.15)$$

Nestes casos o parâmetro μ_1 pode ser interpretado como a inclinação de uma tendência linear anual da variável. Outras formas mais complexas de não-estacionariedade no parâmetro de posição da GEV podem ser citadas, a exemplo de uma tendência polinomial quadrática representada por meio da equação 3.16:

$$\mu(t) = \mu_0 + \mu_1 t + \mu_2 t^2 \quad (3.16)$$

É possível, ainda, ser considerada uma não-estacionariedade no parâmetro de escala, $\sigma(t)$. Nesse caso, o objetivo é analisar possíveis tendências na variância da variável representada pelo modelo GEV e, de acordo com Coles (2001) e Salas e Obeysekera (2014), uma forma apropriada de parametrização é feita por meio de uma função exponencial, uma vez que sua utilização garante que o parâmetro seja expresso somente em valores positivos, conforme a equação 3.17:

$$\ln[\sigma(t)] = \sigma_0 + \sigma_1 t \quad (3.17)$$

Vale ressaltar que não é comum estabelecer uma tendência para o parâmetro de forma.

Ainda de acordo com Coles (2001), o método da máxima verossimilhança está entre os métodos mais comumente utilizados para a determinação dos parâmetros de um modelo GEV não-estacionário, cuja vantagem está em sua adaptabilidade a mudanças na estrutura do modelo. Comumente se emprega uma função logaritmo da verossimilhança pelo fato de a mesma ser contínua, monótona e crescente e, também, pelo fato de que maximizar o logaritmo da função é o mesmo que maximizá-la (NAGHETTINI; PINTO, 2007; CHENG et al., 2014).

Considerando uma dada série de n máximos anuais, denotados $r = (r_1, \dots, r_n)$, e (t_1, \dots, t_n) os anos correspondentes, e supondo a independência dos máximos anuais, o log-verossimilhança no caso não estacionário é dada por:

$$\log L(\mu_0, \mu_1, \sigma, \xi) = -n \log(\sigma) - \left(1 + \frac{1}{\xi}\right) \sum_{i=1}^n \check{r}_i - \sum_{i=1}^n \check{r}_i^{\frac{-1}{\xi}} \quad (3.18)$$

onde

$$\check{r}_i = 1 + \xi \left(\frac{r_i - \mu(t_i)}{\sigma} \right), \quad (3.19)$$

e $\mu(t)$ é uma função de μ_0 e μ_1 como nas Eqs. 3.13 a 3.16, dependendo do modelo considerado. O log-verossimilhança no caso estacionário é função de (μ_0, σ, ξ) e também é dado pela Eq. 3.18, substituindo $\mu(t_i)$ por μ_0 na Eq. 3.19. Denotando θ os três parâmetros da GEV, os parâmetros mais prováveis são aqueles em que $\hat{\theta} = \arg \max_{\theta} L(\theta)$. Uma vez que não existe uma solução explícita, $\hat{\theta}$ é obtido numericamente. Os desvios-padrões da tendência de μ_1 nos modelos não estacionários das Eqs. 3.13 a 3.16 são obtidos a partir da normalidade aproximada do estimador de máxima verossimilhança (COLES, 2001), como:

$$std(\hat{\mu}_1) = \sqrt{(I^{-1})_{22}} \quad (3.20)$$

onde $(I^{-1})_{22}$ é o elemento (2,2) do inverso da Matriz da Informação de Fisher observada I definida por:

$$I = \begin{pmatrix} -\frac{\partial^2 \log L(\hat{\theta})}{\partial \mu_0^2} & -\frac{\partial^2 \log L(\hat{\theta})}{\partial \mu_0 \partial \mu_1} & -\frac{\partial^2 \log L(\hat{\theta})}{\partial \mu_0 \partial \sigma} & -\frac{\partial^2 \log L(\hat{\theta})}{\partial \mu_0 \partial \xi} \\ -\frac{\partial^2 \log L(\hat{\theta})}{\partial \mu_0 \partial \mu_1} & -\frac{\partial^2 \log L(\hat{\theta})}{\partial \mu_1^2} & -\frac{\partial^2 \log L(\hat{\theta})}{\partial \mu_1 \partial \sigma} & -\frac{\partial^2 \log L(\hat{\theta})}{\partial \mu_1 \partial \xi} \\ -\frac{\partial^2 \log L(\hat{\theta})}{\partial \mu_0 \partial \sigma} & -\frac{\partial^2 \log L(\hat{\theta})}{\partial \mu_1 \partial \sigma} & -\frac{\partial^2 \log L(\hat{\theta})}{\partial \sigma^2} & -\frac{\partial^2 \log L(\hat{\theta})}{\partial \sigma \partial \xi} \\ -\frac{\partial^2 \log L(\hat{\theta})}{\partial \mu_0 \partial \xi} & -\frac{\partial^2 \log L(\hat{\theta})}{\partial \mu_1 \partial \xi} & -\frac{\partial^2 \log L(\hat{\theta})}{\partial \sigma \partial \xi} & -\frac{\partial^2 \log L(\hat{\theta})}{\partial \xi^2} \end{pmatrix}$$

Posteriormente, uma etapa muito importante é a seleção do modelo apropriado. De acordo com Coles (2001), uma vez que é possível modelar qualquer combinação dos parâmetros de uma determinada variável, como função do tempo ou de outra covariável, o princípio básico é eger o modelo mais simples e que possua, como característica principal, a capacidade de explicar a maior parte da variação dos dados quanto possível. Nesse sentido, os principais instrumentos utilizados para avaliação e seleção do modelo mais apropriado são o teste da razão de verossimilhança e os critérios de informação de Akaike (AIC) e Bayesiano (BIC).

Os critérios Akaike e Bayesiano (respectivamente AIC, [AKAIKE, 1974] e BIC, [SCHWARZ, 1978]), descritos em Blanchet *et al.* (2016), só diferem entre si no termo penalizante. Nesse sentido, sendo M o modelo não estacionário que se deseja testar e objetivando-se avaliar se M deveria de fato ser preferido ao modelo estacionário M_0 , considera-se L_M e L_{M_0} a verossimilhança em M e M_0 (Eq. 3.18), e $\hat{\theta}$ e $\hat{\theta}_0$ os parâmetros correspondentes mais prováveis. A diferença de AIC e BIC entre os dois modelos é dada por:

$$\Delta AIC = 2\{\log L_M(\hat{\theta}) - \log L_{M_0}(\hat{\theta}_0)\} - 2 \quad (3.21)$$

$$\Delta BIC = 2\{\log L_M(\hat{\theta}) - \log L_{M_0}(\hat{\theta}_0)\} - \log(n)$$

Os valores positivos de ΔAIC (resp. ΔBIC) evidenciam a preferência pelo modelo não estacionário M.

Uma maneira de testar estatisticamente o modelo M versus M_0 é realizar um teste de razão de verossimilhança (LRT, [Coles, 2001], capítulo 2.6). O teste aplica-se quando M_0 é um caso particular de todos os modelos não estacionários considerados (correspondente a μ_1 e $\mu_2 = 0$ nas Eqs 3.13 a 3.16). Define-se, então, D para ser a estatística de desvio:

$$D = 2\{\log L_M(\hat{\theta}) - \log L_{M_0}(\hat{\theta}_0)\} \quad (3.22)$$

A regra de decisão consiste em um teste da validade de M_0 comparado a M , no nível de significância α . Rejeita-se o modelo estacionário M_0 a favor de M se D for maior do que o quantil $(1-\alpha)$ da distribuição χ_1^2 .

Ainda no contexto da análise de frequência sob a hipótese de não-estacionariedade, certos conceitos importantes, argumentados sob a premissa de estacionariedade, não são diretamente aplicáveis à análise não-estacionária, como é caso do tempo de retorno. Neste sentido, muitos trabalhos contribuíram para o avanço da extensão de tais conceitos, no intuito de generalizá-los para situações de não-estacionariedade, com destaque ao conceito proposto por Rootzén e Katz (2013), denominado Design Life Level, ou DLL, que considera o período de vida útil de certa estrutura planejada e a probabilidade de ocorrência de um evento extremo durante esse período, ou seja, a determinação de um quantil associado a uma probabilidade de que esse seja excedido, ao menos uma vez, durante a vida útil da estrutura projetada.

Para a determinação do DLL, utiliza-se a função acumulada de probabilidades para os máximos anuais de cheia durante o período de vida útil do projeto, $F_{X(t)_{T_2-T_1}}$, em que T_1 e T_2 representam, respectivamente, o primeiro e último ano do referido período. Admitindo-se independência entre os termos, tem-se, então:

$$F_{X(t)_{T_2-T_1}} = P(\max\{X_t, t \in [T_1, T_2]\} \leq x)$$

$$F_{X(t)_{T_2-T_1}} = P\left[\bigcap_{t=T_1}^{T_2} (X(t) \leq x)\right] = \prod_{t=T_1}^{T_2} F_t(x) \quad (3.23)$$

De acordo com os referidos autores, o valor do DLL é obtido por meio da inversão do valor obtido na equação (3.23), chamada de função de quantil, aplicada à probabilidade de não-excedência $(1 - p)$ desejada, ou seja, uma estimativa do *Design Life Level* para o risco associado p . A estimativa do quantil de vida útil, para o risco associado p , é dada por:

$$DLL = z_{q_0} \left(F_{X(t)_{T_2-T_1}} \right) \quad (3.24)$$

onde z_{q_0} é o quantil de cheia projetado

No Brasil, Moreira *et al.* (2016) aplicaram tal metodologia com o objetivo de analisar o risco de precipitação para a duração de dez dias, em Tarauacá, no estado do Acre. Neste estudo, entretanto, propõe-se uma adaptação do conceito "*Minimax Design Life Level: the $T_1 - T_2$ p%*"

bounded yearly risk level", descrito também em Rootzén e Katz (2013), para quantificar as intensidades de chuva para fins de projetos de engenharia em uma situação de não-estacionariedade das séries.

Para uma melhor compreensão dos dois conceitos - *Design Life Level e Minimax Design Life Level* – propõe-se aqui a descrição de um exemplo hipotético utilizado no trabalho de Rootzén e Katz (2013). Neste caso, o *Design Life Level* é utilizado como uma medida para quantificar o risco para fins de projeto de engenharia, em uma situação de não-estacionariedade, visando alcançar uma probabilidade desejada para uma excedência perigosa (ou risco de falha) durante o período de vida útil do projeto; já o *Minimax Design Life Level*, embora com uma relação próxima, é complementar, concentrando-se na probabilidade máxima anual de excedência durante o período de vida útil do projeto. Neste contexto, tem-se como exemplo a inundação de um dique, no qual a distribuição do nível de água mais alto, durante o ano t , é representada pela GEV, conforme a equação:

$$G_t(x) = \exp\left(-\left(1 + \xi_t \frac{x - \mu_t}{\sigma_t}\right)^{\frac{-1}{\xi_t}}\right), \text{ para } 1 + \xi_t \frac{x - \mu_t}{\sigma_t} \geq 0 \quad (3.25)$$

Nota-se que para $\xi_t = 0$ esta distribuição é simplificada para Gumbel. Tem-se, ainda, que $\mu_t, \sigma_t > 0$ e ξ_t são os parâmetros de posição, escala e forma, respectivamente, para o ano t após 2015, que representa, no exemplo do estudo, o início do primeiro período de vida do projeto. Além disso, supõe-se que:

$$\mu_t = 1 + 0,002t, \sigma_t = 1 + 0,002t, \xi_t = 0,1 \quad (3.26)$$

Considera-se no estudo que o aumento no parâmetro de posição poderia ser devido a um aumento no nível médio de água, e o aumento do parâmetro de escala poderia ser causado por um aumento na variabilidade climática. Posteriormente, nota-se que o tempo de espera até que um nível u seja excedido, denotado EWT (u), é obtido a partir da equação (3.25), como:

$$\text{EWT}(u) = \sum_{t=0}^{\infty} \text{Pr}\{\text{tempo de espera} > t\} = 1 + \sum_{t=1}^{\infty} G_1(u) \times \dots \times G_t(u). \quad (3.27)$$

As variáveis do *Design Life Level: the T_1 - T_2 $p\%$ extreme level* foram definidas por Rootzén e Katz (2013) como: T_1 denota o início do período de vida do projeto (2015), T_2 é o fim (2064) e p é a probabilidade de que o nível seja excedido durante o período de vida útil do projeto

(5%). O *Design Life Level* estimado pode ser expresso, então, da seguinte forma: “há um risco de 1 em 20 (5%) de que a maior inundação durante 2015-2064 seja maior que 11,5 m”.

A Tabela 3.1 apresenta o *Design Life Level* para dois períodos de vida de projeto e níveis de risco diferentes, juntamente com os correspondentes períodos de retorno para uma condição de estacionariedade com a mesma distribuição do primeiro ano do período de vida do projeto (ou seja, para os períodos de retorno $T = 975$ e $T = 4975$, respectivamente, que pela equação de risco hidrológico “ $R = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^n$ ” torna a probabilidade de uma excedência num período de 50 anos igual a 0,05 e 0,01, respectivamente.) A Tabela 3.1 também exhibe os tempos de espera (EWT) até a primeira superação do *Design Life Level* quando a tendência é dada pela equação (3.26), e quando a tendência para nas extremidades dos períodos de vida do projeto.

Tabela 3.1 – Resultado do exemplo de cálculo do DLL citado em Rootzén e Katz (2013)

<i>Design Life</i>	Prob.	<i>Design Life Level</i>	Nível de Retorno (2015)	EWT	EWT Tendência interrompida
2015-2064	0,05	11,5	10,9	251	788
2015-2064	0,01	15,2	14,4	431	3839
2065-2114	0,05	12,6	10,9	262	1008
2065-2114	0,01	16,6	14,4	453	5002

* Os níveis de retorno são para $T=975$ e $T=4975$, respectivamente. Na primeira coluna EWT, os parâmetros são dados pela equação (3.26). Na segunda coluna, os parâmetros são dados pela equação (4) até o final do período de vida útil e são mantidos constantes depois disso.

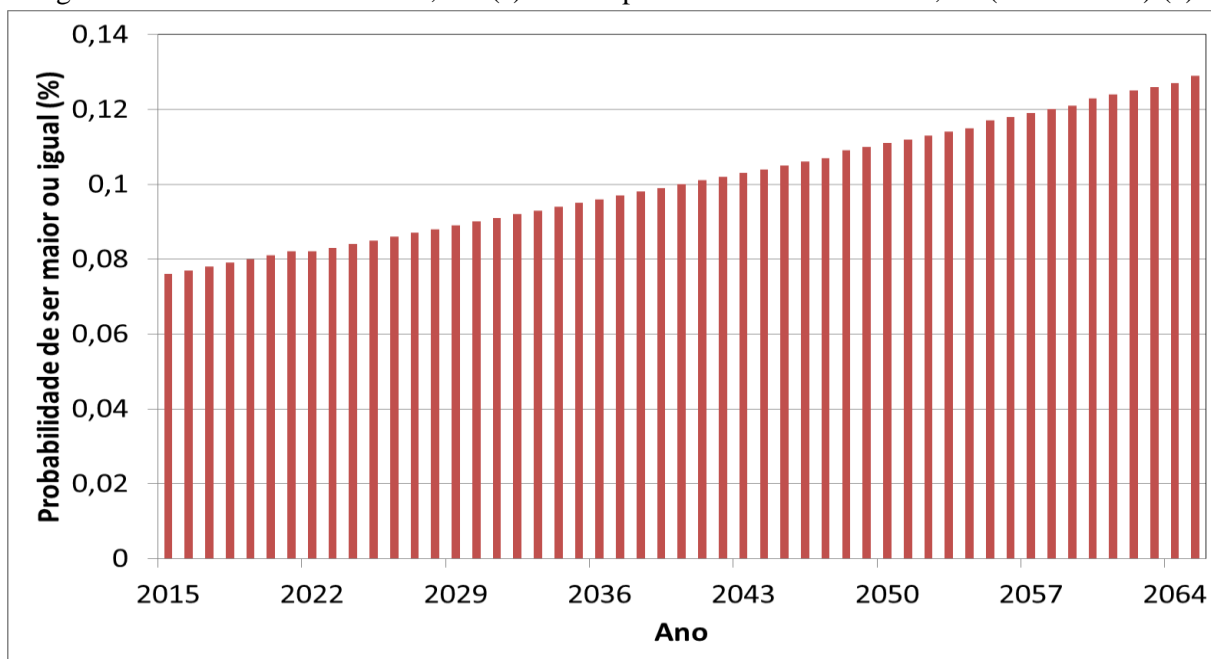
Considerando os resultados da Tabela 3.1, observa-se que os Níveis de Retorno obtidos a partir da suposição de estacionariedade são muito baixos e que os tempos de espera são drasticamente alterados diante da mudança de suposições sobre o que acontece após o período de vida útil do projeto. Tais resultados ilustram que nenhum desses conceitos é apropriado para este exemplo (a finalidade dos cálculos do tempo de espera é apenas mostrar sua sensibilidade a suposições sobre o comportamento após o final do período de vida útil do projeto e não fazer previsões fisicamente realistas).

Ainda no contexto do exemplo de Rootzén e Katz (2013), uma variante do *Design Life Level* é o *Minimax Design Life Level: the $T_1 - T_2$ p% bounded yearly risk level*. Aqui T_1 e T_2 são definidos como antes, mas para este conceito, o nível é escolhido de tal forma que a probabilidade máxima de excedência em qualquer ano no período de vida útil do projeto seja no máximo p%. Assim, no exemplo, “o nível de água de risco anual limitado a 0,1% em 2015–2064 de 12,0 m” poderia, em uma linguagem menos técnica, ser considerado como “o risco de

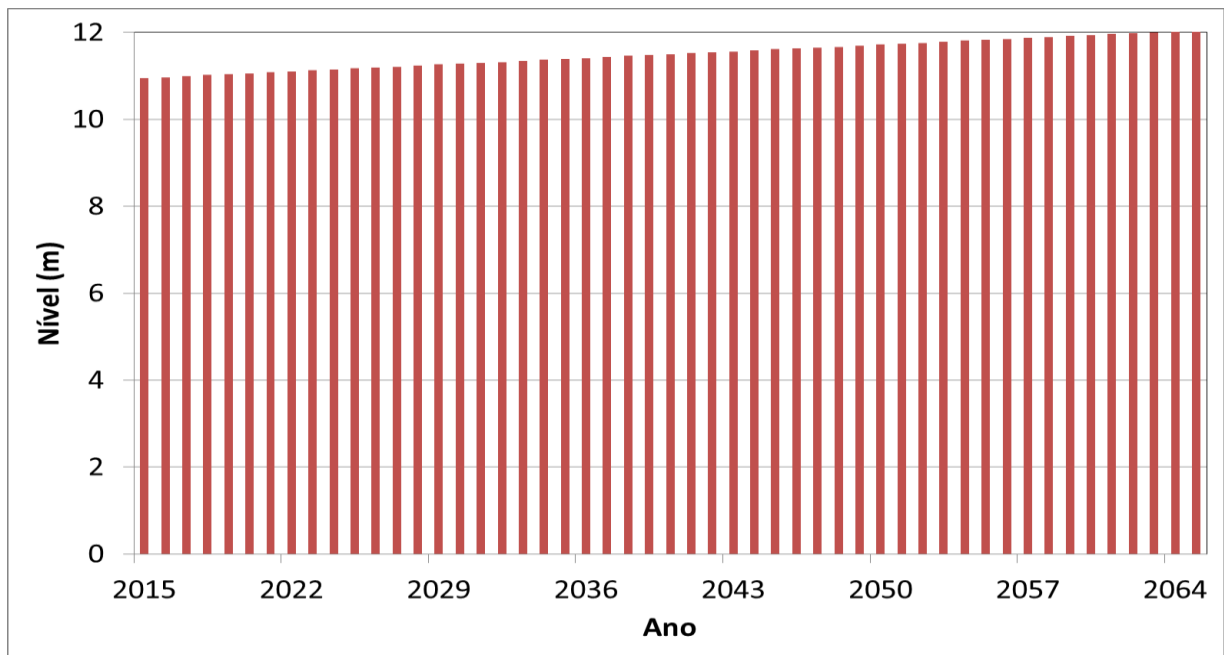
haver uma inundação maior que 12,0 m é menor que 1 em 1000 para cada ano, no período de tempo de 2015 a 2064". Tecnicamente, o valor de 12,0 m é obtido pela primeira determinação do quantil de 0,999 da distribuição das maiores chuvas em 2015, em 2016, ... e em 2064, e depois o maior desses 50 quantis.

Finalmente, Rootzén e Katz (2013) apresentam o Gráfico de Risco, que fixa um nível e mostra como o risco de exceder esse nível varia nos diferentes anos do período de vida útil do projeto, e o gráfico de risco constante que, diferente disso, fixa uma probabilidade e, para cada ano no período de vida útil do projeto, exhibe o nível que é excedido com essa probabilidade. Resumindo, o risco não estacionário em termos de mudança de quantis (denominado "nível de retorno efetivo") informa aos gestores como eles devem planejar para obter o mesmo risco para cada ano no período de vida útil do projeto. A Figura 3.2 exhibe esses gráficos para o presente exemplo.

Figura 3.2 – Risco do Nível de 11,5 m (a) e Nível para o risco constante de 0,1% (2015 a 2065) (b)



(a)



(b)

Considerando, então, apresentado o conceito de *Minimax Design Life Level*, que será explorado no Capítulo 6 deste trabalho, vale ressaltar que o número de estudos que identificam e quantificam não-estacionariedades em séries hidrológicas, muitas vezes relacionadas às alterações climáticas, aumentou consideravelmente nos últimos anos. Porém, estudos que lidam com os impactos de mudanças climáticas na drenagem urbana ainda são bastante limitados, em parte porque exigem um foco específico em escalas de pequenas bacias urbanas (geralmente inferiores a 500 km²) e precipitações de curta duração (normalmente inferiores a 1 dia) (WILLEMS *et al.*, 2012).

3.5 Impacto da não-estacionariedade de séries hidrológicas em bacias urbanas – o conceito de resiliência urbana

A precisão e eficiência nos projetos de infraestrutura hídrica e no planejamento de gestão de inundações são altamente dependentes de informações confiáveis de precipitação, sendo que a maior parte dos casos requer dados subdiários de chuva, a fim de contemplar a variabilidade temporal dos eventos de chuvas intensas (PEDERSEN *et al.*, 2010, BONNIN *et al.*, 2006, WATT *et al.*, 2003; SUN *et al.*, 2000).

Em regiões onde os processos convectivos de chuva são dominantes, torna-se necessário o conhecimento das chuvas extremas por meio das equações Intensidade-Duração-Frequência (IDF), que exigem uma rede representativa das estações para capturar estatisticamente a

variabilidade espacial e temporal dos eventos na região (KONRAD, 2001; WHEATER *et al.*, 2000).

Segundo Hailegeorgis *et al.* (2013), as curvas IDF permitem a concepção de hietogramas de tempestades de projeto que geram a informação necessária para a concepção e gestão de infraestrutura de drenagem urbana. No entanto, devido à prevalência de eventos extremos de precipitação e da vulnerabilidade dos ambientes urbanos, há um interesse crescente advindo de diferentes partes, tais como municípios, empresas e engenheiros para a análise confiável desses eventos, de forma a definir as incertezas e procedimentos para a atualização de rotina (HAILEGEORGIS *et al.*, 2013).

Séries temporais longas são necessárias para a análise confiável de tendência e para comprovar a existência de mudança para efeitos de planejamento de longo prazo. Considerando que a análise é dependente dos dados, a estimativa de eventos extremos precisa ser atualizada regularmente, sendo esta prática indispensável para uma correta gestão e avaliação do desempenho de infraestruturas hídricas, vulnerabilidades e análise de risco (HAILEGEORGIS *et al.*, 2013).

À medida que os problemas de drenagem urbana se tornam mais complexos, são necessárias análises mais abrangentes e integradas, que considerem as inter-relações existentes entre o meio físico e as intervenções humanas. Segundo Fortunato *et al.* (2014), a necessidade de otimizar os investimentos relacionados com os sistemas de drenagem urbana levou muitos pesquisadores a investigar abordagens de projeto diferentes das convencionais, baseadas na suposição *a priori* de uma chuva de projeto padronizada para a região.

A drenagem urbana deve compreender um conjunto de medidas que visem à mitigação dos riscos e prejuízos decorrentes de inundações, não se restringindo aos aspectos impostos pela engenharia. Para Garcias (2005) as técnicas de drenagem urbana convencionais não abrangem toda a problemática associada ao ciclo hidrológico e a busca por métodos mais eficientes para o planejamento e gestão da drenagem torna-se uma ferramenta essencial. Nesse contexto, o conceito de resiliência urbana ganha destaque, uma vez que propõe ferramentas que buscam benefícios de longo prazo.

O conceito de resiliência refere-se à capacidade de recuperação de um sistema, diante de uma perturbação imposta, podendo, então, ser medida pela velocidade de retorno ao equilíbrio após

uma perturbação. Restringindo o conceito para a drenagem urbana, a resiliência pode ser definida através da identificação dos atributos dos sistemas que devem ser resistentes e a quais tipos de perturbações, sendo muitas vezes expressa como a capacidade de todo o sistema em se recuperar de ondas de cheias (KLEIN *et al.*, 1998; SAYERS *et al.*, 2003; De BRUIJN, 2004).

As reformulações recentes de resiliência remetem a adaptabilidade como uma propriedade da resiliência que reflete a capacidade do sistema em lidar e se desenvolver continuamente sob o efeito de mudanças e tendências. É neste sentido mais amplo que o conceito fornece um quadro contextual mais apropriado para desenvolver e avaliar abordagens integradas para a gestão da drenagem urbana (GERSONIUS, 2008).

Considerando supostas mudanças, ou tendências, nas séries de precipitação, medidas de mitigação e adaptação devem ser propostas, buscando aumentar a resiliência das cidades aos eventos extremos de chuva. As abordagens devem ser consolidadas no sentido de aumentar a capacidade estrutural dos sistemas, lidar com a capacidade estrutural projetada, recuperar-se diante de uma perturbação e adotar medidas preventivas, visando à adaptabilidade.

As políticas de adaptação tendem a se enquadrar no conceito de “estratégias sem arrependimento” (no regrets strategy), que são aquelas dirigidas à solução de problemas associados à variabilidade climática existente enquanto, ao mesmo tempo, constroem capacidade adaptativa às futuras mudanças climáticas. Os benefícios das medidas “sem arrependimento” devem ser percebidos independentemente do grau de mudança climática, podendo ser iniciadas mesmo sem previsões precisas e definitivas (ANA, 2010).

No sentido de lidar com a capacidade dos sistemas projetados devem ser buscadas propostas para a redução dos danos no caso de uma cheia que exceda o limiar de reação do sistema e, quanto à capacidade de recuperação, alternativas para que o sistema se recupere para um estado equivalente ao anterior à ocorrência do evento extremo. Por fim, são necessárias proposições para se lidar com as incertezas inerentes às mudanças climáticas futuras, utilizando uma abordagem adaptativa de precaução e gestão (De GRAAF *et al.*, 2009).

Neste contexto, a implementação de medidas físicas e técnicas associadas aos conceitos de “*Best Management Practices*”, nos EUA e Canadá, “*Techniques Alternatives*”, na França, dentre outros, vem sendo uma grande inspiração. Segundo Fletcher *et al.* (2014), as Técnicas

Alternativas buscam compensar o efeito da expansão urbana otimizando o uso do solo nas cidades e limitando os custos com investimento.

Também conhecidas como Técnicas Compensatórias, termo usado em alguns outros países, como o Brasil (BAPTISTA *et al.*, 2011), estas técnicas objetivam reduzir o volume de escoamento, as vazões de pico, a vulnerabilidade das áreas urbanas a inundações e, em menor medida, proteger a qualidade dos ambientes receptores do escoamento produzido. Um dos princípios associados às técnicas está na manutenção das vazões produzidas em condições naturais.

Na sequência serão descritas algumas iniciativas em termos da adoção de técnicas compensatórias em diferentes partes do mundo, assim como estudos que modelam o uso destas técnicas em bacias urbanas.

3.6 Técnicas compensatórias em drenagem urbana

Tradicionalmente os sistemas de drenagem urbana são projetados com o objetivo de prevenir alagamentos e inundações, uma vez que proporcionam o rápido escoamento das águas pluviais, possibilitando o desenvolvimento do sistema viário e a segurança da população (BECKER, 2006). De acordo com Baptista *et al.* (2011), os sistemas de drenagem urbana podem ser classificados, mediante duas vertentes, como sistemas “clássicos” e “alternativos”.

Os sistemas clássicos, baseados no pensamento higienista do século XIX, são projetados com o objetivo de captar as águas pluviais, transportá-las através de condutos artificiais que funcionam por gravidade, afastá-las das regiões urbanas e dispensá-las nos corpos d’água no menor tempo possível. Desse modo, embora tais sistemas se caracterizem pela eficiência hidráulica, são também responsáveis pela propagação das cheias para áreas a jusante, tornando as inundações inevitáveis (MOURA, 2004).

Os sistemas alternativos ou compensatórios, por outro lado, buscam o aumento da infiltração e da retenção das águas pluviais, possibilitando a redução do volume de cheias (MOURA, 2004). Existe uma grande variedade de técnicas compensatórias, que podem ser utilizadas em diferentes escalas territoriais, adequando-se ainda ao tecido urbano local, isto é, podem ser utilizadas em associação com áreas de estacionamento, práticas de lazer e recreação, entre outros (BAPTISTA; NASCIMENTO; BARRAUD, 2011).

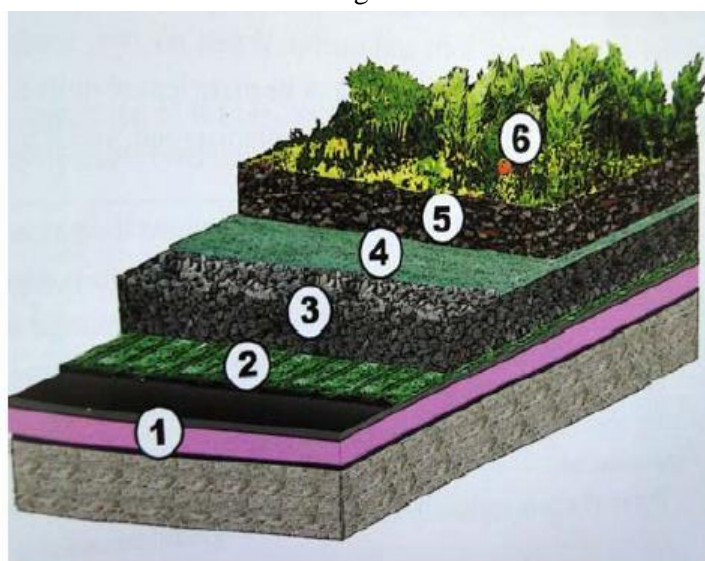
Nesse contexto, alguns dispositivos de fácil instalação em conjunto com a paisagem urbana são: os jardins de chuva, também chamados de sistemas de biorretenção; as trincheiras de infiltração, que são estruturas longitudinais construídas para facilitar a infiltração das águas pluviais; o pavimento permeável, que construído com materiais permeáveis possibilita a infiltração da água; os poços de infiltração, que aumentam a capacidade de infiltração do solo e permitem um armazenamento no desnível produzido; os reservatórios individuais e telhados verdes ou armazenadores, que apesar de terem um efeito menos expressivo no controle de enchentes, agregam uma série de benefícios para a cidade (BAPTISTA *et al.*, 2011).

Neste trabalho foram selecionadas técnicas compensatórias para simular sua implantação na bacia do Córrego Ressaca, em Belo Horizonte – MG. Dessa forma, são apresentadas na sequência as principais técnicas atualmente em uso, cujos mecanismos de funcionamento, critérios de seleção e formas de aplicação serão detalhados.

3.6.1 Telhados Verdes

Segundo Caetano *et al.* (2010), os telhados verdes são coberturas que remetem ao princípio de recomposição vegetal, visando recuperar a qualidade ambiental. Sendo assim, essa tecnologia utiliza a cobertura de edificações, onde são implantadas camadas de isolamento, impermeabilização, drenagem, filtragem, substrato e vegetação a fim de simular uma superfície com solo vegetado original, como pode ser observado na Figura 3.3.

Figura 3.3 – Camadas de um telhado verde



- 1 - pavimento do telhado, isolamento e impermeabilização.
- 2 - proteção e camada de armazenamento.
- 3 - camada de drenagem.
- 4 - camada anti-raiz e filtro permeável.
- 5 - camada de substrato.
- 6 - vegetação.

Fonte: Baldessar (2012)

De acordo com Neto (2012), os telhados verdes podem ser classificados em três tipos: Intensivo, que possui espessura vegetal superior a 250 cm e elevados custos; semi-intensivo, que possui espessura vegetal entre 5 e 100 cm e custo mediano; e extensivo, que possui espessura vegetal entre 5 e 15 cm, além de baixos custos financeiros. No caso dos telhados extensivos, o acesso a estes é exclusivo para manutenção e pode ser implantando até em superfícies inclinadas. Já os telhados intensivos exigem manutenção mais intensa e são também mais pesados, já que necessitam de substratos com profundidade maior que 150 mm (WOODS BALLARD *et al.*, 2015; SAMPLE; DOUMAR, 2013a).

Os critérios para instalação de telhados verdes são bastante flexíveis, mas devem seguir as restrições do local. Em termos estruturais, o principal critério é a avaliação da capacidade da edificação que receberá o telhado verde, cuja sobrecarga é estimada em, no mínimo, 70 kg/m² (SAMPLE; DOUMAR, 2013a). Em termos ambientais, é importante que o tipo de vegetação seja escolhido de acordo com as condições locais. Os telhados verdes são boas soluções para regiões urbanas, considerando a falta de espaço disponível (WOODS BALLARD *et al.*, 2015). A Figura 3.4 apresenta um exemplo de telhado verde implantado no prédio do Banco do Brasil, em Belo Horizonte, que cobriu 475 m² de laje.

Figura 3.4 – Telhado Verde no prédio do Banco do Brasil, em Belo Horizonte



Fonte: Cidade Jardim (2011)

Vale ainda mencionar que estudos desenvolvidos nos últimos anos relacionam os benefícios dos telhados verdes ao cenário atual de mudanças climáticas, uma vez que podem reduzir os efeitos de ilhas de calor e aumentar a biodiversidade local.

Um exemplo de trabalho está sendo realizado na cidade de Chicago - EUA (CCAP, s.d.), onde já foram construídos telhados verdes em diversos edifícios. Só no teto da prefeitura (City Hall) há mais de 20 mil plantas, de mais de 150 variedades, incluindo 100 arbustos, 40 trepadeiras e 2 árvores. A cidade está monitorando a temperatura (Figura 3.5), a chuva e a velocidade e direção do vento, o que vai ajudar a avaliar como o telhado verde tem contribuído para a qualidade de vida na cidade.

Outro exemplo de trabalho foi desenvolvido na Universidade de São Paulo (USP), comparando dois prédios da capital paulista, um com área verde e outro com laje de concreto, sendo então verificado que a temperatura no topo do edifício com jardim ficou até 5,3 graus Celsius (°C) mais baixa. Também houve ganho de 15,7% em relação à umidade relativa do ar (CATUZZO, 2013).

Figura 3.5 - Comparação da temperatura da superfície entre o telhado sem cobertura e o telhado verde da Prefeitura de Chicago



Fonte: *Chicago Climate Action Plan (CCAP)* (s.d).

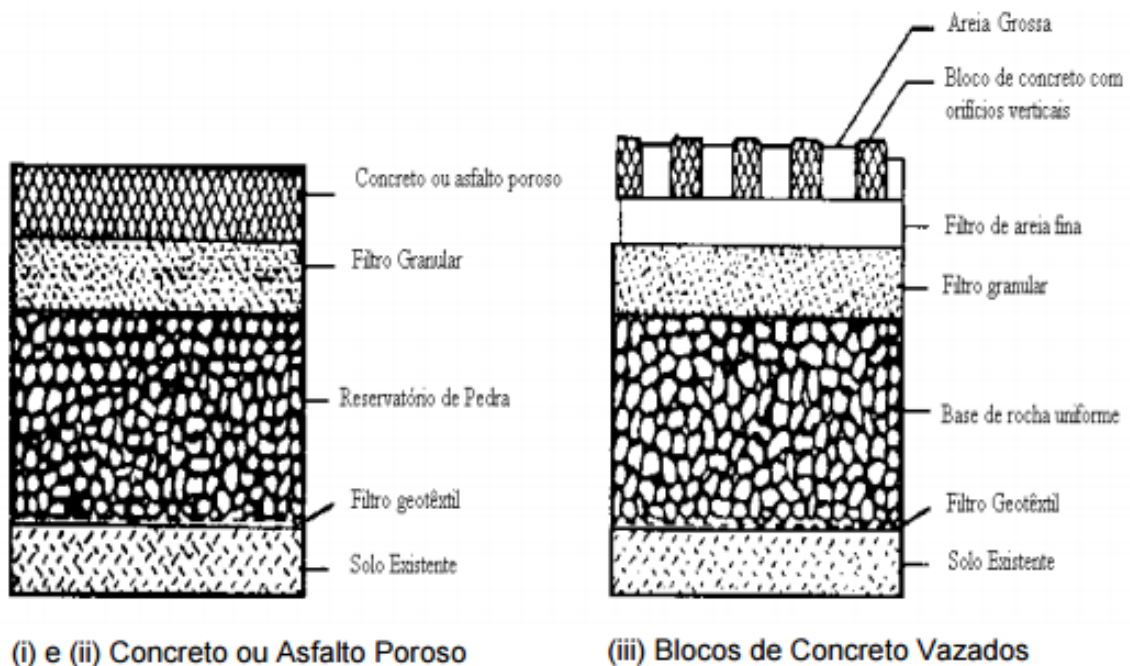
3.6.2 Pavimentos Permeáveis

Segundo Urbonas e Stahre (1993) *apud* Araujo *et al.* (2000), os pavimentos permeáveis são mecanismos de infiltração que permitem a passagem do escoamento superficial para um reservatório de pedras que se localiza sob a superfície do terreno. Sua utilização visa reduzir a vazão drenada superficialmente, melhorar a qualidade da água e contribuir para o aumento da recarga de água subterrânea, podendo ser classificados em três tipos:

- i. Pavimento de concreto poroso;
- ii. Pavimento de asfalto poroso;
- iii. Pavimento de blocos de concreto vazado, preenchidos com material granular, como areia ou vegetação rasteira.

Os pavimentos permeáveis são executados em camadas, conforme apresentado na Figura 3.6. A camada que se localiza mais superficialmente é a de revestimento, sendo o material para a sua composição e a espessura escolhidos de acordo com a quantidade de água que se almeja coletar e/ou também armazenar, além das cargas associadas ao tráfego. Já para os blocos intertravados a segunda camada é formada por areia fina, sendo necessário, em todos os casos, um filtro granular para impedir que sedimentos cheguem ao reservatório. Sob o filtro localiza-se a camada de pedras, que armazena a água e deve ser compactada para assegurar uma densidade máxima, sem que as pedras, no entanto, se quebrem em pedaços menores. Abaixo da camada de pedras é necessário um filtro geotêxtil para evitar possíveis contaminações, uma vez que a camada mais profunda é a de solo natural, que deve ser analisado antes da implantação do pavimento (WOODS BALLARD *et al.*, 2015).

Figura 3.6 - Camadas do pavimento permeável



Fonte: Urbonas e Stahre (1993) *apud* Araújo *et al.* (2000).

Essa técnica pode ser utilizada em diversos espaços urbanos, garagens (Figura 3.7), ruas e avenidas, áreas de recreação e lazer, parques, passeios e calçadas (SAMPLE; DOUMAR,

2013b). A utilização do pavimento permeável não apresenta grandes restrições, exceto quando o solo é extremamente impermeável (recomenda-se condutividade hidráulica entre 10^{-4} m/s e 10^{-6} m/s) ou quando o nível do lençol freático for alto, além de questões associadas ao tráfego local, declividade do terreno (recomenda-se limitar a 5%) e largura mínima da via de 12 m (WOODS BALLARD *et al.*, 2015; SCHUELER, 1987).

Figura 3.7 - Implantação de blocos de concreto vazado em garagem



3.6.3 Trincheiras de Infiltração

Segundo Baptista *et al.* (2011), as trincheiras drenantes (trincheiras de percolação ou trincheiras de infiltração) são estruturas lineares que podem ser instaladas na superfície, ou sob o solo, a uma pequena profundidade (entre 0,90m e 3,70m), conforme apresentado na Figura 3.8, sendo o seu comprimento sempre superior à sua largura. Funcionam como reservatórios tradicionais que armazenam a água precipitada até sua infiltração no solo.

As trincheiras são constituídas por valetas que realizam o papel de filtro, uma vez que estão preenchidas de material granular e envoltas em uma camada de material fino ou manta geotêxtil, que impedem ou dificultam a colmatação das mesmas, garantindo uma redução da vazão de pico. O preenchimento com material granular proporciona maior estabilidade do talude e, por este motivo, são implantadas, geralmente, junto a sistemas viários, estacionamentos, parques ou jardins, e são mais adequadas para áreas menores ou iguais a 2 hectares (BAPTISTA *et al.*, 2011).

Figura 3.8 - Implantação de trincheira de infiltração



Fonte: Ponciano (2016)

De acordo com Schueler (1987), as trincheiras de infiltração podem ser classificadas em dois grupos: as superficiais e as subterrâneas. As trincheiras superficiais são mais aplicadas em áreas residenciais, já que a carga de sedimentos e óleos é menor, podendo então ser retida pela grama. Já as trincheiras subterrâneas podem receber um escoamento mais concentrado oriundo das tubulações ou estruturas de drenagem, mas devem ser providas de estruturas de entrada capazes de reter sedimentos e óleos.

No que se refere às restrições para instalação, deve ser respeitada a distância mínima de um metro que deve ser guardada entre a base da trincheira e o nível do lençol freático e, por isso, não devem ser instaladas nas proximidades dos cursos d'água. Além disso, é necessário que o terreno tenha uma inclinação máxima de 20%, sendo que no intervalo de 5% a 20% é preciso realizar regularização do fundo da vala (WOODS BALLARD *et al.*, 2015; SAMPLE; BARLOW, 2013).

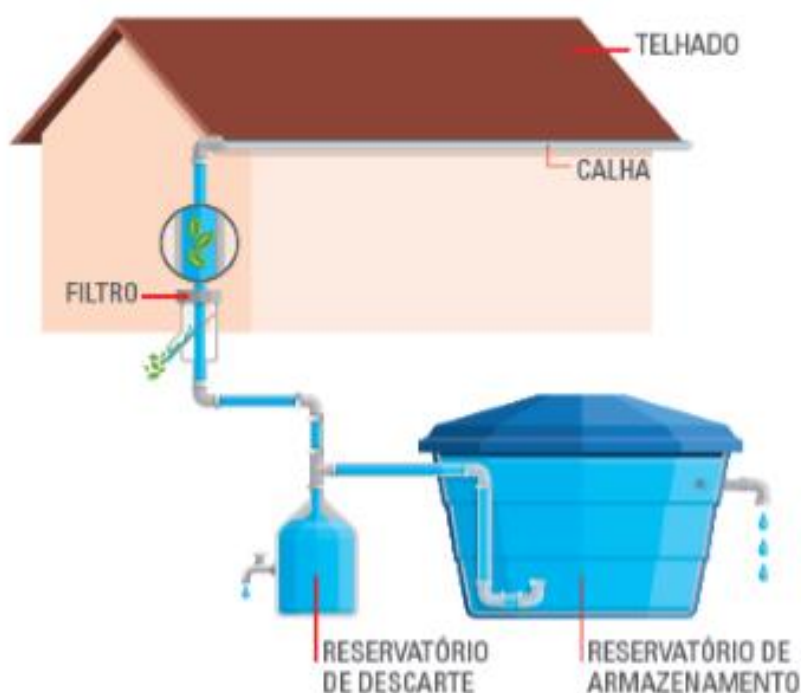
3.6.4 Reservatórios Individuais

Os reservatórios individuais são dispositivos que interceptam, desviam, armazenam e liberam a água da chuva coletada nos telhados, por meio de calhas e rufos. Os reservatórios podem ser instalados de forma superficial ou subterrânea, sendo importante garantir o fácil acesso para

manutenção (SAMPLE; DOUMAR, 2013c; WOODS BALLARD *et al.*, 2015). Apresentam como vantagem o aproveitamento da água para diversas finalidades, como irrigação, processos industriais, entre outros; e o amortecimento dos picos de cheia, aliviando o sistema de drenagem a jusante (TOMINAGA, 2013).

O funcionamento do reservatório individual é bem simples, como esquematizado na Figura 3.9. As águas pluviais são coletadas pelas calhas e rufos e escoam por uma tubulação até o reservatório. Nesta tubulação, a água passa por um filtro, com o objetivo de retirar os resíduos maiores. Como alternativa, pode ser implantada uma tubulação paralela ao reservatório para descartar a primeira água da chuva. No momento em que a água atinge o nível máximo do reservatório, o excedente é descartado por meio do extravasor, que pode ou não estar conectado a outro reservatório (SAMPLE; DOUMAR, 2013c; WOODS BALLARD *et al.*, 2015).

Figura 3.9 – Esquema do reservatório individual



Fonte: FEAM/FIEMG (2016)

3.6.5 Sistemas de biorretenção (Jardins de chuva)

Os sistemas de biorretenção são rasas depressões de terra que recebem a água do escoamento superficial. A água acumula nessas depressões formando pequenas poças que, aos poucos, se

infiltram no solo. A vegetação retém os poluentes das águas pluviais e ajuda na infiltração e retenção do volume de água.

O sistema contribui para aumentar a beleza paisagística da rua (Figura 3.10), reduz parte do volume que é escoado pela superfície, é eficiente na remoção de sedimentos finos, metais, nutrientes e bactérias e reduz o tamanho e custo do sistema de drenagem a jusante. Algumas limitações deste método consistem em não poder utilizá-lo em grandes áreas de contribuição, a possibilidade de ocorrer colmatagem e a demanda de área para implantação, uma vez que reduz o espaço de via trafegável (ABCP, 2013).

Figura 3.10 – Sistemas de biorretenção em vias e estacionamentos em Melbourne



Fonte: WSUD (1999); WSUD (2004)

Essa técnica compensatória pode ser utilizada em áreas comerciais, estacionamentos e vias públicas, sendo formada por uma camada superficial de vegetação, seguida de camadas de serapilheira, areia, solo e brita. A água é então drenada por uma tubulação que pode destiná-la tanto ao subsolo quanto a algum reservatório, sendo também necessária a instalação de um sistema de extravasamento (SAMPLE; LIU, 2013).

Quanto às restrições para implantação, a profundidade do lençol freático deve estar a uma distância mínima de 0,60 m a 1,20 m do fundo da célula, para evitar contaminação das águas subterrâneas. Além disso, é importante que as plantas sejam resistentes a períodos de estiagem, assim como períodos em que as raízes estarão submersas. A manutenção é similar à de um jardim, sendo necessária a periodicidade em termos de poda e adubação (SAMPLE; LIU, 2013).

Considerando que um dos objetivos deste trabalho é simular a implantação destes dispositivos em uma bacia hidrográfica do município de Belo Horizonte, a modelagem hidrológica faz-se necessária, uma vez que a representação dos processos hidrológicos de transformação da precipitação em escoamento, infiltração e evaporação será de fundamental importância.

3.7 Modelagem matemática e computacional de fenômenos hidrológicos – simulação da implantação de técnicas compensatórias

Atualmente, diversos modelos hidrológicos que realizam transformação chuva-vazão têm sido aplicados na simulação de vazões de cheias, dentre os quais podem ser citados: Hydrologic Modeling System (HEC-HMS), Soil and Water Assessment Tool (SWAT), TOPOgraphy-based hydrological MODEL (TOPMODEL), Model for Urban Sewers (MOUSE), Storm Water Management Model (SWMM), entre outros (FORMIGA *et al.*, 2016; USACE - U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2016; BENDIENT; HUBER; VIEUX, 2008).

O SWMM 5.1 foi selecionado para este trabalho pois é um modelo amplamente utilizado na modelagem hidrológica de bacias urbanas e de técnicas compensatórias, com representação eficaz do comportamento dessas estruturas (FLETCHER; ANDRIEU; HAMEL, 2013; KREBS *et al.*, 2014). O modelo foi desenvolvido pela *Environment Protection Agency- EPA*, dos Estados Unidos, e constitui um dos mais completos e robustos modelos para tratar de problemas de cheias urbanas. Além das funções que compõem os modelos mais usuais de drenagem urbana, o SWMM destaca-se por incorporar uma série de outras características que o tornam particularmente capaz para o tratamento de problemas complexos de manejo de águas pluviais.

O modelo permite a representação de oito técnicas compensatórias, denominadas no software por LID's, sendo estas: células de biorretenção, jardins de chuva, telhados verdes, trincheiras de infiltração, pavimentos permeáveis, reservatórios individuais, desconexão de telhados e valas de infiltração (MCCUTCHEON; WRIDE, 2013). Estas estruturas são representadas por uma combinação de camadas verticais, para as quais são definidas as características gerais (espessura, volume de vazios, condutividade hidráulica, rugosidade, entre outras) (PALLA; GNECCO, 2015). Posteriormente, é possível definir a cobertura das técnicas por sub-bacia, a partir da inserção do número de unidades, área média e porcentagem de área impermeável tratada.

Neste contexto, estudos de modelagem hidrológica têm sido realizados com o objetivo de analisar o impacto da implantação de diferentes técnicas compensatórias na drenagem urbana, apoiando o planejamento sustentável das bacias. Versini *et al.* (2015), por exemplo, simularam a implantação de telhados verdes em uma bacia urbana com o uso do SWMM e constataram uma redução da vazão de pico de até 60%, considerando a implantação de telhados verdes em 100% das áreas aptas a receber este tipo de técnica. Já para um cenário mais realista, caso 10% das áreas potenciais fossem tratadas com telhados verdes, a vazão de pico seria reduzida em 16%.

Drummond (2012) analisou a implantação de microrreservatórios em lotes de uma bacia de 57 hectares localizada em Belo Horizonte com o uso do SWMM, obtendo uma redução de 50% da vazão de pico em relação ao cenário que considera a bacia totalmente impermeabilizada. Também em Belo Horizonte, Rosa (2017) avaliou a resposta hidrológica da bacia do córrego Leitão a eventos chuva-vazão em cenários com implantação de infraestruturas verdes em 100%, 50% e 10% da área impermeável da bacia, obtendo reduções na vazão de pico de 60%, 30% e 5%, respectivamente.

Ainda neste sentido, Silva e Cabral (2014) simularam no SWMM a implantação de reservatórios em diferentes locais de uma bacia no município de Recife, para avaliar os impactos em um ponto de alagamento. Na simulação com reservatórios em lotes, a técnica se mostrou eficiente, reduzindo os níveis de inundação em mais de 40%. Para a simulação com as outras técnicas compensatórias (em ruas e na bacia), no contexto de ruas a eficiência foi de 60% na redução das vazões afluentes ao canal. Já para a solução ao nível da bacia foi observada redução de mais de 80% das vazões afluentes ao canal.

Walsh, Pomeroy e Burian (2014) utilizaram o SWMM para simular a implantação de reservatórios residenciais de diferentes volumes em uma bacia de San Diego, Estados Unidos, por meio da construção de diferentes cenários de impermeabilização e volumes de precipitação. Foram observadas reduções volumétricas máximas de longo prazo entre 10,1% e 12,4% para o período de análise (1948-2011).

As abordagens citadas atribuem às águas urbanas um papel crescente na sociedade, agregando-se diversas funções que extrapolam os aspectos hidráulicos e sanitários, únicos originalmente considerados nos sistemas clássicos de drenagem. O conceito de resiliência urbana oferece uma

base para o uso de ferramentas integradas e associadas com a gestão das águas urbanas (GERSONIUS, 2008).

De forma geral, na simulação de implantação de técnicas compensatórias nos diversos estudos citados foram observadas reduções expressivas das vazões de pico e do volume escoado. Ainda que essas reduções possam ser consideradas superestimadas, a modelagem hidrológica destas técnicas é uma ferramenta eficaz para a avaliação dos benefícios hidrológicos de implantação das mesmas (MCCUTCHEON; WRIDE, 2013). Neste estudo, busca-se a avaliação da implantação de técnicas compensatórias em um cenário de renovação urbana, ou seja, pretende-se avaliar o potencial de implantação de telhados verdes, mediante exigência da prefeitura de Belo Horizonte nas etapas de licenciamento e regularização de imóveis.

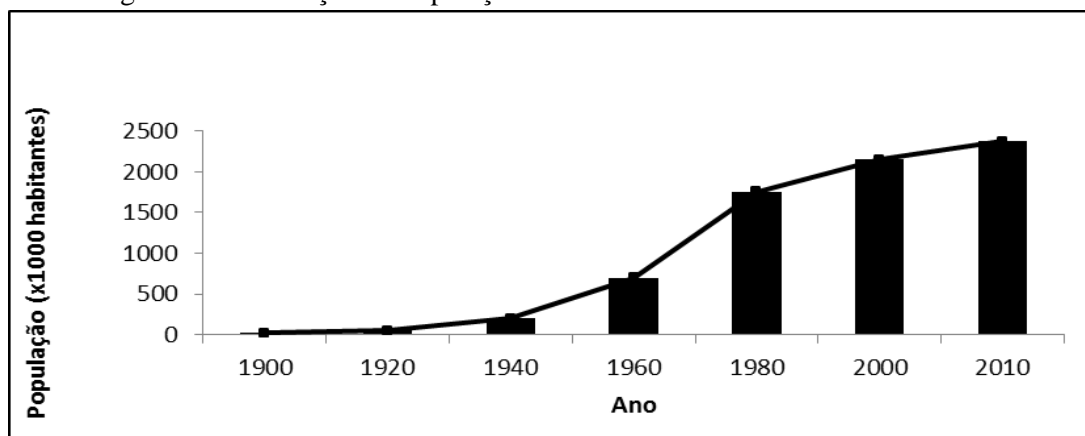
4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

4.1 Aspectos Gerais da RMBH

A área de estudo é a Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), sendo sua escolha fundamentada no fato de que grande parte desta região está sendo afetada, direta ou indiretamente, pelas consequências relacionadas a eventos extremos de chuva e, também, pela ausência de estudos relacionados à tendência de ocorrência de eventos extremos de precipitação, principalmente no que se refere a eventos subdiários, na região.

A RMBH, drenada pelos rios das Velhas e Paraopeba, afluentes do rio São Francisco, está localizada entre as latitudes 19°00' e 20°30' sul e longitudes 43°15' e 44°45' oeste, na região central do Estado de Minas Gerais. De acordo com o censo demográfico de 2010, realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (IBGE, 2010), a RMBH constitui a terceira maior aglomeração urbana do Brasil, abrangendo uma área de 9.468 km², sendo formada por 34 municípios, com uma população estimada em aproximadamente 5,8 milhões de habitantes para o ano de 2014, dos quais 2,5 milhões de habitantes vivem na capital de Belo Horizonte, que apresenta uma área de aproximadamente 331 km². A capital apresenta um crescimento populacional expressivo, como ilustrado na Figura 4.1. Os impactos de tal crescimento afetaram, sobretudo, a qualidade ambiental da região.

Figura 4.1 – Evolução da População em Belo Horizonte: Período 1900 a 2010



Fonte: Adaptado de Baptista *et al.* (2011) e Censo IBGE (2010).

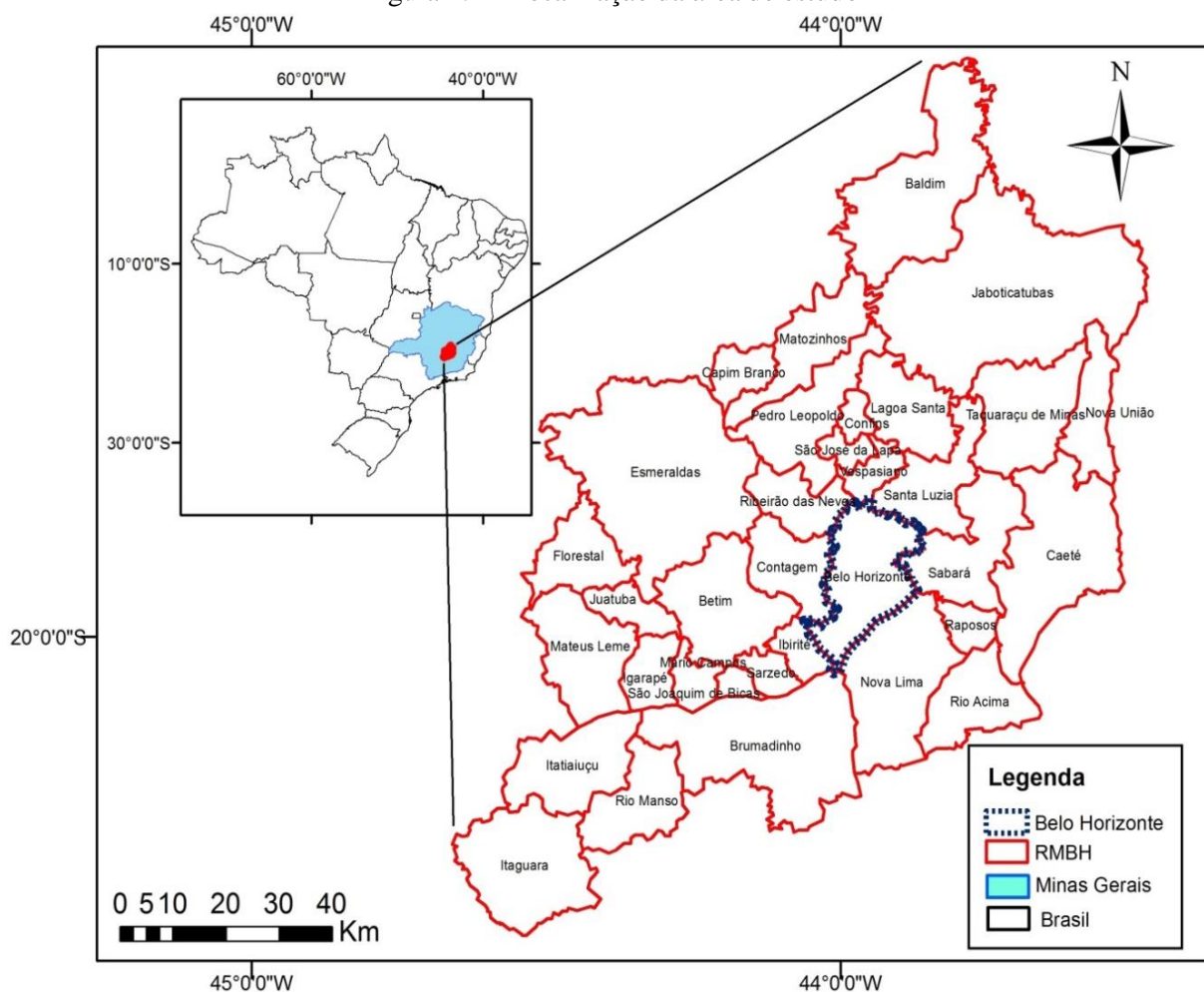
Belo Horizonte é a quinta cidade com maior produto interno bruto (PIB) do Brasil, com 1,3% do PIB nacional, atrás de São Paulo, Rio de Janeiro, Brasília e Curitiba. Segundo dados de 2012 seu PIB somou 58,4 bilhões de reais, o que equivale a aproximadamente 14,5% de

toda produção de bens e serviços do estado de Minas Gerais. Segundo dados do IBGE, em 2012, o PIB per capita do município era de R\$ 24.365,33.

A RMBH possui um PIB de aproximadamente R\$ 135,68 bilhões, ocupando o quarto lugar no ranking nacional das regiões metropolitanas, o que corresponde a 34% de todo o PIB mineiro em 2012. A região possui o quinto maior parque produtivo da América do Sul, com destaque para a indústria automobilística e de autopeças, siderurgia, eletrônica e construção civil.

Na Figura 4.2 é apresentado o mapa da RMBH, localizada no estado de Minas Gerais, com destaque para a cidade de Belo Horizonte, capital mineira. O mapa foi elaborado com o uso software ArcGIS, utilizando as bases georreferenciadas da Agência Nacional de Águas (ANA).

Figura 4.2 - Localização da área de estudo



4.2 Expansão Urbana da RMBH e de Belo Horizonte

A RMBH tem se destacado como uma importante região de atração populacional, absorvendo um grande número de imigrantes intraestaduais e interestaduais, mesmo nos períodos em que Minas Gerais apresentou perdas populacionais em relação a outros estados brasileiros. Neste sentido, pode-se afirmar que o processo de expansão urbana da RMBH tem sido alimentado pelas migrações internas, sendo que entre 1986-1991 a RMBH recebeu um total de 229 mil imigrantes interestaduais e intraestaduais, tendo esse número aumentado para 244 mil no período de 1995-2000 (SOUZA, 2008).

Na região, Belo Horizonte se destaca como destino preferencial, atraindo 54% dos imigrantes que chegaram na RMBH entre 1986 e 1991 e em torno de 49% daqueles que chegaram entre 1995 e 2000 (SOUZA, 2008). Dessa forma, a cidade, que foi originalmente planejada para abrigar 200 mil habitantes, começou a sofrer com os impactos do processo de urbanização. Com uma concepção positivista, o projeto da capital consistia em uma malha de avenidas e vias retilíneas entrecruzadas, cuja geometria desconsiderava a existência de cursos de água que atravessavam a área urbana (CHAMPS; PEREZ; FROÉS, 2001; MONTE-MÓR, 1994). A Figura 4.3 apresenta uma imagem da planta cadastral da nova capital de 1895.

Figura 4.3 - Planta Geral da cidade de Belo Horizonte, em 1895



Fonte: CCNC (2017)

Em pouco mais de um século, a população da capital atingiu os 2,5 milhões de habitantes e os limites da área urbana se ampliaram dos 9 km² iniciais para 331 km², sem contar as conurbações com os municípios vizinhos (IBGE, 2015). Neste contexto, durante décadas o planejamento urbano não foi capaz de acompanhar o processo de urbanização desordenado do município. A evolução da ocorrência de inundações acompanhou o crescimento populacional, que causou intensa ocupação da zona urbana e aumentou expressivamente as áreas impermeáveis da cidade. A crescente impermeabilização do solo causou a redução da capacidade de infiltração das águas pluviais e conseqüente aumento do volume de escoamento superficial (TUCCI, 2007). No período de 1928 a 2000 foram noticiadas 200 inundações em Belo Horizonte, sendo 69,5% dos eventos concentrados nas duas últimas décadas analisadas, segundo estudo realizado por Champs (2012).

Ao longo da história de Belo Horizonte, a solução para as inundações foram as obras de retificação e canalização (BORSAGLI, 2016) sendo, atualmente, cerca de 31% dos cursos d'água do município canalizados (BELO HORIZONTE, 2015). No entanto, sabendo-se que os canais e condutos artificiais aumentam a velocidade de escoamento das águas e, conseqüentemente, diminuem o tempo de concentração das bacias urbanas (TUCCI, 2007), as inundações em diversos pontos da capital mineira persistem até os dias de hoje, somados aos vários pontos de alagamento.

Em vista dos problemas do sistema convencional de drenagem de Belo Horizonte, observaram-se alguns avanços a partir de 2002 com a elaboração e implementação do Plano Diretor de Drenagem Urbana, e em 2006 com o Plano Municipal de Saneamento Básico, além do financiamento de obras do Programa de Recuperação Ambiental de Belo Horizonte – Drenurbs e do Programa de Aceleração do Crescimento – PAC, voltados para a solução integrada de problemas de inundação e saneamento (CHAMPS, 2012). Porém, dado os altos custos das obras (especialmente as de macrodrenagem), é inviável dar continuidade ao modelo convencional de drenagem que vem sendo aplicado desde a fundação da cidade. Torna-se necessária a busca por alternativas de menor custo de implantação e manutenção (CHAMPS, 2012) e que sejam capazes de abranger maiores áreas do município e de sua região metropolitana.

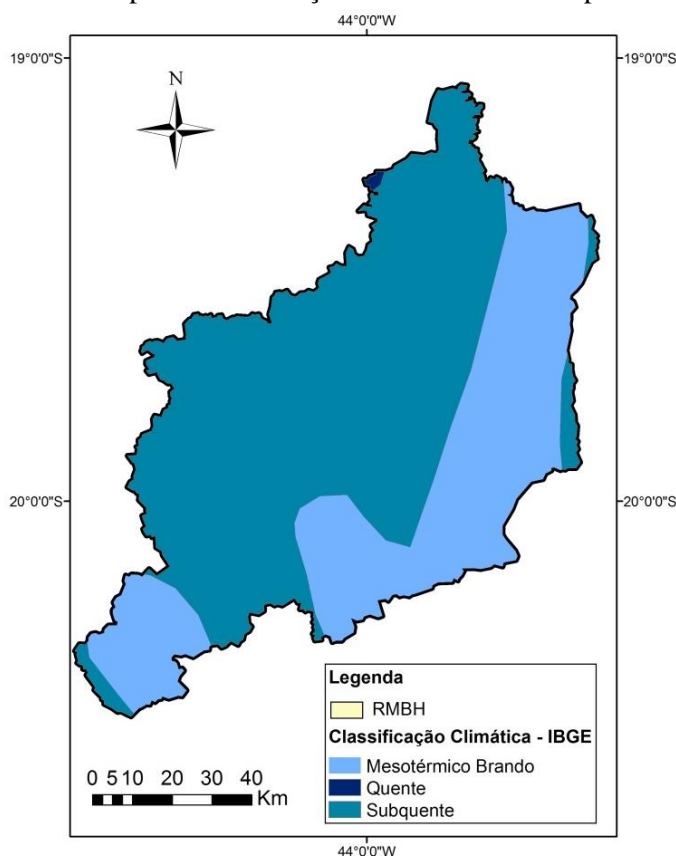
Vale ainda ressaltar que, a exemplo do que vem ocorrendo em outras Regiões Metropolitanas brasileiras, na RMBH observa-se o fenômeno de periferização, caracterizado pelo crescimento mais acelerado da população dos municípios periféricos comparativamente ao ritmo de

crescimento populacional do município central. A participação relativa de Belo Horizonte no incremento absoluto da população da região metropolitana, que nos anos 50 representava pouco menos de 92%, apresentou-se em torno de 26%, em 2000 (SOUZA, 2008). Dessa forma, reforça-se a necessidade da busca por alternativas que possam abranger todas as áreas direta ou indiretamente afetadas pelo desenvolvimento da capital.

4.3 Características climáticas

Na Figura 4.4 é apresentada a classificação climática do IBGE para a RMBH. É possível observar que a RMBH está inserida nas classificações Clima Tropical Brasil Central Subquente, com média de temperatura entre 15 e 18° em pelo menos um mês, e Clima Tropical Brasil Central Mesotérmico Brando, com média de temperatura entre 10 e 15°.

Figura 4.4 – Mapa da classificação climática do IBGE para a RMBH



Fonte: Adaptado de IBGE

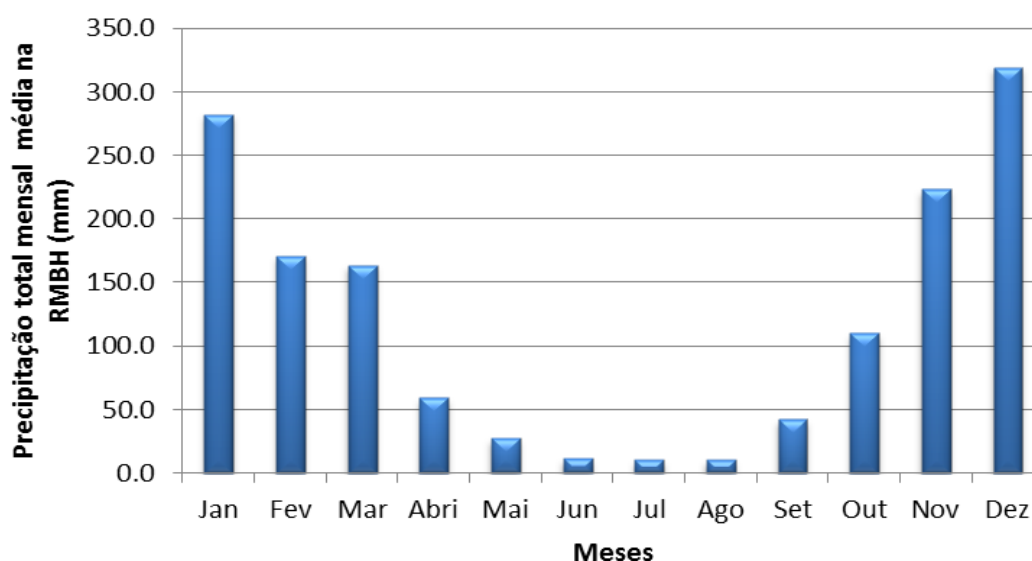
A região é caracterizada por uma estação seca com duração de quatro a cinco meses, entre abril e setembro, sendo que aproximadamente 80% do total acumulado da precipitação anual ocorre durante a estação chuvosa. A Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), definida como

uma persistente faixa de nebulosidade orientada no sentido noroeste sudeste, bem caracterizada nos meses de verão, é uma das principais responsáveis pela precipitação de verão observada na região. Além disso, as frentes frias, que se originam principalmente no Pacífico Sul, atuam na região durante todo o ano provocando condições de instabilidade e quedas de temperaturas do ar.

Adicionalmente, o aquecimento continental, no verão, gera intensas células de baixa pressão espacialmente distribuídas, favorecendo a formação de chuvas intensas, muitas vezes acompanhadas por ventos, trovoadas e granizos (ABREU, 1998). Neste sentido, a expansão e densificação das zonas urbanas pertencentes à RMBH podem elevar as temperaturas nas cidades, assim como proporcionar o aumento da turbulência e da presença de núcleos de condensação na atmosfera, o que favorece a ocorrência de tempestades. Dessa forma, a vulnerabilidade das cidades em face da possível não estacionariedade das condições hidroclimatológicas precisa ser trabalhada, tanto em função da indução de ocorrência de tempestades pela urbanização como também de possíveis mudanças climáticas, assunto central deste trabalho.

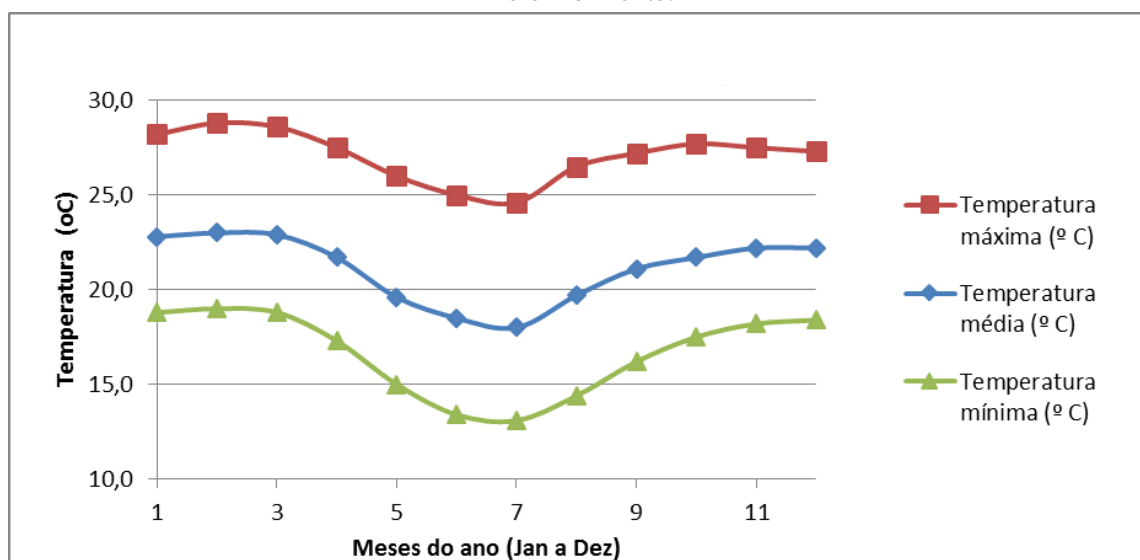
Na Figura 4.5 é apresentada a distribuição pluviométrica mensal na RMBH, na qual se observa o início do período chuvoso ocorrendo em outubro e se estendendo até o mês de março. Os valores apresentados na figura correspondem às estações selecionadas neste estudo e que serão apresentadas posteriormente. O total anual médio para a região é de, aproximadamente, 1431 mm.

Figura 4.5 – Precipitação total mensal média na RMBH – Período - 1941 a 2014



De acordo com INMET (2008), a temperatura média anual na RMBH varia entre 20°C e 22°C, enquanto a umidade relativa média varia entre 70% e 80%. Em Belo Horizonte, o período de verão é caracterizado pelo forte aquecimento solar. Os meses de janeiro e fevereiro são os mais quentes, com temperatura média de 23,63°C, temperatura média máxima de 29,68°C e média mínima de 19,44°C. As temperaturas mais baixas são observadas no mês de julho, com média de 18,63°C, máxima de 24,93°C e mínima de 13,69°C (Figura 4.6). Em termos de umidade relativa do ar, não há grande variabilidade sazonal em Belo Horizonte, sendo a máxima em janeiro (80%) e a mínima em agosto (64%) (LUCAS; ABREU, 2004).

Figura 4.6 – Normais Climatológicas (1961-1990) das temperaturas média, máxima e mínima para Belo Horizonte.



Fonte: INMET (2008)

A RMBH conta com um número expressivo de estações com medição de precipitação, temperatura, evaporação, umidade do ar e, também, nível da água. No que se refere aos dados de precipitação que serão abordados neste estudo, foram consultados os registros disponibilizados pela Agência Nacional de Águas (ANA), pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), assim como das estações da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), da Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária (Infraero) e do Instituto de Controle do Espaço Aéreo (ICEA). Os dados de temperatura foram consultados na base do INMET.

5 ESTUDO DE TENDÊNCIAS EM EVENTOS DIÁRIOS DE CHUVA COM POTENCIALIDADE EM CAUSAR ALAGAMENTOS NA RMBH

5.1 Introdução

Neste capítulo será apresentado o estudo de análise de tendência dos dados diários de chuva extrema na Região Metropolitana de Belo Horizonte a partir de métodos estatísticos. Como etapa preliminar, serão analisadas as tendências em séries de temperaturas médias, máximas e mínimas anuais, cujas estações climatológicas se localizam na área urbana de Belo Horizonte e na cidade de Florestal, ambas pertencentes à RMBH, a fim de identificar uma possível propensão à formação de “Ilhas de Calor” na região.

Posteriormente, proceder-se-á para a etapa de aquisição e análise preliminar dos dados de alagamentos da RMBH, a fim de caracterizar os eventos extremos de precipitação (altura de chuva registrada nas datas de ocorrência dos alagamentos). Na sequência, serão apresentadas a seleção e a consistência das estações pluviométricas com registros de chuva diária na RMBH, que serão analisadas em função das ocorrências de alagamentos registradas na etapa anterior.

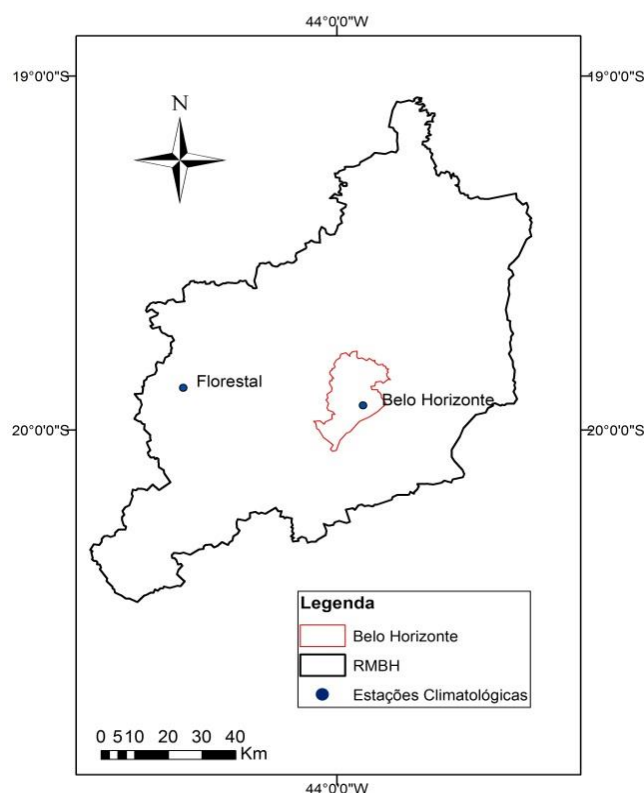
Os dados de precipitação serão também analisados conforme a definição realizada pelo ETCCDMI, que indica índices de precipitação relevantes para o estudo. Uma vez definidos os eventos extremos de chuva a serem estudados, será realizada a análise de tendência a partir de testes estatísticos que identificam mudanças graduais e abruptas em séries temporais.

5.2 Análise de Tendências nas Séries de Temperatura da RMBH

Considerando o assunto central deste capítulo, que remete à análise de tendência em eventos extremos de chuva, uma questão importante a ser discutida é a influência de possíveis concentrações de fontes de calor urbano a que os postos meteorológicos possam estar submetidos. O fenômeno “Ilha de calor urbana”, caracterizado por surgir nas áreas das metrópoles apresentando elevação da temperatura na superfície dessas áreas quando comparada com a temperatura de áreas vizinhas, foi apontado com fortes evidências em trabalhos realizados para a cidade de Belo Horizonte (ABREU; ASSIS, 1998; MAGALHÃES FILHO; ABREU, 2015) sendo, então, uma motivação para as análises que serão apresentadas na sequência.

Foram obtidos junto ao INMET os dados das estações climatológicas BELO HORIZONTE - MG (OMM: 83587) e FLORESTAL - MG (OMM: 83581), cujas localizações são apresentadas na Figura 5.1. O período de dados corresponde aos anos de 1961 a 2015 para a estação de Belo Horizonte e de 1961 a 2001 para a estação de Florestal. A estação de Belo Horizonte está localizada a uma altitude de 915 metros e a estação de Florestal a 760 metros. Em contraste com Belo Horizonte, Florestal é uma cidade de pequeno porte, com cerca de 6000 habitantes, a princípio pouco influenciada por impactos de urbanização ou industrialização.

Figura 5.1– Localização das estações climatológicas



Para avaliar uma possível mudança no padrão das temperaturas comparou-se a evolução da temperatura média anual, temperatura máxima média anual e temperatura mínima média anual das duas estações (Figuras 5.2 a 5.4).

Analisando as Figuras 5.2 a 5.4 é possível observar uma tendência positiva nos dados de temperatura média e mínima média anual para as duas estações, e uma aparente mudança nos padrões de temperatura a partir da década de 80. Fato importante de ser observado é uma tendência de aumento nas temperaturas máximas médias anuais para a estação Florestal que não é observada na estação localizada no centro urbano de Belo Horizonte. Aparentemente, o aumento da temperatura média é justificado, na cidade de Belo Horizonte, por um aumento

acentuado das temperaturas mínimas, diferentemente da cidade de Florestal que apresenta aumento das três temperaturas.

Figura 5.2– Evolução da temperatura média anual para as estações Belo Horizonte e Florestal

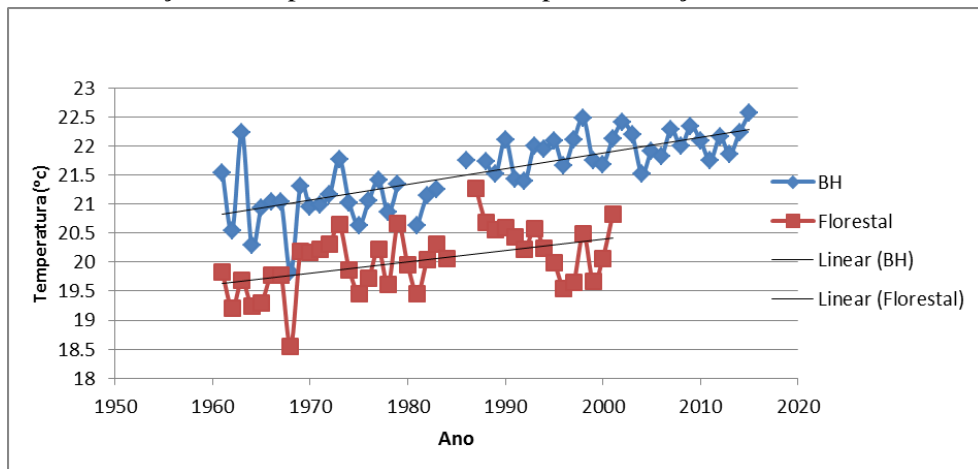


Figura 5.3– Evolução da temperatura mínima média anual para as estações Belo Horizonte e Florestal

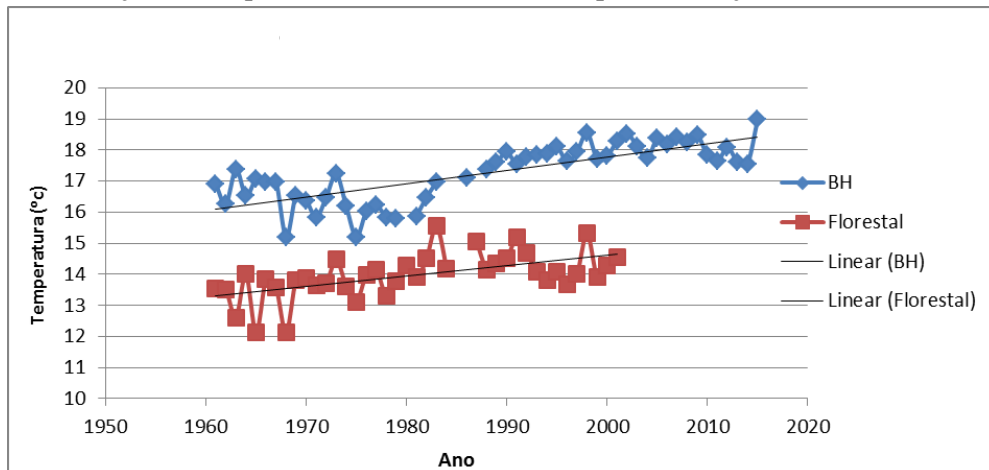
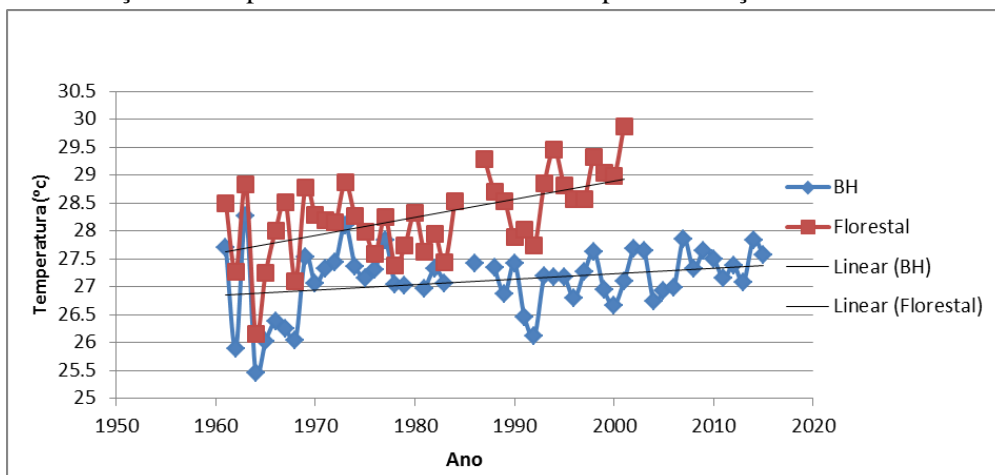


Figura 5.4– Evolução da temperatura máxima média anual para as estações Belo Horizonte e Florestal



Vale ressaltar que, embora tenha sido observado um maior aumento nas temperaturas máximas anuais para a cidade de Florestal, as temperaturas médias e mínimas para a cidade de Belo Horizonte são consideravelmente maiores, além de apresentarem uma tendência positiva maior ao longo dos anos (um aumento de cerca de 1,2° C na temperatura média anual para Belo Horizonte, enquanto a estação Florestal indica um aumento de aproximadamente 0,7 ° C – até 2001). Além disso, embora as duas cidades da RMBH se encontrem na mesma região climática, aproximadamente com as mesmas latitudes, a estação de Belo Horizonte está localizada a uma altitude 165 m superior a Florestal.

Resultados semelhantes foram encontrados em estudos realizados para as cidades de Campinas (BLAIN *et al.*, 2009) e de Petrolina e Juazeiro (LEITÃO *et al.*, 2011), que detectaram um maior aumento da temperatura mínima para o centro urbano, quando comparado ao entorno menos atingido pelos efeitos da urbanização. Estes autores relacionam a elevação da temperatura mínima com fatores locais, como por exemplo, à ilha de calor urbano, afastando a hipótese de fatores de grande escala, como por exemplo, o aquecimento global.

Para verificar a significância das tendências observadas, a análise de tendência foi realizada utilizando o teste de Mann-Kendall, com o nível de significância de 5%, sendo os resultados apresentados na Tabela 5.1 (S + significa tendência positiva significativa, enquanto NS significa tendências não significativas).

Tabela 5.1- Análise de tendência para as séries de temperatura a partir do teste de Mann-Kendall, no nível de significância de 5%

Estação	Temperatura média máxima anual	Temperatura média anual	Temperatura média mínima anual
Belo Horizonte	NS	S+	S+
Florestal	S+	S+	S+

Observa-se que as questões apontadas na análise visual dos dados de temperatura foram confirmadas. As temperaturas indicam, em geral, tendências positivas, exceto para os dados de temperatura máxima anual para a cidade de Belo Horizonte. Dessa forma, considerando as nítidas mudanças nos padrões de temperatura, principalmente para cidade de Belo Horizonte, será apresentado na sequência a investigação associada aos dados de chuva para a região.

5.3 Aquisição e Análise Preliminar dos Dados de Alagamentos da RMBH

De acordo com a Secretaria Nacional de Defesa Civil, em publicação da Portaria Conjunta nº 148, de 18 de dezembro de 2013, define-se por alagamento a “Extrapolação da capacidade de escoamento de sistemas de drenagem urbana e consequente acúmulo de água em áreas rebaixadas atingindo ruas, calçadas ou outras infraestruturas urbanas, em decorrência de precipitações intensas”. Já as inundações são definidas como “a submersão de áreas fora dos limites normais de um curso de água em zonas que normalmente não se encontram submersas”. Neste caso, o transbordamento ocorre de modo gradual, geralmente ocasionado por chuvas prolongadas na bacia hidrográfica.

Considerando tais definições e a relevância das chuvas menos prolongadas para os sistemas de drenagem urbana, foi realizado um levantamento dos eventos de alagamento ocorridos nos últimos 35 anos na cidade de Belo Horizonte, a fim de relacionar as datas destes eventos com os registros pluviométricos da região para os mesmos dias. Dessa forma, eventos extremos de precipitação foram definidos, nesse trabalho, como precipitações com potencialidade em causar alagamentos na região.

Os eventos de alagamento levantados abrangem o período de 1979 a 2014, respeitando o período mínimo de 30 anos de dados exigido pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) para caracterização climática de uma determinada região. Constatou-se a ocorrência destes eventos por meio de dados fornecidos pela Superintendência de Desenvolvimento da Capital (Sudecap) e notícias de jornais (Estado de Minas, Folha de São Paulo). A variedade das fontes deve-se à dificuldade de se obter os casos de alagamento em longo prazo, já que não existe um órgão específico que registre esse tipo de informação.

Foram obtidos 104 casos de alagamentos. Os eventos levantados, assim como as datas, locais e fontes correspondentes são apresentados no APÊNDICE A.

5.4 Aquisição e Análise Preliminar dos Dados de Precipitação da RMBH

5.4.1 Aquisição dos Dados de Precipitação da RMBH

Os dados de precipitação diária da RMBH foram selecionados com o auxílio das bases georreferenciadas da ANA e das séries hidrológicas disponíveis no Sistema de Informações

Hidrológicas da ANA - Hidroweb. Além disso, foram consultados os dados de precipitação disponibilizados pela Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), pela Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária (Infraero) e pelo Instituto de Controle do Espaço Aéreo (ICEA), mas estes não atenderam aos critérios mínimos estabelecidos na sequência.

Os critérios que nortearam a seleção dos registros de precipitação total diária para a RMBH foram os seguintes:

- Séries com, pelo menos, 50 anos de registros;
- Dados contínuos, ou seja, séries ininterruptas ao longo dos anos ou com poucas falhas, uma vez que valores diários de precipitação são de difícil preenchimento de falhas devido à grande variação espacial e temporal da precipitação para os eventos de frequências médias e pequenas (BERTONI; TUCCI, 2001);
- Uniformidade na distribuição espacial das estações pluviométricas no interior e nas proximidades da RMBH.

Ao final dessa análise foram selecionadas 14 estações pluviométricas. O mapa com a localização das estações selecionadas na RMBH foi construído utilizando o *software* ArcGIS, com o auxílio das bases georreferenciadas da ANA, sendo apresentado na Figura 5.5.

Na Tabela 5.2 são listadas as principais características dessas estações. Tendo em vista a necessidade de registros com, pelo menos, 50 anos de dados, não foi possível obter uma cobertura homogênea de estações pluviométricas na região analisada, como pode ser observado na Figura 5.5. No entanto, acredita-se que as estações selecionadas consigam caracterizar de forma satisfatória o regime de chuvas da RMBH.

Figura 5.5– Localização das estações pluviométricas selecionadas na RMBH

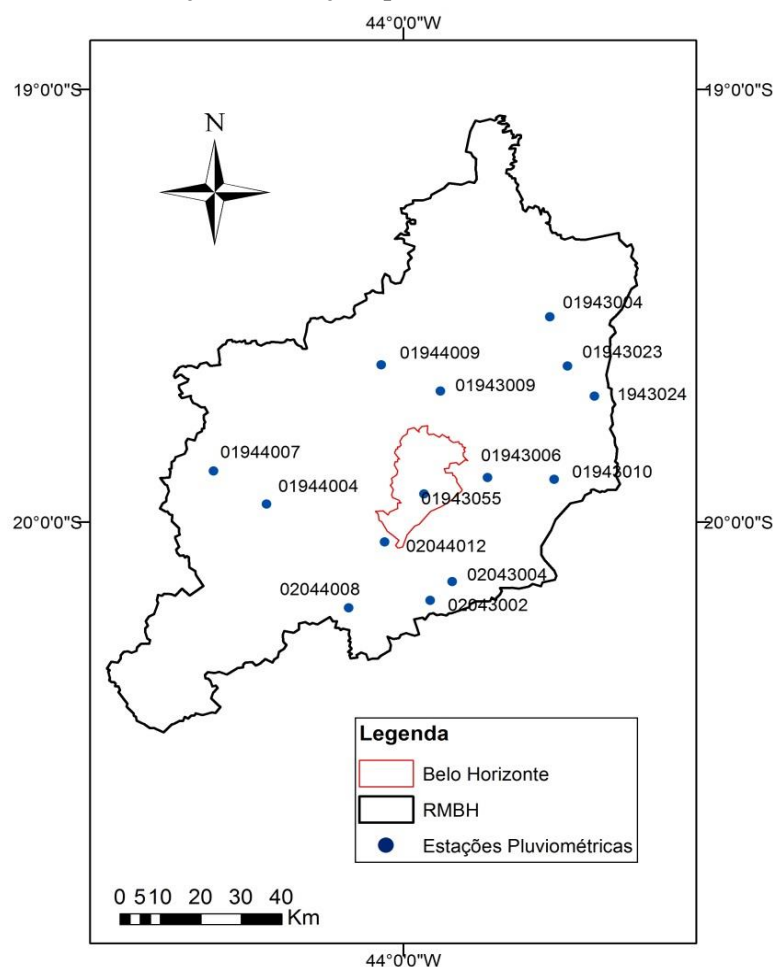


Tabela 5.2 – Caracterização das estações pluviométricas selecionadas na RMBH

Código	Nome da estação	Município	Altitude (m)	Latitude	Longitude	Período de observação
01943004	Jaboticatubas	Jaboticatubas	716	19°31'11"	43°44'43"	1941 a 2014
01943006	Sabará	Sabará	720	19°53'29"	43°49'19"	1941 a 2014
01943009	Vespasiano	Vespasiano	676	19°41'14"	43°55'15"	1941 a 2014
01943010	Caeté	Caeté	840	19°53'54"	43°39'55"	1941 a 2014
01943023	Taquaraçu	Taquaraçu de Minas	710	19°39'50"	43°41'17"	1942 a 2014
01943024	José de Melo	Nova União	825	19°41'23"	43°35'08"	1965 a 2014
01943055	Horto	Belo Horizonte	915	19°56'03"	43°57'08"	1961 a 2014
01944004	P.N. Paraopeba	Juatuba	721	19°57'20"	44°18'24"	1941 a 2014
01944007	F.E. Florestal	Florestal	745	19°52'47"	44°25'16"	1950 a 2014
01944009	Pedro Leopoldo	Pedro Leopoldo	698	19°38'05"	44°03'09"	1941 a 2014
02043002	Lagoa Grande	Nova Lima	1350	20°10'45"	43°56'34"	1941 a 2014
02043004	Rio do Peixe	Nova Lima	1097	20°08'16"	43°53'33"	1941 a 2014
02044008	Melo Franco	Brumadinho	761	20°11'52"	44°07'15"	1941 a 2014
02044012	Ibirité	Ibirité	1073	20°02'34"	44°02'36"	1945 a 2014

5.4.2 Análise Preliminar dos Dados de Precipitação selecionados na RMBH

Para a análise de consistência de dados foi utilizado o Método de Dupla Massa, apresentado em Searcy e Hardison (1960), que consiste em verificar se os totais acumulados de precipitação do posto a consistir são proporcionais aos totais acumulados regionais (observados em postos próximos ao posto em análise). Busca-se, então, com essa comparação verificar o alinhamento dos postos segundo uma única reta. No método é elaborado um gráfico no qual o eixo das abscissas corresponde à média do somatório dos totais mensais de precipitação da região e o eixo das ordenadas ao somatório dos totais mensais da estação que se deseja consistir. A declividade da reta determina o fator de proporcionalidade entre as séries, de forma que a série é considerada inconsistente se a reta ajustada apresentar mudança de declividade.

As estações de apoio, neste estudo, foram compostas por duas estações próximas às estações a serem consistidas, e o critério adicional adotado para consistência dos postos pluviométricos foi um coeficiente de determinação (R^2) superior a 0,99. Os gráficos de Dupla Massa que consistiram todos os postos pluviométricos selecionados na RMBH são apresentados no APÊNDICE B.

5.5 Análise de Eventos Diários de Chuva com Potencialidade em causar Inundações na RMBH

Nesta etapa foi observado o comportamento das precipitações nos dias de ocorrência dos alagamentos anteriormente levantados, a fim de se obter um limiar que indique a potencialidade de um evento diário de precipitação para causar alagamentos na RMBH. Para isso, foram consideradas as estações 01943055, localizada na região centro-sul da cidade de Belo Horizonte, e a estação 02044012, localizada na cidade de Ibitaré, uma vez que os eventos de alagamento foram levantados apenas na cidade de Belo Horizonte e a proximidade de Ibitaré com a região do Barreiro viabiliza a análise dos eventos ocorridos nesta região.

A Tabela 5.3 apresenta as alturas diárias de precipitação observadas nos dias de ocorrência dos eventos. Observa-se o registro de alguns alagamentos sem precipitação correspondente na data, o que pode estar associado a ocorrência de chuvas localizadas que não foram observadas nas estações pluviométricas.

Tabela 5.3 – Alturas diárias de precipitação registradas em dias de ocorrência de alagamentos

Datas de registros de alagamentos	01943055	02044012	Datas de registros de alagamentos	01943055	02044012	Datas de registros de alagamentos	01943055	02044012	Datas de registros de alagamentos	01943055	02044012
	P (mm)	P (mm)		P (mm)	P (mm)		P (mm)	P (mm)		P (mm)	P (mm)
21 /10/2014	19	60	15/01/2010	61	23,5	8/2/1989	27,9	12,2	11/2/1983	51,8	78,6
2/4/2014	37	-	7/10/2009	18,9	33,7	30/09/88	68	61,7	21/01/83	51	53,5
3/4/2014	48,8	-	22/01/2009	35,9	9,9	17/03/88	50	30,5	4/1/1983	11,2	18,6
18/01/2014	-	-	18/12/2008	21,8	47,3	8/2/1988	63,6	59,4	2/1/1983	32,4	63,2
22/12/2013	29	-	15/12/2008	67,7	31,2	14/12/87	40,2	61,2	26/01/1982	13	14,1
12/12/2013	63,1	75,4	17/09/2008	-	-	9/12/1987	89,2	47,1	24/01/1982	35,6	52,2
9/4/2013	-	24,8	26/11/2007	5	21,3	6/12/1987	28,6	30	3/1/1982	112,6	81,6
7/1/2013	60,8	18,5	30/11/2006	156,3	36,6	11/3/1987	37,8	65,7	27/11/1981	11,8	17,7
29/12/2012	-	13,8	29/11/2006	29,4	40,3	8/3/1987	5,4	18,6	14/11/1981	53,3	50,8
15/11/2012	14,1	19,6	4/12/2003	57,2	24,9	27/12/86	19,8	45,2	13/11/1981	25,6	32,6
7/11/2012	10,5	9,7	16/01/2003	83,4	206,1	26/12/86	37,6	24,8	11/11/1981	95	71
5/11/2012	60,9	31,9	18/12/2000	158,8	126	12/12/1986	44,5	14	10/11/1981	40,7	34,2
15/03/2012	29,7	14	28/01/2000	77,2	124,5	11/1/1986	28,3	34,8	13/01/1981	62,3	68,4
30/01/2012	56,6	55,7	24/12/1999	80,2	60,8	10/1/1986	35,1	7,9	12/1/1981	35,8	55,8
28/01/2012	30,6	46,9	30/10/1998	10,6	35,9	9/1/1986	11,3	52,6	10/1/1981	35	79,2
02/01/2012	74,4	88	4/1/1997	147,4	116,9	18/03/85	99,7	90,2	10/12/1980	24,2	35,2
30/12/2011	10	8,4	14/12/1995	138,7	196,2	26/02/85	92,6	61	7/12/1980	22	34,9
29/12/2011	9,9	25	9/10/1995	72,4	46,9	29/01/85	60	19,8	05/12/80	7,4	10,2
27/12/2011	48,6	39,5	24/01/1992	72,6	71,6	26/01/85	117,2	52,6	3/12/1980	20,8	44,4
15/12/2011	91,4	51,5	28/01/1991	46,9	129,4	7/1/1985	17,8	12,4	25/11/80	55,4	21,1
11/12/2011	18,6	24,3	28/11/1990	54,8	17,2	17/12/84	63	62,2	29/01/1980	22,6	28,4
28/02/2011	39,9	23,5	16/12/89	76,4	51,2	16/12/84	134,3	92,2	2/1/1980	38,5	33,8
15/01/2011	4,7	3,3	14/12/89	38,7	65,6	4/12/1984	70	80	28/12/79	50,2	26
6/12/2010	60,4	84,9	13/12/89	78	85,4	10/12/1983	49,2	77,4	27/12/79	54,9	10,9
23/11/2010	75,5	40,8	6/11/1989	20	-	7/12/1983	40,7	44	8/2/1979	35,6	9
3/3/2010	30,6	14,3	15/03/89	41,2	32	1/3/1983	35,6	-	04/02/79	3,6	7,5

As características descritivas das amostras selecionadas, considerando as alturas de precipitação de ambas as estações, foram obtidas (primeiro quartil - Q1, segundo quartil - Q2, terceiro quartil - Q3 e magnitude máxima e mínima de precipitação) e são apresentadas na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Características descritivas das séries temporais de alturas diárias de precipitação registradas em dias de ocorrência de alagamentos

Características da amostra (mm)	01943055	02044012
Min	5,4	8,4
1Q	28,5	23,7
2Q	42,9	40,6
3Q	64,6	62,1
Max	158,8	206,1

Considerando a análise preliminar dos dados, observa-se que as alturas de precipitação mínima e máxima (Min e Max) representam valores que, a princípio, podem ser caracterizados como outliers, pois representam pontos atípicos em comparação com as demais alturas de precipitação registradas. No entanto, ao analisar outros pluviômetros da RMBH, foi possível inferir que esses eventos foram observados com magnitudes semelhantes em outras áreas da região. Além disso, considerando a topografia e a notória urbanização na cidade de Belo Horizonte, as chuvas com baixas magnitudes, como a altura mínima de precipitação registrada (Min), quando associadas a curtas durações, podem ser responsáveis por inundações.

Para a obtenção do limiar, citado anteriormente, foi empregado o cálculo da mediana das alturas diárias de precipitação apresentadas na Tabela 5.3. Como não foi possível obter a duração das chuvas levantadas e, conseqüentemente, estimar a intensidade média dos eventos e identificar se esses alagamentos eram consequência de problemas na rede de drenagem (bocas de lobo obstruídas, galerias entupidadas, etc), optou-se por adotar uma medida de tendência central mais resistente à presença de valores atípicos, ou seja, a mediana da amostra, como indicador da altura de chuva diária que pode gerar problemas de alagamento (HELSEL; HIRSCH, 2002)

Dessa forma, objetivou-se incluir nas análises posteriores de tendência para dados diários de precipitação, todos os totais diários acima do limiar estabelecido, e os valores abaixo do limiar foram considerados eventos extremos associados a curtas durações, ou seja, eventos de alta intensidade, assunto que também será abordado no trabalho, em etapas futuras.

Diante do exposto, o valor limiar obtido foi equivalente a 40 mm, ou seja, eventos diários extremos foram, então, considerados como totais diários de precipitação superiores a 40 mm.

Para verificar a pertinência do valor de referência adotado, foram analisados estudos aplicados a Belo Horizonte e a outros locais.

A classificação da precipitação em Belo Horizonte para o uso em alerta de inundações mostra que as chuvas na faixa de 30 a 50 mm, de acordo com os registros de pluviômetros (precipitação diária) localizados na cidade, são consideradas chuvas fortes e maiores do que 50 mm, chuvas extremamente fortes (REIS *et al.*, 2004). Também foi calculado o percentil da precipitação diária em dias chuvosos (acima de 0,1 mm) nas duas estações consideradas, obtendo-se, então, o percentil 92,5. O levantamento de alguns limiares considerados em estudos realizados para outras localidades com o nível de urbanização semelhante ao de Belo Horizonte aponta para percentis de 0,85 (PINKAYAN, 1966; XAVIER, 2001; ANANIAS *et al.*, 2010) e 0,95, com totais diários equivalentes a valores entre 42 e 65 mm (MOURA *et al.*, 2013), que são valores próximos ao percentil obtido no estudo.

Vale ressaltar que o valor limiar estabelecido é apenas um indicativo de chuva com potencialidade em causar alagamentos na RMBH, uma vez que diversos fatores influenciam na resposta da bacia a um evento chuvoso, como por exemplo: a umidade antecedente do solo, mudanças no uso e ocupação do solo, condições de manutenção dos sistemas de drenagem, entre outros.

5.6 Análise de Tendências nas Séries de Eventos Extremos de Precipitação da RMBH

Após a obtenção do limiar, procedeu-se para a análise de tendência do número anual de dias chuvosos acima deste valor estabelecido, considerando todas as estações pluviométricas selecionadas na RMBH. Além disso, foi realizada a análise de tendência para índices climáticos referentes à precipitação, conforme a definição realizada pelo Expert Team on Climate Change Detection Monitoring and Indices (ETCCDMI), apresentados na Tabela 5.5. Foi realizada a montagem das séries temporais dos índices de precipitação por ano hidrológico.

As tendências das séries temporais foram avaliadas, de acordo com Kundzewicz e Robson (2004), pelo teste de mudanças graduais Mann-Kendall e pelos testes de mudanças abruptas, descritos em Chiew e Siriwardena (2005), *Distribution-Free CUSUM e Rank Sum* (detectam a alteração da mediana em dois períodos), sendo todos os testes não paramétricos. Os testes foram realizados com o auxílio do software TREND e o nível de significância considerado nos testes foi de 5%.

Tabela 5.5 – Índices de Precipitação

Sigla	Nome do Índice	Definição	Unidade
CDD	Número anual de dias secos consecutivos	Número máximo de dias consecutivos com $P < 1$ mm	dias
CWD	Número anual de dias chuvosos consecutivos	Número máximo de dias consecutivos com $P \geq 1$ mm	dias
SDII	Índice de intensidade diária	Total anual de precipitação em dias chuvosos ($P \geq 1$ mm) dividido pelo número de dias chuvosos ($P \geq 1$ mm) no ano hidrológico	mm/dia
R10	Número anual de dias chuvosos acima de 10 mm	Número de dias no ano com $P \geq 10$ mm	dias
R20	Número anual de dias chuvosos acima de 20 mm	Número de dias no ano com $P \geq 20$ mm	dias
R30	Número anual de dias chuvosos acima de 30 mm	Número de dias no ano com $P \geq 30$ mm	dias
R40	Número anual de dias chuvosos acima de 40 mm	Número de dias no ano com $P \geq n$ mm, sendo n o limiar a ser estabelecido	dias
Rx1day	Precipitação máxima mensal em 1 dia consecutivo	Precipitação máxima mensal de 1 dia chuvoso	mm
Rx5day	Precipitação máxima mensal em 5 dias consecutivos	Precipitação máxima mensal de 5 dias consecutivos chuvosos	mm
R95p	Dias muito chuvosos	Precipitação anual total em que $P >$ percentil 95	mm
R99p	Dias extremamente chuvosos	Precipitação anual total em que $P >$ percentil 99	mm
PrpTtot	Total anual de dias chuvosos	Total anual de chuva em dias chuvosos ($P \geq 1$ mm)	mm

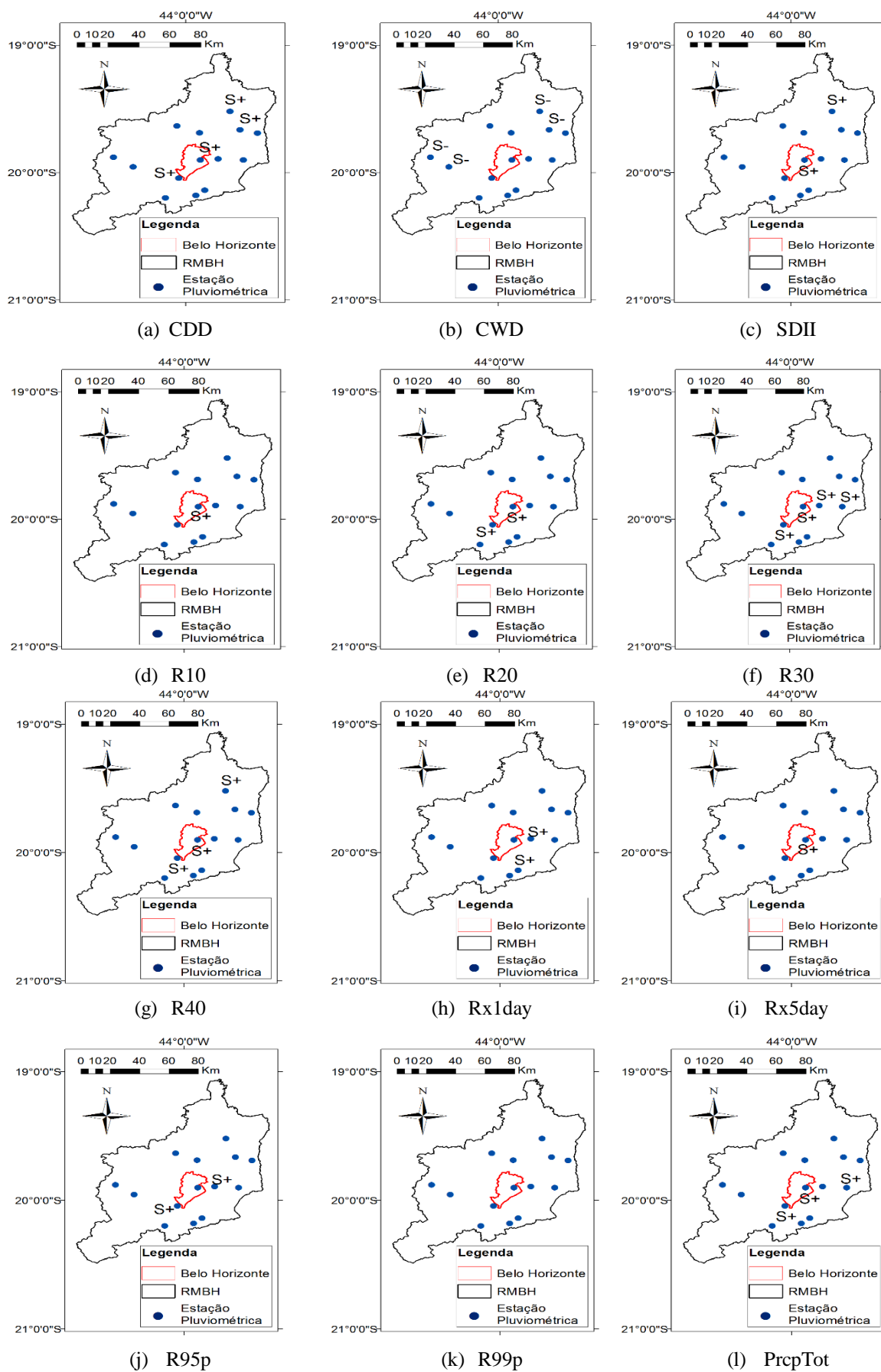
Fonte: Zhang e Yang (2004)

A Tabela 5.6 apresenta os resultados, considerando que S+ representa uma tendência positiva significativa, enquanto o S- representa uma tendência negativa significativa. Além disso, na Figura 5.6 apresenta-se a distribuição espacial das tendências por índice de precipitação.

Tabela 5.6- Análise de tendência para os índices de precipitação realizada pelo teste de Mann-Kendall, considerando o nível de significância de 5%

Código	CDD	CWD	SDII	R10	R20	R30	R40	Rx1day	Rx5day	R95p	R99p	PrpTot
01943004	S+	S-	S+				S+					
01943006						S+		S+		S+		
01943009		S-										
01943010						S+						S+
01943023	S+											
01943024												
01943055	S+		S+	S+	S+	S+	S+		S+			S+
01944004		S-										
01944007		S-										
01944009												
02043002					S+	S+	S+			S+		S+
02043004								S+				
02044008			S-									
02044012	S+											

Figura 5.6 – Distribuição espacial das tendências por índice de precipitação



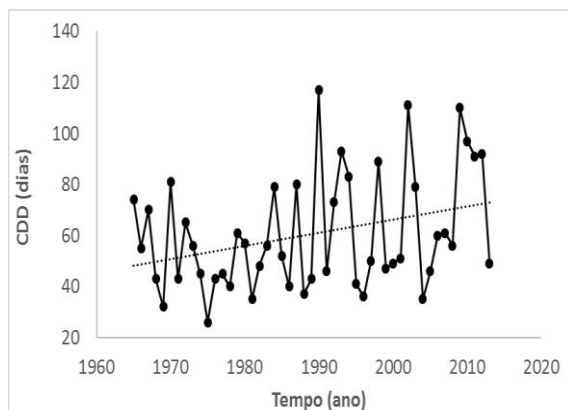
Os resultados apresentados indicam que os índices R10, R20, R40, Rx1day, Rx5day, R95p e PrcpTot apresentaram tendências significativas em no máximo três estações, o que sugere que não existe uma tendência regional para estes índices na RMBH. Por outro lado, quando a significância estatística foi detectada, observou-se que esses índices indicam predominantemente tendências positivas, sendo um indicativo de que uma possível mudança no padrão de chuvas da região pode estar apontando para um aumento dos índices relevantes para a drenagem urbana, a exemplo dos dias muito chuvosos (R95p), a precipitação máxima mensal em 1 e 5 dias consecutivos e o número de dias chuvosos acima de 10, 20 e 40 mm.

O índice R30 apresenta tendência significativa em 4 estações da RMBH. Observa-se que as estações que apresentam tendência de aumento deste índice estão concentradas na parte Leste da RMBH, indicando um aumento do número anual de dias chuvosos acima de 30 mm para esta área. Vale ressaltar que as estações que apresentaram tendência positiva significativa para os índices R20 e R40 também apresentaram tendência significativa para o índice R30, reforçando a hipótese de uma mudança no padrão de chuvas da parte Leste da região.

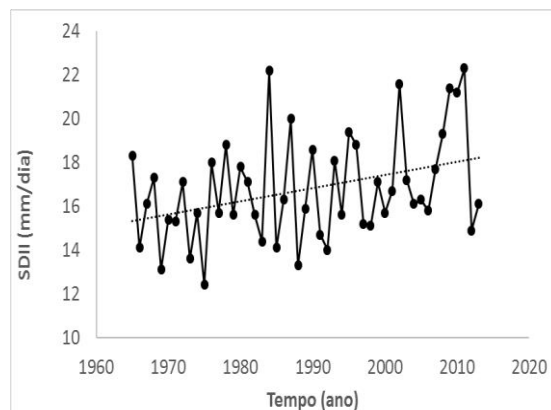
Observa-se que 4 estações apresentaram tendência negativa significativa para o índice CWD, apontando para uma diminuição nos dias chuvosos consecutivos nas regiões Norte e Sudoeste. Analisando ainda a Figura 5.6, que apresenta também a variação espacial do índice CDD, observa-se que esse índice aponta para uma tendência predominantemente positiva e concentrada nas regiões Norte e Central, sinalizando um aumento nos dias secos consecutivos nessas regiões. Tais resultados apontam para uma tendência de acúmulo das precipitações em uma escala de tempo menor nas regiões Norte e Central, tendência que é confirmada pelo índice SDII com significância positiva para as estações 01943004 e 01943055.

Considerando a localização da estação 01943055, a única na cidade de Belo Horizonte (região sul), é importante que seja dada a devida ênfase aos resultados obtidos para essa estação. As tendências identificadas sinalizam para o aumento de índices relevantes para a drenagem urbana - CDD, SDII, R10, R20, R30, R40, Rx5day e PrcpTot (os gráficos com a variação temporal dos índices de precipitação são apresentados na Figura 5.7) - sendo também a estação com o maior número de índices que apresentaram tendência. Têm-se, então, uma nítida mudança nos padrões de precipitação apontada para a cidade de Belo Horizonte, reforçada ainda pelo fato de que a tendência de aumento da intensidade diária de precipitação (SDII) está associada a aumentos significativos do número anual de dias secos consecutivos (CDD), sinalizando o aumento de chuvas para a cidade.

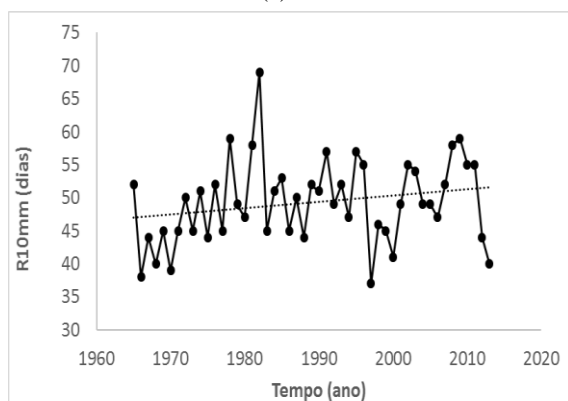
Figura 5.7 - Variação temporal dos índices de precipitação



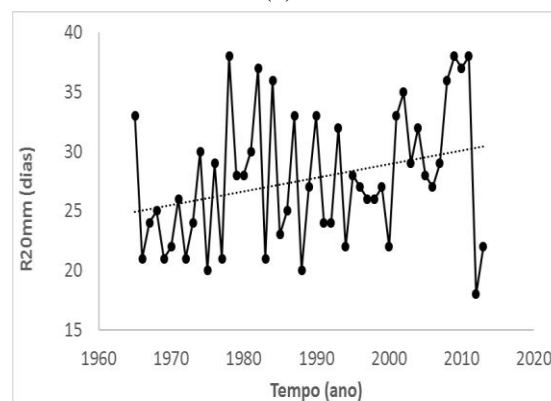
(a) CDD



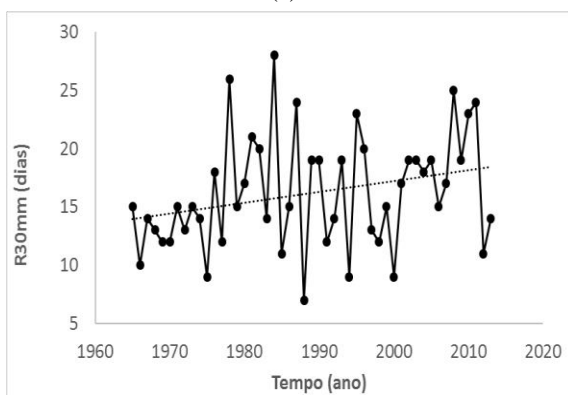
(b) SDII



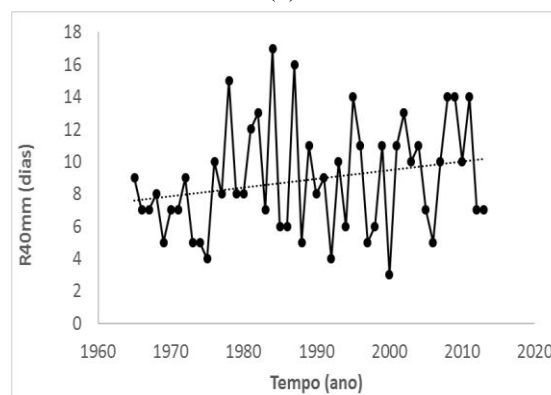
(c) R10



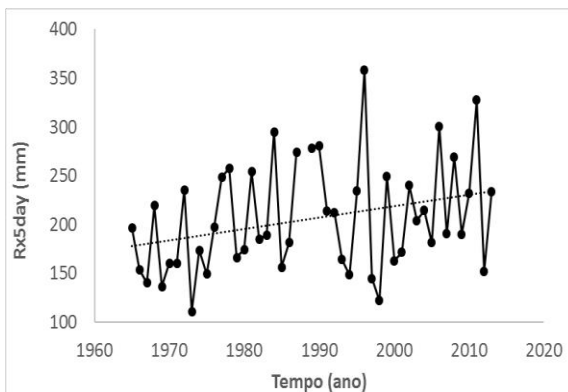
(d) R20



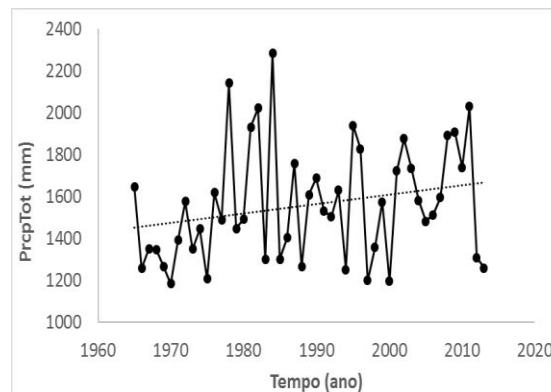
(e) R30



(f) R40



(g) Rx5day

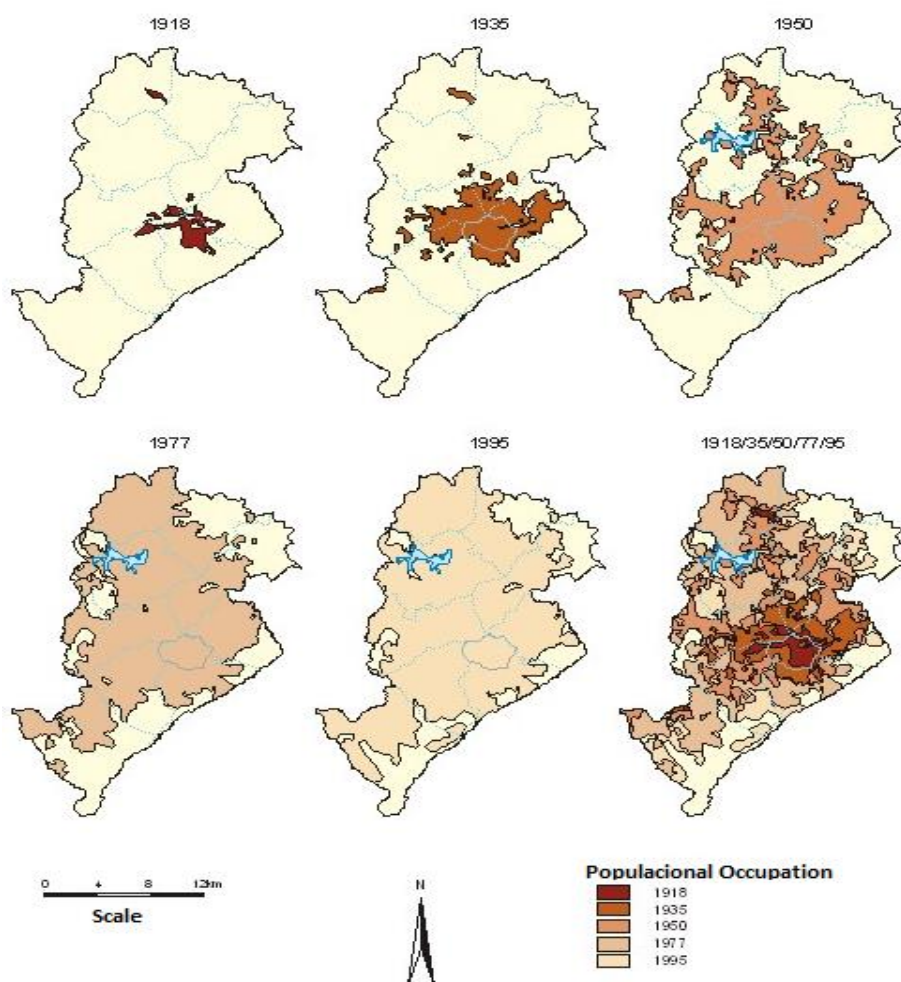


(h) PrcpTot

Os resultados dos testes de mudanças abruptas são apresentados na Tabela 5.7. Pode-se observar que há diferentes anos de mudança, eliminando a possibilidade de determinar um único ano que possa ser representativo de alterações nos padrões de precipitação da RMBH. Tal resultado era esperado, uma vez que diferentes tendências foram observadas ao longo do estudo.

No entanto, a estação 01943055, que representa a cidade de Belo Horizonte, apresentou quebras concentradas no ano de 1988 (destacado em vermelho na Tabela 5.7), que poderia, a princípio, apontar para uma época de forte expansão urbana, na qual foi verificada uma intensa migração em direção à Região Metropolitana. Uma representação temporal da ocupação e desenvolvimento da cidade de Belo Horizonte é apresentada na Figura 5.8.

Figura 5.8 - Representação temporal da ocupação e desenvolvimento da cidade de Belo Horizonte



Fonte: PBH (2014a)

Tabela 5.7- Resultados dos testes de mudanças abruptas, considerando o nível de significância de 5%

Código	CDD		CWD		SDII		R10		R20		R30	
	Cusum	Rank	Cusum	Rank	Cusum	Rank	Cusum	Rank	Cusum	Rank	Cusum	Rank
01943004				S (1987)		S (1987)						
01943006											S(1996)	
01943009												S(2000)
01943010												
01943023		S(1988)										
01943024												
01943055		S(1988)	S (1988)			S(1988)		S(1988)	S(2000)	S(1988)	S(2000)	S(1988)
01944004			S (2011)									
01944007			S (1987)	S (1987)								
01944009												
02043002									S(2001)			
02043004												
02044008					S (1982)	S (1986)						
02044012		S(1988)										

Tabela 5.7- Continuação

Código	R40		Rx1day		Rx5day		R95p		PRCPTOT	
	Cusum	Rank	Cusum	Rank	Cusum	Rank	Cusum	Rank	Cusum	Rank
01943004										
01943006				S(1990)			S(1990)	S(1984)		
01943009										
01943010										S(1975)
01943023										
01943024										
01943055						S (1988)				
01944004										
01944007										
01944009										
02043002		S (1987)					S (1992)			
02043004				S (1986)						
02044008										
02044012										

Observando as Figuras 5.8 e 4.1 é possível notar que a cidade apresentou um processo de ocupação expressivo entre as décadas de 50 e 90. No entanto, embora se possa pensar que uma tendência evidenciada a partir do ano de 1988 não faça sentido para a cidade, na prática, mesmo com a desaceleração do processo de expansão urbana, Belo Horizonte sofreu com o processo de verticalização, ocupando no ranking nacional a 10ª posição (IBOPE, 2010). Além disso, vale ressaltar que as consequências da expansão urbana na cidade não foram evidenciadas exatamente no momento em que ocorreram, uma vez que a cidade apresentou um desenvolvimento significativo como consequência da forte imigração que ocorreu entre as décadas de 50 e 90, ou seja, a cidade foi planejada sob demanda. Observa-se, por exemplo, que a partir da década de 80 muitos rios da cidade foram canalizados com o objetivo de aumentar o espaço para o tráfego urbano.

Por fim, embora não se possa estabelecer uma relação direta com as análises realizadas para as séries de temperatura, observa-se que a estação localizada na cidade de Belo Horizonte apresenta uma série de particularidades em seus resultados que podem estar associadas à influência de possíveis concentrações de fontes de calor urbano a que os postos meteorológicos possam estar submetidos.

5.7 Considerações Finais da Análise de Tendências em Eventos Extremos Diários de Chuva na RMBH

Com base nos resultados obtidos neste capítulo, pode-se concluir que:

Os índices de precipitação R10, R20, R40, Rx1day, Rx5day, R95p e PRCPTOT apresentaram tendências significativas em, no máximo, três estações na RMBH, sem um padrão espacial claro, o que se considera um resultado inconclusivo em nível regional. No entanto, a análise de tendência nas séries temporais do índice de precipitação R30 aponta para aumentos significativos desse índice em quatro estações localizadas na parte leste da região.

Considerando a predominância de tendências positivas significativas dos índices R30 e R40 na região leste, há um indicativo de que nesta região houve um aumento na precipitação diária entre 30 e 40 mm. Possivelmente, um limiar de 30 mm de chuva poderia ser adotado como alerta para a região.

Em relação à distribuição espacial do índice CWD, quatro estações relataram tendência negativa significativa e apontaram para uma diminuição no número de dias chuvosos consecutivos nas áreas Norte e Sudeste. O índice CDD apontou para uma tendência positiva predominante concentrada nas áreas Norte e Central, o que indicou um aumento no número de dias secos consecutivos nessas regiões. Tais resultados apontam para uma tendência no acúmulo de precipitações em uma escala de tempo menor nas áreas Norte e Central, o que foi confirmado pelo índice SDII. No entanto, pouca alteração foi observada no índice PrcpTot, indicando que os eventos extremos de precipitação a curto prazo são mais sensíveis às mudanças no ambiente quando comparadas às precipitações anuais.

Em relação à estação localizada na cidade de Belo Horizonte, as tendências identificadas indicaram um aumento nos índices relevantes para os sistemas de drenagem urbana, ou seja, CDD, SDII, R10, R20, R30, R40, Rx5day e PrcpTot. No que diz respeito a mudanças abruptas, os resultados dos testes indicam diferentes anos de mudança na Região Metropolitana de Belo Horizonte. No entanto, na estação 01943055, que representa Belo Horizonte, detectou-se uma convergência de mudanças no ano de 1988.

A análise de tendências para temperaturas médias e mínimas anuais indica uma tendência positiva mais expressiva para a estação de Belo Horizonte, quando comparada à estação de Florestal (localizada na RMBH), sinalizando a possível existência de uma "ilha de calor urbano" na capital, onde a estação pluviométrica 01943055 está localizada.

Os resultados de presença de tendência e mudanças abruptas são apenas indicativos de possíveis alterações nos padrões climatológicos da região, porém estes apontam para a não confirmação da hipótese de estacionariedade (o futuro será estatisticamente igual ao passado). Informações desta natureza são essenciais nos processos de tomada de decisão dentro da perspectiva de gestão de risco.

6 ANÁLISE DE ESTACIONARIEDADE PARA O ESTUDO DE CHUVAS INTENSAS EM BELO HORIZONTE

6.1 Introdução

O dimensionamento da drenagem urbana se origina da obtenção de hidrogramas de projeto, utilizando como base a relação IDF. Desta forma, é imprescindível a garantia da confiabilidade da curva IDF para que os riscos associados aos projetos sejam estimados de forma adequada. No entanto, como visto anteriormente, existem incertezas sobre as precipitações máximas na cidade de Belo Horizonte que podem indicar mudanças nas atuais relações IDF.

De fato, algumas das incertezas relacionadas à região, e que influenciam no ajuste da curva, estão na percepção de ocorrências de chuvas mais intensas nos últimos anos, que são identificadas nas frequentes inundações. Nesse sentido, será apresentado o estudo de tendência de dados subsidiários de chuva a partir de métodos estatísticos. A etapa inicial será de aquisição e análise de consistência dos registros pluviográficos da região, para que, posteriormente, sejam definidos os máximos anuais a serem estudados. A análise de tendência buscou identificar mudanças graduais e abruptas em séries temporais.

Visando ainda quantificar as eventuais tendências observadas, teve-se o objetivo, nesta etapa, de construir uma nova curva que contemple as eventuais alterações nas intensidades das chuvas que ocorrem na cidade, sob uma ótica de não-estacionariedade.

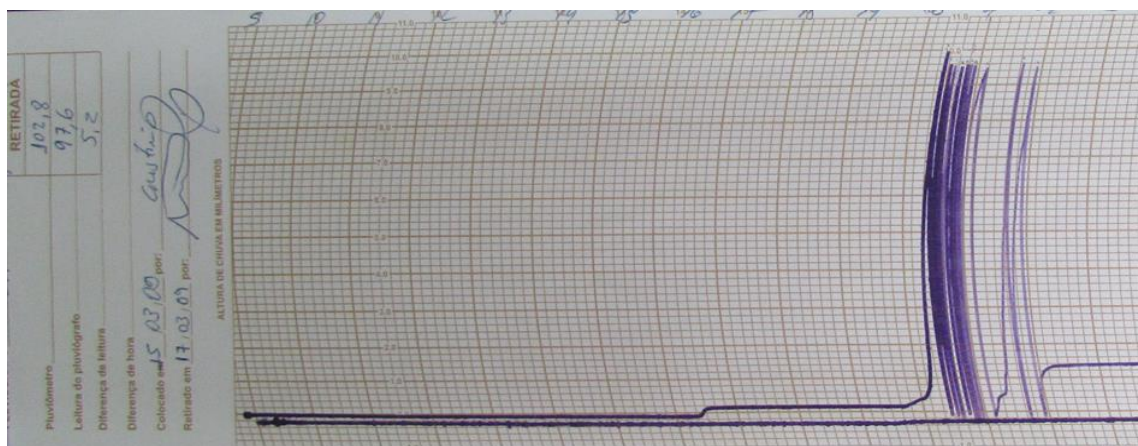
6.2 Aquisição e Análise Preliminar dos Dados de Precipitação Subdiária da cidade de Belo Horizonte

6.2.1 Aquisição dos dados de precipitação subdiária

Inicialmente, almejava-se a aquisição de dados de precipitação subdiária para toda a RMBH, porém as dificuldades no atendimento aos critérios básicos estabelecidos foram limitantes. Estabeleceu-se que as séries deveriam contar com, pelo menos, 50 anos de registros e com poucas falhas, uma vez que valores subsidiários de precipitação são de difícil preenchimento de falhas. Dessa forma, foram avaliados os dados disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), pela Agência Nacional de Águas (ANA) e pela Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), sendo apenas a série histórica do INMET apta às análises posteriores.

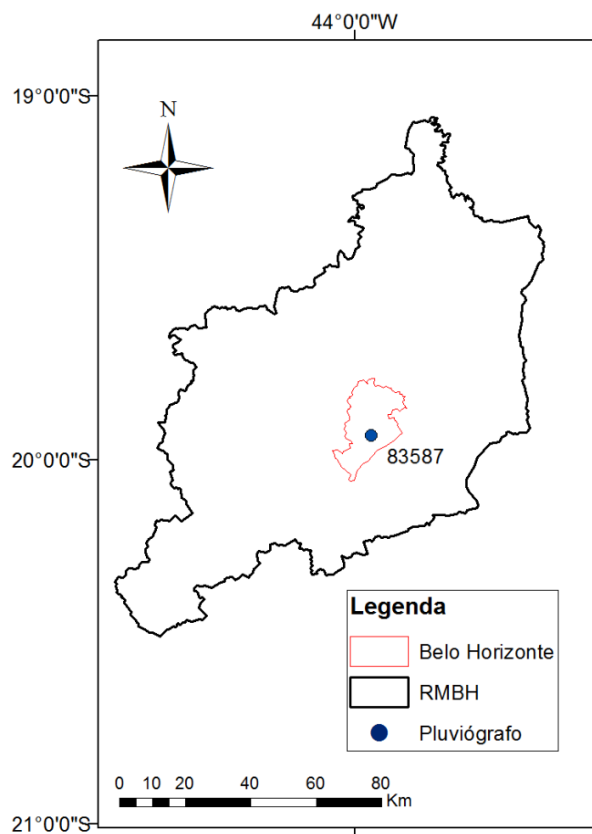
As informações pluviográficas da estação do INMET (código 83587) foram fornecidas em meio físico, ou seja, em forma de pluviogramas, optando-se pela digitalização dos mesmos por meio de fotografias. Na Figura 6.1 é apresentada a fotografia de um pluviograma que representa o padrão dos dados acessados; na Figura 6.2 é apresentada a localização da estação, que se encontra em uma altitude de 916 m.

Figura 6.1 - Fragmento do pluviograma do dia 16/03/2009



Fonte: INMET, 2016

Figura 6.2 – Localização da estação pluviográfica do INMET



6.2.2 Análise preliminar dos dados de precipitação subdiária

Para a estação do INMET citada, foram selecionados os diagramas de chuvas consideradas “intensas”, a partir dos limites estabelecidos por PFAFSTETTER (1957) e WILKEN (1978), apresentados na Tabela 6.1. Cada diagrama selecionado foi analisado com o objetivo de se obter as maiores inclinações por ano hidrológico para as diferentes durações a serem consideradas no estudo (10, 15, 30 e 45 minutos, e 1, 2, 3, 4, 8, 14 e 24 horas).

Tabela 6.1 – Limiares de chuvas intensas

Duração	Precipitação (mm)	Intensidade (mm/h)
10 minutos	12	72
15 minutos	15	60
30 minutos	20	40
45 minutos	23	30,7
1 hora	25	25
2 horas	30	15
3 horas	33	11
4 horas	35	8,8
8 horas	40	5
14 horas	47	3,4
24 horas	55	2,3

Foram realizadas as leituras dos pluviogramas dos anos de 1996 a 2015, sendo então montadas as séries temporais de intensidades pluviométricas máximas, por ano hidrológico (a consideração do ano hidrológico garante que os eventos sejam independentes), para todas as durações em estudo, sendo estas apresentadas no APÊNDICE C. Para complementação da série histórica foram utilizadas as intensidades máximas registradas no estudo de Pinheiro e Naghettini (1998), dos anos de 1956 a 1995.

Analisando a série histórica completa é possível observar que dos anos de 1956 a 1980 não há registros das intensidades máximas para as durações de 8, 14 e 24 horas. Dessa forma, foi realizada uma análise preliminar de média móvel de 10 anos (Figura 6.3), a fim de verificar o comportamento dessas durações ao longo dos anos, comparando-as às demais durações em estudo. Para tal, foram calculadas 50 médias móveis, sendo a primeira de 1956 a 1965 e a última de 2005 a 2014. De acordo com Grayson *et al.* (1996), a média móvel é uma das técnicas mais simples e comumente usada no estudo de tendências.

Analisando a Figura 6.3, observa-se que as médias móveis de intensidades de chuva máximas registradas para as durações de 10 min a 1 hora apresentam, além de tendências de crescimento, oscilações nítidas ao longo do tempo, o que não ocorre com as durações de 2 a 24 horas. Além

disso, um comportamento notório para as chuvas de menor duração são os períodos com tendências definidas (variações cíclicas), sendo estas ora positivas, ora negativas (Figura 6.4).

Figura 6.3 – Análise de média móvel de 10 anos para as intensidades máximas registradas, considerando todas as durações de chuva

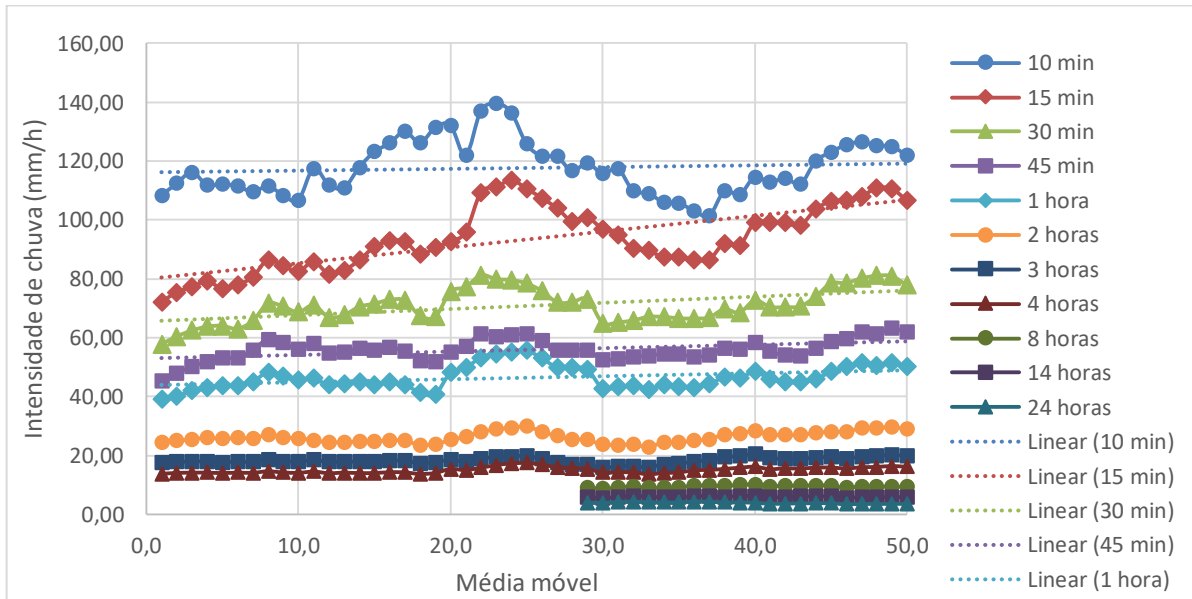
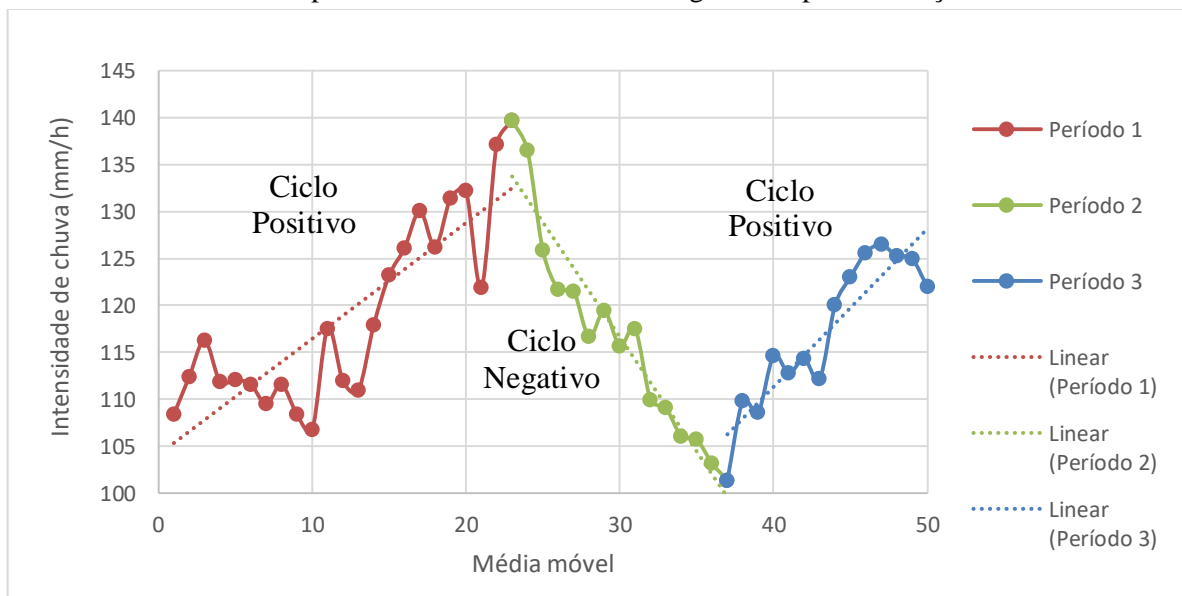


Figura 6.4 – Períodos com diferentes tendências definidas (variações cíclicas), considerando a média móvel de 10 anos para as intensidades máximas registradas para a duração de 10 min



Dessa forma, embora possa ser pensado que as variações cíclicas ao longo das séries caracterizem a inexistência de tendências, estas podem representar períodos críticos para uma determinada região, tanto por escassez, quanto por cheias e, por isso, não podem ser ignoradas. Nesse sentido, procedeu-se para a análise de tendências por meio de testes estatísticos, a fim de

se definir um ano de mudança que caracterize o ciclo atual (ciclo positivo), além de quantificar as eventuais tendências identificadas. Para tal, serão analisadas as séries de 10 min a 4 horas (séries completas), buscando verificar a significância das análises realizadas.

6.3 Análise e Modelagem de Tendências nas Séries de Máximos Anuais de Precipitação Subdiária da estação do INMET (83587)

As tendências das séries temporais foram avaliadas, de acordo com Kundzewicz e Robson (2004), pelo teste de mudanças graduais *Mann-Kendall* e pelos testes de mudanças abruptas, descritos em Chiew e Siriwardena (2005), *Distribution-Free CUSUM* e *Rank Sum* (detectam a alteração da mediana em dois períodos), sendo todos os testes não paramétricos. Os testes foram realizados com o auxílio do software TREND e o nível de significância considerado nos testes foi de 5%. Os resultados são apresentados na Tabela 6.2 (S + significa tendência positiva significativa, enquanto NS significa tendência não significativa).

Tabela 6.2 - Análise de tendência para as séries de precipitação subdiária

Estação 83587 (Durações)	Mann-Kendall	CUSUM	Rank Sum
10 min	NS	S+ (2011)	S+ (2000)
15 min	S+	S+ (1980)	S+ (2000)
30 min	S+	NS	S+ (2000)
45 min	S+	NS	S+ (2000)
1 h	S+	NS	S+ (2000)
2 h	NS	NS	NS
3 h	NS	NS	NS
4 h	NS	NS	NS
8 h	NS	NS	NS
14 h	NS	NS	NS
24 h	NS	NS	NS

Observa-se que foram detectadas tendências positivas significativas para o teste de mudanças abruptas *Rank Sum*, que indicaram o ano de 2000 como sendo o ano de mudança de todas as séries com durações inferiores a 1 hora. Para o teste de mudanças abruptas *CUSUM* foram detectadas tendência positivas apenas para as séries com durações de 10 e 15 min, identificando ainda diferentes anos de mudança. Adicionalmente, o teste de Mann-Kendall apontou tendências positivas monotônicas para as séries com durações de 15 min a 1 hora.

Nesse sentido, é possível concluir que a existência de tendências está associada às séries com durações inferiores a 1 hora e a tendência que é comum a todas as séries inicia-se no ano de 2000, fato que pode estar associado ao ciclo positivo indicado na Figura 6.4.

Para quantificar as tendências observadas e modelar a distribuição estatística dos dados, utilizou-se a distribuição GEV, em sintonia com a Teoria dos Valores Extremos (COLES, 2001), conforme a equação 3.12 apresentada na etapa de Revisão de Literatura. O ajuste dos dados à distribuição é apresentado no APÊNDICE D:

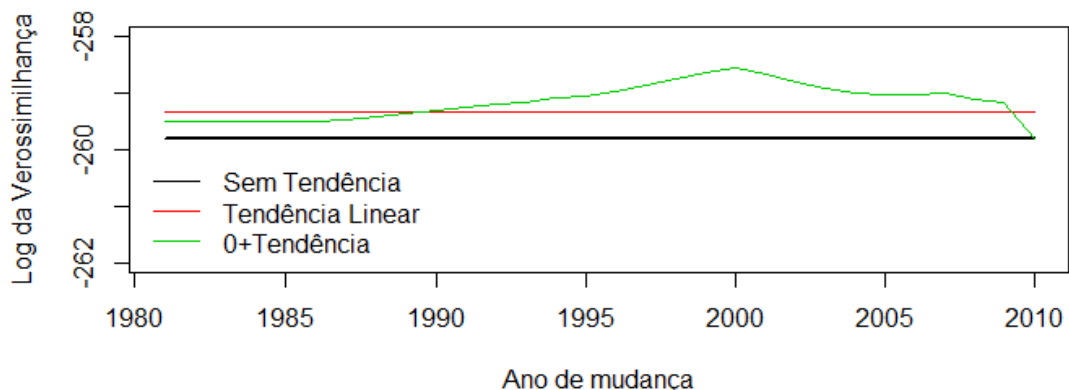
No caso não-estacionário, os parâmetros da distribuição GEV variam com o tempo (anos). O parâmetro de posição foi assumido como sendo uma função $\mu(t)$, enquanto os parâmetros de escala e forma foram constantes. Testou-se, então, três modelos para $\mu(t)$: o modelo estacionário [$\mu(t) = \mu_0$]; uma tendência linear monotônica [$\mu(t) = \mu_0 + \mu_1 t$], apresentada na equação 3.13; e uma tendência linear a partir do ano t_0 , apresentada na equação 3.14.

Considerando que as séries consistem no período de 1956 a 2014 e que as décadas de 80 e 90 representam um período de forte expansão urbana para a RMBH, além da “quebra” no ano de 2000 que já foi indicada pelo teste *Rank Sum*, serão considerados anos a partir de 1982 como possíveis anos de mudança (t_0).

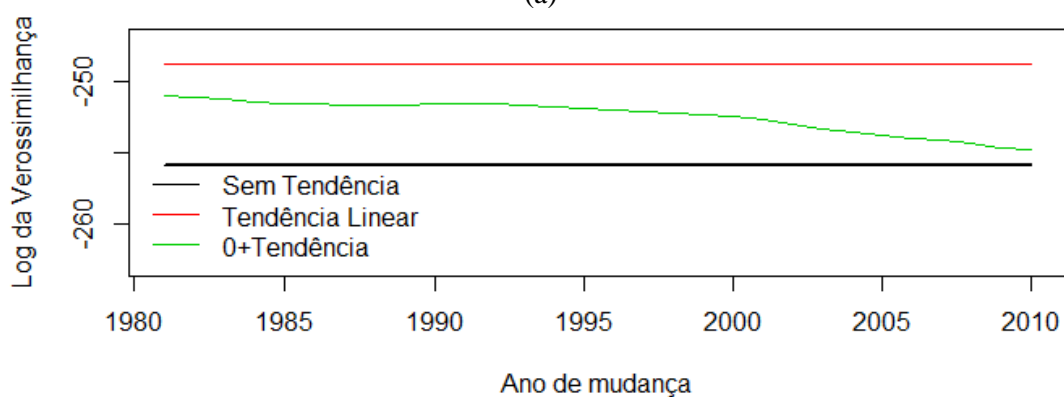
Todos os modelos foram ajustados pela máxima verossimilhança (COLES, 2001), conforme descrito na etapa 3.4 da Revisão de Literatura. Os cálculos e ajustes foram desenvolvidos em ambiente R.

Em primeiro lugar, foi selecionado qual dos modelos se ajusta melhor aos dados, sendo a primeira evidência obtida comparando-se o log-verossimilhança dos diferentes modelos para cada duração (inferior a 1 hora). A Figura 6.5 representa o log-verossimilhança dos modelos em função do ano de mudança (considerando que os modelos estacionário e linear não têm ano de mudança, os mesmos são representados com linhas horizontais). Dessa forma, a linha preta representa o modelo sem tendência, a linha vermelha a tendência linear contínua e a linha verde a tendência linear a partir de um certo ano (t_0).

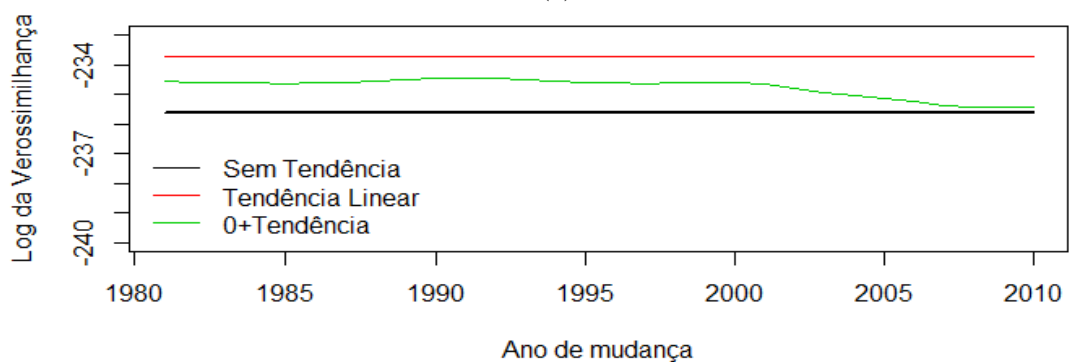
Figura 6.5 – Log-verossimilhança para os três modelos não-estacionários em relação ao ano de mudança para as séries de precipitações máximas com durações de 10 (a), 15 (b), 30 (c), 45 (d) e 60 (e) min



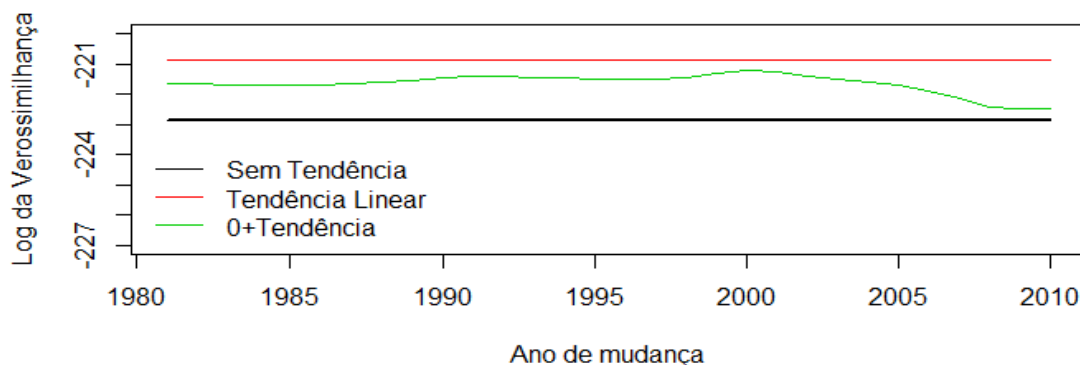
(a)



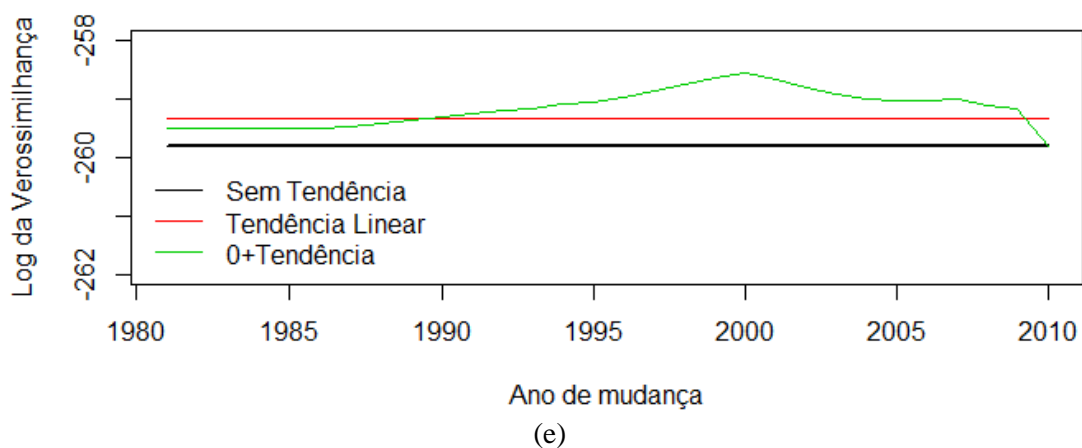
(b)



(c)



(d)



Considerando que o objetivo é maximizar o log-verossimilhança, o maior valor indica o melhor ajuste. Observa-se que para as diferentes durações os modelos com tendência linear e tendência linear a partir de um certo ano (t_0) para $\mu(t)$ apresentam os melhores ajustes. Vale ressaltar que, de forma geral, o ano de 2000 representa os melhores ajustes para o modelo com tendência a partir de um certo ano.

Nesse contexto, optou-se por analisar os resultados obtidos na etapa de identificação de tendências e compará-los aos resultados obtidos nesta etapa. Dessa forma, verifica-se que o modelo estacionário deve, de fato, ser desconsiderado e que o modelo que indica uma tendência a partir do ano de 2000 é o que melhor se adequa a todas as durações.

Uma vez selecionado o modelo não-estacionário com o melhor ajuste para as séries históricas, foi ainda utilizado o critério Akaike Information (AIC, [AKAIKE, 1974]), descrito na etapa 3.4 da Revisão de Literatura), para verificar se o modelo não-estacionário selecionado, para cada série, deveria de fato ser preferido ao modelo estacionário.

Foram, então, analisadas as séries de intensidades máximas anuais, para as diferentes durações, que apresentaram preferência para o modelo GEV com tendência linear para o parâmetro $\mu(t)$ a partir de 2000, considerando o critério AIC, e a magnitude destas tendências (em % de aumento).

Observou-se que as intensidades de precipitação para as diferentes durações apresentaram aumentos, a partir do ano de 2000, que variaram de 15 a 30%, caracterizando eventos pluviométricos para os quais os sistemas de drenagem da cidade podem não estar preparados,

uma vez que foram dimensionados à partir de equações IDF ajustadas para o município sob a hipótese de estacionariedade.

Nesse contexto, foi elaborada uma proposta de relações IDF para situações de não-estacionariedade dos dados, que se aplica nesse estudo às séries de intensidades máximas anuais de precipitação para as durações de 10, 15, 30, 45 minutos e 1 hora. Para tal, será considerado o modelo GEV com os parâmetros σ (escala) e ξ (forma) constantes e o parâmetro μ (posição) variando conforme a equação:

$$\mu(t) = \begin{cases} \mu_0, & t \leq 2000 \\ \mu_0 + \mu_1(t - 2000), & t \geq 2000 \end{cases} \quad (6.1)$$

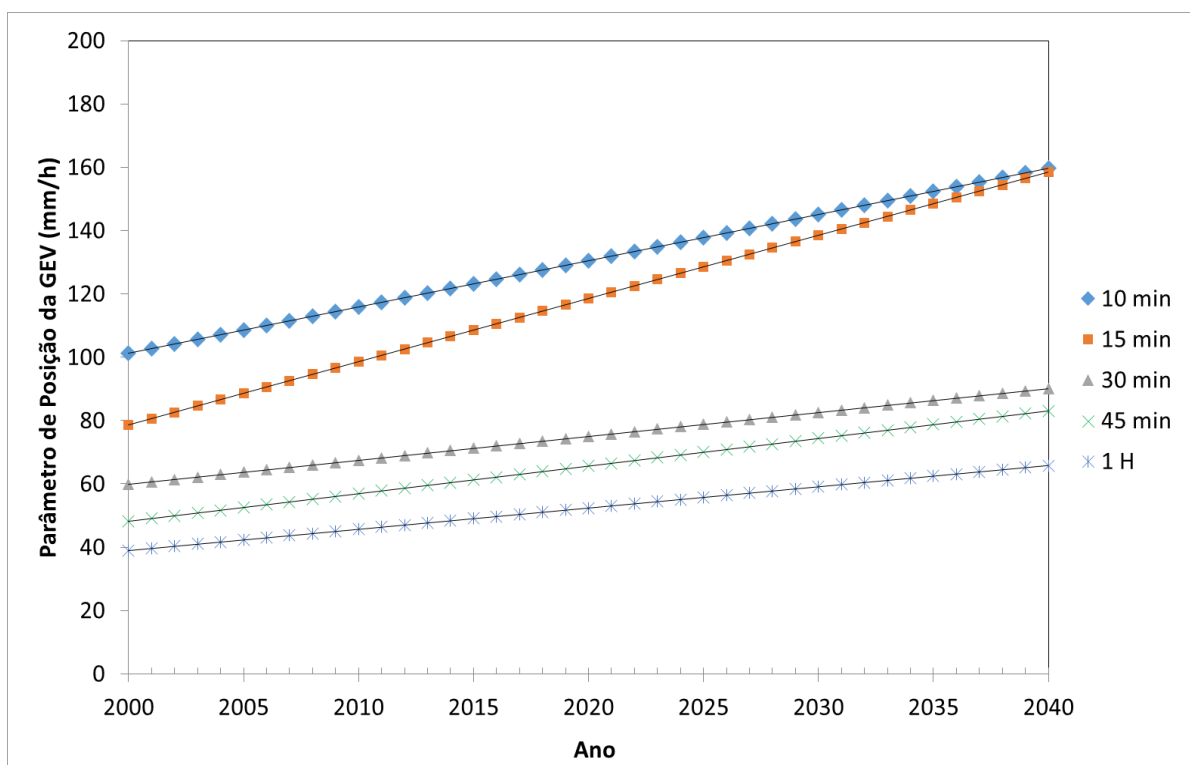
Dessa forma, são apresentados na Tabela 6.3 os parâmetros da distribuição:

Tabela 6.3 - Parâmetros da distribuição GEV não estacionária ajustada

Parâmetros	10min	15min	30min	45min	60 min
μ_0	101,34	78,64	59,92	48,23	39,00
μ_1	1,46	2,00	0,75	0,87	0,67
σ	23,38	19,71	14,68	12,79	9,86
ξ	-0,058	-0,098	-0,006	-0,191	-0,016

Os resultados apresentados na Tabela 6.3 permitem o cálculo do parâmetro de posição para cada ano até 2040. Neste sentido, o gráfico apresentado na Figura 6.6 permite visualizar a variação temporal do parâmetro de posição da GEV para cada duração. A escolha do ano de 2040 como limite para a estimativa deste parâmetro justifica-se pelo fato de que as retas correspondentes às durações de 10 e 15 minutos, com coeficientes angulares iguais a μ_1 , se cruzam entre os anos de 2042 e 2043, evidenciando que as intensidades de precipitação associadas a diferentes durações podem apresentar isoladamente tendências mais ou menos significativas. Embora o ano limite estabelecido não incorpore este comportamento, tal constatação abre uma discussão sobre a justificativa do mesmo, presumindo-se, de forma especulativa, que o mesmo está associado aos processos físicos de formação das chuvas convectivas, relacionado a maior disponibilidade de energia devido à tendência de aumento das temperaturas (apresentada no capítulo 5).

Figura 6.6 – Variação temporal do parâmetro de posição da GEV para cada duração



6.4 Definição de relações IDF para situações de não-estacionariedade

As equações IDF estão comumente associadas ao conceito de período de retorno. Porém, segundo Moreira *et al.* (2016) este conceito, embora amplamente utilizado sob a premissa de estacionariedade, não é igualmente aplicável à análise não-estacionária, uma vez que a distribuição da variável aleatória varia anualmente, proporcionando a existência de distintas probabilidades anuais de excedência, que estão ainda associadas a um determinado quantil de referência, ao longo do tempo.

Neste sentido, muitos estudos vêm sendo desenvolvidos de forma a explorar o conceito de tempo de retorno, aplicando-o para situações de não-estacionariedade, com destaque ao método proposto por Rootzén e Katz (2013), denominado *Design Life Level*, ou DLL. Neste estudo, entretanto, propõe-se uma adaptação do conceito "*Minimax Design Life Level: the $T_1 - T_2$ p% bounded yearly risk level*", descrito em Rootzén e Katz (2013) e no item 3.4 da Revisão de Literatura deste trabalho, para quantificar as intensidades de chuva para fins de projetos de engenharia, em uma situação de não-estacionariedade das séries. O conceito de *Minimax Design Life Level*, nesse caso, remete ao risco associado a uma obra, ou seja, T_1 indica o tempo do

início do período de vida do projeto, T_2 é o fim e p é a probabilidade de que a capacidade projetada para a obra seja excedida durante o período de vida útil do projeto.

Como exemplo, para um período de vida útil de um projeto de 2018 a 2040 e uma probabilidade de 5% de que a capacidade da estrutura projetada seja excedida durante o período, o cálculo da intensidade de projeto para uma chuva com duração de 10 min seria realizado da seguinte forma:

Cálculo dos parâmetros de posição conforme a equação 6.1 e a Tabela 6.3

$$\mu(2018) = 101,34 + 1,46 (2018 - 2000) = 127,62 \text{ mm/h}$$

$$\mu(2040) = 101,34 + 1,46 (2040 - 2000) = 159,74 \text{ mm/h}$$

Cálculo do quantil para probabilidade de excedência de 5% conforme a inversa da equação 3.12 e a Tabela 6.3, utilizando o parâmetro de posição de 2040.

$$I(0,05) = 159,74 + \frac{23,38}{0,058} \{1 - [-\ln(1 - 0,05)]^{0,058}\} = 223,5 \text{ mm/h}$$

Considerando uma linguagem menos técnica, pode-se afirmar: "existe um risco de 1 em 20 de que a maior chuva com duração de 10 minutos entre 2018 e 2040 seja superior a 223,5 mm/h". Dessa forma, é possível calcular os quantis para diferentes durações e probabilidades de excedência, considerando a mesma vida útil do projeto, ou seja, para cada duração calcula-se o parâmetro de posição da GEV para o ano no qual a vida útil do projeto finaliza, a exemplo do que foi feito para a duração de 10 min, e então calculam-se os quantis associados às probabilidades de excedência propostas.

Supondo-se então probabilidades de excedência variando de 0,5 a 50%, para as diferentes durações de chuva em análise, têm-se para o ano de 2040 os quantis apresentados na Tabela 6.4:

Tabela 6.4 - Quantis de intensidade de chuva para diferentes durações e probabilidades de excedência, considerando 2040 como o ano de fim de vida do projeto

Probabilidade de excedência	10 min	15 min	30 min	45 min	60 min
	Quantis (mm/h)				
0,5	168,2	165,5	95,5	87,6	69,4
0,2	193,3	186,0	112,0	99,8	80,4
0,1	209,1	198,3	122,9	106,5	87,6
0,067	217,5	204,7	129,0	109,9	91,5
0,05	223,5	209,3	133,3	112,1	94,4
0,04	228,0	212,6	136,6	113,7	96,5
0,033	231,8	215,4	139,4	115,1	98,4
0,029	234,3	217,2	141,3	115,9	99,6
0,025	237,1	219,3	143,5	116,9	101,0
0,02	241,4	222,4	146,7	118,3	103,1
0,013	249,4	228,1	152,9	120,8	107,1
0,01	254,1	231,5	156,7	122,3	109,5
0,008	258,1	234,3	159,9	123,4	111,5
0,007	260,5	235,9	161,8	124,1	112,8
0,006	263,2	237,8	164,0	124,9	114,2
0,005	266,3	239,9	166,6	125,7	115,8

Buscando analisar a variação dos quantis em termos de duração e de probabilidade de excedência (PE), os mesmos foram plotados em um gráfico e são apresentados na Figura 6.7. No âmbito dessa proposta, para cada vida útil de interesse, ter-se-iam 5 equações que representam cada uma das durações de chuva. Considerando, então, o período de 2018 a 2040, as equações que representam essa vida útil são:

$$\text{Para 10 min de duração: } I \text{ (mm/h)} = - 20,45 \ln (PE) + 160,26 \quad (6.2)$$

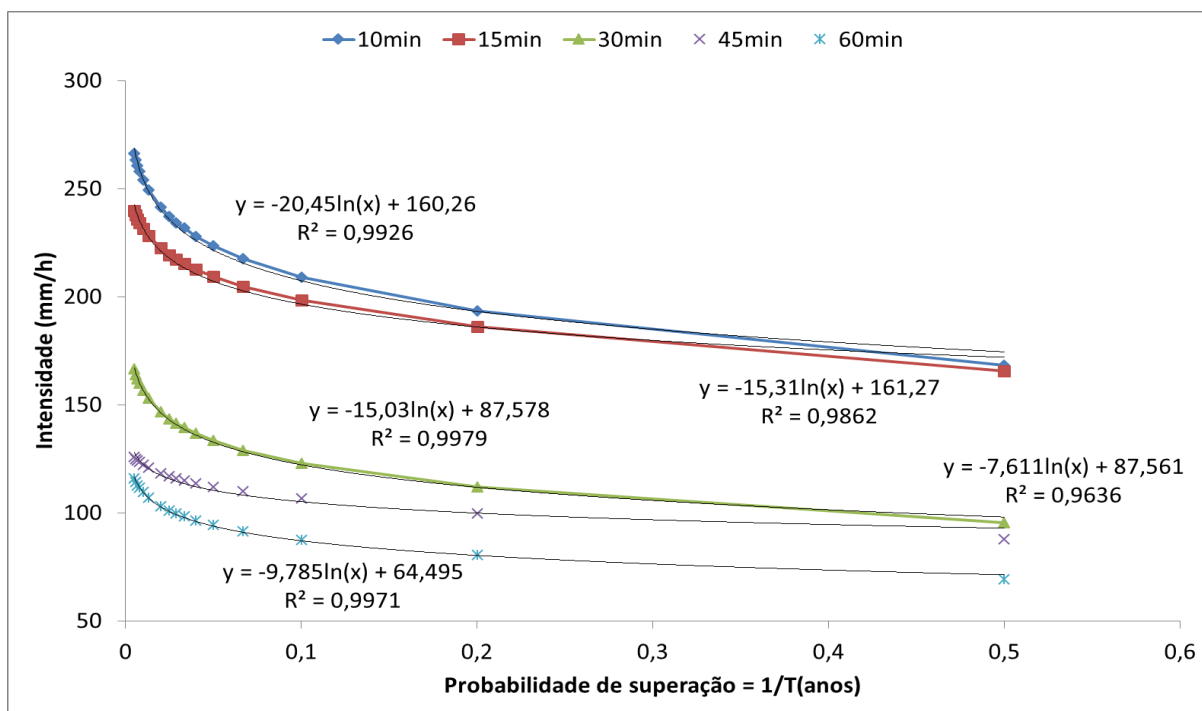
$$\text{Para 15 min de duração: } I \text{ (mm/h)} = - 15,31 \ln (PE) + 161,27 \quad (6.3)$$

$$\text{Para 30 min de duração: } I \text{ (mm/h)} = - 15,03 \ln (PE) + 87,58 \quad (6.4)$$

$$\text{Para 45 min de duração: } I \text{ (mm/h)} = - 7,61 \ln (PE) + 87,56 \quad (6.5)$$

$$\text{Para 1 hora de duração: } I \text{ (mm/h)} = - 9,79 \ln (PE) + 64,50 \quad (6.6)$$

Figura 6.7 – Quantis de intensidade de chuva, em mm/h, para diferentes durações e probabilidades de excedência



Recomenda-se, conforme destacado anteriormente, que esta proposta esteja restrita a uma estimativa de quantis para o ano de 2040. É importante enfatizar que a atualização dos dados para estudos que envolvem análise de não-estacionariedade é essencial, pois não se pode afirmar que a tendência detectada será contínua por toda a série histórica.

Nesse contexto, faz-se um paralelo entre as estimativas de intensidade de chuva para as diferentes IDF's já ajustadas para o município de Belo Horizonte, ainda que se saiba que os quantis obtidos à partir da série histórica da estação do INMET são de abrangência local (não são válidos para todo o município de Belo Horizonte). Busca-se, nesse sentido, uma comparação entre as estimativas de intensidades de chuva para os anos de 2018 (ano mais próximo) e 2040, considerando as equações que serão mencionadas na sequência.

Otto Pfafstetter publicou em 1957 o trabalho intitulado *Chuvas Intensas no Brasil* (PFAFSTETTER, 1957), no qual foram estabelecidas equações IDF para 98 postos pluviográficos no Brasil, através da equação:

$$P = R [a \cdot t + b \cdot \log(1 + c \cdot t)] \quad (6.7)$$

Onde:

P = precipitação total máxima (mm);

R = fator associado ao período de retorno;

t = duração da chuva (horas); e

a, b, c = parâmetros locais.

O fator R é calculado pela equação:

$$R = T^{\left(\alpha + \frac{\beta}{T^{0,25}}\right)} \quad (6.8)$$

Onde:

T = período de retorno (anos);

α = parâmetro que depende da duração da precipitação; e

β = parâmetro que depende da duração da precipitação e do local estudado;

Para Belo Horizonte, os parâmetros a, b, c assumem os respectivos valores: 0,6; 26,0 e 20,0. Os valores de β variam conforme a duração do evento, como apresentado na Tabela 6.5:

Tabela 6.5 – Valores do parâmetro β

t	5 min	15 min	30 min	1h a 6 dias
β	0,120	0,120	0,120	0,040

Fonte: Pfafstetter (1957)

Os valores de α são apresentados na Figura 6.8:

Figura 6.8 - Valores do parâmetro α

Duração	α	duração	α	duração	α
5 min	0,108	15min	0,122	30min	0,138
1h	0,156	2h	0,166	4h	0,174
8h	0,176	14h	0,174	24h	0,170
48h	0,166	3d	0,160	4d	0,156
6d	0,152				

Fonte: Pfafstetter (1957)

Outras equações foram utilizadas para projetos de sistemas de drenagem na cidade de Belo Horizonte. Neste sentido, Villela e Mattos (1975) apresentaram a equação 6.9 para a cidade de Belo Horizonte, desenvolvida por Adir José de Freitas e Ana Amélia Carvalho de Souza, em

um período de 31 anos (1938- 1969). Nesta equação os parâmetros K, m, D₀ e n assumem os respectivos valores: 24,63; 0,1; 20 e 0,84.

$$I = \frac{K T^m}{(t+D_0)^n} \quad (6.9)$$

Onde:

I = intensidade da chuva (mm/min);

T = período de retorno (anos);

t = duração da chuva (minutos); e

K, m, D₀ e n = parâmetros relativos ao ajuste da equação;

Em 1982, por solicitação da Sudecap, foi desenvolvido pela SEEBLA – Serviços de Engenharia Emilio Baumgart Ltda o estudo de “Memória Justificativa dos Estudos Hidrológicos do Vale do Ribeirão Arrudas”, no qual foram formuladas as seguintes equações de chuvas intensas para a cidade:

Para durações inferiores a 1 hora:

$$I = \frac{795,18 T^{0,1598}}{(t+5)^{0,7039} T^{0,0106}} \quad (6.10)$$

Para durações superiores a 1 hora:

$$I = \frac{1172,4 T^{0,1454}}{t^{0,8331}} \quad (6.11)$$

Onde:

I = intensidade da chuva (mm/h);

T = período de retorno (anos);

t = duração da chuva (minutos);

A equação atualmente utilizada e recomendada no manual de instruções técnicas para elaboração de estudos e projetos de drenagem urbana do município de Belo Horizonte é a equação de Pinheiro e Naghettini (1998):

$$I = 0,76542 D^{-0,7059} P^{0,5360} \mu_{T,d} \quad (6.12)$$

Onde:

I = intensidade da chuva (mm/h);

P = Precipitação total anual (mm);

D = duração da chuva (horas); e

$\mu_{T,d}$ = quantil adimensional de frequência regional associado ao período de retorno T e à duração d (tabelado).

Para a estimativa de $\mu_{T,d}$ tem-se a Figura 6.9:

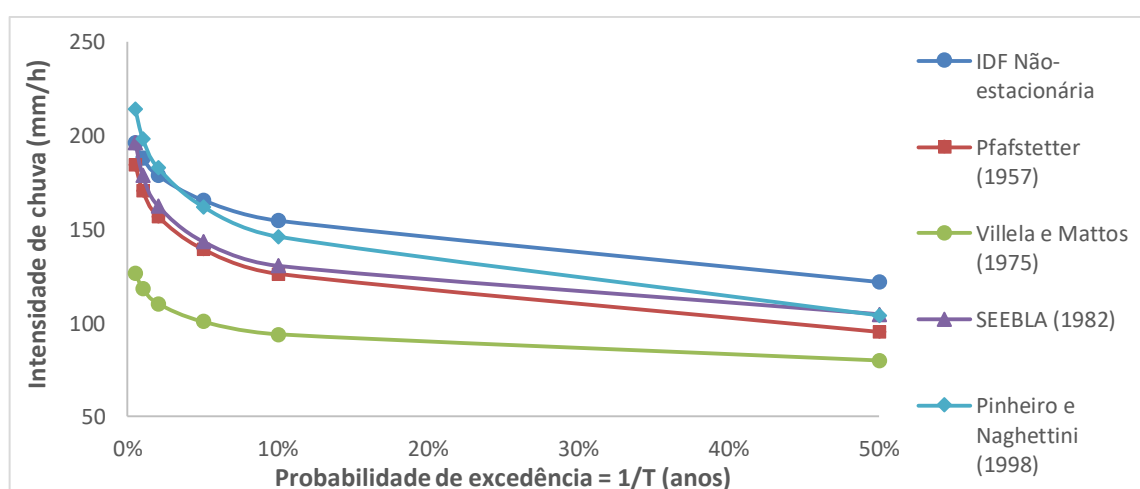
Figura 6.9 - Quantis adimensionais $\mu_{T,d}$

Durações	Período de retorno (anos)							
	1,05	1,25	2	10	20	50	100	200
10 minutos	0,691	0,828	1,013	1,428	1,586	1,791	1,945	2,098
15 minutos	0,695	0,830	1,013	1,422	1,578	1,780	1,932	2,083
30 minutos	0,707	0,836	1,013	1,406	1,557	1,751	1,897	2,043
45 minutos	0,690	0,827	1,013	1,430	1,589	1,795	1,949	2,103
1 hora	0,679	0,821	1,014	1,445	1,610	1,823	1,983	2,143
2 horas	0,683	0,823	1,014	1,439	1,602	1,813	1,970	2,128
3 horas	0,679	0,821	1,014	1,445	1,610	1,823	1,983	2,143
4 horas	0,688	0,826	1,013	1,432	1,591	1,798	1,953	2,108
8 horas	0,674	0,818	1,014	1,451	1,618	1,834	1,996	2,157
14 horas	0,636	0,797	1,016	1,503	1,690	1,931	2,112	2,292
24 horas	0,603	0,779	1,017	1,550	1,754	2,017	2,215	2,412

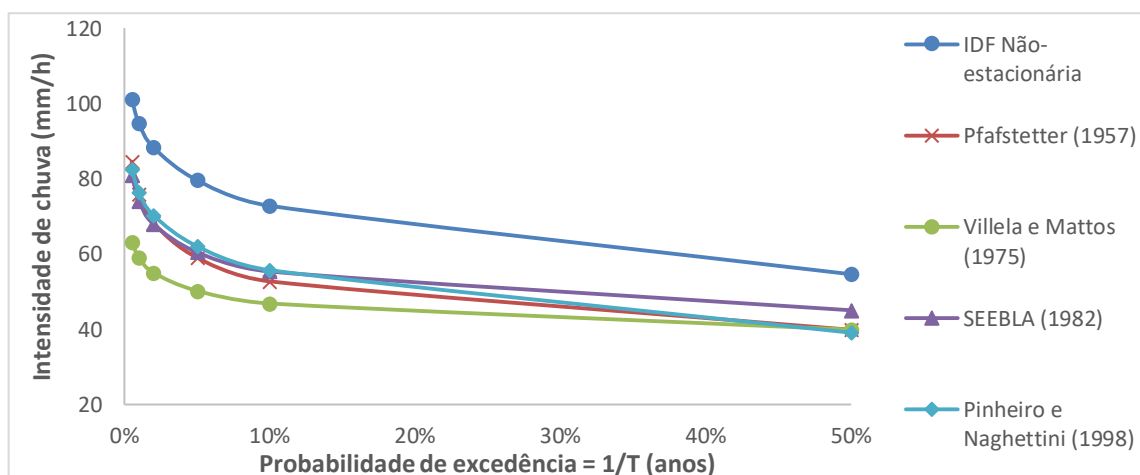
Fonte: Pinheiro e Naghettini (1998)

Nas Figuras 6.10 e 6.11 são apresentadas as intensidades de chuva calculadas para todas as IDF's citadas, considerando as durações de 15 minutos e 1 hora, sendo estas comparadas com os valores obtidos por meio da IDF não-estacionária para os anos de 2018 e 2040.

Figura 6.10 – Intensidades de chuva para as durações de 15 (a) e 60 (b) minutos, estimadas para 2018, considerando as diferentes IDF's ajustadas para o município de Belo Horizonte



(a)



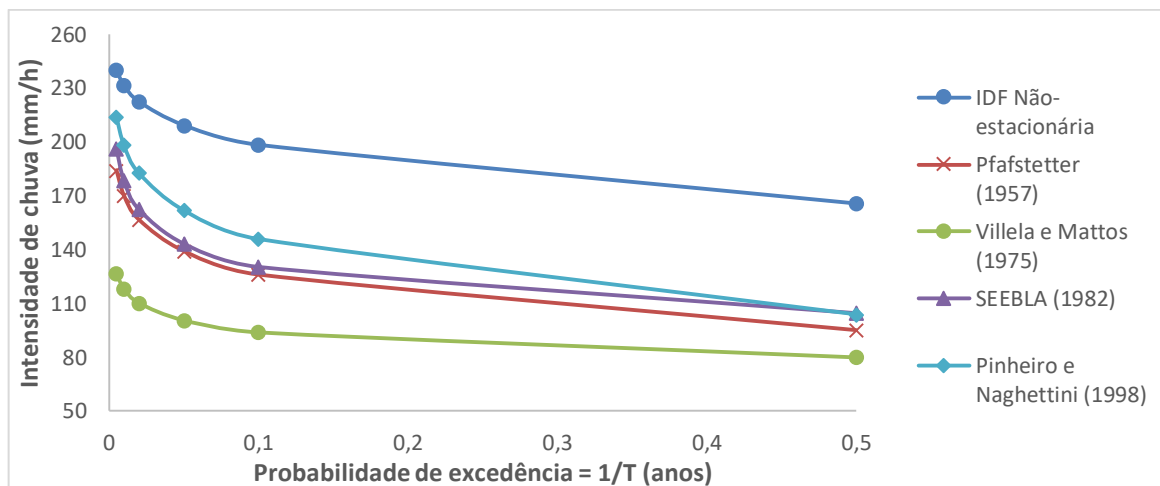
(b)

Considerando a Figura 6.10, observa-se que para 15 e 60 minutos de duração a equação de Villela e Mattos (1975) é a que mais subestima os valores de intensidade de chuva, apresentando para uma probabilidade de excedência de 0,5% diferenças de até 37% (60 minutos de duração) em relação às estimativas da IDF não-estacionária para 2018.

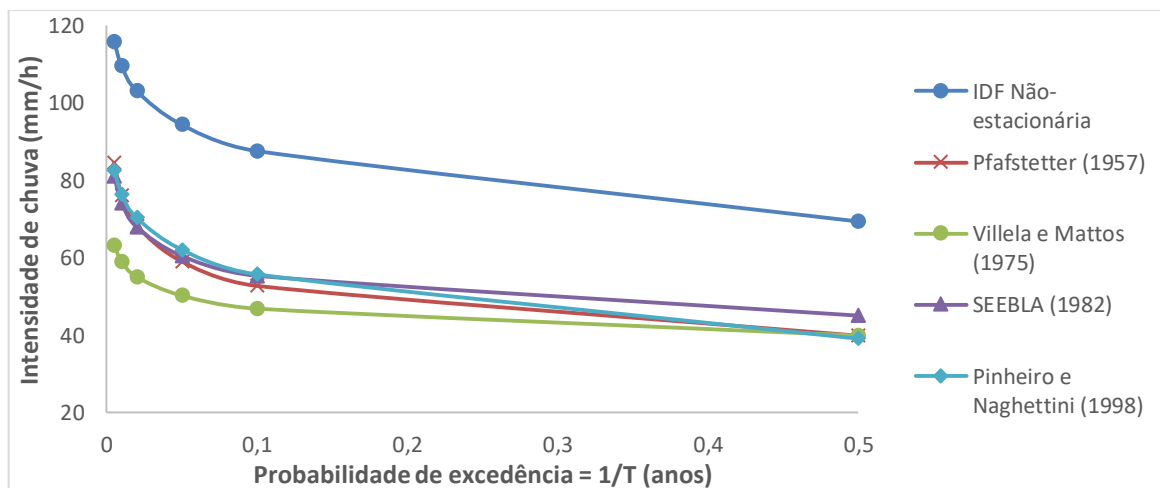
No entanto, comparando com a equação de Pinheiro e Naghettini (1998), é possível perceber que a IDF não-estacionária apresenta para probabilidades de excedência superiores, 50% por exemplo, e 15 minutos de duração, estimativas de intensidades de chuva até 15% maiores, mas para probabilidades de excedência inferiores, 0,5% por exemplo, a equação de Pinheiro e Naghettini supera os valores da IDF não-estacionária em até 9%. Para 60 minutos de duração, as estimativas da IDF ajustada superam os valores de Pinheiro e Naghettini para todas as probabilidades de excedência, apresentando diferenças de até 28%.

Observando agora a Figura 6.11, nota-se que as estimativas das IDF's estacionárias permaneceram as mesmas, aumentando a diferença em relação às estimativas da IDF ajustada neste trabalho. Para 15 e 60 minutos de duração, a equação de Villela e Mattos (1975) ainda é a que mais subestima os valores de intensidade de chuva, apresentando para uma probabilidade de excedência de 0,5% diferenças de até 48% em relação às estimativas da IDF não-estacionária para 2040. Comparando novamente com os ajustes da equação de Pinheiro e Naghettini (1998), que são os que mais se aproximam, é possível perceber que a IDF não-estacionária apresenta valores estimados até 38% superiores.

Figura 6.11 – Intensidades de chuva para as durações de 15 (a) e 60 (b) minutos, estimadas para 2040, considerando as diferentes IDF's ajustadas para o município de Belo Horizonte



(a)



(b)

As diferenças apresentadas entre a IDF ajustada e a atualmente vigente, de Pinheiro e Naghettini, são expressivas. No entanto, é interessante a comparação entre as IDF's estacionárias já ajustadas para o município. Nota-se que a maior diferença está entre a IDF de Villela e Mattos (1975) e Pinheiro e Naghettini (1998), que se aproxima de 41%, ou seja, ainda que não tenham sido ajustadas por meio da mesma metodologia, são equações que já representaram ou ainda representam as chuvas intensas do município, sendo incoerente, em condições de estacionariedade, tamanha discrepância.

Zuffo (2004), em estudo realizado para a cidade de Campinas, apresentou a necessidade de revisões periódicas das equações IDF, a fim de evitar o subdimensionamento de obras

hidráulicas. Neste trabalho, o autor atribui as mudanças nas intensidades de chuva ao crescimento urbano da cidade. Outra vertente é apresentada no estudo de Mailhot *et al.* (2007) que, embora confirmem a necessidade de atualização das IDF's, atribuem as mudanças apresentadas aos efeitos de mudanças climáticas.

6.5 Considerações Finais da análise de estacionariedade para o estudo de chuvas intensas em Belo Horizonte

Com base nos resultados obtidos neste capítulo, pode-se concluir que:

Considerando a estação pluviográfica 83587 do INMET, localizada na cidade de Belo Horizonte, para durações de chuva que variaram de 10 minutos a 24 horas foram observadas variações cíclicas ao longo das séries históricas que poderiam, a princípio, caracterizar a inexistência de tendências. Porém, é importante considerar que estas variações podem representar períodos críticos para uma determinada região, tanto por escassez, quanto por cheias e, por isso, não podem ser ignoradas. Nesse sentido, procedeu-se para a análise de tendências por meio de testes estatísticos.

Foram detectadas diferentes tendências para as durações de chuva analisadas na estação pluviográfica 83587 (INMET). Considerando durações iguais ou inferiores a 1 hora as tendências observadas apontam para um aumento na intensidade desses eventos, que são os mais críticos para os sistemas de drenagem urbana, a partir do ano de 2000. Para as demais durações não foram detectadas tendências significativas.

Considerando o objetivo de identificar e quantificar as tendências observadas e incorporá-las na análise de tendência, conclui-se que para as durações inferiores a 1 hora a distribuição GEV com tendência linear no parâmetro de posição - $\mu(t)$ - a partir do ano de 2000 apresenta os melhores ajustes.

Neste contexto, foi proposta uma adaptação do conceito "*Minimax Design Life Level: the $T_1 - T_2$ p% bounded yearly risk level*", descrito em Rootzén e Katz (2013), para quantificar as intensidades de chuva para fins de projetos de engenharia, na situação de não-estacionariedade identificada. Para a metodologia proposta, os quantis para diferentes durações e probabilidades de excedência, considerando uma vida útil do projeto, foram calculados.

Diante dos quantis de intensidade de chuva obtidos para a IDF não-estacionária, fez-se um paralelo com as estimativas de intensidade de chuva para as diferentes IDF's já ajustadas para o município de Belo Horizonte. Comparando com a equação de Pinheiro e Naghettini (1998), atualmente vigente no município, foi possível perceber que a IDF não-estacionária apresenta para o ano de 2018, e para probabilidades de excedência superiores, estimativas de intensidades de chuva até 15% maiores, mas para probabilidades de excedência inferiores a equação de Pinheiro e Naghettini supera os valores da IDF não-estacionária em até 9%. Para o ano de 2040 a IDF não-estacionária apresenta valores estimados até 48% superiores.

Ressalta-se então a necessidade de revisões periódicas das equações IDF, enfatizando ainda a importância de obtenção de dados contínuos e de qualidade para se dispor de observações hidrológicas de longo prazo que auxiliem na avaliação de como a mudança da atmosfera está alterando os processos hidrológicos. A não-estacionariedade associada às séries históricas implica em revisões ainda mais importantes, uma vez que o conceito de tempo de retorno, comumente relacionado às IDF's, não é igualmente aplicável à análise não-estacionária.

7 ADAPTABILIDADE DA CIDADE DE BELO HORIZONTE FRENTE ÀS MUDANÇAS NOS PADRÕES DE CHUVA – ESTUDO DE CASO PARA A BACIA DO CÓRREGO RESSACA

7.1 Introdução

Diante dos impactos decorrentes das tendências detectadas nas séries de precipitação diária e subdiária da cidade de Belo Horizonte e, sobretudo, da alteração da equação de chuvas intensas (IDF), para as infraestruturas de drenagem do município, além dos vários problemas já vivenciados e associados à expressiva redução das áreas verdes na capital mineira, foi estudada a implantação de Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana, buscando benefícios relacionados ao controle do escoamento. Para tal, foram propostos cenários que contemplam a condição atual de ocupação das bacias, verificando as possíveis técnicas a serem adotadas, e uma situação futura, que vislumbra um novo padrão de desenvolvimento urbano e uma equação IDF que incorpora as condições de não-estacionariedade já verificadas neste trabalho.

De forma geral, na simulação de implantação de técnicas compensatórias são observadas reduções expressivas das vazões de pico e do volume escoado. Nesse sentido, a modelagem hidrológica é uma ferramenta eficaz para a avaliação dos benefícios hidrológicos da implantação dessas estruturas. Neste capítulo busca-se a avaliação da implantação de técnicas compensatórias em um cenário de renovação urbana, ou seja, pretende-se avaliar o potencial de implantação de telhados verdes, mediante exigência da prefeitura de Belo Horizonte nas etapas de licenciamento e regularização de imóveis e, ainda, de pavimentos permeáveis, que seria uma iniciativa dos órgãos gestores.

7.2 Definição da bacia de estudo

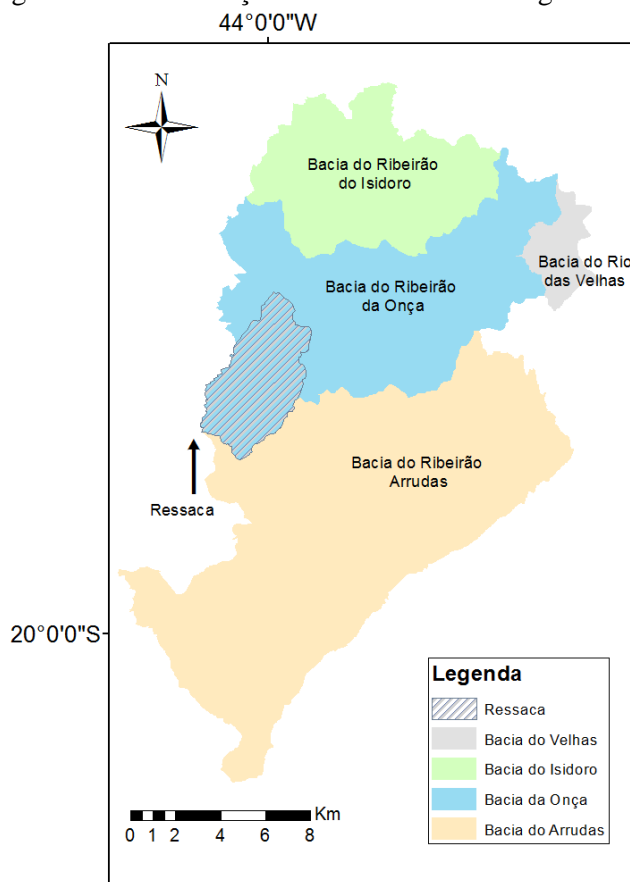
A definição da área de estudo foi baseada na importância de se analisar com maior cautela o comportamento das bacias hidrográficas localizadas no município de Belo Horizonte, no que se refere à susceptibilidade dessas bacias aos eventos intensos de chuva (com durações inferiores a 1 hora) e também às mudanças nos padrões de chuvas detectadas nos capítulos anteriores. Esta motivação decorre de o fato da capital mineira vir sofrendo com problemas associados a alagamentos e inundações, muitas vezes com perdas materiais e humanas.

Neste sentido, o processo de escolha da bacia de estudo teve ainda como suporte os seguintes aspectos: base de informação geográfica ampla; informações detalhadas acerca das estruturas

que compõem os sistemas de macrodrenagem, uma vez que os resultados serão avaliados por meio da modelagem hidrológica da bacia; e considerou-se pertinente que a bacia apresentasse uma notável necessidade de soluções associadas às problemáticas envolvidas na drenagem urbana (alagamentos e inundações).

Dessa forma, apesar da motivação ser a cidade de Belo Horizonte como um todo, a área de estudo foi restrita aos limites da sub-bacia do córrego Ressaca, que é um tributário direto da lagoa da Pampulha, formando uma sub-bacia da bacia do Onça, abrangendo, portanto, uma área de grande importância para a capital. Na Figura 7.1 é apresentada a localização da sub-bacia selecionada para o estudo. Este córrego juntamente com o Sarandi são os principais afluentes da Lagoa e, de acordo com CPRM (2001), contribuem com cerca de 70% do volume de água, além de representarem 63% da área total de drenagem. Segundo CPRM (2001), o córrego Ressaca nasce em Belo Horizonte na cota 920 m e possui extensão de 8,8 km, desde a sua nascente, nas proximidades do antigo aterro sanitário de Belo Horizonte, até sua confluência com o ribeirão Sarandi. Sua área de drenagem é de 20,6 km².

Figura 7.1 – Localização da sub-bacia do córrego Ressaca

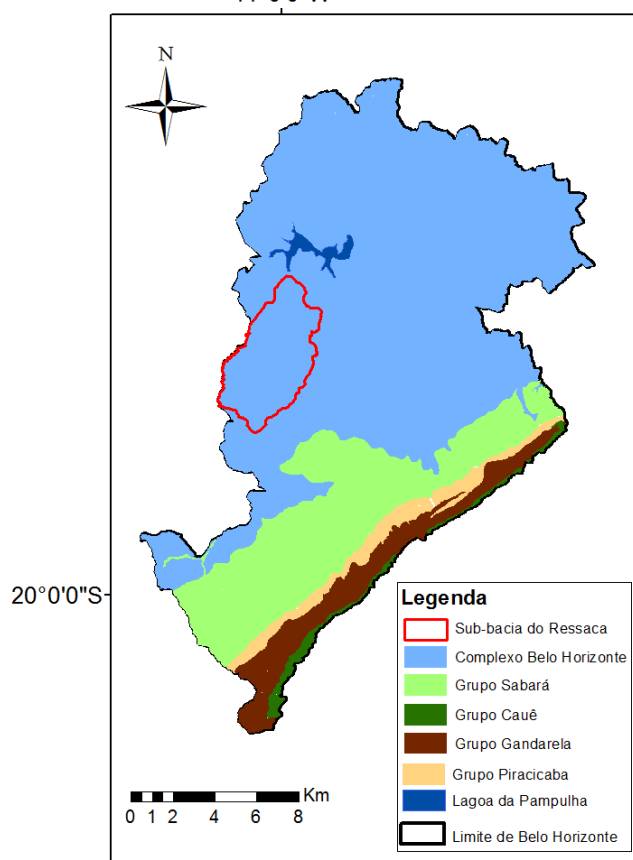


Fonte: Adaptado de PRODABEL (2011).

Segundo Gomes (1998) o município de Belo Horizonte apresenta grande diversidade em termos de constituição geológica e, conseqüentemente, uma ampla diversidade de aspectos fisionômicos ou geomorfológicos. Tais aspectos contribuem também para a diversidade em termos de grupos hidrológicos existentes, representados na cidade pela classificação dos solos segundo grupos hidrológicos do *Natural Resources Conservation Service* (NRCS), o antigo *US Soil Conservation Service* (RAMOS et al., 1999).

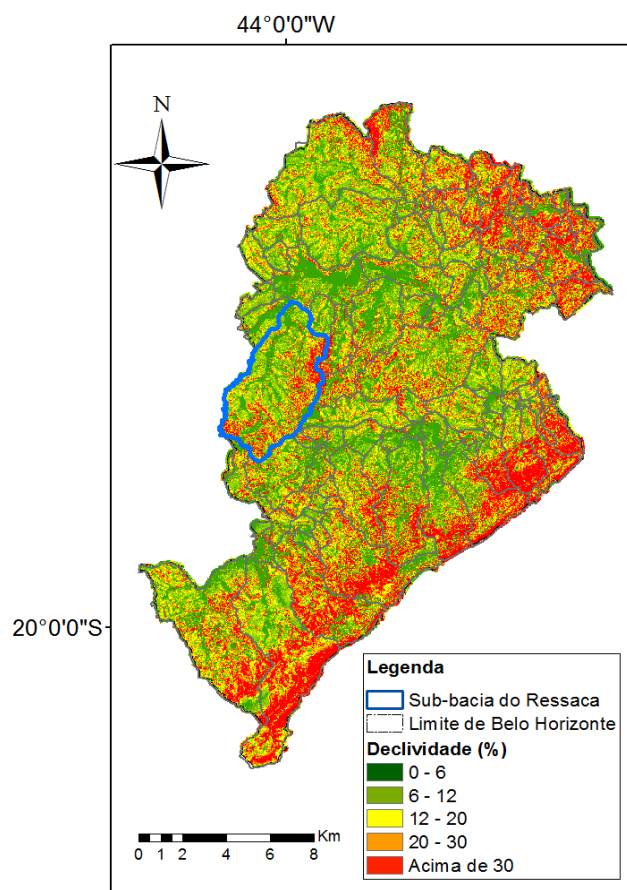
A bacia do Ressaca, área de estudo deste capítulo, está sob o Domínio do Complexo Belo Horizonte, correspondente ao Domínio Geomorfológico da Depressão de Belo Horizonte, no qual predominam as rochas gnáissico-migmatíticas (Figura 7.2). Existe, ainda, nas formações superficiais, um solo que apresenta espessura e evolução pedológica variadas, além de depósitos aluvionares associados aos principais cursos d'água (GOMES, 1998). A distribuição dos tipos de solo pode ser, ainda, relacionada à camada de rocha que originou as camadas superiores do solo (COSTA, 2002). Sendo assim, a condutividade hidráulica do Complexo Belo Horizonte (gnaisses e migmatitos) é de, aproximadamente, $1,1 \times 10^{-6}$ m/s.

Figura 7.2 – Mapa de litologia de Belo Horizonte
44°0'0"W



Segundo Cajazeiro (2012), a Depressão de Belo Horizonte apresenta morfologia rebaixada e é delimitada a sul pela Serra do Curral, correspondente ao limite norte do Quadrilátero Ferrífero. Caracteriza-se pelo predomínio de um relevo de colinas suaves, com encostas côncavo convexas, altitudes médias entre 800 e 900 metros e declividades médias de 0 a 12% (Figura 7.3).

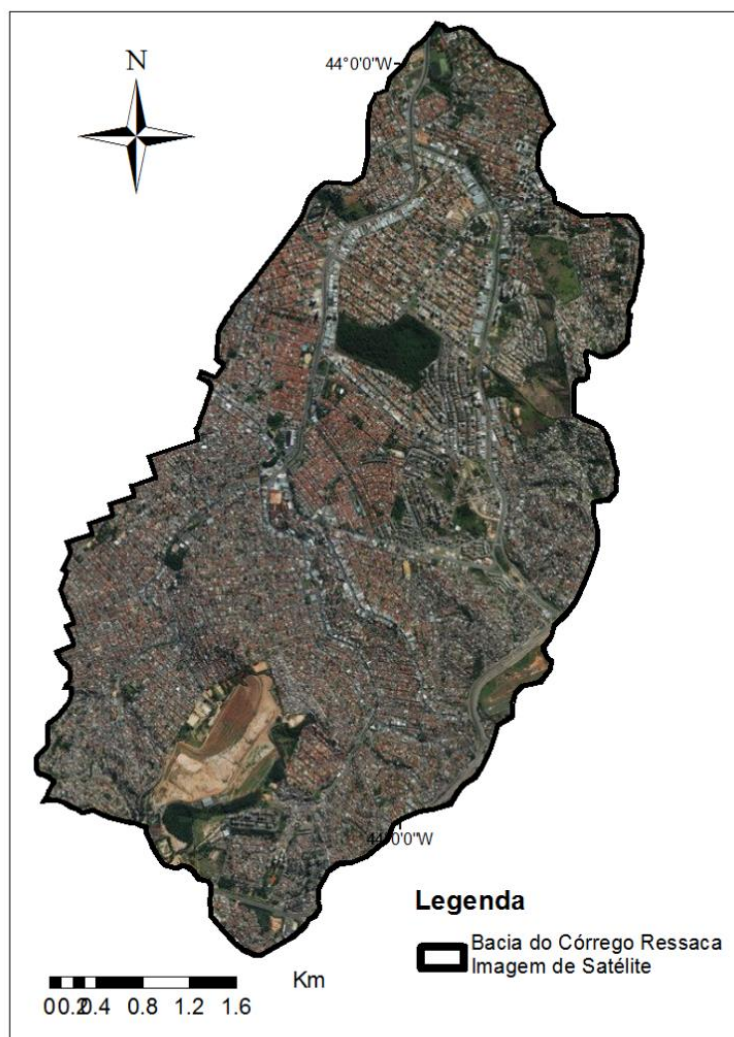
Figura 7.3 – Mapa de declividade de Belo Horizonte



Fonte: Adaptado de PRODABEL (2011).

O uso e ocupação do solo na bacia do córrego Ressaça é predominantemente urbano (Figura 7.4), existindo poucas áreas não ocupadas, representadas principalmente por áreas verdes, sendo muitas delas parques e lotes vagos. Dessa forma, a bacia é representada por áreas expressivamente alteradas, com grande impermeabilização do solo e modificações no comportamento hidrológico natural (CAJAZEIRO, 2012).

Figura 7.4 – Imagem de satélite da bacia do Ressaca (uso e ocupação do solo)



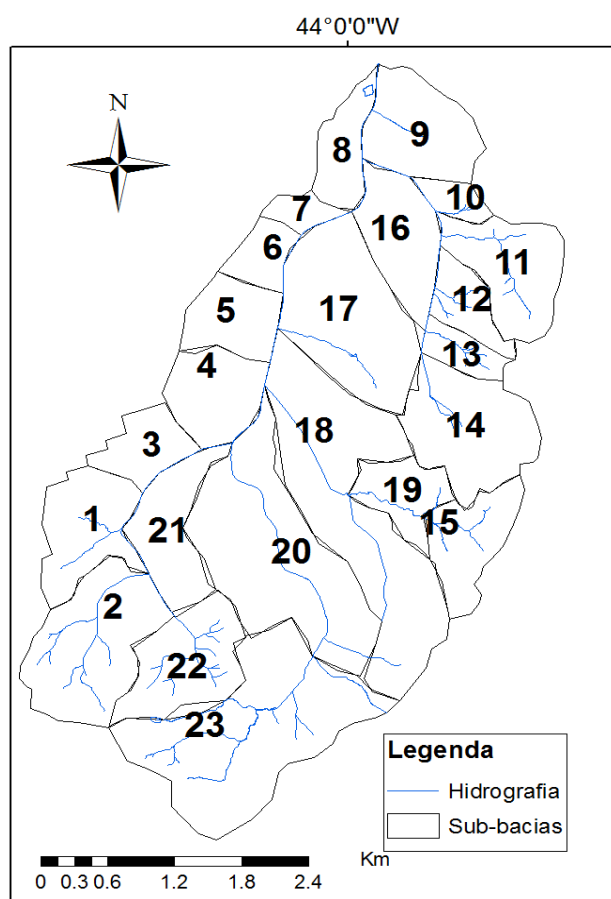
7.3 Modelagem dos fenômenos hidrológicos – Construção de cenários de adaptação via renovação urbana

A modelagem matemática hidrológica foi realizada por meio do modelo computacional SWMM na versão 5.1.012. A escolha deste modelo foi fundamentada em sua grande abrangência em termos de ferramentas para a análise dos efeitos da implantação de medidas de controle na fonte e avaliação da eficiência da implantação de BMPs (*Best Management Practices*), por simular tanto a transformação chuva-vazão quanto a propagação de cheias em rios e canais, além de ser um software de domínio público, com uma interface relativamente simples e por se tratar de um modelo bastante utilizado por pesquisadores da área de recursos hídricos.

7.3.1 Características do modelo hidrológico

A primeira etapa da modelagem hidrológica no SWMM é a construção de um modelo topológico com indicação de todas as sub-bacias, condutos, nós, junções, exutórios e unidades de armazenamento. Nesse contexto, foi utilizado o modelo desenvolvido e calibrado por Cândido (2015), que avaliou o desempenho deste através da comparação dos dados de vazões simulados com os dados observados em uma estação fluviométrica instalada em um ponto mais a jusante na bacia. Nesse modelo foram definidas, no total, 23 sub-bacias (Figura 7.5). Segundo Cândido (2015), os critérios estabelecidos para a delimitação basearam-se na homogeneidade do uso do solo e declividade, na disponibilidade de cadastro da rede de macrodrenagem disponibilizado por PBH (2002), na topografia e hidrografia da bacia.

Figura 7.5 – Mapa de sub-bacias



As principais características das estruturas hidráulicas e dos componentes hidrológicos também precisam ser inseridas no modelo. O modelo de infiltração selecionado por Cândido (2015) foi o do *Natural Resources Conservation Service* (NRCS) e, portanto, foi determinado o *Curve Number* (CN) de cada sub-bacia. Para tal, a autora utilizou o mapa de uso do solo do município

de Belo Horizonte, elaborado por Teixeira e Moura (2014). Ainda de acordo com Cândido (2015), o parâmetro “% Impermeável” necessário para as sub-bacias no SWMM foi calculado dividindo-se a área da classe “mancha urbana”, definida no mapa de uso do solo, pela área total da sub-bacia.

Segundo Cândido (2015) os parâmetros de entrada para as sub-bacias foram largura, área, declividade (calculados no QGIS) e, ainda, o coeficiente de Manning (n), a profundidade do armazenamento (PA) em depressão e o tempo seco, que se refere ao tempo para um solo completamente saturado se tornar totalmente seco. Os valores iniciais adotados para esses parâmetros foram obtidos em Silva (2014). Para o cálculo da chuva efetiva a autora optou também pelo modelo *Curve Number*. Para os condutos, os parâmetros principais de entrada foram a forma, a profundidade máxima, o comprimento - disponíveis na ficha de cadastro da Prefeitura de Belo Horizonte - e o n-Manning - valor definido por Silva (2014). Vale ressaltar que todos os parâmetros de entrada do modelo estão detalhados no trabalho de Cândido (2015).

Considerando as etapas posteriores de análise de sensibilidade, calibração e validação do modelo, Cândido (2015) constatou que o modelo foi mais sensível aos parâmetros coeficiente de Manning para escoamento superficial na parcela impermeável da sub-bacia (n-imperm) e coeficiente de rugosidade de Manning dos condutos (n-conduto), sendo que a calibração manual destes parâmetros apresentou resultados satisfatórios em termos do coeficiente de eficiência de Nash - 0,77. No que se refere à validação, concluiu-se que os períodos de tempo analisados (considerando as estações pluviométricas e fluviométricas utilizadas) são satisfatoriamente reproduzidos pelo modelo calibrado, uma vez que o Nash da validação se manteve 0,77. Por fim, o modelo foi selecionado para este estudo, pois a modelagem das vazões produziu resultados satisfatórios quando comparados com estudos anteriores realizados na mesma bacia, a exemplo de Silva (2014).

As técnicas compensatórias que serão propostas e hipoteticamente instaladas nas sub-bacias nas etapas posteriores, de acordo com os cenários que serão definidos, também demandaram a inserção de uma série de dados específicos para cada uma delas. Para tal foram consideradas as recomendações de Rossman (2015), Schueler (1987) e Woods Ballard *et al.* (2015), que serão definidas posteriormente.

7.3.2 Construção dos cenários de modelagem hidrológica

Foram propostos seis cenários que visam contemplar a adoção de técnicas compensatórias diante de uma análise futura. Para a definição destes cenários foi considerado um horizonte de tempo de 20 anos e a perspectiva de renovação urbana, ou seja, foi estimada uma taxa anual de pedidos de regularização e licenciamento de imóveis na área de estudo, a fim de que se possa considerar um potencial número de lotes que adotariam, por exigência de leis vigentes ou futuramente aprovadas, a infraestrutura proposta, sendo neste caso o telhado verde. Para esta estimativa foram obtidas junto à Secretaria Municipal Adjunta de Regulação Urbana (SMARU) da Prefeitura de Belo Horizonte as informações de renovação de imóveis. No site da Prefeitura são encontradas informações específicas sobre o tipo de regulação, a localização, a área do lote, a área construída, entre outras (Figura 7.6).

Figura 7.6 - Relatório mensal de processos de licenciamento e regularização da Prefeitura de Belo Horizonte

SECRET							
RELATÓ							
Nº PROCESSO	TIPO	Nº ALVARÁ	TÍTULO PROJETO	ENDEREÇO	BAIRRO	ZONA FISCAL	QUARTEIRÃO
01-048096/14-65	REGULARIZACAO	201401230	LEVANTAMENTO DO ACRESCIMO	RUA MAURA, 938	UNIÃO	799	111
01-098480/14-45	LICENCIAMENTO	201401133	APROVACAO INICIAL	AVE ITAITE, 756, 754, 752, 750	MARIANO DE ABREU	448	054
01-126093/14-68	LICENCIAMENTO	201401180	APROVACAO INICIAL	RUA DEPUTADO QUINTINO VARGAS, 195	CANDELÁRIA	910	006
01-142501/14-83	LICENCIAMENTO	201401140	APROVACAO INICIAL	RUA AVA, 60	JULIANA	959	075
01-087491/14-08	REGULARIZACAO	-	LEVANTAMENTO TOTAL	AVE AFONSO PENA, 354	SEGUNDA SEÇÃO URBANA	002	029
01-084352/13-06	LICENCIAMENTO	201401207	APROVACAO INICIAL	RUA ITAGUA, 264	VERA CRUZ	453	011
01-062414/14-19	REGULARIZACAO	-	LEVANTAMENTO DO ACRESCIMO	RUA LEOPOLDO PEREIRA, 93	MINAS GERAIS	254	009
01-111899/14-05	LICENCIAMENTO	201401173	APROVACAO INICIAL	RUA GLAUBER ROCHA, 77	PAQUETÁ	310	039
01-117611/14-80	LICENCIAMENTO	201401124	APROVACAO INICIAL	RUA SENHORA DA PAZ, 119	CANADÁ	376	046
01-000960/13-49	LICENCIAMENTO	201303682	MODIF. COM DECRESCIMO DE AREA CONSTRUIDA	RUA RENZO ANTONINI, 141	DO TREVÓ	983	012
01-094425/14-95	LICENCIAMENTO	201401223	APROVACAO INICIAL	RUA ISTRIA FERRAZ, 264	DOS BURITIS	171	082
01-133302/14-66	LICENCIAMENTO	201401176	APROVACAO INICIAL	RUA ATENAS, 291	ALVINA	491	242
01-107215/14-26	REGULARIZACAO	-	LEVANTAMENTO TOTAL	RUA JOAO CARLOS, 632, 630	SAGRADA FAMÍLIA	425	231
01-114855/14-38	REGULARIZACAO	-	LEVANTAMENTO TOTAL	RUA MAIRINK, 138	MARIANO DE ABREU	448	122
01-125398/14-80	REGULARIZACAO	-	LEVANTAMENTO TOTAL	RUA BARAO DE INDAIA, 147	ITATIAIA	329	102

Fonte: PBH (2014b).

Uma vez obtidas as informações dos processos de licenciamento e regularização, os mesmos foram separados por sub-bacia, de acordo com a definição da Figura 7.5, sendo calculadas as

proporções de áreas aptas à implantação de telhados verdes. Para tal, quando a área construída era contemplada com mais de um pavimento, a mesma era dividida por este valor. As informações de cada processo analisado, assim como as áreas obtidas por sub-bacia, são apresentadas no APÊNDICE E. Considerando que foram analisados processos dos anos de 2014, 2015 e 2016, foi calculada uma média, para os três anos em análise, das áreas aptas à implantação da estrutura.

Vale ressaltar que a metodologia adotada se baseia no fato de que as modelagens existentes na literatura consideram a implementação dessas infraestruturas em nível de lote apenas por critérios técnicos de adoção, sem a visão da real possibilidade de inserção, ou seja, não consideram o aspecto de consistência com a realidade dinâmica das cidades.

Nesse sentido, em Belo Horizonte, existem alguns esforços por parte do poder público para promover o uso de técnicas compensatórias. Um exemplo é a implantação de reservatórios individuais, já prevista no município em alguns casos desde 1996, com a aprovação da Lei Municipal nº 7.166/1996, referente às normas e condições de parcelamento, uso e ocupação do solo (BELO HORIZONTE, 1996). Segundo esta lei, fica permitida a impermeabilização de até 100% do terreno, exceto para zonas de proteção e de proteção ambiental, desde que sejam instaladas caixas de retenção pluvial de volume total igual a 30 litros por metro quadrado de área impermeável excedente. Contudo, Drumond, Coelho e Moura (2013) concluíram que o volume proposto pela legislação não é suficiente para amortecer o acréscimo da vazão de pico ocasionado pela total impermeabilização dos terrenos.

Desde 2015 tramita na Câmara Municipal de Belo Horizonte o Projeto de Lei nº 1.749, que consiste no novo Plano Diretor. Uma das mudanças propostas é a exigência de áreas permeáveis nos terrenos, que atualmente pode ser substituída com a instalação de reservatórios de captação de águas pluviais (BELO HORIZONTE, 2015). Adicionalmente, destaca-se o Projeto de Lei nº 963/2014, que propõe a instalação obrigatória de telhados verdes em novos empreendimentos com mais de três pavimentos, em tramitação atualmente na Câmara Municipal (BELO HORIZONTE, 2014). Em âmbito nacional, a obrigatoriedade de telhados verdes em novos empreendimentos já é realidade no Estado da Paraíba, segundo a Lei Estadual nº 10.047/2013 (PARAÍBA, 2013) e no município de Recife, onde adicionalmente é obrigatória a instalação de reservatórios de águas pluviais de acumulação ou retardo em lotes com área superior a 500 m² que possuem área impermeabilizada superior a 25% da área total (RECIFE, 2015).

Atualmente encontra-se também em tramitação na Câmara Municipal de Belo Horizonte o Projeto de Lei nº 179/2017 (BELO HORIZONTE, 2017), que propõe a instituição de um desconto progressivo no IPTU de imóveis que adotarem medidas de redução de impacto ambiental e eficiência energética. São incluídas diversas medidas voltadas ao manejo sustentável de águas pluviais nas ações e práticas elegíveis para os descontos, das quais se destacam a utilização de pavimentação permeável em no mínimo 60% da área de passeio, construção de valas de infiltração e reservatórios para captação de águas pluviais, ampliação de áreas permeáveis além do exigido por lei e implantação de telhados verdes. Tal incentivo já é realidade em diversos municípios brasileiros, como em Santos, Guarulhos, Sorocaba e Curitiba (SANTOS, 2015; JAHNKE; WILLANI; ARAÚJO, 2013).

Considerando, então, a realidade dinâmica da cidade de Belo Horizonte, assim como as iniciativas apresentadas, são definidos, na sequência, os cenários propostos:

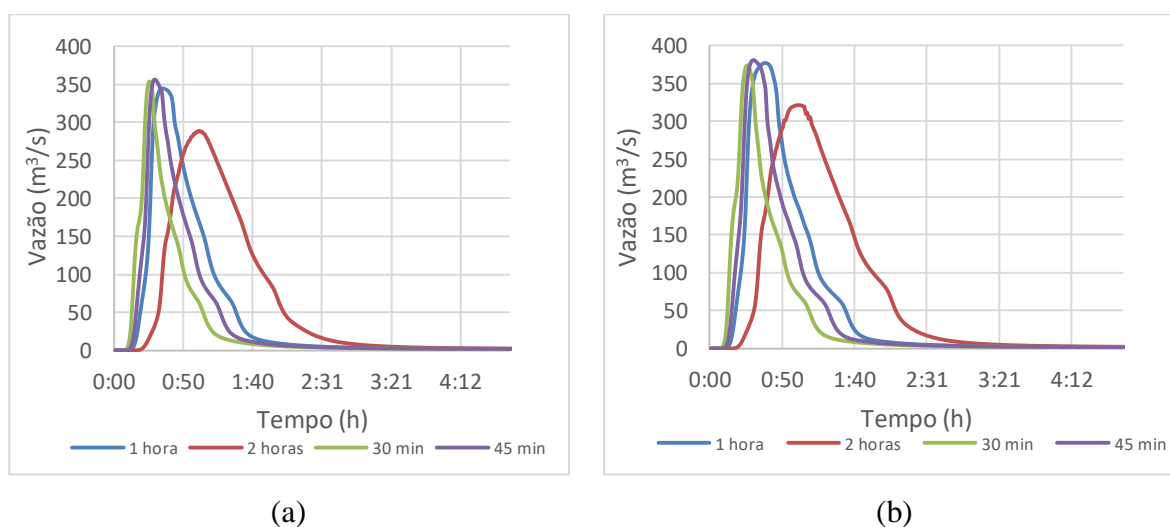
- “Cenário 1”: estado atual da bacia, considerando a equação de chuvas intensas atualmente adotada no município;
- “Cenário 2”: inserção de telhados verdes em todas as edificações com pedido de regularização nos próximos 20 anos, considerando a equação de chuvas intensas atualmente adotada no município;
- “Cenário 3”: inserção de telhados verdes em todas as edificações com pedido de regularização no próximos 20 anos e pavimentos permeáveis, considerando a equação de chuvas intensas atualmente adotada no município;
- “Cenário 4”: estado atual da bacia, considerando uma projeção de 20 anos para a equação de chuvas intensas ajustada neste trabalho (não-estacionária);
- “Cenário 5”: inserção de telhados verdes em todas as edificações com pedido de regularização nos próximos 20 anos, considerando ainda a projeção da equação de chuvas intensas ajustada neste trabalho (não-estacionária);
- “Cenário 6”: inserção de telhados verdes em todas as edificações com pedido de regularização no próximos 20 anos e pavimentos permeáveis, considerando ainda a projeção da equação de chuvas intensas ajustada neste trabalho (não-estacionária).

7.3.3 Chuvas de Projeto

Para os cenários 1, 2 e 3 as precipitações de projeto (sintéticas) foram obtidas por meio da equação IDF de Pinheiro e Naghettini (1998), para períodos de retorno de 2, 10 e 50 anos e durações de 10 a 240 minutos. A distribuição temporal dos eventos considerados foi definida pelos hietogramas adimensionais (distribuição do 2º quartil e 50% de probabilidade de ocorrência) constantes na metodologia desenvolvida por Huff (1967). A precipitação com duração crítica, isto é, aquela que produziu as maiores vazões de pico na seção de exutório, foi a precipitação utilizada para os diferentes tempos de retorno.

Neste contexto, a partir do cenário inicial (Cenário 1), foram inseridas no modelo precipitações de durações entre 30 minutos e 2 horas, para os períodos de retorno de 10 e 25 anos (Figura 7.7). Observa-se então que a precipitação de 45 minutos foi a mais crítica, ou seja, produziu a maior vazão de pico no exutório, sendo então a duração crítica selecionada para este estudo.

Figura 7.7 - Hidrogramas resultantes de precipitações de projeto de diferentes durações para os períodos de retorno de 10 (a) e 25 anos (b).



Para os cenários 4, 5 e 6 as precipitações de projeto foram obtidas por meio da equação IDF não-estacionária proposta neste trabalho para as probabilidades de excedência (PE) de 50, 10 e 2%, equivalentes aos períodos de retorno dos cenários iniciais, e duração crítica de 45 minutos. Adicionalmente, considerando que os cenários foram propostos em um horizonte de 20 anos, definiu-se como vida útil do projeto o período de 2018 a 2038. Dessa forma, o cálculo da chuva de projeto seguiu o seguinte procedimento:

Cálculo dos parâmetros de posição conforme a equação 6.1 e a Tabela 6.3

$$\mu(2018) = 48,23 + 0,87 (2018 - 2000) = 63,89 \text{ mm/h}$$

$$\mu(2038) = 48,23 + 0,87 (2038 - 2000) = 81,29 \text{ mm/h}$$

Cálculo dos quantis para probabilidades de excedência de 50, 10 e 2% conforme a inversa da equação 3.12 e a Tabela 6.3, utilizando o parâmetro de posição de 2038.

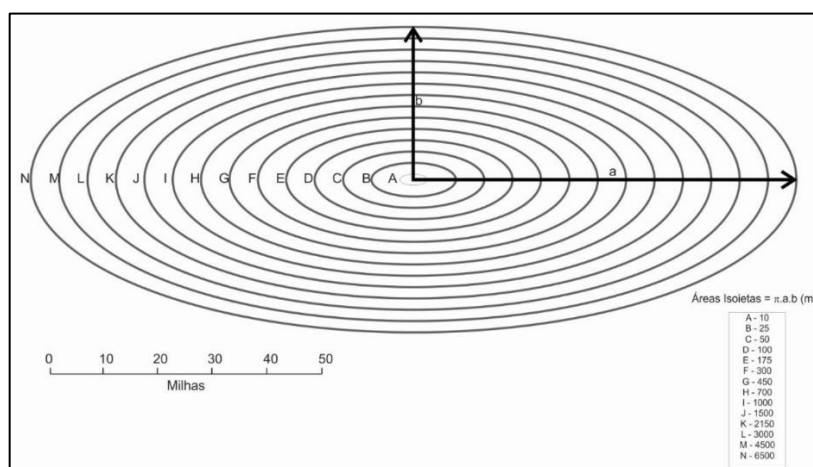
$$I(0,5) = 81,29 + \frac{12,79}{0,191} \{1 - [-\ln(1 - 0,5)]^{0,191}\} = 85,82 \frac{\text{mm}}{h} x \left(\frac{45}{60}\right) = 64,37 \text{ mm}$$

$$I(0,1) = 81,29 + \frac{12,79}{0,191} \{1 - [-\ln(1 - 0,1)]^{0,191}\} = 104,68 \frac{\text{mm}}{h} x \left(\frac{45}{60}\right) = 78,51 \text{ mm}$$

$$I(0,02) = 81,29 + \frac{12,79}{0,191} \{1 - [-\ln(1 - 0,02)]^{0,191}\} = 116,47 \frac{\text{mm}}{h} x \left(\frac{45}{60}\right) = 87,35 \text{ mm}$$

Em função da distância entre o posto pluviográfico que foi usado como referência para a concepção da equação IDF não-estacionária e a bacia do córrego Ressaca, foi utilizada a metodologia de distribuição espacial da chuva de projeto, desenvolvida pelo U.S. Weather Bureau (CHOW *et al.*, 1988) e recomendada por Taborga (1974), com o objetivo de representar de forma mais realística o modelo matemático. A metodologia é aplicável para bacias com área de drenagem maiores que 25 km² e consiste em encaixar isoietas padrão, que têm a forma de elipses concêntricas com relação entre os eixos $a = 2,5b$, conforme Figura 7.8, na área de drenagem a ser estudada.

Figura 7.8 - Distribuição isoietal padrão para cálculo da chuva de projeto



Fonte: CHOW *et al.* (1998) apud PINHEIRO (2011)

Cada elipse envoltória tem um abatimento de chuva progressivo à medida que se afasta do centroide da bacia hidrográfica. Para calcular a altura de chuva da isoietta envoltória P_C é utilizada a seguinte equação:

$$\frac{25}{A} P_0 + \frac{A-25}{A} \left(\frac{P_0 + P_C}{2} \right) = k \cdot P_0 \quad (7.1)$$

Onde:

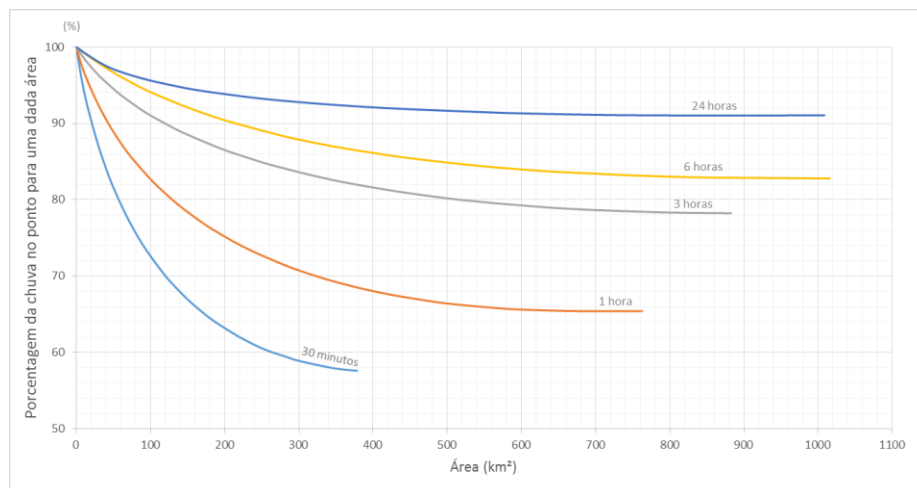
A: Área da elipse dada por $A = \pi \cdot a \cdot b$, em km^2 ;

P_0 : Chuva Pontual, em mm;

k: Fator de abatimento de chuva pontual, associado à duração da chuva d e a área da elipse A.

Os valores do fator de abatimento k foram obtidos conforme o gráfico da Figura 7.9 (adaptado de CETESB, 1980).

Figura 7.9 - Fator de abatimento da altura de chuva pontual



Fonte: adaptado de CETESB (1980)

Neste sentido, as estimativas das precipitações de projeto são apresentadas na Tabela 7.1.

Tabela 7.1- Quantis de precipitação de projeto para a duração de 45 minutos e diferentes Tempos de Retorno/ Probabilidades de Excedência (mm)

TR (anos)/PE (%)	2 anos/ 50%	10 anos/10%	50 anos/2%
	Chuva de Projeto (mm)		
IDF Pinheiro e Naghettini (1998)	28,23	39,87	50,05
IDF Não-estacionária	50,85	62,03	69,01

7.3.4 Parâmetros para modelagem das técnicas compensatórias e seleção das áreas disponíveis para implantação

Ferramentas de geoprocessamento foram aplicadas para o mapeamento das áreas com potencial para implantação de técnicas compensatórias. Foram fornecidos pela Empresa de Informática e Informação do Município de Belo Horizonte (Prodabel) os arquivos georreferenciados da base topográfica do município de Belo Horizonte, contendo arruamentos, quadras, lotes, edificações, praças, rede de drenagem, bacias e sub-bacias hidrográficas, o que permitiu a representação precisa da ocupação da bacia do córrego Ressaca.

Na implantação de técnicas compensatórias que promovem a infiltração da água no solo devem ser consideradas as restrições relacionadas à profundidade do lençol freático e à condutividade hidráulica do solo. Conforme Costa (2002), a profundidade do lençol na região é, quase sempre, maior do que cinco metros, tendendo a reduzir nas proximidades do leito dos cursos d'água. Dessa forma, de acordo com Rosa (2017), exigiu-se uma distância mínima de 30 metros dos canais para implantação das técnicas de infiltração. Considerando ainda que a condutividade hidráulica normalmente exigida para aplicação de técnicas de infiltração varia de 10^{-4} m/s a 10^{-6} m/s, e que a capacidade de infiltração associada à litologia da bacia é da ordem de 10^{-6} m/s (COSTA, 2002), foi estabelecido que essas estruturas promovem o armazenamento e a infiltração parcial da precipitação afluyente (WOODS BALLARD *et al.*, 2015).

Na sequência são apresentados todos os critérios utilizados para seleção das áreas com potencial para implantação das técnicas e os parâmetros de entrada para cada infraestrutura no SWMM.

7.3.4.1 Telhados Verdes

Os telhados verdes simulados são do tipo extensivo, caracterizados por profundidades mais rasas de solo quando comparados aos telhados intensivos, o que resulta em estruturas mais leves e fáceis de serem implementadas sobre edificações já construídas (WOODS BALLARD *et al.*, 2015). Os parâmetros de entrada dos telhados verdes no modelo SWMM são apresentados na Tabela 7.2.

Tabela 7.2- Parâmetros de entrada dos telhados verdes

Camada	Parâmetro	Telhado Verde
Superfície	Profundidade de armazenamento (mm)	100
	Cobertura vegetal (fração)	0,2
	Rugosidade superficial (Manning)	0,4
	Declividade superficial (%)	10
Solo	Espessura (mm)	100
	Porosidade (fração)	0,46
	Capacidade de campo (fração)	0,244
	Ponto de murcha (fração)	0,136
	Condutividade hidráulica (mm/h)	1,5
	Declividade da condutividade	10
Drenagem	Potencial matricial (mm)	218,5
	Espessura (mm)	50
	Índice de vazios (vazios/sólidos)	0,5
	Rugosidade (Manning)	0,4

Fonte: valores médios recomendados por Rosa (2017) e Rossman (2015), profundidades recomendadas por Schueler (1987) e Woods Ballard *et al.* (2015).

A seleção das edificações para implantação dos telhados verdes baseou-se no seguinte procedimento: levantamento e mapeamento dos pedidos de regularização e licenciamento de imóveis na área de estudo, para cada sub-bacia, sendo consideradas as informações dos anos de 2014, 2015 e 2016, disponíveis no site da Secretaria Municipal Adjunta de Regulação Urbana (SMARU) da Prefeitura de Belo Horizonte. Uma vez coletadas as informações, para simulação dos telhados verdes no SWMM foram calculadas a média anual do número de unidades, as áreas médias e larguras médias dos telhados para cada sub-bacia. A média anual do número de unidades foi ainda multiplicada por 20, de forma a simular o horizonte de 20 anos proposto nos cenários. Os resultados são apresentados na Tabela 7.3.

As áreas que se mostraram mais propícias para implantação de telhados verdes, uma vez que apresentam maior taxa de renovação, foram as regiões correspondentes às sub-bacias 5, 16, 17 e 20 (Figura 7.10), mais especificamente os bairros Celso Machado, Serrano, Castelo, Patrocínio, Glória e Inconfidência (Figura 7.11).

Tabela 7.3- Características dos telhados verdes por sub-bacia

Sub-bacia	Área total (ha)	Quantidade (unid.)	Área média (m ²)	Largura média (m)	Área total tratada (ha)
1	82,3	100,0	140,3	11,8	1,40
2	134,2	73,3	120,2	11,0	0,88
3	44,2	53,3	208,8	14,4	1,11
4	67,8	60,0	166,7	12,9	1,00
5	56,3	180,0	233,6	15,3	4,21
6	29,8	126,7	198,8	14,1	2,52
7	17,5	6,7	83,9	9,2	0,06
8	45,0	46,7	234,7	15,3	1,10
9	87,1	213,3	144,8	12,0	3,09
10	18,7	80,0	255,4	16,0	2,04
11	87,1	206,7	141,0	11,9	2,91
12	37,6	120,0	122,6	11,1	1,47
13	26,2	53,3	141,6	11,9	0,76
14	114,3	20,0	243,4	15,6	0,49
15	65,3	20,0	81,7	9,0	0,16
16	77,1	306,7	206,0	14,4	6,32
17	154,9	666,7	189,7	13,8	12,65
18	243,0	246,7	131,1	11,4	3,23
19	47,6	0,0	0,0	0,0	0,00
20	216,5	266,7	236,6	15,4	6,31
21	74,3	40,0	91,1	9,5	0,36
22	94,0	0,0	0,0	0,0	0,00
23	234,9	180,0	130,0	11,4	2,34

Figura 7.10 - Áreas potencialmente tratadas com telhado verde por sub-bacia

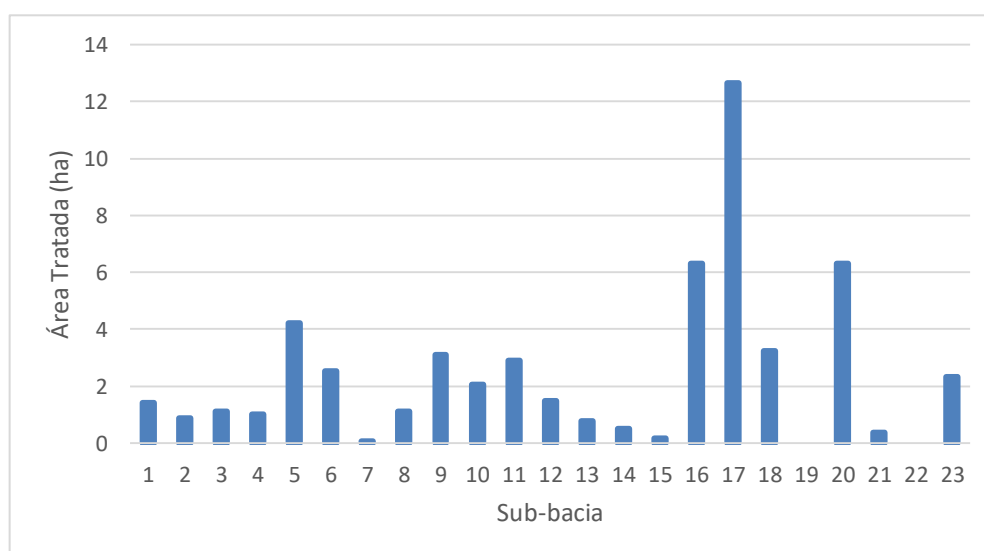
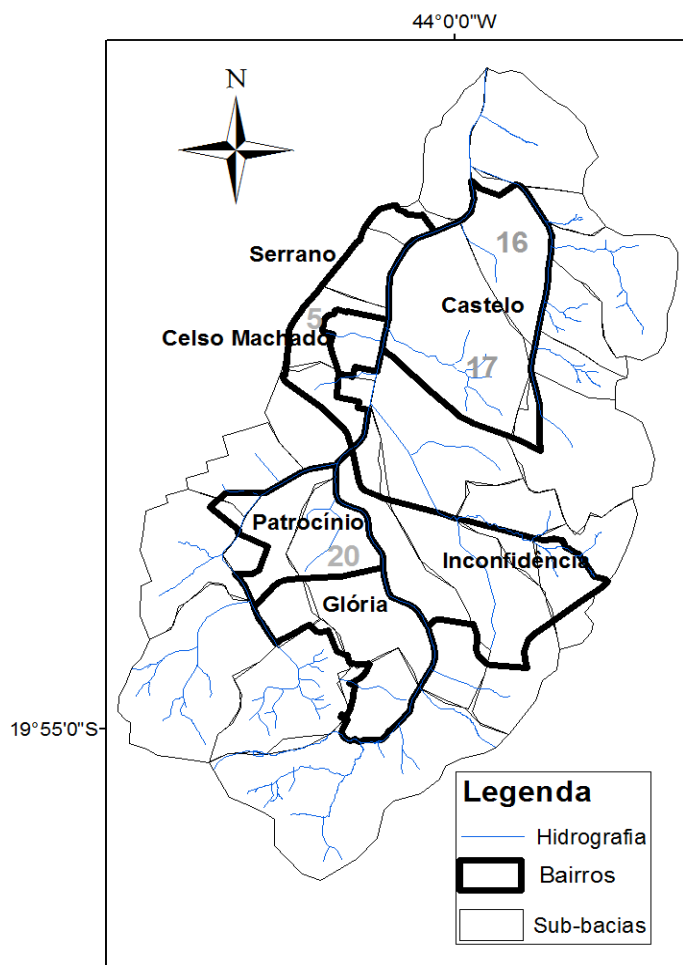


Figura 7.11 - Bairros com maior concentração de áreas selecionadas para telhados verdes



7.3.4.2 Pavimentos Permeáveis

Os pavimentos permeáveis selecionados foram do tipo modular, construídos a partir de blocos de concreto cujas juntas são preenchidas com material permeável (WOOD BALLARD *et al.*, 2015), e de infiltração parcial, com presença de tubulação de drenagem. Os parâmetros de entrada utilizados são apresentados na Tabela 7.4.

Tabela 7.4- Parâmetros de entrada dos pavimentos permeáveis

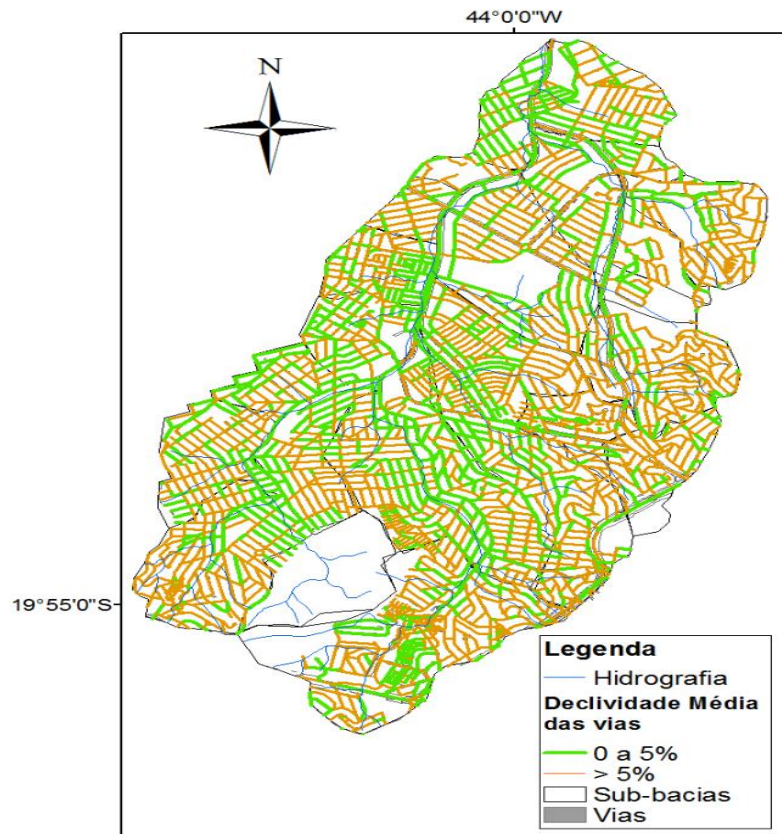
Camada	Parâmetro	Pavimento Permeável
Superfície	Profundidade de armazenamento (mm)	0
	Cobertura vegetal (fração)	0
	Rugosidade superficial (Manning)	0,015
	Declividade superficial (%)	3
Solo	Espessura (mm)	450
	Porosidade (fração)	0,45
	Capacidade de campo (fração)	0,19
	Ponto de murcha (fração)	0,085
	Condutividade hidráulica (mm/h)	10,9
	Declividade da condutividade	5
	Potencial matricial (mm)	110
Pavimento	Espessura (mm)	150
	Índice de vazios (vazios/sólidos)	0,2
	Superfície impermeável	0,1
	Permeabilidade (mm/hr)	5000
	Fator de colmatção	270
Armazenamento	Espessura (mm)	400
	Índice de vazios (vazios/sólidos)	0,6
	Condutividade hidráulica (mm/h)	15
	Fator de colmatção	36
Dreno de fundo	Coefficiente de drenagem (mm/h)	0,8
	Expoente de drenagem	0,5
	Cota de referência do dreno (mm)	0

Fonte: valores médios recomendados por Rosa (2017) e Rossman (2015), profundidades recomendadas por Schueler (1987) e Woods Ballard *et al.* (2015).

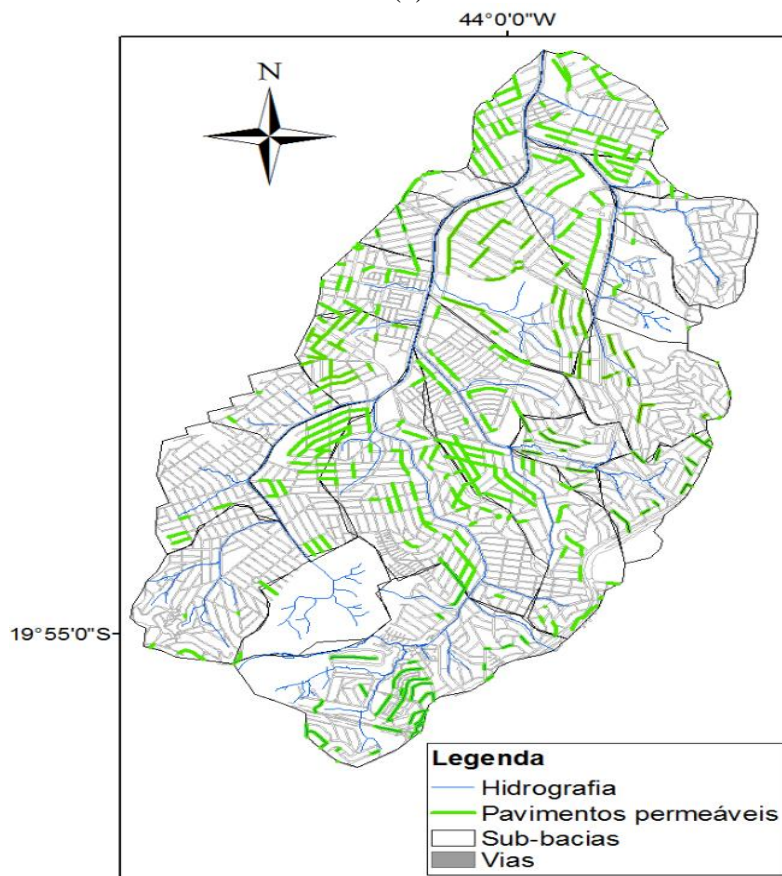
Os critérios para implantação de pavimentos permeáveis variam de acordo com as características de relevo e tráfego do local em que se pretende realizar a pavimentação. De uma maneira geral, devem-se observar alguns critérios como: declividade máxima do terreno de 5%, condutividade hidráulica do solo entre 10^{-4} m/s e 10^{-6} m/s e largura mínima da via de 12 m (ROSA, 2017; WOODS BALLARD *et al.*, 2015; SCHUELER, 1987). Considerou-se ainda a distância dos cursos d'água maior que 30 metros e a exclusão das vias arteriais.

Os mapas de classificação das vias por declividade média e da seleção final para pavimentos permeáveis são apresentados na Figura 7.12.

Figura 7.12 - Mapas de declividade das vias (a) e áreas selecionadas para pavimentos permeáveis (b)



(a)



(b)

Para simulação dos pavimentos permeáveis no SWMM, o número de unidades, as áreas e larguras médias das estruturas foram calculados para cada sub-bacia. Os resultados são apresentados na Tabela 7.5.

Tabela 7.5- Características dos pavimentos permeáveis por sub-bacia

Sub-bacia	Área total (ha)	Quantidade (unid.)	Área média (m ²)	Largura média (m)	Área total tratada (ha)
1	82,3	5	1269,2	12,17	0,63
2	134,2	6	882,8	14,29	0,53
3	44,2	4	1075,0	12,50	0,43
4	67,8	29	1322,1	12,97	3,83
5	56,3	24	992,2	14,86	2,38
6	29,8	8	1612,5	16,78	1,29
7	17,5	3	2151,3	23,65	0,65
8	45	15	1898,7	13,91	2,85
9	87,1	35	1186,9	13,94	4,15
10	18,7	10	1544,2	12,99	1,54
11	87,1	3	808,3	14,06	0,24
12	37,6	2	563,5	12,97	0,11
13	26,2	2	619,5	13,18	0,12
14	114,3	19	1326,8	15,06	2,52
15	65,3	13	1369,2	13,37	1,78
16	77,1	26	1354,6	14,27	3,52
17	154,9	44	1472,0	14,95	6,48
18	243	79	1381,0	13,75	10,91
19	47,6	16	1537,5	19,17	2,46
20	216,5	70	1238,6	13,03	8,67
21	74,3	30	1487,3	12,92	4,46
22	94	2	1285,5	13,15	0,26
23	234,9	58	1715,5	15,63	9,95

As áreas que se mostraram mais propícias para implantação de pavimentos permeáveis e apresentaram maior concentração dessas estruturas foram as regiões norte e central da bacia, mais especificamente os bairros Itatiaia, Serrano, Castelo, Paquetá, Itacolomi, Alípio de Melo, Patrocínio e Inconfidência (Figura 7.13), que são as regiões que apresentam maior concentração de trechos com declividades inferiores a 5%, como pode ser observado na Figura 7.12.

Observa-se que alguns bairros são coincidentes no que se refere à possibilidade de receber as duas infraestruturas propostas (telhado verde e pavimento permeável), sendo estes os bairros Castelo, Serrano, Inconfidência e Patrocínio, demarcando novamente as regiões Norte e Central. No entanto, também é possível observar que as áreas aptas à implantação de pavimentos permeáveis estão melhor distribuídas entre as bacias (Figura 7.14) quando comparadas às áreas aptas à implantação de telhados verdes (Figura 7.10).

Vale ainda ressaltar que o somatório das áreas tratadas por técnica proposta, no horizonte de 20 anos, é bastante semelhante, correspondendo ao percentual de 3,5% da área total para os telhados verdes e 3,8% da área total para os pavimentos permeáveis.

Figura 7.13 - Bairros com maior concentração de áreas selecionadas para pavimentos permeáveis

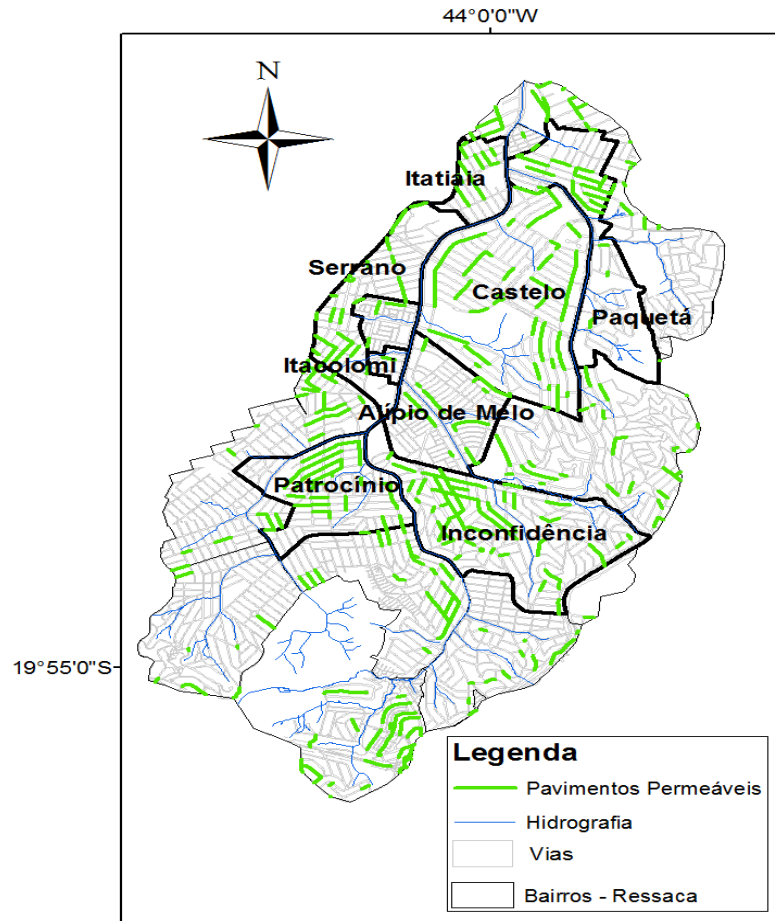
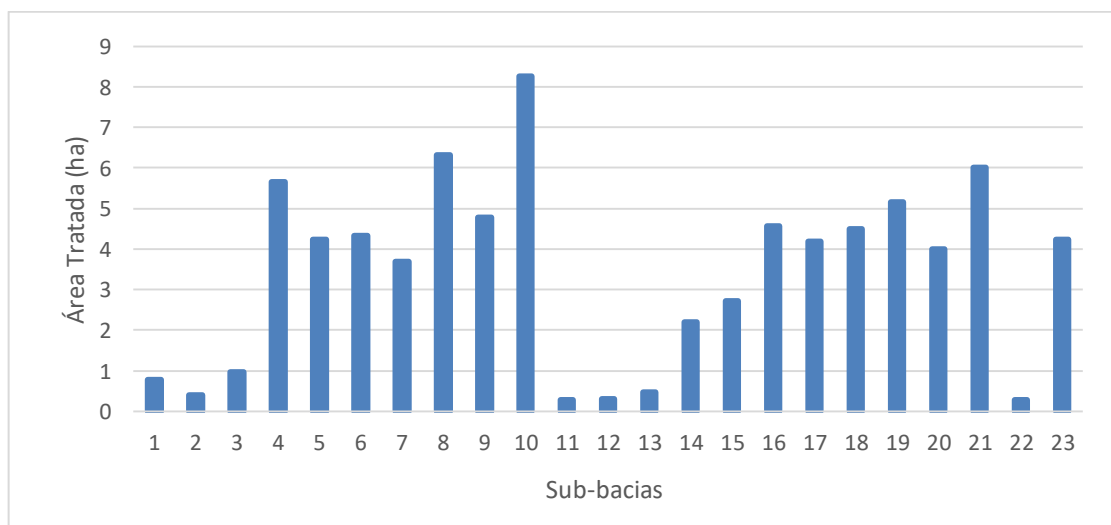


Figura 7.14 - Áreas tratadas com pavimento permeável por sub-bacia



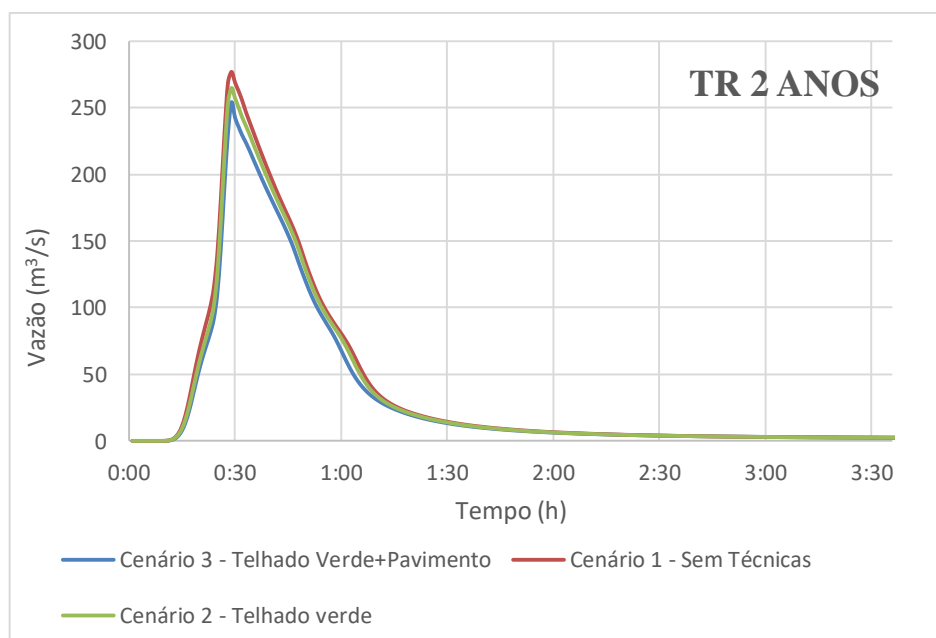
7.4 Resposta Hidrológica aos cenários propostos

Os hidrogramas resultantes da modelagem dos cenários (hidrogramas no exutório da bacia) são apresentados na sequência.

7.4.1 Modelagem dos cenários para precipitação de projeto – IDF atual (PINHEIRO; NAGHETTINI, 1998)

Os hidrogramas no exutório da bacia, resultados da simulação dos cenários 1, 2 e 3 para precipitações de 45 minutos de duração e períodos de retorno de 2, 10 e 50 anos, são apresentados nas Figuras 7.15, 7.16 e 7.17. Esses resultados são apresentados sumariamente na Tabela 7.6, na sequência.

Figura 7.15 - Hidrograma no exutório da bacia do córrego Ressaca, resultado da modelagem dos cenários 1, 2 e 3 – TR 2 anos



Considerando a Figura 7.15, no Cenário 2, com implantação de telhados verdes em todas as edificações com pedidos de regularização e licenciamento em um horizonte de 20 anos, foi constatada redução na vazão de pico de 4,4%, se comparado ao Cenário 1, que corresponde ao cenário atual da bacia. Quando considerado o Cenário 3, com implantação de telhados verdes e pavimentos permeáveis, nota-se uma redução de 8,3% na vazão de pico, também comparado ao Cenário original.

Figura 7.16 - Hidrograma no exutório da bacia do córrego Ressaca, resultado da modelagem dos cenários 1, 2 e 3 – TR 10 anos

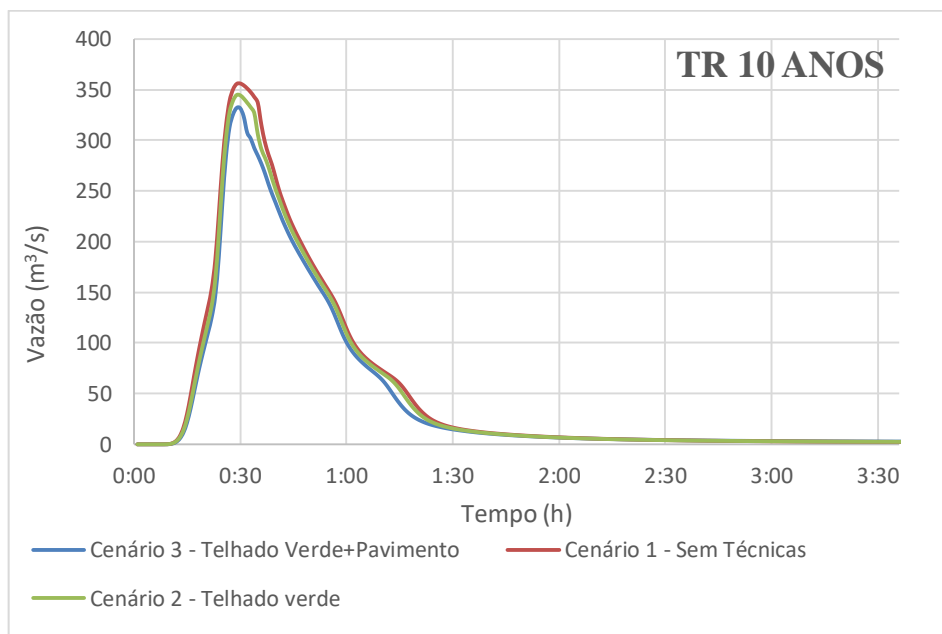
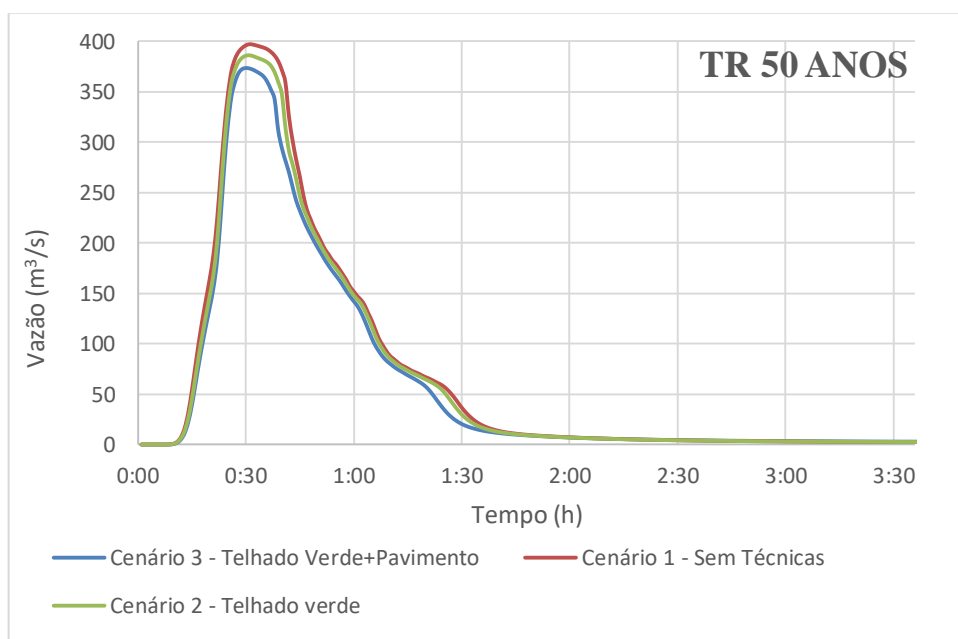


Figura 7.17 - Hidrograma no exutório da bacia do córrego Ressaca, resultado da modelagem dos cenários 1, 2 e 3 – TR 50 anos



Para o tempo de retorno de 10 anos, apresentado na Figura 7.16, foi constatada no Cenário 2 redução na vazão de pico de 3,2%, se comparado ao Cenário 1, e para o Cenário 3, nota-se uma redução de 6,8% na vazão de pico, também comparado ao Cenário original. Considerando ainda o último tempo de retorno associado aos cenários, equivalente a 50 anos (Figura 7.17), observa-

se uma queda maior na eficiência das técnicas adotadas, sendo a redução da vazão de pico no Cenário 2 igual a 2,8% e no Cenário 3, de 5,9%, ambos comparados ao Cenário original.

As simulações em geral não mostraram variação significativa nos tempos de ascensão e recessão dos hidrogramas. Palla e Gnecco (2015) encontraram uma tendência para o aumento do tempo de ascensão e recessão de acordo com o aumento da porcentagem de área impermeável tratada por técnicas compensatórias, o que indica que seria necessário o tratamento de uma área maior da bacia para que houvesse algum atraso expressivo na ascensão e recessão dos hidrogramas.

Tabela 7.6 - Variações nos picos de vazão

Cenário	Q pico (m³/s)		
	TR 2 anos	TR 10 anos	TR 50 anos
1- Inicial	277,1	356,1	397,1
2- Telhados verdes	264,9 (-4,4%)	344,6 (-3,2%)	386,1 (-2,8%)
3 - Conjunto	254,1 (-8,3%)	331,9 (-6,8%)	373,5 (-5,9%)

Nota-se que com o aumento do tempo de retorno, que equivale a chuvas de projeto de maior magnitude, a eficiência das técnicas adotadas tende a diminuir, o que pode ser explicado pela capacidade de retenção das bacias, estritamente relacionada às características físicas das estruturas implantadas (PALLA; GNECCO, 2015), e não à área impermeabilizada tratada.

Resultados semelhantes foram obtidos por Palla e Gnecco (2015), que encontraram para precipitações de tempos de retorno de 2, 5 e 10 anos reduções da vazão de pico nos cenários de máxima implantação de LIDs (*low impact development*) de, respectivamente, 45%, 37% e 31%, e por Gironás, Roesner e Davis (2009), que constataram para precipitações com TR de 2, 5 e 100 anos, reduções percentuais nas vazões de pico da ordem de 36%, 33% e 21%.

Vale ressaltar que a diferença de eficiência na redução da vazão de pico para os estudos citados, se comparada às reduções obtidas neste estudo, se deve à simulação da implantação de técnicas compensatórias em toda a bacia de estudo, diferente da restrição aqui adotada, em bases realistas e factíveis, para o cenário de renovação urbana.

As variações de volumes escoados correspondentes aos cenários propostos encontram-se na Tabela 7.7.

Tabela 7.7- Variações nos volumes escoados

Cenário	Volume (m ³)		
	TR 2 anos	TR 10 anos	TR 50 anos
1 - Inicial	546.348	778.782	983.544
2- Telhados verdes	519.917 (-4,8%)	740.529 (-4,9%)	935.503 (-4,9%)
3 - Conjunto	486.004 (-11,0%)	693.895 (-10,9%)	876.463 (-10,9%)

Considerando o período de retorno de 2 anos, no cenário original (1) o volume total escoado no exutório foi de 546.348 m³. No cenário 2, com a implantação do telhado verde, houve redução em 4,8% do volume total, equivalente a 519.917 m³. No cenário 3, o volume diminuiu em 11,0% (486.004 m³).

Para os períodos de retorno de 10 e 50 anos os volumes totais para o cenário original foram iguais a 778.782 m³ e 983.544 m³, respectivamente. Constatou-se que nos demais cenários as variações percentuais no volume de escoamento mantiveram-se muito próximas às obtidas na simulação para TR 2 anos (4,9% e 10,9%, respectivamente).

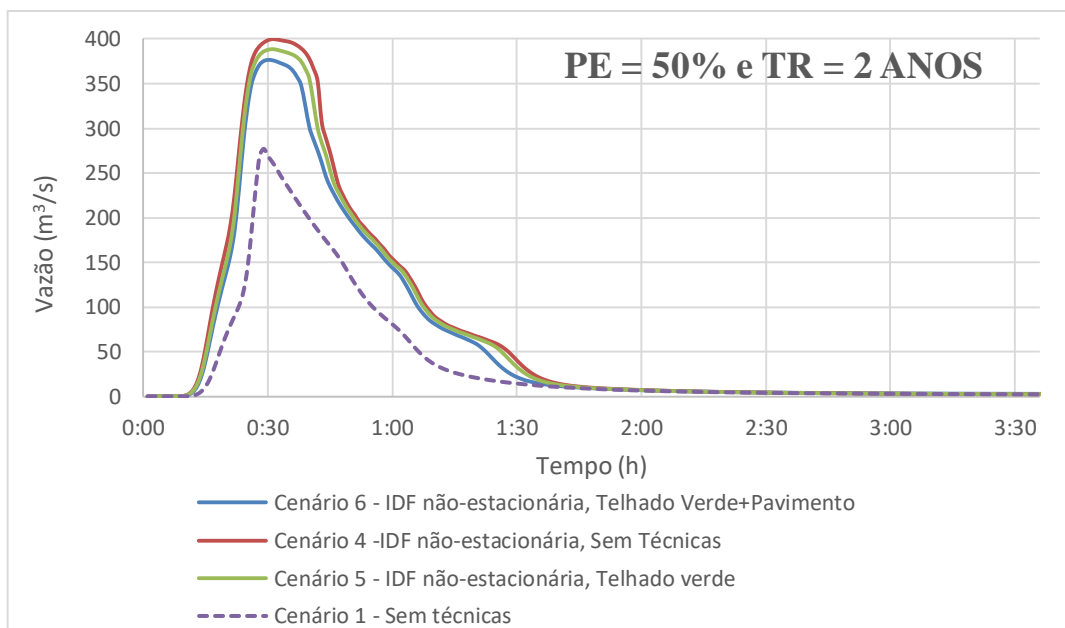
As eficiências na redução dos volumes escoados não apresentaram variações expressivas para um mesmo cenário e diferentes tempos de retorno. O desempenho dos pavimentos permeáveis foi bastante próximo ao desempenho dos telhados verdes, isso porque os telhados verdes não foram explorados em um cenário de potencialidade máxima de instalação, mas sob a perspectiva da renovação urbana. As tendências dos resultados gerados estão de acordo com outros estudos similares encontrados na literatura (PALLA; GNECCO, 2015; ROSA, 2017; WALSH; POMEROY; BURIAN, 2014).

Ressalta-se que as eficiências encontradas devem ser consideradas com cautela, uma vez que não foram analisados eventos de chuvas sequenciais.

7.4.2 Modelagem dos cenários para precipitação de projeto – IDF não-estacionária

Os hidrogramas no exutório da bacia, resultados da simulação dos cenários 4, 5 e 6 para precipitações de 45 minutos de duração e probabilidades de excedência (PE) de 50, 10 e 2% (equivalentes a períodos de retorno de 2, 10 e 50 anos), são apresentados nas Figuras 7.18, 7.19 e 7.20. Esses resultados são apresentados sumariamente na Tabela 7.8, na sequência.

Figura 7.18 - Hidrograma no exutório, resultado da modelagem dos cenários 4, 5 e 6 – PE = 50%

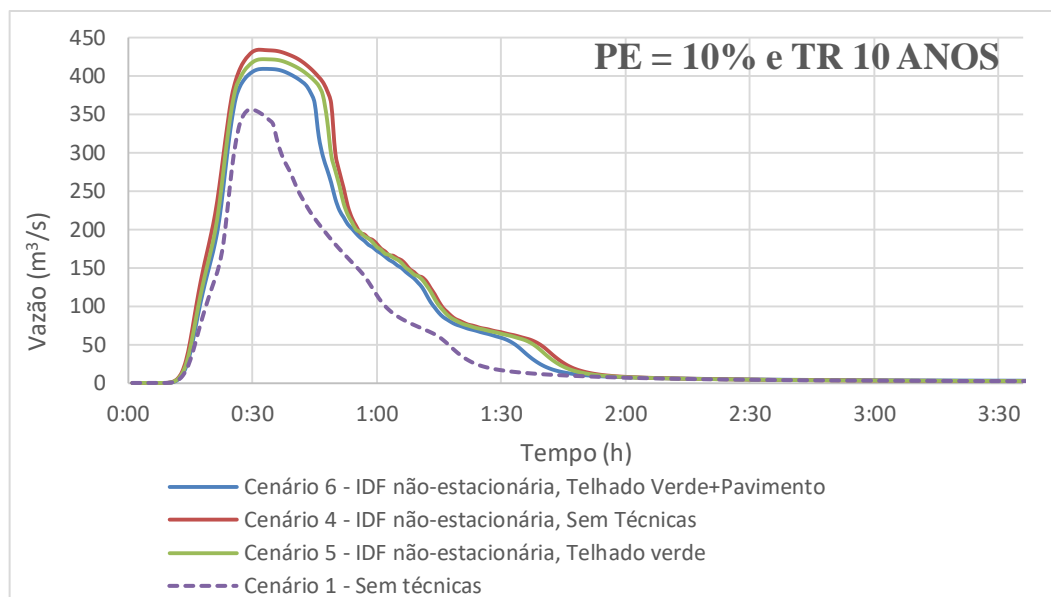


Considerando a Figura 7.18, no Cenário 4 - IDF não-estacionária - foi constatado um aumento na vazão de pico de 44%, se comparado ao Cenário 1, que corresponde ao cenário atual da bacia, sem a implantação de técnicas compensatórias. Nesse sentido, torna-se ainda mais importante a iniciativa de implantação de técnicas que venham a contribuir com a redução do escoamento.

Já no cenário 5, com a implantação de telhados verdes em todas as edificações com pedidos de regularização e licenciamento em um horizonte de 20 anos, e que considera ainda a IDF não-estacionária, foi constatada uma redução na vazão de pico de 2,8%, se comparado ao Cenário 4, que corresponde ao cenário não-estacionário sem a implantação de técnicas. Quando considerado o Cenário 6, com implantação de telhados verdes e pavimentos permeáveis, nota-se uma redução de 5,8% na vazão de pico, também comparado ao Cenário 4.

Para a probabilidade de excedência de 10%, apresentada na Figura 7.19, foi constatada no Cenário 5 uma redução na vazão de pico de 2,8%, se comparado ao Cenário 4, e para o Cenário 6, nota-se uma redução de 5,7% na vazão de pico, também comparado ao Cenário sem a implantação de técnicas. Quando considerada a comparação entre o Cenário Original (1) e o Cenário 4, que considera a IDF não-estacionária, nota-se um aumento de 22% na vazão de pico.

Figura 7.19 - Hidrograma no exutório, resultado da modelagem dos cenários 4, 5 e 6 – PE = 10%



Considerando ainda a última probabilidade de excedência associada aos cenários, equivalente a 2% (Figura 7.20), observa-se uma queda na eficiência das técnicas adotadas, sendo a redução da vazão de pico no Cenário 5 igual a 2,6% e no Cenário 6, de 5,1%, ambos comparados ao cenário sem a implantação de técnicas (Cenário 4). Em compensação, nota-se que a vazão de pico foi menos alterada quando da modificação da IDF, sendo para esta probabilidade de excedência 14% maior.

Figura 7.20 - Hidrograma no exutório, resultado da modelagem dos cenários 4, 5 e 6 – PE = 2%

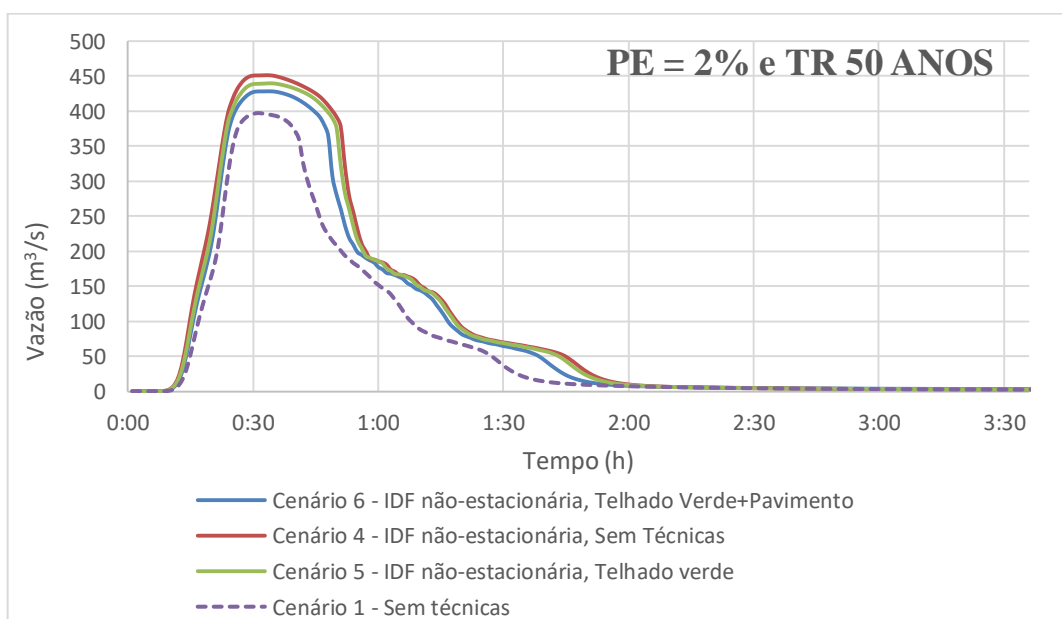


Tabela 7.8- Variações nos picos de vazão

Cenário	Q pico (m ³ /s)		
	PE 50%	PE 10%	PE 2%
1 – IDF atual - Inicial (m³/s)	277,1	356,1	397,1
4- IDF Ajustada - Inicial (m ³ /s)	399,8 (+44%)	434,1 (+22%)	451,1 (+14%)
5- Telhados verdes	388,6 (-2,8%)	421,8 (-2,8%)	439,6 (-2,6%)
6 - Conjunto	376,6 (-5,8%)	409,2 (-5,7%)	428,2 (-5,1%)

Nota-se que com a redução da probabilidade de excedência a eficiência das técnicas adotadas tende a diminuir, mas em escala expressivamente inferior aos cenários que consideram a IDF atual (1, 2 e 3 – apresentados na Tabela 7.6). Tal fato justifica-se novamente pela capacidade de retenção das bacias, ainda relacionada às características físicas das estruturas implantadas, que tendem a perder eficiência com o aumento das chuvas de projeto.

Vale ainda ressaltar que o aumento da vazão de pico obtido quando da comparação dos Cenários 1 e 4, embora bastante expressivo, pode ser atenuado com a implantação das técnicas compensatórias. Analisando a probabilidade de excedência de 2%, por exemplo, aproximadamente 40% do aumento poderia ser compensado com a implantação de telhados verdes e pavimentos permeáveis na proposta de renovação urbana.

As variações de volumes escoados correspondentes aos cenários propostos encontram-se na Tabela 7.9.

Tabela 7.9- Variações nos volumes escoados

Cenário	Volume (m ³)		
	PE 50%	PE 10%	PE 2%
1 – IDF atual - Inicial	546.348	778.782	983.544
4- IDF Ajustada - Inicial	999.592 (+83%)	1.225.410 (+57%)	1.366.791 (+39%)
5- Telhados verdes	950.908 (-4,9%)	1.173.988 (-4,2%)	1.315.315 (-3,8%)
6 - Conjunto	890.870 (-10,9%)	1.099.620 (-10,3%)	1.232.503 (-9,8%)

Considerando a PE de 50%, no Cenário 4 (sem técnicas e IDF não-estacionária) o volume total escoado no exutório foi de 999.592 m³, 83% superior ao volume escoado no cenário original. No cenário 5, com a implantação do telhado verde, houve redução em 4,9% do volume total, equivalente a 950.908 m³. No cenário 6, o volume diminuiu em 10,9% (890.870 m³).

Para as PE's de 10 e 2%, os volumes totais para o Cenário 4 foram iguais a 1.225.410 m³ e 1.366.791 m³, respectivamente. Constatou-se que nos demais cenários as variações percentuais

no volume de escoamento mantiveram-se relativamente próximas às obtidas na simulação para PE de 50% (-4,2% e -10,3% - Cenário 5; - 3,8% e - 9,8% - Cenário 6).

As eficiências na redução dos volumes escoados não apresentaram grandes variações para um mesmo cenário e diferentes probabilidades de excedência, no mesmo sentido dos resultados verificados para os cenários estacionários. Já as variações expressivas entre os cenários que não consideram a implantação de técnicas, mas se diferenciam em relação à IDF (Cenários 1 e 4) eram esperadas em função das análises realizadas no capítulo 6, o que reforça a necessidade de uma gestão que favoreça a implantação de técnicas que não só reduzam o escoamento, mas que venham a contribuir para uma mudança no clima local.

No que se refere à implantação de telhados verdes, por exemplo, experiências apresentadas em trabalhos anteriores analisam esta estrutura quanto à minimização dos impactos decorrentes do aumento da temperatura em centros urbanos, que vão além do armazenamento de águas pluviais, conforme exemplos apresentados para a cidade de Chicago e São Paulo, na etapa de Revisão de Literatura.

O planejamento de uma infraestrutura verde propicia a integração da natureza na cidade, favorecendo também a mitigação de impactos ambientais e a adaptação para enfrentar os problemas causados pelas alterações climáticas, como por exemplo: chuvas mais intensas e frequentes, aumento das temperaturas (ilhas de calor), perda de biodiversidade, entre outros (HERZOG; ROSA, s.d.; AHERN, 2009; HERZOG, 2010).

7.5 Considerações Finais da modelagem de cenários de adaptação via renovação urbana

Com base nos resultados obtidos neste capítulo, pode-se concluir que:

Para a avaliação do impacto da implantação de telhados verdes e pavimentos permeáveis na bacia do Córrego Ressaca, sob uma perspectiva de renovação urbana, foram construídos seis cenários de modelagem hidrológica, sendo os três primeiros correspondentes à equação atual de chuvas intensas (PINHEIRO; NAGHETTINI, 1998) e os demais formulados a partir da equação ajustada no capítulo anterior deste trabalho (IDF não-estacionária).

Quando da comparação dos 3 primeiros cenários, que consideram a IDF atualmente vigente no município, os hidrogramas obtidos mostraram maior redução dos picos de vazão para o período de retorno de 2 anos. O melhor desempenho correspondeu à implantação conjunta de telhados verdes e pavimentos permeáveis (Cenário 3), que apresentou redução de 8,3% da vazão de pico e de 11% do volume escoado. Observou-se que com o aumento do tempo de retorno, que equivale a chuvas de projeto de maior magnitude, a eficiência das técnicas adotadas diminuiu.

Considerando os demais cenários, que incorporam a IDF não-estacionária, foi constatado no Cenário 4 (sem a implantação de técnicas compensatórias) um aumento na vazão de pico de 44%, se comparado ao Cenário 1, que corresponde ao cenário atual da bacia, também sem a implantação de técnicas. Já no Cenário 6, que constituiu o cenário com maior redução na vazão de pico para a probabilidade de excedência de 50%, com implantação de telhados verdes e pavimentos permeáveis, observou-se uma redução de 5,8% na vazão, se comparado ao Cenário 4, e 10,9% no volume escoado.

O aumento da vazão de pico obtido quando da comparação dos Cenários 1 e 4, embora bastante expressivo, pode ser atenuado com a implantação de técnicas que venham a contribuir com a redução do escoamento. A implantação das infraestruturas propostas no âmbito da bacia do córrego Ressaca, ou em qualquer outra bacia do município de Belo Horizonte, ainda constitui um grande desafio. Atualmente na cidade existem alguns projetos de lei que podem favorecer a implantação de medidas compensatórias, mas é necessário um esforço por parte do poder público para divulgar e incentivar a implantação destas estruturas na realidade das bacias urbanas.

De forma a complementar este estudo, recomenda-se a avaliação da redução das manchas de inundação na bacia do córrego Ressaca decorrentes da implantação das técnicas compensatórias propostas. Ressalta-se também que é necessário testar outras combinações de técnicas compensatórias, de forma a maximizar as áreas impermeáveis tratadas. Adicionalmente, é preciso fazer uma análise de custo-benefício das técnicas propostas.

8 CONCLUSÕES

O presente trabalho buscou contribuir com a identificação e quantificação de tendências na ocorrência de eventos extremos de precipitação na Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) e, ainda, no delineamento de medidas de minimização dos riscos decorrentes das tendências observadas. Para tal, o estudo foi dividido em três etapas: a primeira etapa (Capítulo 5) buscou identificar tendências em chuvas extremas diárias para a RMBH; a segunda etapa (Capítulo 6) objetivou a análise e quantificação de tendência em chuvas subdiárias na cidade de Belo Horizonte, almejando ainda a proposta de uma nova curva Intensidade-Duração-Frequência (IDF) sob condições de não-estacionariedade; e na terceira e última etapa (Capítulo 7) foi proposta a implantação de Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana, diante dos impactos decorrentes da alteração da equação de chuvas intensas (IDF) proposta na etapa anterior.

Neste sentido, considerando os resultados do capítulo 5, foi realizada uma análise preliminar de tendência para temperaturas médias e mínimas anuais de duas estações localizadas nos municípios de Belo Horizonte e Florestal, indicando uma tendência positiva mais acentuada para a estação climatológica de Belo Horizonte, quando comparada à estação da cidade de Florestal (localizada na RMBH), sinalizando a possível existência de uma "ilha de calor urbano" na capital.

Na sequência, foram analisadas 14 estações pluviométricas com dados diários na RMBH, sob a perspectiva dos índices de precipitação recomendados pelo ETCCDMI. A maioria dos índices de precipitação analisados apresentou tendências significativas em, no máximo, três estações da RMBH, sem um padrão espacial claro e, portanto, obteve-se um resultado inconclusivo a nível regional. No entanto, a análise de tendência na série temporal do índice R30 aponta para tendências positivas em quatro estações pluviométricas, localizadas na parte leste da região.

Quanto à distribuição espacial dos índices CWD, CDD e SDII, os resultados apontam para uma tendência em acumular precipitações em uma escala de tempo mais curta nas partes Norte e Central da RMBH. No entanto, não foram observadas alterações no índice PRCPTOT na mesma região, indicando que os eventos extremos de precipitação a curto prazo são mais sensíveis às mudanças no ambiente quando comparados às precipitações anuais. Em relação à estação localizada na cidade de Belo Horizonte, as tendências identificadas indicaram um aumento nos índices relevantes para os sistemas de drenagem urbana. No que diz respeito a

mudanças abruptas, observou-se uma convergência de mudanças no ano de 1988, evidenciando um ano representativo de um período de forte expansão urbana.

Em linhas gerais, os resultados de presença de tendência indicam alterações nos padrões climatológicos da RMBH, apontando para a não confirmação da hipótese de estacionariedade (o futuro será estatisticamente igual ao passado). Informações desta natureza são essenciais nos processos de tomada de decisão dentro da perspectiva de gestão de risco.

Com base nos resultados obtidos no capítulo 6, pode-se concluir que foram detectadas diferentes tendências para as durações de chuva analisadas na estação pluviográfica 83587 (INMET). Considerando durações iguais ou inferiores a 1 hora as tendências observadas apontam para um aumento na intensidade desses eventos, que são os mais críticos para os sistemas de drenagem urbana, a partir do ano de 2000. Para as demais durações não foram detectadas tendências significativas.

Neste contexto, foi proposta uma adaptação do conceito "*Minimax Design Life Level: the $T_1 - T_2$ p% bounded yearly risk level*", descrito em Rootzén e Katz (2013), para quantificar as intensidades de chuva para fins de projetos de engenharia, na situação de não-estacionariedade identificada para as durações inferiores a 1 hora. A distribuição GEV não-estacionária foi ajustada às séries de máximos anuais de intensidade de precipitação para durações inferiores a 1 hora. Considerou-se que o parâmetro de posição da GEV, em cada duração, varia linearmente com o tempo, sendo este a única variável explicativa e os parâmetros de escala e forma foram mantidos constantes. Isto permitiu o cálculo dos parâmetros da GEV para cada ano entre 2018 e 2040, com estimativas dos quantis para diferentes probabilidades de excedência.

Diante dos quantis de intensidade de chuva obtidos para a IDF não-estacionária, fez-se um paralelo com as estimativas de intensidade de chuva para as diferentes IDF's já ajustadas para o município de Belo Horizonte. Comparando com a equação de Pinheiro e Naghettini (1998), atualmente vigente no município, foi possível perceber que a IDF não-estacionária apresenta para o ano de 2018, e para probabilidades de excedência maiores, estimativas de intensidades de chuva até 15% superiores. Para menores probabilidades de excedência a equação de Pinheiro e Naghettini supera os valores da IDF não-estacionária em até 9%. Para o ano de 2040 a IDF não-estacionária apresenta valores estimados até 48% superiores.

Ressalta-se então a necessidade de revisões periódicas das equações IDF, a fim de evitar equívocos no dimensionamento de obras hidráulicas. Este fato destaca a importância de obtenção de dados contínuos e de qualidade para se dispor de observações hidrológicas de longo prazo que auxiliem na avaliação de como a mudança da atmosfera está alterando os processos hidrológicos, pois, como afirmam Milly *et al.* (2008): "Em um mundo não estacionário, a continuidade das observações é crítica". A não-estacionariedade associada às séries históricas implica em revisões ainda mais importantes, uma vez que o conceito de tempo de retorno, comumente relacionado às IDF's, não é igualmente aplicável à análise não-estacionária.

Finalmente, no capítulo 7, foi avaliado o impacto da implantação de telhados verdes e pavimentos permeáveis na bacia do Córrego Ressaca (localizada no município de Belo Horizonte), sob uma perspectiva de renovação urbana, utilizando a modelagem hidrológica no SWMM. Foram construídos seis cenários, sendo os três primeiros correspondentes à equação atual de chuvas intensas (PINHEIRO; NAGHETTINI, 1998) e os demais formulados a partir da equação ajustada no capítulo 6 deste trabalho (IDF não-estacionária). Os cenários evoluíram de forma a considerar a implantação de técnicas compensatórias.

Quando da comparação dos 3 primeiros cenários, que consideram a IDF atualmente vigente no município, os hidrogramas obtidos mostraram maior redução dos picos de vazão para o período de retorno de 2 anos. O melhor desempenho correspondeu à implantação conjunta de telhados verdes e pavimentos permeáveis (Cenário 3), que apresentou redução de 8,3% da vazão de pico e de 11% do volume escoado. Observou-se que com o aumento do tempo de retorno, que equivale a chuvas de projeto de maior magnitude, a eficiência das técnicas adotadas diminuiu.

Considerando os demais cenários, que incorporam a IDF não-estacionária, foi constatado no Cenário 4 (sem a implantação de técnicas compensatórias) um aumento na vazão de pico de 44%, se comparado ao Cenário 1, que corresponde ao cenário atual da bacia, também sem a implantação de técnicas. Já no Cenário 6, que constituiu o cenário com maior redução na vazão de pico para a probabilidade de excedência de 50%, com implantação de telhados verdes e pavimentos permeáveis, observou-se uma redução de 5,8% na vazão, se comparado ao Cenário 4, e 10,9% no volume escoado. Dessa forma, observa-se que o aumento da vazão de pico obtido quando da comparação dos Cenários 1 e 4, embora bastante expressivo, pode ser atenuado com a implantação de técnicas que venham a contribuir com a redução do escoamento.

Os resultados deste estudo evidenciam as potencialidades de uma bacia para implantação de técnicas compensatórias em drenagem urbana e os benefícios hidrológicos que essas podem promover com o aumento da infiltração e, conseqüentemente, redução do escoamento superficial, diante de um cenário de mudanças nos padrões de precipitação. No entanto, considerando que as simulações foram realizadas sob uma perspectiva de renovação urbana semelhante a atual, observou-se que a redução das vazões de pico e do volume escoado com implantação de técnicas compensatórias não foi expressivamente elevada, o que indica que o uso destas técnicas exigirá do poder público a criação de um ambiente “jurídico” que possibilite/incentive a aplicação destas em uma maior área da bacia.

REFERÊNCIAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. Projeto Técnico: Jardins de chuva. 2013. Disponível em: http://solucoesparacidades.com.br/wp-content/uploads/2013/04/AF_Jardins-de-Chuva-online.pdf. Acesso em: 10 jan 2018.

ABREU, M. L. *Climatologia da estação chuvosa de Minas Gerais: De Nimer (1977) à Zona de Convergência do Atlântico Sul*. *Revista Geonomos*, v. 6 (2), 17-22, 1998.

ABREU, M. L.; ASSIS W. L. A Ilha de calor em Belo Horizonte: Um estudo de caso. X Congresso Brasileiro de Meteorologia, Brasília – DF, 1998.

ADAMOWSKI, K.; BOUGADIS, J.; Detection of trends in annual extreme rainfall. *Hydrological Processes*, v. 17, p. 3547-3560, 2003.

AHERN, J. *Sustainability, Urbanism and Resilience*. Palestra na Primeira Conferência de Humanidades e Indústria Criativa, Universidade de Tecnologia Nacional Chyn-Yi, Taichung, Taiwan, p. 4-22, 4 de junho de 2009.

AKAIKE, H. A new look at the statistical model identification. *Automatic Control*, IEEE Transactions on, v. 19(6), p. 716–723, 1974.

ALPERT P.; BEN-GAI T. BAHARAD Y.; BENJAMINI D.; YEKUTIELI M.; COLACINO L.; DIODATO C.; RAMIS C.; HOMAR V.; ROMERO R.; MICHAELIDES S.; MANES A. The paradoxical increase of Mediterranean extreme daily rainfall in spite of decrease in total values. *Geophysical Research Letters*, v. 29, n.11, 31-1 – 34-4, (June Issue), 2002.

ALEMAW, B. F.; CHAOKA, T. R. Trends in the Flow Regime of the Southern African Rivers as visualized from Rescaled Adjusted Partial Sums (RAPS). *African Journal of Science and Technology*, v. 3, n.1, p. 69-78, 2002.

ALEXANDER, L. V.; ZHANG, X.; PETERSON, T. C.; CAESAR, J.; GLEASON, B.; KLEIN TANK, A. M. G.; et al. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research*, v.111, D05109, p. 1-22, 2006.

ALEXANDRE, G.R. Estudo para Identificação de Tendências do Regime Pluvial na Região Metropolitana de Belo Horizonte a Partir de Métodos Estatísticos e Modelos Climáticos. Belo Horizonte: UFMG. 193p. Dissertação de Mestrado, 2009.

ALEXANDRE, G.R.; BAPTISTA, M.B.; NAGHETTINI, M.C. Estudo para Identificação de Tendências do Regime Pluvial na Região Metropolitana de Belo Horizonte a Partir de Métodos Estatísticos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 15, n.2, p. 115-126, 2010.

ANA. Os Efeitos das Mudanças Climáticas sobre os Recursos Hídricos: Desafios para a Gestão. Agência Nacional de Águas. 2010.

ANANIAS, D.S.; SOUZA, E.B.; SOUZA, P.F.S.; SOUZA, A.M.L.; VITORINO, M.I.; TEIXEIRA, G.M.; FERREIRA, D.B.S. Climatologia da estrutura vertical da atmosfera em novembro para Belém-PA. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.25, n.2, 218 - 226, 2010.

ARAÚJO, P. R., TUCCI, C. E. M., GOLDENFUM, J. A. 2000. Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução do escoamento superficial. *Revista Brasileira dos Recursos Hídricos*, v. 5, n. 3, p. 21-29, 2000.

ARAÚJO, E.D., SILVA, J.B., MACHADO, C.C.C. Identificação de Ilhas de Calor na Cidade de Campina Grande-PB utilizando Sensoriamento Remoto. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v.9, n.2, p. 614-626, 2016.

ARNBJERG-NIELSEN, K. Significant climate change of extreme rainfall in Denmark. *Water Science and Technology*, v. 54, n.6-7, p.1-8, 2006.

BAPTISTA, M.; NASCIMENTO, N.; BARRAUD, S. *Aspectos da evolução da urbanização e de problemas de inundações em Belo Horizonte*. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 12. Anais. Vitória: ABRH. 1997.

BAPTISTA, M. B.; NASCIMENTO, N. O. Aspectos institucionais e de financiamento dos sistemas de drenagem urbana. *RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 7, n. 1, p. 29-49, 2002.

BAPTISTA, M.; NASCIMENTO, N.; BARRAUD, S. *Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana*. Porto Alegre: ABRH, 2ª edição, 318p, 2011.

BECKER, P. Obtenção de Informações para Plano Diretor de Drenagem urbana utilizando o SIG. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC. UFCS, 2006.

BALDESSAR, Silvia M. N. Telhado verde e sua contribuição na redução da vazão da água pluvial escoada. Dissertação de mestrado. Curitiba: UFPR, PPGCC, 2012.

BELO HORIZONTE (Município). Lei Municipal nº 7.166, de 27 de agosto de 1996. Estabelece Normas e Condições Para Parcelamento, Ocupação e Uso do Solo Urbano no Município. Belo Horizonte: DOM, 1996.

BELO HORIZONTE (Município). Projeto de Lei nº 1.749, de 7 de outubro de 2015. Aprova o plano diretor do município de Belo Horizonte e dá outras providências. Câmara Municipal de Belo Horizonte, MG, 2015. Disponível em: <<https://www.cmbh.mg.gov.br/atividade-legislativa/pesquisar-proposicoes/projeto-de-lei/1749/2015>>. Acesso em: 24 nov. 2017.

BELO HORIZONTE (Município). Projeto de Lei nº 963, de 3 de fevereiro de 2014. Dispõe sobre a obrigatoriedade da instalação do "telhado verde" nos locais que especifica, e dá outras providências. Câmara Municipal de Belo Horizonte, MG, 2014. Disponível em: <<https://www.cmbh.mg.gov.br/atividade-legislativa/pesquisar-proposicoes/projeto-de-lei/963/2014>>. Acesso em: 24 nov. 2017.

BELO HORIZONTE (Município). Projeto de Lei nº 179, de 17 de março de 2017. Institui o programa de incentivo à sustentabilidade urbana, denominando 'IPTU Verde', que estabelece o desconto progressivo no IPTU de imóveis que adotarem medidas de redução de impacto ambiental e eficiência energética. Câmara Municipal de Belo Horizonte, MG, 2017. <

<http://cmbhsildownload.cmbh.mg.gov.br/silinternet/servico/download/documentoVinculado?iDDocumento=2c907f765acea498015add16a07f0bd6>> Acesso em: 23 nov. 2017.

BELO HORIZONTE. Plano Municipal de Saneamento de Belo Horizonte - 2012/2015: Atualização 2014. Belo Horizonte: PBH, 2015. Disponível em: <<http://portalpbh.pbh.gov.br/pbh/contents.do?evento=conteudo&chPlc=199034>>. Acesso em: 10 ago. 2015.

BENDIENT, P. B.; HUBER, W. C.; VIEUX, B. E. Hydrology and Floodplain Analysis. 4th. ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, Inc., 2008.

BENISTON, M.; STEPHENSON, D. B.; CHRISTENSEN, O. B.; FERRO, C. A. T.; FREI, C.; GOYETTE, S.; HALSNAES, K.; HOLT, T.; JYLHA, K.; et al. Future extreme events in European climate: an exploration of regional model projections. *Climatic Change*, v. 81, p. 71-95, 2007.

BENISTON, M. The 2003 heat wave in Europe: a shape of things to come? An analysis based on Swiss climatological data and model simulations. *Geophysical Research Letters*, v.31, L02202, p. 1-4, 2004.

BERTONI, J. C. & TUCCI, C. E. M. Precipitação. In.: Hidrologia: ciência e aplicação, Org. Carlos E. M. Tucci, 2ª ed., 2. reimpr., Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS: ABRH, 2001.

BLAIN, G.C.; PICOLI, M.C.A.; LULU, J. Análise estatística das tendências de elevação nas séries anuais de temperatura mínima do ar no estado de São Paulo. *Bragantia*, v.68, p.807-815, 2009.

BLANCHET, J., MOLINIÉ, G., TOUATI, J. Spatial analysis of trend in extreme daily rainfall in southern France. *Climate Dynamics*, 2016. DOI 10.1007/s00382-016-3122-7.

BOCHEVA, L.; MARINOVA, T.; SIMEONOV, P.; GOSPODINOV, I.. Variability and trends of extreme precipitation events over Bulgaria (1961–2005). *Atmospheric Research*, v.93, p.490–497, 2009.

BONNIN, G.M.; MARTIN, D.; LIN, B.; T. PARZYBOK, T.; YEKTA, M.; RILEY, D. NOAA Atlas 14 Precipitation-Frequency Atlas of the United States Volume 2 Version 3.0: Delaware, District of Columbia, Illinois, Indiana, Kentucky, Maryland, New Jersey, North Carolina, Ohio, Pennsylvania, South Carolina, Tennessee, Virginia, West Virginia. U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service, Silver Spring, Maryland. 2006.

BORSAGLI, A. Rios Invisíveis da Metrópole Mineira. Belo Horizonte: Clube de Autores, 2016. 430 p.

CAETANO, F.D.N.; TIBIRIÇÁ, A.C.G.; SANTOS, G.L.A.A. Sistema de cobertura verde para uma edificação da área de saúde numa IFES. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 13., 2010, Canela. Anais eletrônicos...

Porto Alegre: ANTAC, 2010. Disponível em: <<http://www.infohab.org.br/entac2014/2010/arquivos/618.pdf>>. Acesso em: 12 abr. 2017.

CAJAZEIRO, J. M. D. *Análise da Susceptibilidade à formação de inundações nas Bacias e áreas de contribuição do Ribeirão Arrudas e córrego do Onça em termos de índices morfométricos e impermeabilização*. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação do Departamento de Geografia. UFMG, 101p. 2012.

CÂNDIDO, E.G.S. *Modelagem hidrológica e hidráulica da Bacia do Córrego Ressaca (Belo Horizonte, MG) utilizando o modelo SWMM*. Belo Horizonte: UFMG. 65p. Trabalho de Conclusão de Curso, 2015.

CATUZZO, H. *Telhado verde: impacto positivo na temperatura e umidade do ar*. O caso da cidade de São Paulo. Tese de Doutorado. Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo, 207p. 2013.

CCNC - ACERVO DA COMISSÃO CONSTRUTORA DA NOVA CAPITAL DE MINAS. Acervo da Comissão Construtora da Nova Capital de Minas, 2017. Disponível em: <<http://www.comissaoconstrutora.pbh.gov.br>>. Acesso em: 03 dez 2017.

CETESB, Drenagem Urbana – Manual de Projeto, Companhia de Tecnologia e Saneamento do Estado de São Paulo, São Paulo-SP, 1980.

CHAMPS, J. R. B. *Inundações urbanas em Belo Horizonte: Ocorrências, Controle e Medidas de Proteção*, Montevideu, Uruguai, v. 4, n. 2, p. 1-6, Set. 2012. Disponível em: <<http://www.unesco.org/uy/phi/aqualac/fileadmin/phi/aqualac/AqualacVol4No2-Art1Champs.pdf>>. Acesso em: 12 nov. 2017.

CHENG, L.; KOUCHAK, A. A.; GILLELAND, E.; KATZ, R. W. Non-stationary extreme value analysis in a changing climate. *Climatic change*, v. 127, n. 2, p. 353-369, 2014.

CHIEW, F., SIRIWARDENA, L. Trend User Guide. Australia: CRC for catchment hidrology. 29 pages, 2005. Available at <[http://www.toolkit.net.au/tools/TREND/ documentation](http://www.toolkit.net.au/tools/TREND/documentation)> Acesso em: 23 Abr. 2015.

CHRISTENSEN, J. H.; CHRISTENSEN, O. B. Severe summertime flooding in Europe. *Nature*, v. 421, p. 805–806, 2003.

CIDADE JARDIM. Telhado Verde no Banco do Brasil – Belo Horizonte. 2011. Disponível em: <http://institutocidadejardim.com.br/2011/06/22/telhado-verde-no-banco-do-brasil-belo-horizonte/>. Acesso em: 10 jun 2016.

CHAMPS, J. R. B. *Inundações urbanas em Belo Horizonte: Ocorrências, Controle e Medidas de Proteção*, Montevideu, Uruguai, v. 4, n. 2, p. 1-6, Set. 2012. Disponível em: <<http://www.unesco.org/uy/phi/aqualac/fileadmin/phi/aqualac/AqualacVol4No2-Art1Champs.pdf>>. Acesso em: 12 nov. 2017.

CHAMPS, J. R. B.; PEREZ, S. T. C. S.; FROÉS, C. M. V. O planejamento do sistema de drenagem na cidade de Belo Horizonte. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 23. Anais. João Pessoa: ABES. 2001.

CHICAGO CLIMATE ACTION PLAN (CCAP). Acesso em: <http://www.chicagoclimateaction.org/>. Disponível em: 10 jun 2016.

CHIEW, F.; SIRIWARDENA, L. Trend user guide. Australia: CRC for catchment hidrology. 2005. 29 p. Disponível em: <<http://www.toolkit.net.au/tools/TREND/documentation>>. Acesso em: 23 nov 2015.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. Applied hydrology, 572 pp. McGraw-Hill, New York, 1988.

CLARKE, R. T. Hydrological prediction in a non-stationary world. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 11, p. 408-414, 2007.

COLES, S. An introduction to statistical modeling of extreme values. *Springer Series in Statistics*. Springer-Verlag, London. 2001.

COSTA, W. D. Caracterização das Condições de Uso e Reservação das Águas Subterrâneas do Município de Belo Horizonte - MG. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

COTTON, W., PIELKE, R.A. Sr. *Human Impacts on Weather and Climate*, Chap 5, 2nd edn, Cambridge University Press: Cambridge, 2007.

CPRM - COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. Projeto Pampulha: estudo hidrogeológico da Bacia da Pampulha. BEATO, D. A. C.; DUTRA, G. M.; MEDEIROS, M. J. – Belo Horizonte: CPRM/PBH/P. Contagem, 2001.

CRAIG, R. K. “Stationarity Is Dead” - Long live transformation: Five principles for climate change adaptation law. *Harvard Environ. Rev.*, 34 (1), p. 9 - 75, 2010.

CRISCI, A.; GOZZINI, B. MENEGUZZO, F.; PAGLIARA, S.; MARACCHI, G. Extreme rainfall in a changing climate: regional analysis and hydrological implications in Tuscany. *Hydrological Processes*, v.16, p.1261-1274, 2002.

CRUTZEN, P. J. Geology of mankind. *Nature*, 415, p. 23-23, 2002.

DAI, A. Recent climatology, variability, and trends in global surface humidity. *Journal of Climate*, v.19, p. 3589-3606, 2006.

DANTAS, L.G., SANTOS, C.A.C., OLINDA, R.A. Tendências anuais e sazonais nos extremos de temperatura do ar e precipitação em Campina Grande – PB. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 30, n. 4, p.423 - 434, 2015.

DE BRUIJN, K. Resilience and flood risk management. *Water Policy*, v.6, n.1, 53–66, 2004.

De GRAAF, R.; De GIESEN, V. N.; de VEN, V. F. Alternative water management options to reduce vulnerability for climate change in the Netherlands. *Journal Natural Hazards*, v.51 (3), p.407-422, 2009.

DOUGLAS, E. M.; VOGEL, R.M.; KROLL, C. N. Trends in floods and low flows in the United States: impact of spatial correlation. *Journal of Hydrology*, v. 240, p. 90-105, 2000.

DRUMMOND, P. D. P. Estudo da influência da reservação de águas pluviais em lotes no município de Belo Horizonte, MG: Avaliação hidráulica e hidrológica. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos): Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

EASTERLING, D. R.; MEEHL, G. A.; PARMESAN, C.; CHANGNON, S. A.; KARL, T. R.; MEARN, L. O. Climate extremes: observations, modeling, and impacts. *Science*, v.289, p. 2068-2074, 2000.

ESTADO DE MINAS/D.A Press. *A BH das 200 enchentes*. 2012. Disponível em: https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2012/01/07/interna_gerais,271132/a-bh-das-200-enchentes.shtml. Acesso em: 23 jan. 2018.

FERREIRA, C.C.M., BATISTA, G.M.F., VIANNA, Y.C.G. Variações ou tendências climáticas: um estudo com as séries de temperatura do ar para a cidade de Juiz de Fora-MG. *Revista de Ciências Humanas*, v. 15, n. 2, p. 414-433, 2015.

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

FLETCHER T. D., SHUSTER W., HUNT W. F., ASHLEY R., BUTLER D., ARTHUR S., TROWSDALE S., BARRAUD S., SEMADENI-DAVIES A., BERTRAND-KRAJEWSKI J.-L., STEEN P., RIVARD G., UHL M., DAGENAIS D., VIKLANDER M. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal*, v. 12 (7), p. 525-542, 2014.

FORMIGA, K. T. M.; CARVALHO, M. de; S., K. A.; S., A. K. Calibração do Storm Water Management Model (SWMM) utilizando algoritmos evolucionários multiobjetivo. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 21, n. 4, p. 697-707, 2016.

FORTUNATO, A.; OLIVERI, E.; MAZZOLA, M. R. Selection of the Optimal Design Rainfall Return Period of Urban Drainage Systems. *Procedia Engineering*, v.89, p.742-749, 2014.

FRICH, P.; ALEXANDER, L. V.; DELLA-MARTA, P.; GLEASON, B.; HAYLOCK, M.; KLEIN TANK, A. M. G.; et al. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Climate Research*, v.19, p. 193-212, 2002.

GARCIAS, J. I. B. *Monitoramento Hidrológico e Modelagem da Drenagem Urbana da Bacia Hidrográfica do Arroio Cancela*. Dissertação (Mestrado). Curso de Engenharia Civil, Departamento de Centro de Tecnologia Programa de Pós, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

- GAUTHIER T. D. Detecting trends using spearman's rank correlation coefficient. *Environmental Forensics*, v. 2, p.359-362, 2001.
- GERSONIUS, B. Can resilience support integrated approaches to urban drainage management? *11th International Conference on Urban Drainage*, Edinburgh. Scotland, UK, 2008.
- GIRONÁS, J.; ROESNER, L. A.; DAVIS, J. Storm Water Management Model - Applications Manual. Cincinnati, OH: U. S. Environmental Protection Agency, 2009.
- GOMES, I. *Geossistemas: Sistemas e Subsistemas naturais da Regional Barreiro – Belo Horizonte, MG, Brasil*. Monografia de graduação do curso de Geografia, IGC/UFMG, 1998.
- GOYETTE, S.; BRASSEUR, O.; BENISTON, M. Application of a new wind gust parameterization: Multiscale case studies performed with the Canadian regional climate model. *Journal of Geophysical Research*, v. 108, n. D13, 4374, 2003.
- GRAYSON, R. B.; ARGENT, R. M.; NATHAN, R. J.; MCMAHON, T. A.; MEIN, R. *Hydrological Recipes. Estimation techniques in Australian Hydrology*. Australia: Cooperative Research Center for Catchment Hydrology, 1996. p. 125
- GROISMAN, P. Y.; KNIGHT, R. W.; KARL, T. R. Changes in intense precipitation over the central United States. *Journal of Hydrometeorology*, v.13, p.47-66, 2012.
- GROISMAN, P. Y.; KNIGHT, R. W.; EASTERLING, D.R.; KARL, T. R.; HEGERL, G.C.; RAZUVAEV, V.N. Trends in intense precipitation in the climate record. *Journal of Climate*, v.18, p.1326 -1350, 2005.
- HAILEGEOORGIS, T. T.; THOROLFSSON, S. T.; ALFREDSEN, K. Regional frequency analysis of extreme precipitation with consideration of uncertainties to update IDF curves for the city of Trondheim. *Journal of Hydrology*, v. 489, p.305-318, 2013.
- HELSEL, D. R.; HIRSCH, R. M. *Statistical Methods in Water Resources*. Techniques of Water Resources Investigations, Book 4, chapter A3. U.S. Geological Survey. 522 p, 2002.
- HERZOG, C. P. *Green infrastructure as a strategy to reinstate resilience to an urban watershed in Rio de Janeiro, Brazil*. In: Sessão paralela - Intelligent Urban Fabric. 1st World Congress on Cities and Adaptation to Climate Change. Resilient Cities 2010. Bonn, 28-30 de maio de 2010.
- HERZOG, C. P.; ROSA, L.Z. *Infraestrutura Verde: Sustentabilidade e Resiliência para a Paisagem Urbana*. Disponível em: <http://www.revistas.usp.br/revistalabverde/article/download/61281/64217>. Acesso em: 20 de jun. 2016.
- HUFF, Floyd A. Time distribution of rainfall in heavy storms. *Water resources research*, v. 3, n. 4, p. 1007-1019, 1967.
- IAURIF. L'eau, la ville et l'urbanisme. *Cahiers de l'IAURIF*, v. 116, 204 p, 1997.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. CENSO DEMOGRÁFICO 2010. Disponível em: <http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?codmun=310620>. Acesso em 15 fev 2016.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Produto interno bruto dos municípios 2012*. Disponível em: <https://ww2.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/pibmunicipios/2012/>. Acesso em 15 jan 2017.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cidades: Belo Horizonte, 2015. Disponível em: <Cidades: Belo Horizonte>. Acesso em: 16 maio 2017.

IBOPE - Instituto Brasileiro de Opinião e Estatística, 2010. *Mercado Imobiliário Residencial Brasileiro*. Disponível em: http://www.ibope.com.br/pt-br/noticias/Documents/110718_Pyxis%20Imobili%C3%A1rio.pdf. Acesso em 01 jun 2017.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. *Normais Climatológicas, 2008*. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/html/clima/mapas/?mapa=tmed>. Acesso em: 14 jul 2016.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Summary for policymakers. In: C. B. FIELD, V. BARROS, T. F. STOCKER, D. QIN, D. J. DOKKEN, K. L. EBI, et al. (Eds.). *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. A special report of working groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK, and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2012. p. 3-21.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Summary for policymakers*. Genebra: IPCC, 2014. p. 2-31.

JAHNKE, L.T.; WILLANI, S.M.U.; ARAÚJO, T.L.R. O IPTU Verde: Práticas Sustentáveis Trazem Benefícios Financeiros à População. *Revista Eletrônica do Curso de Direito - UFSM, Santa Maria, v. 8, Edição Especial - I Congresso Internacional de Direito Ambiental e Ecologia Política - UFSM, p.413-423, 2013.*

KANAE, S.; OKI, T.; KASHIDA, A. Changes in hourly heavy precipitation at Tokyo from 1890 to 1999. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, v. 82, p. 241-247, 2004.

KARL, T. R.; KNIGHT, R. W.; EASTERLING, D. R.; QUAYLE, R. G. Indices of climate change for the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v.77, n.2, p. 279-291, 1996.

KARL, T. R.; KNIGHT, R.W. Secular trends of precipitation amount, frequency, and intensity in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 79, p. 231-241, 1998.

KATZ R.W.; PARLANGE M.B.; NAVEAU P. Statistics of extremes in hydrology. *Advances in Water Resources*, v. 25, p. 1287–1304, 2002.

KENDALL, M. G., *Rank Correlation Methods*, 4th ed., Charles Griffin: London, 1975.

KISHTAWAL, C.M., NIYOGI, D., TEWARI, M., PIELKE SRD, R.A., SHEPHERDE, J.M. Urbanization signature in the observed heavy rainfall climatology over India. *International Journal of Climatology*, 2009. DOI: 10.1002/joc.2044.

KLEIN R.J.T; SMIT M.J.; GOOSEN H.; HULSBERGEN C.H. Resilience and Vulnerability: Coastal Dynamics or Dutch Dikes? *The Geographical Journal*, v. 164 n. 3, p.259-268, 1998.

KONRAD, C.E. The most extreme precipitation events over the Eastern United States from 1950 to 1996: considerations of scale. *Journal of Hydrology*, v.2, p. 309–325, 2001.

KOUTSOYIANNIS, D. Nonstationarity versus scaling in hydrology. *Journal of Hydrology*, v. 324, p. 239–254, 2006.

KOUTSOYIANNIS, D.; MONTANARI, A. Negligent killing of scientific concepts: The stationarity case. *Hydrol. Sci. J.*, v. 60, p.1174–1183, 2014.

KREBS, G.; KOKKONEN, T.; VALTANEN, M.; SETÄLÄ, H.; KOIVUSALO, H. Spatial resolution considerations for urban hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 512, 2014. 482-497.

KRISHNAKUMAR, K.N., PRASADA RAO, G.S.L.H.V., GOPAKUMAR, C.S. Rainfall trends in twentieth century over Kerala, India. *Atmospheric Environment*, v. 43, p. 1940-1944, 2009.

KUNDZEWICZ, Z.W.; SZAMALEK, K.; KOWALCZAK, P. The great flood of 1997 in Poland. *Hydrological Sciences Journal*, v. 44, n.6, p. 855-870, 1999.

KUNDZEWICZ, Z. W.; ROBSON, A. (Eds). Detecting Trend and Other Changes in Hydrological Data. World Climate Programme - Water, World Climate Programme Data and Monitoring, WCDMP-45, WMO/TD no. 1013. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 2000.

KUNDZEWICZ, Z. W.; ROBSON, A. J. Change detection in hydrological records - a review of the methodology. *Hydrological Sciences Journal*, v. 49, n. 1, p. 7-19, 2004. <http://dx.doi.org/10.1623/hysj.49.1.7.53993>.

KYSELÝ, J. Trends in heavy precipitation in the Czech Republic over 1961– 2005. *International Journal of Climatology*, v. 29, p.1745–1758, 2009.

LABAT, D.; AERIS, Y. G.; PROBST, J. L.; GUYOT, J. L. Evidence for global runoff increase related to climate warming. *Advances in Water Resources*, v.27, p.631–642, 2004.

LANG, M.; RENARD, B. Analyse régionale sur les extremes hydrométriques en France: détection de changements cohérents et recherche de causalité hydrologique. *La Houille Blanche*, n. 6, p. 83-89, 2007.

LEITÃO, M. M. V. B.R.; BEZERRA P. T. C.; OLIVEIRA, G. M.; MENEZES, H. E. A.; PINTO, M. G. C. L. P. *Expansão urbana e aumento da temperatura do ar nas cidades de*

- Petrolina/PE e Juazeiro/BA*. IV Simpósio Internacional De Climatologia, João Pessoa-PB, 2011.
- LIMA, C.H.R. *Análise estatística da sazonalidade e tendências temporais em eventos de cheia na bacia do Paraná*. In: XIX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2011, Maceió, AL. Anais... Maceió, AL, 2011. p. 1-18.
- LINS, H. F.; COHN, T. A. Stationarity: Wanted dead or alive?, *J. Am. Water Resour. Assoc.*, v. 47, p. 475–480, 2011.
- LUCAS, T. P. B.; ABREU, M. L. Caracterização climática dos padrões de ventos associados a eventos extremos de precipitação em Belo Horizonte – MG. *Caderno de Geografia*, Belo Horizonte, v. 14, n. 23, p. 135-152, 2004.
- LY, M.; TRAORE, S.B.; ALHASSANE, A.; SARR, B. Evolution of some observed climate extremes in the West African Sahel. *Weather and Climate Extremes*, v.1, p.19-25, 2013.
- MADSEN, H.; LAWRENCE, D.; LANG, M.; MARTINKOVA, M.; KJELDSSEN, T.R. Review of trend analysis and climate change projections of extreme precipitation and floods in Europe. *Journal of Hydrology*, v. 519, p. 3634-3650, 2014.
- MAGALHÃES FILHO, L. C. A.; ABREU, J. F. Ilha de Calor Urbana, Metodologia para Mensuração Belo Horizonte, uma Análise Exploratória. *Sistemas, Cibernética e Informática*, v.12 (1), 2015.
- MAILHOT, A.; DUCHESNE, S.; CAYA, D.; TALBOT, G. Assessment of future change in intensity-duration-frequency (IDF) curves for Southern Quebec using the Canadian Regional Climate Model (CRCM). *Journal of Hydrology*, v.347(1), p.197-210, 2007.
- MANN, H. B., Non-parametric test against trend. *Econometrica*, v.13, p.245-259, 1945.
- MARENGO J, A. Caracterização do clima no Século XX e Cenários Climáticos no Brasil e na América do Sul para o Século XXI derivados dos Modelos Globais de Clima do IPCC, Relatório 1, MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE-MMA, SECRETARIA DE BIODIVERSIDADE E FLORESTAS – SBF, DIRETORIA DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE – DCBio Mudanças Climáticas Globais e Efeitos sobre a Biodiversidade - Sub projeto: Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do Século XXI. Brasília, Fevereiro 2007.
- MATALAS, N. C. Comment on the announced death of stationarity. *Water Resour. Plann. Manage.*, v. 138, p. 311–312, 2012.
- MCCUTCHEON, M.; WRIDE, D. Shades of Green: Using SWMM LID Controls to Simulate Green Infrastructure. *Journal of Water Management Modeling*, 2013.
- MILLY, P. C. D.; BETANCOURT, J.; FALKENMARK, M.; HIRSCH, R.M.; KUNDZEWICZ, Z.W.; LETTENMAIER, D.P.; STOUFFER, R.J. Stationarity is dead: Whither water management?. *Science*, v. 319, p. 573–574, 2008.

MILLY, P. C.; BETANCOURT, J.; FALKENMARK, M.; HIRSCH, R. M.; KUNDZEWICZ, Z. W.; LETTENMAIER, D. P.; STOUFFER, R. J.; MICHAEL D. DETTINGER, M. D.; KRYSANOVA, V. On critiques of “Stationarity is dead: whither water management?”. *Water Resources Research*, v. 51(9), p. 7785-7789, 2015.

MINUZZI, R. B.; CARAMORI, P. H. Variabilidade climática sazonal e anual da chuva e veranicos no Estado do Paraná. *Revista Ceres*, Viçosa, v. 58, n.5, p. 593-602, set/out, 2011.

MONTANARI, A.; KOUTSOYIANNIS, D. Modeling and mitigating natural hazards: Stationarity is immortal!, *Water Resour. Res.*, v. 50, p. 9748–9756, 2014.

MONTE-MÓR, R. L. M. Belo Horizonte: a cidade planejada e a metrópole em construção. In: MONTE-MÓR, R. L. M. Belo Horizonte: espaços e tempos em construção. Belo Horizonte: Cedeplar/PBH, 1994.

MORAES, J.M.; GENOVEZ, A.M.; MORTATTI, J.; BALLESTER, M.V.; KRUSCH, A.V., MARTINELLI, L.A.; VICTORIA, R.L. Análise de intervenção das séries temporais de vazão dos principais rios da bacia do Rio Piracicaba. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.2 (2), p. 65-79, 1997.

MOREIRA, J. G. do V. Método para análise de frequência e de gestão do risco de cheias, a partir da informação hidrometeorológica, sob a condição de não-estacionariedade. Belo Horizonte: UFMG. 204p. Tese de doutorado, 2016.

MOREIRA, J. G. do V.; NAGHETTINI, M. Detecção de tendências monotônicas temporais e relação com erros dos tipos I e II: estudo de caso em séries de precipitações diárias máximas anuais do estado do Acre. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 31, n. 4, 2016. p. 394-402, 2016.

MOREIRA, J. G. do V.; NAGHETTINI, M.; ELEUTÉRIO, J.C. Frequência e risco sob não-estacionariedade em registros pluviométricos da bacia do alto rio Tarauacá, Acre. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 21, n. 1, 2016. p. 232-241, 2016.

MOURA, P. M. Contribuição para a Avaliação Global de Sistemas de Drenagem Urbana. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. UFMG, 142p. 2004.

MOURA, C.R.W.; ESCOBAR, G.C.J.; ANDRADE, K.M. Padrões de circulação em superfície e altitude associados a eventos de chuva intensa na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.28, n.3, 267 - 280, 2013.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. Hidrologia Estatística. 1a ed. Belo Horizonte: CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – Superintendência Regional de Belo Horizonte, 2007.

NASTOS, P.T.; ZEREFOS, C.S. Decadal changes in extreme daily precipitation in Greece. *Advances in Geosciences*, v.16, p. 55–62, 2008.

NETO, P. S. G. *Telhados Verdes Associados com Sistemas de Aproveitamento de Água de Chuva: Projeto de dois protótipos para futuros estudos sobre esta técnica compensatória em drenagem urbana e prática sustentável na construção civil*. <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10004589.pdf>. Acesso em: 20 jun 2017.

NUNES, L.H. Repercussões globais, regionais e locais do aquecimento global. *Terra Livre*, Ano 19, v.1, n.20, p.101-110, 2003.

OBEYSEKERA, J.; SALAS, J. D. Quantifying the uncertainty of design floods under nonstationary conditions. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 19, n. 3, p. 1438-1446, 2014.

PAIXÃO E.; MIRZA M.M.Q.; SHEPHARD M.W.; AULD H.; KLAASSEN J.; SMITH G. An integrated approach for identifying homogeneous regions of extreme rainfall events and estimating IDF curves in Southern Ontario, Canada: Incorporating radar observations. *Journal of Hydrology*, v.528, p.734-750, 2015.

PALLA, A.; GNECCO, I. Hydrologic modeling of Low Impact Development systems at the urban catchment scale. *Journal of Hydrology*, 528, 2015. 361-368.

PARAÍBA. Lei Estadual no 10.047, de 9 de julho de 2013. Dispõe sobre a obrigatoriedade da instalação do “telhado verde” nos locais que especifica, e dá outras providências. João Pessoa: DOEPB, 2013.

PBH, Atlas dos Diagramas dos Canais Revestidos do Sistema de Macrodrenagem – Bacia do Ribeirão do Onça, Plano Diretor de Drenagem de Belo Horizonte, Prefeitura Municipal de Belo Horizonte, 2002.

PBH – Prefeitura de Belo Horizonte. *O conceito de Unidades de Planejamento (UPs) em Belo Horizonte*. Disponível em: <http://slideplayer.com.br/slide/1257388/>. Acesso em 15 mai 2017. Belo Horizonte, 2014a

PBH – Prefeitura Municipal de Belo Horizonte. *Relatório mensal de processos de licenciamento e regularização - Projetos de edificação aprovados em dezembro/2014*. Belo Horizonte, 2014b.

PEDERSEN, L.; JENSEN N. E.; CHRISTENSEN L. E.; MADSEN, H. Quantification of the spatial variability of rainfall based on a dense network of rain gauges, *Atmos. Res.*, v.95, p.441–454, 2010.

PFAFSTETTER, O. *Chuvas intensas no Brasil. Rio de Janeiro: Ministério da Viação e Obras Públicas; DNOS, 1957. 420p.*

PINHEIRO, M. C. Diretrizes Para Elaboração de Estudos Hidrológicos e Dimensionamentos Hidráulicos em Obras de Mineração. ABRH. Porto Alegre – RS, 2011, 308 p.

PINHEIRO, M. M. G. e NAGHETTINI, M. Análise regional da frequência e distribuição temporal das tempestades na Região Metropolitana de Belo Horizonte – RMBH. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.3, n. 4, p.73-87, 1998.

PINKAYAN, S. Conditional probabilities of occurrence of Wet and Dry Years Over a Large Continental Area. Colorado: State University, Boulder-Co, *Hidrology Papers*, v.12, 1966.

PONCIANO, J.L.C. *Águas Pluviais: análise de problemas de novos loteamentos, estudo de caso do setor habitacional Arniqueira– DF*. Brasília: UNB. 90p. Projeto Final, 2016.

PRODABEL - Empresa de Informática e Informação do Município de Belo Horizonte S/A. Base Cartográfica, 2011.

QUEIROZ, M.A. *Avaliação de tendências em séries de precipitação diária máxima anual na faixa central do estado de Minas Gerais*. Belo Horizonte: UFMG.184p. Dissertação de Mestrado, 2013.

RAIMUNDO, C.C., SANSIGOL, C.A., MOLION, L.C.B. Tendências das classes de precipitação na Região Metropolitana de São Paulo. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.29, n.3, p. 397 - 408, 2014.

RAMOS, M. H. D.; VIANA, C. S.; BAPTISTA, M. B. - *Classificação dos solos de Belo Horizonte segundo grupos hidrológicos do US Soil Conservation Service*. Publicado nos anais do XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Belo Horizonte, 1999.

RAUCH W.; LAGHARI A. N.; TOFFOL S. Are extreme rainfall intensities more frequent? Analysis of trends in rainfall patterns relevant to urban drainage systems. *Water Science & Technology*, v. 59, n. 9, p. 1769-1776, 2009.

RECIFE (Município). Lei no 18.112, de 12 de janeiro de 2015. Dispõe sobre a melhoria da qualidade ambiental das edificações por meio da obrigatoriedade de instalação do "telhado verde", e construção de reservatórios de acúmulo ou de retardo do escoamento das águas pluviais para a rede de drenagem e dá outras providências. Recife: DOM, 13 jan. 2015.

REIS, R.J., GUIMARÃES, D.P., COELHO, C.W.G.A., PAIXÃO, G.M., NASCIMENTO, J.S., SIMÕES, T.K.S.L. Determinação das Áreas de Potencial de Riscos de Precipitações Intensas em Belo Horizonte. *Caderno de Geografia*, v. 14, n. 23, p. 127-134, 2004.

ROOTZÉN, H.; KATZ, R. W. Design life level: Quantifying risk in a changing climate. *Water Resources Research*, v. 49, n. 9, p. 5964-5972, 2013.

ROSA, D.W.B. *Resposta hidrológica de uma bacia hidrográfica urbana à implantação de técnicas compensatórias de drenagem urbana - Bacia do Córrego do Leitão, Belo Horizonte, Minas Gerais*. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos. Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

ROSSMAN, L. A. Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1. King Drive Cincinnati, OH, USA: U. S. Environmental Protection Agency, 2015.

RUHL, J. B.; SALZMAN, J. Climate change meets the Law of the Horse. *Duke Law J.*, v. 62, p. 975–1026, 2013.

- SALVIANO, M.F., GROppo, J.D., PELLEGRINO, G.Q. Análise de Tendências em Dados de Precipitação e Temperatura no Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 31, p. 64-73, 2016.
- SAMPLE, D. J.; BARLOW, S. Best Management Practice, Fact Sheet 8. Infiltration Practices, 2013.
- SAMPLE, D. J.; DOUMAR, L. Best Management Practice, Fact Sheet 5. Vegetated Roofs, 2013a.
- SAMPLE, D. J.; DOUMAR, L. Best Management Practice, Fact Sheet 7. Permeable Pavement, 2013b.
- SAMPLE, D. J.; BARLOW, S. Best Management Practice, Fact Sheet 8. Infiltration Practices, 2013c.
- SAMPLE, D. J.; DOUMAR, L. Best Management Practice, Fact Sheet 6. Rainwater Harvesting, 2013d.
- SAMPLE, D. J.; LIU, J. Best Management Practice, Fact Sheet 9. Bioretention, 2013.
- SANCHES, F.O.; VERDUM, R.; FISCH, G. Estudo de tendência de chuvas de longo prazo. *Ambiente & Água*, v. 8, n. 3, p.214-228, 2013.
- SANTOS, J. F.; PORTELA, M. M. *Tendências em Séries de Precipitação Mensal em Portugal Continental: Aplicação do Teste de Mann-Kendall*. In: XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (CDROM), São Paulo, 2007.
- SANTOS (Município). Lei Complementar no 913, de 21 de dezembro de 2015. Concede incentivo fiscal à implantação de “coberturas verdes” nos edifícios do município, e dá outras providências. Santos: DOM, 2015.
- SANTOS C.A.C.; BRITO J.I.B.; RAO T.V.R.; MENEZES H.E.A. Tendência dos índices de precipitação no estado do Ceará. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.24, n.1, P.39-47, 2009.
- SANTOS, C.A.C.; SATYAMURTY, P.; SANTOS, E.M. Tendências de índices de extremos climáticos para a região de Manaus-AM. *Acta Amazônica*, v. 42, n.3, p.329-333, 2012.
- SAYERS, P.; GOULDBY B. P.; SIMM J. D.; MEADOWCROFT, I.; HALL, I. Risk, Performance and uncertainty in flood and coastal defence – A review. *R&D Technical report FD2302/TR1*, v. 88, 2003.
- SCHÄR, C.; VIDALE, P. L.; LÜTHI, D.; FREI, C.; HÄBERLI, C.; LINIGER, M.; APPENZELLER, C. The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature*, v. 427, p. 332–336, 2004.
- SCHUELER, T. R. Controlling urban runoff: A practical manual for planning and designing urban BMPs. Water Resources Publications, 1987.

- SCHWARZ, G. Estimating the Dimension of a Model. *The Annals of Statistics*, v. 6(2), p.461–464, 1978.
- SEARCY, J. K.; HARDISON, C. H. *Double-mass curve*. Manual de Hydrology: Part 1, General Surface – Water techniques, USGS, USA, 1960.
- SEMENOV, V.A.; BENGTSSON, L. Secular trends in daily precipitation characteristics: greenhouse gas simulation with a coupled AOGCM. *Climate Dynamics*, v.19, p. 123–140, 2002.
- SEEBLA - Serviços de Engenharia Emilio Baumgart Ltda. *Memória Justificativa dos Estudos Hidrológicos do Vale do Ribeirão Arrudas*. Belo Horizonte, 1982.
- SHANG, H., YAN, J., GEBREMICHAEL, M., AYALEW, S.M. Trend Analysis of Extreme Precipitation in the Northwestern Highlands of Ethiopia with a Case Study of Debre Markos. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2011. DOI:10.5194/hess-15-1937-2011.
- SHAW, R.; SHARMA, A. Beyond Resilience Mapping. In *Climate and Disaster Resilience in Cities* (Community, Environment and Disaster Risk Management, v.6), *Emerald Group Publishing Limited*, p.281-287, 2011.
- SHOURASENI, S.R.; ROBERT, C.B.J.R. Trends in extreme daily precipitation indices in India. *International Journal of Climatology*, v.24, p.457–466, 2004.
- SIGRIST, F., KÜNSCH, H.R., STAHEL, W. A dynamic non-stationary spatio-temporal model for short term prediction of precipitation. *Ann. Appl. Statist*, v. 6, p. 1452-1477, 2012.
- SILVA, T. F. G. *Suivi et modélisation de la dynamique des cyanobactéries dans les lacs urbains ausein de leur bassin versant*. 2014. 289 p. Tese (Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 2014.
- SILVA, P.O.; CABRAL, J.J.S.P. Atenuação de Picos de Vazão em Área Problema: Estudo Comparativo de Reservatórios de Detenção em Lote, em Logradouros e em Grande Área da Bacia. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, n. 2, p.7-18, jun. 2014.
- SILVEIRA, A.L.L. *Hidrologia Urbana no Brasil*, in: BRAGA, B.; TUCCI, C.E.M.; TOZZI, M., *Drenagem Urbana - Gerenciamento, Simulação, Controle*, ABRH Publicações nº 3, Editora da Universidade, Porto Alegre, 1998.
- SOUZA, J. *A Expansão Urbana de Belo Horizonte e da Região Metropolitana de Belo Horizonte: O Caso Específico do município de Ribeirão das Neves*. Belo Horizonte: UFMG. 194p. Tese de Doutorado, 2008.
- SOUZA, D.O., NASCIMENTO, M.G., ALVALÁ, R.C.S. Influência do Crescimento Urbano sobre o Microclima de Manaus e Belém: Um Estudo Observacional. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 8, n. 4, 2015.

- STEFFEN, W.; BROADGATE, W.; DEUTSCH, L. GAFFNEY, O.; LUDWIG, C. The trajectory of the Anthropocene: The great acceleration. *Anthropocene Rev.*, v. 2, p. 81–98, 2015.
- SUN, X.; MEIN, R. G.; KEENAN, T.D.; ELLIOT, J.F. Flood estimation using radar and raingauge data. *Journal of Hydrology*, v.239, p. 4–18, 2000.
- TABORGA, J. T., Práticas Hidrológicas, TRANSCON Consultoria Técnica Ltda., Rio de Janeiro-RJ, 1974.
- TEIXEIRA, M. L C.; MOURA, P. M.; AGUIAR, I. M. C. *Estimativa de Área Impermeável do Município de Belo Horizonte*. Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 2014.
- TOMINAGA, E.N.S. *Urbanização e cheias: medidas de controle na fonte*. São Paulo: USP.137p. Dissertação de Mestrado, 2013.
- TORETI A.; XOPLAKI E.; MARAUN D.; KUGLISTSCH F.G.; WANNER H. LUTERBACHER J. Characterization of extreme winter precipitation in Mediterranean coastal sites and associated anomalous atmospheric circulation patterns. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, v.10, p.1037-1050, 2010.
- TRENBERTH, K. E.; JONES, P. D.; AMBENJE, P.; BOJARIU, R.; EASTERLING, D.; KLEIN TANK, A.; et al. Observations: surface and atmospheric climate change. In: SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, M.; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K. B.; et al. (Eds.). *Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2007. p. 235-336.
- TUCCI, C. E. M.; BRAGA, B. *Clima e Recursos Hídricos no Brasil*, 1a ed. Porto Alegre: ABRH, 2003. 348 p.
- TUCCI, C. E. M.; MELLER, A. *Regulação das Águas Pluviais Urbanas*. Rega, Porto Alegre, v. 4, n. 1, p. 75-89, 2007.
- ULBRICH, U.; FINK, A. H.; KLAWA, M.; PINTO, J. G. Three extremes storms over Europe in December 1999. *Weather*, v. 56, p. 70-80, 2001.
- URBONAS, B.; STAHR, P. *Stormwater Best Management Practices and Detention*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. 450p. 1993.
- US ARMY CORPS OF ENGINEERS. *The Hydrologic Modeling System (HEC-HMS)*. Hydrologic Engineering Center, 1974. Disponível em: <<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>>. Acesso em: 20 de ago. 2016.
- VAN DEN BESSALAR, E.J.M.; KLEN-TANK, A.M.G.; BUISSAND, T.A. Trends in European precipitation extremes over 1951–2010. *International Journal of Climatology*, v. 33, p. 2682– 2689, 2013.

VERSINI, Pierre-A.; JOUVE, P.; BERTHIER, E.; GOUELLO, B. de. Use of green roofs to solve storm water issues at the basin scale - Study in the Hauts-de-Seine County (France). *Urban Water Journal*, 2015.

VILLARINI G.; SMITH J. A.; SERINALDI F.; BALES J.; BATES P. D.; KRAJEWSKI W. F. Flood frequency analysis for nonstationary annual peak records in an urban drainage basin. *Advances in Water Resources*, v. 32, p. 1255-1266, 2009.

VILLARINI, G.; SMITH J. A.; NLETEKOS A. A.; SCHWARZ, U. Annual maximum and peaks-over-threshold analyses of daily rainfall accumulation for Austria. *Journal of Geophysical Research*, v. 116, D05103, 2011.

VILLELA, S.M.; MATTOS, A. Hidrologia aplicada. Editora McGraw-Hill do Brasil, 245p, São Paulo, 1975.

WALSH, T.C.; POMEROY, C.A.; BURIAN, S.J. Hydrologic modeling analysis of a passive, residential rainwater harvesting program in an urbanized, semi-arid watershed. *Journal of Hydrology*, v. 508, p.240-253, 2014.

WATT, W.E.; WATERS, D.; MCLEAN, R. Climate Variability and Urban Stormwater Infrastructure in Canada: Context and Case Studies. *Toronto - Niagara Region Study Report and Working Paper Series*, 30p, 2003.

WHEATER, H.S.; ISHAM, V.S.; COX, D.R.; CHANDLER, R.E.; KAKOU, A.; NORTHROP, P.J.; OH, L., ONAF, C.; RODRIGUEZ, C. Iturbe Spatial-temporal rainfall fields: modelling and statistical aspects *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, v.4, p. 581–601, 2000.

WIENS, J. A.; HAYWARD, G. D.; SAFFORD, H. D.; GIFFEN, C. eds. *Historical Environmental Variation in Conservation and Natural Resource Management*. 352 p. Wiley-Blackwell, Hoboken, N. J, 2012.

WILKEN, P.S. Engenharia de drenagem superficial. São Paulo: CETESB 477p, 1978.

WILLEMS P.; ARNBJERG-NIELSEN K.; OLSSON J.; NGUYEN V.T.V. Climate change impact assessment on urban rainfall extremes and urban drainage: methods and shortcomings. *Atmos. Res.*, v.103, p.106-118, 2012.

WILLETT, K. M.; JONES, P. D.; GILLETT, N. P.; THORNE, P. W. Recent changes in surface humidity: development of the HadCRUH dataset. *Journal of Climate*, v.21, p. 5364-5383, 2008.

WOLKOVICH, E. M.; COOK, B. I.; MCLAUCHLAN, K. K.; DAVIES, T. J. Temporal ecology in the Anthropocene. *Ecol. Lett.*, v. 17(11), p. 1365–1379, 2014.

WOODS BALLARD, B.; WILSON, S.; UDALE-CLARKE, H.; ILLMAN, S.; SCOTT, T.; Ashley, R.; Kellagher, R. The SuDS Manual, C753, CIRIA, London, UK, 2015. Disponível em: http://www.ciria.org/Memberships/The_SuDS_Manual_C753_Chapters.aspx. Acesso em: 10 ago. 2017.

WSUD – Water Sensitive Urban Design. 1999. Estudo de caso: Lynbrook Estate. Disponível em: <http://wsud.melbournewater.com.au/>. Acesso em: 14 jan 2018.

WSUD – Water Sensitive Urban Design. 1999. Estudo de caso: Carpark – Ricketts Point. Disponível em: <http://wsud.melbournewater.com.au/>. Acesso em: 14 jan 2018.

XAVIER, T. de M. B.S. *Tempo de Chuva – Estudos Climáticos e de Previsão para o Ceará e Nordeste Setentrional*, ABC Editora, Fortaleza-Ceará, 478 p. 2001.

XU, Z. X.; TAKEUCHI, K.; ISHIDAIRA, H. Monotonic trend and step changes in Japanese precipitation. *Journal of Hydrology*, v. 279, p. 144-150, 2003.

XU, Z. X.; ZHANG, L.; RUAN, B. Q. Analysis on the spatiotemporal distribution of precipitation in the Beijing Region. *Arid Land Geography*, v. 29 (2), p. 186-193, 2006.

ZHANG X.; YANG F. RclimDex (1.0) User Guide. *Climate Research Branch Environmental Canada*. Downsview (Ontario, Canada), 2004. 22p.

ZHANG, X., ZWIERS, F. W., HEGERL, G. C., LAMBERT, F. H., GILLET, N. SOLOMON, S., STOTT, P. NOZAWA, T. Detection of human influence on twentieth-century precipitation trends. *Nature*, v. 448, p. 461–465, 2007.

ZOLINA, O. *Changes in intense precipitation in Europe*. In: Kundzewicz, Z.W. (Ed.), *Changes in Flood Risk in Europe. IAHS Special Publication 10*, p. 97–120 (Chapter 6). 2012.

ZOLINA, O. Multidecadal trends in the duration of wet spells and associated intensity of precipitation as revealed by very dense observational network. *Env. Res. Lett.*, v.9, 025003 2014.

ZUFFO, A. C. Equações de chuvas são eternas? XXI Congresso Latino Americano de Hidráulica. São Pedro/SP, 2004.

APÊNDICE A

Tabela com os eventos de alagamentos registrados na cidade de Belo Horizonte.

Tabela A.1 – Informações associadas aos eventos de alagamentos registrados no período de 1979 a 2014.

Data	Local	Evento	Fonte
21 /10/2014	Bairro Água Branca / Contagem	Alagamento	Hoje em Dia
	Av. Tereza Cristina / Oeste	Alagamento	
	Av. Tereza Cristina / Oeste	Transbordamento do arrudas	
2/4/2014	Aeroporto da Pampulha / Pampulha	Alagamento	Uol Notícias
	Av. Antônio Carlos / Pampulha	Alagamento	
	Rio Arrudas, Palmares / Nordeste	Transbordamento do arrudas	
	Rio Arrudas, Ribeiro de Abreu / Nordeste	Transbordamento do arrudas	Folha de São Paulo
3/4/2014	Av. Prudente de Moraes / Centro-Sul	Alagamento	Hoje em Dia
	Av. Silva Lobo / Oeste	Inundação	
	Bairro Lourdes / Centro-Sul	Alagamento	
	Bairro Novo Aarão Reis / Norte	Inundação	
	Bairro Prado / Oeste	Inundação	
18/01/2014	Túnel Ponteio / Sul	Alagamento	MGTV
	Bairro Cruzeiro / Sul	Alagamento	
22/12/2013	Av. Cristiano Machado / Pampulha	Inundação	Estado de Minas
	Bairro Ribeiro de Abreu / Nordeste	Inundação	
12/12/2013	Bairro Durval de Barros / Contagem	Alagamentos em toda a BH	Hoje em Dia
	Bairro Riacho das Pedras / Contagem	Alagamentos em toda a BH	
	Bairro Glória / Contagem	Alagamentos em toda a BH	
	Bairro Inconfidentes / Contagem	Alagamentos em toda a BH	
	Av. Tereza Cristina / Oeste	Alagamentos em toda a BH	
	Av. Bias Fortes / Centro-Sul	Alagamentos em toda a BH	
	Via Expressa / Noroeste	Alagamentos em toda a BH	
	Bairro Castelo / Pampulha	Alagamentos em toda a BH	
9/4/2013	Av. Antônio Carlos / Pampulha	Alagamento	TV Alterosa
	Bairro Prado / Oeste	Alagamento	
	Av. Sebastião de Brito / Norte	Alagamento	
7/1/2013	Av. Francisco Sá / Oeste	Inundação e alagamentos	Hoje em Dia
	Bairro Planalto / Pampulha	Inundação e alagamentos	
	Av. Bias Fortes / Centro-Sul	Inundação e alagamentos	
	Bairro Bonfim / Noroeste	Inundação e alagamentos	
	Av. Cristiano Machado / Venda Nova	Inundação e alagamentos	
29/12/2012	Av. Francisco Sá / Oeste	Alagamento	Hoje em Dia
	Região Barreiro		TUDO (O Portal de Notícias da VB Comunicação)
	Região Centro-Sul		

Tabela A.1 – Continuação

Data	Local	Evento	Fonte
	Região Noroeste		
15/11/2012	Av. Silva Lobo / Oeste	Alagamento	Estado de Minas
	Av. Francisco Sá / Oeste	Alagamento	
	Av. Cristiano Machado / Nordeste	Alagamento	
	Av. Bernardo Vasconcelos / Nordeste	Alagamento	
	Av. Heráclito Mourão de Miranda / Pampulha	Alagamento	
	Av. Severino Ballesteros Rodrigues / Noroeste	Alagamento	
	Av. Tereza Cristina / Oeste	Alagamento	
7/11/2012	Centro / Contagem	Alagamento	Estado de Minas
	Centro / Centro-Sul	Alagamento	
	Bairro Santa Terezinha / Pampulha	Alagamento	
	Bairro Serrano / Noroeste	Alagamento	
5/11/2012	Av. Pedro I com Av. Vilarinho / Venda Nova	Alagamento	Belo Horizonte de A a Z
	Av. Antônio Carlos com Av. Pedro II / Noroeste	Alagamento, Enxurrada	
15/03/2012	Av. Cristiano Machado / Nordeste	Alagamento	G1 Minas Gerais
30/01/2012	Via Expressa / Noroeste	Alagamento	Estado de Minas
	Av. Olinto Meireles / Barreiro	Alagamento	
	Av. Cristiano Machado / Nordeste	Alagamento	
28/01/2012	bairro São Benedito / Santa Luzia	Alagamento	Estado de Minas
	Av. Vilarinho / Venda Nova	Alagamento	
02/01/2012	Av. Bias Fortes / Centro-Sul	Alagamento	Estado de Minas
	Bairro Santa Tereza / Leste	Alagamento	
30/12/2011	Av. Bernardo Vasconcelos / Nordeste	Inundação	Estado de Minas
	Av. Cristiano Machado / Nordeste	Inundação/Alagamento	G1
	Bairro Horto Florestal / Leste		
	Região Venda Nova		
29/12/2011	Região Leste	Chuva intensa	Folha.com
	Região Nordeste	Chuva intensa	
	Região Norte	Chuva intensa	
	Região Oeste	Chuva intensa	
27/12/2011	Betim	Deslizamento	Folha de São Paulo
	Contagem	Desabamento de muro	
	Região Oeste	Alagamentos	
	Região Pampulha	Inundações	

Tabela A.1 – Continuação

Data	Local	Evento	Fonte
15/12/2011	Av. Cristiano Machado / Nordeste	Inundação/alagamento	G1 Minas Gerais
	Bairro Primeiro de Maio / Norte	Alagamento	
	Bairro São Gabriel / Nordeste		
11/12/2011	Av. Amazonas / Centro-Sul	Alagamento	G1 Minas Gerais
	Av. Bias Fortes / Centro-Sul	Alagamento	
	Av. Francisco Sá / Oeste	Alagamento	
	Av. Silva Lobo / Oeste	Alagamento	
	Av. Barão Homem de Melo / Oeste	Alagamento	G1 Minas Gerais
	Bairro São Pedro / Venda Nova	Acidente de trânsito	
	Av. Vilarinho / Venda Nova	Alagamento	
Bairro Primeiro de Maio / Norte	Alagamento		
28/02/2011	Savassi / Centro-Sul	Alagamento	IG Minas Gerais
	Bairro Buritis / Oeste	Alagamento	
15/01/2011	Ribeirão Arrudas / Oeste	Transbordamento do arrudas	Folha de São Paulo
	Av. Antônio Carlos / Pampulha	Alagamento	
	Região Barreiro	Alagamento	
6/12/2010	Av. Tereza Cristina / Oeste e Contagem	Transbordamento do arrudas	Itatiaia
23/11/2010	Av. Cristiano Machado / Norte	Inundação	Uol Notícias
	Av. Sebastião de Brito / Norte	Alagamento	
	Vila Fazendinha / Nordeste	Alagamento	
3/3/2010	UFMG / Pampulha	alagamento	Destaknews
15/01/2010	Bairro Buritis / Oeste	Alagamento e chuva de granizo	R7 notícias
	Bairro Nova Suíça / Oeste	Alagamento e chuva de granizo	
	Bairro Barroca / Oeste	Alagamento e chuva de granizo	
	Bairro Nova Granada / Oeste	Alagamento e chuva de granizo	
7/10/2009	Bairro Cidade Jardim / Centro-Sul		ESTADO DE MINAS
	Bairro Prado / Oeste		
	Bairro Lourdes / Centro-Sul		
	Bairro Horto / Leste		
	Bairro Renascença / Nordeste		
22/01/2009	Barreiro	Alagamento	Portal UAI
	Vila Dom Bosco / Contagem	Alagamento/inundação	
	Vila São Paulo / Contagem	Alagamento/inundação	
	Vila Elisabeth / Contagem	Alagamento/inundação	
18/12/2008	UFMG / Pampulha	Alagamento	UFMG

Tabela A.1 – Continuação

Data	Local	Evento	Fonte
15/12/2008	Contagem	Desabamento de muro	Gazeta do Povo
	Ribeirão das Neves	Inundações/risco de deslizamentos/desabamentos	
	Santa Luzia	Inundações/risco de Deslizamentos/desabamentos	
	Córrego do Onça / Norte	Inundação	Folha da Região
	Bairro São Tomás / Pampulha	Inundação	
17/09/2008	Venda Nova / Norte	Destelhamento	Uol Notícias
	Região Oeste	Prejuízos (granizo)	
	Região Noroeste	Prejuízos (granizo)	
	Betim	Desabamento	
	Contagem	Desabamento	
26/11/2007	Av. Silviano Brandão / Leste	Alagamento	Folha de São Paulo
	Contagem	Desabamento	
	Ibirité	Desabamento	
30/11/2006	Bairro Novo Aarão Reis / Norte	Alagamento	Terra
	Região Leste	Inundações/desabamentos	G1 Brasil
	Região Noroeste	Inundações/desabamentos	
29/11/2006	Região Leste	Inundações/desabamentos	G1 Brasil
	Região Noroeste	Inundações/desabamentos	
4/12/2003	Aeroporto da Pampulha / Pampulha	Alagamento	Folha de São Paulo
	Nova Lima	Deslizamento	
16/01/2003	Morro das Pedras / Oeste	Deslizamento de barraco	Época
	bairro Industrial / Contagem	Deslizamentos	Notícias Terra
	Morro do Cafezal Sul	Deslizamentos	
	Bairro Taquaril / Leste	Deslizamentos	
18/12/2000	Córrego do Onça / Norte	Inundação	Folha de São Paulo
	córrego da Pampulha / Pampulha	Inundação	
	BH	Alagamentos em toda a BH	Globo.com
	Contagem	Deslizamento de barraco	
28/01/2000			
24/12/1999	Córrego Cachoeirinha / Leste	Inundação	Diário do Grande ABC
	BH	Alagamentos em toda a BH	Estado de Minas - Trabalho
30/10/1998	BH		Estado de Minas - Trabalho
4 /01/1997	RMBH toda	Alagamentos/inundações em toda BH	Folha de São Paulo

Tabela A.1 – Continuação

Data	Local	Evento	Fonte
14/12/1995	RMBH toda	Alagamentos/inundações em toda BH	Folha de São Paulo
9/10/1995	Região Leste	Desabamentos e enxurradas	Folha de São Paulo
24/1/1992	RMBH toda	Alagamentos/inundações em toda BH	Estado de Minas - Trabalho
28/01/1991	RMBH toda	Alagamentos/inundações em toda BH	Estado de Minas - Trabalho
28/11/1990	RMBH toda	Alagamentos/inundações em toda BH	Estado de Minas - Trabalho
16/12/89	Bairro Sagrada Família / Leste	Asfalto cedeu	Sudecap
	Bairro concórdia / Nordeste	Desabamento de barranco	
	Bairro Cabana / Oeste	Desabamento de barranco	
	Bairro Nova Granada / Oeste	Desabamento de barranco	
	Bairro Cabana / Oeste	Desabamento de barraco	
	Bairro Bandeirantes / Pampulha	Desabou residência	
	Bairro Washington / Barreiro	Desabamento de barraco	
	Parque São João / Contagem		
	Favela Ventosa / Oeste	Desabamento de barraco	
	Bairro Santo Tomás de Aquino / Pampulha	Inundou casas	
	Bairro Marajó / Oeste	Desabou residência	
	Bairro Nova Cintra / Oeste	Desabamento de barraco	
	Bairro Santa Efigênia / Leste	Desabou residência	
	Av. José Cândido da Silveira / Leste	Desabamento de barraco	
	Bairro São Lucas / Centro-Sul	Desabamento de barraco	
	Bairro Nova Cintra / Oeste	Desabamento de barraco	
	Bairro Gutierrez / Oeste	Deslizamento de barraco	
Bairro Vera Cruz / Leste	Desabou residência		
14/12/89	Vila Cemig / Barreiro	Muro de arrimo desabou	Sudecap
13/12/89	Bairro Santo Antônio / Centro-Sul	Barraco desabou	Sudecap
6/11/1989	Bairro Santo André / Noroeste	Inundação	Sudecap
	Bairro Pirajá / Nordeste	Inundação	
	Bairro Sagrada Família / Leste	Inundação	
	Av. José Cândido da Silveira / Leste	Inundação	
	Bairro Sagrada Família / Leste	Inundação	
	Bairro União / Nordeste	Inundação	
	Av. Nossa Senhora da Saúde / Nordeste	Inundação	
	Av. Belmonte / Nordeste	Inundação	
Bairro União / Nordeste	Inundação		
15/03/89	Bairro Glória / Contagem	Destruíu ruas	Sudecap

Tabela A.1 – Continuação

Data	Local	Evento	Fonte
8/2/1989	São Vicente	Barraco desabou	Sudecap
	Vila São Vicente / Noroeste	Barraco desabou	
30/09/88	Bairro Santa Amélia / Pampulha	Inundou devido aos bueiros entupidos	Sudecap
	Bairro Minas Caixa / Venda Nova	Inundou	
	Bairro Jardimópolis / Oeste	Inundou	
	Bairro concórdia / Nordeste	Inundou	
17/03/88	Av. Antônio Carlos / Pampulha	Subiu 1 metro	Sudecap
	Praça Vaz de Mello/Lagoinha	Alagou	
	Viaduto da BR 262 / Nordeste	Transbordou, inundou	
	Córrego Cachoeirinha / Norte	Inundou casas	
	Bairro Suzana / Pampulha	Inundou 25 casas	
		Inundou casas	
Inundou escola			
8/2/1988	Bairro Suzana / Pampulha	Inundação	Sudecap
14/12/87	Bairro Independência / Barreiro	Inundou casas	Sudecap
	Região Barreiro	Inundou casas	
	Av. Tereza Cristina / Barreiro	Inundou casas	
	Bairro Betânia / Oeste	Inundou casas	
9/12/1987	Praça Vaz de Mello / Venda Nova	Arrastou carro	Sudecap
	Av. Prudente de Moraes	Arrastou carro	
	Proximidades do Zoológico / Pampulha	Inundação	
	Centro / Centro-Sul	Arrastou 5 carros	
	Av. Olegário Maciel / Centro-Sul	Inundação	
	Rua Tupis / Centro-Sul	Alagamento	
6/12/1987	Bairro Nova Suíça / Oeste	Inundou casas	Sudecap
	Av. Santos Dumont / Centro	Inundou porão	
	Favela São Domingos / Nova Granada	Inundou casas	
11/3/1987	Bairro Jardim América / Oeste	Inundação	Sudecap
8/3/1987	Bairro Cabana / Oeste	Inundou casas	Sudecap
	Bairro Palmeiras / Oeste	Inundou casas	
	Bairro Marajó / Oeste	Inundou casas	
	Bairro Betânia / Oeste	Inundou casas	
27/12/86	Bairro Bonsucesso / Barreiro	Desabou barraco	Sudecap
26/12/86	Bairro Alto Vera Cruz / Leste	Desabou barraco	Sudecap
	Bairro São Pedro/ Centro Sul	Muro de arrimo desabou	
	Favela do Cafezal / Centro-Sul	Desabou barraco	

Tabela A.1 – Continuação

Data	Local	Evento	Fonte
12/12/1986	Av. do Contorno com Prof. Moraes	Estorou rede de esgoto	Sudecap
	Savassi / Centro-Sul	Inundou casas	
	Av. Prudente de Moraes / Centro-Sul	Inundou casas, lojas e prédios	
	Av. Belém / Leste	Inundou 8 casas	
	Rua Tupis / Centro-Sul	Inundou loja	
	Bairro Saudade / Leste	Inundou casa	
	Bairro Serra /Centro-Sul	Levou carro	
	Bairro Alpes / Oeste	Inundou casa	
	Bairro Serra /Centro-Sul	Inundou prédio	
	Av. Jequitinhonha / Leste	Entupiu galeria com alagamento	
	Rua da Bahia (Palácio da Liberdade) / Centro-Sul	Águas provocaram início	
	Rua Rio Grande do Norte / Centro-Sul	Inundou prédio	
	Bairro Santo Antônio / Centro-Sul	Levou carro	
	Av. Antônio Carlos / Pampulha	Levou moto	
	Bairro São Geraldo / Leste	Arrastou carro	
	Cidade Jardim / Centro Sul	Arrastou carro	
	Bairro Caetano Furquim / Leste	Desabamento de barraco	
	Av. Prudente de Moraes / Centro-Sul	Inundou casas	
	Bairro Sion / Centro-Sul	Muro de prédio desabou	
	Bairro São João / Betim	Casa desabou	
	Bairro São Francisco / Pampulha	Inundou casa	
	Bairro Serra /Centro-Sul	Inundou casa	
	Bairro Santo Antônio / Centro-Sul	Desabou barranco e muro	
	Bairro Alto Vera Cruz / Leste	Muro desabou	
	Bairro Vera Cruz / Leste	Levou ponte	
	Bairro Santo Antônio / Centro-Sul	Inundou apto	
	Centro / Centro-Sul	Arrastou carro	
	Bairro Funcionários / Centro-Sul	Arrastou carro	
	Av. Silva Lobo / Oeste	Arrastou carro	
	Av. Cristiano Machado (com Av. Dom Leme) / Nordeste	Arrastou carro	
bairro Floresta / Leste	Inundou casa		
Centro / Centro-Sul	Arrastou carro		
Av. Jequitinhonha / Leste	Inundou casa		
Bairro Grajaú / Oeste	Desabamento de barraco		
Bairro Serra /Centro-Sul	Desabamento de barraco		
11/1/1986	Bairro Santa Tereza / Leste	Desabamento muro de arrimo	Sudecap
	Bairro Vila São José / Noroeste	Desabamento	
10/1/1986	Av. Silviano Brandão / Leste	Inundação	Sudecap
	Savassi (Praça da Savassi) / Centro-Sul	Inundação	
	Av. Augusto de Lima / Centro-Sul	Inundação	

Tabela A.1 – Continuação

Data	Local	Evento	Fonte
9/1/1986	Bairro Boa Vista / Leste	Inundação	Sudecap
18/03/85	Via Expressa / Contagem	Transbordou	Sudecap
	Av. Pedro II (Rio Arrudas) / Centro-Sul	Saiu tampa do bueiro	
	Bairro São José / Noroeste	Enchente	
	Via Expressa / Contagem	Transbordou	
	Av. Tereza Cristina (fim)/ Barreiro	Enchente	
26/02/85	Bairro Suzana / Pampulha	Inundou casas	Sudecap
29/01/85	Bairro Alto Vera Cruz / Leste	Transbordou	Sudecap
26/01/85	Av. dos Andradas (Rio Arrudas) / Leste	Cratera de 15 m de diâmetro por 8 de profundidade	Sudecap
	Bairro Primeiro de Maio (Córrego do Onça) / Norte	Erosão com deslizamento de barraco	
	Av. Afonso Pena / Centro-Sul	Enchente	
7/1/1985	Av. Jequitinhonha / Leste	Inundação	Sudecap
17/12/84	Bairro Nova Cintra (Rio Arrudas) / Oeste	Derrubou ponte	Sudecap
	Vila Aeroporto (Córrego do Onça) / Norte	Inundou casas	
	Bairro São Tomás (Córrego do Onça) / Pampulha	Inundou casas	
	Bairro São Bernardo (Rio Arrudas) / Norte	Enchente	
	Bairro Santa Efigênia / Leste	Inundação	
	Rua Carijós (Rio Arrudas) / Centro-Sul	Inundação	
	Elevado Castelo Branco (Rio Arrudas) / Centro-Sul	Inundação	
	Rua Rio Grande do Sul (Rio Arrudas) / Centro-Sul	Inundação	
	Av. Cristiano Machado / Nordeste	Enchente, levou carros	
	Terminal Rodoviário até Vila Itaú (Rio Arrudas) / Centro até Contagem	Enchente	
	terminal Rodoviário (Rio Arrudas) / Centro	Enchente	
	Av. Tereza Cristina (Rio Arrudas) / Oeste	Enchente	
	Cidade Industrial / Contagem	Enchente	
	Bairro Nova Cintra / Oeste	Inundou casas	
16/12/84	Bairro Ribeiro de Abreu (Córrego do Onça) / Nordeste	Enchente	Sudecap
4/12/1984	Bairro Vera Cruz Saudade/ Vera Cruz / Leste	Inundou lojas	Sudecap
	Av. do Contorno (com Rua Carijós) / Centro-Sul		
10/12/1983	Bairro Primeiro de Maio (Rio Arrudas) / Norte	Inundação	Sudecap

Tabela A.1 – Continuação

Data	Local	Evento	Fonte
7/12/1983	Bairro Vila União / Leste	Inundou casas	Sudecap
	Av. do Canal / Oeste	Córrego transbordou	
	bairro Santa Efigênia / Leste	Alagamento	
	Av. Cristiano Machado (com Rua Jacuí) / Leste	Alagamento	
	Bairro Cachoeirinha / Nordeste	Inundou casas	
	Bairro da Graça / Nordeste	Inundou casas	
	Bairro São Cristóvão / Noroeste	Alagamento	
	Av. Petrolina (Horto) / Leste	Alagamento	
	Av. Silvano Brandão (Rio Arrudas) / Leste	Alagamento	
	Av. Antônio Carlos / Pampulha	Alagamento	
	Bairro São Paulo / Nordeste	Inundou casas	
	Bairro Suzana / Pampulha	Inundou casas	
	Bairro Aparecida / Noroeste	Inundou casas	
	Via Expressa / Contagem	Alagamento	
1/3/1983	Av. dos Andradas (Rio Arrudas) / Leste	Inundação	Sudecap
	Bairro Santa Mônica / Pampulha	Enchente	
	Av. do Contorno / Centro-Sul	Inundação	
11/2/1983	Bairro Venda Nova / Venda Nova	Destruiu barracos	Sudecap
21/01/83	Av. Vilarinho / Venda Nova	Destruiu barracos	Sudecap
4/1/1983	Bairro Santa Terezinha / Pampulha	Inundação	Sudecap
	Bairro Gameleira (Conjunto Cristina) / Oeste	Enchente	
	Bairro Santa Tereza (Favela Perela) / Leste	Enchente	
	Bairro Sion / Centro-Sul	Inundação	
2/1/1983	Av. Tereza Cristina (Favela Suvaco da Cobra) / Oeste	Inundação	Sudecap
	Bairro Primeiro de Maio / Norte	Enchente	
	Av. Olegário Maciel / Centro-Sul	Enchente	
	Av. do Contorno com Prof. Moraes / Centro-Sul	Enchente	
	Av. do Contorno com Rua Curitiba (ponte) / Centro-Sul	Destruiu gradil protetor	
	Av. dos Andradas com Rua dos Guaicurus (ponte) / Leste	Destruiu gradil protetor	
	Bairro Vera Cruz / Leste	Rompeu sistema de contenção	
	Av. dos Andradas com Av. Francisco Sales / Leste	Guarda corpo de ponte destruído	
	Av. do Contorno (Rio Arrudas) / Centro-Sul		
	Bairro Santa Efigênia / Leste	Inundação	
	Lagoa da Pampulha / Pampulha	Alagou	
	Bairro Jardim Alvorada / Noroeste	Enchente	
Bairro Santa Efigênia / Leste	Enchente		

Tabela A.1 – Continuação

Data	Local	Evento	Fonte
2/1/1983	Av. dos Andradas (Praça da Estação) / Centro	Inundação	Sudecap
	bairro Nova Suíça (Rio Arrudas)/ Oeste	Enchente	
	Rua Guaicurus / Centro	Enchente	
	Bairro Gameleira (Rio Arrudas) / Oeste	Enchente	
	Bairro São Gabriel (Córrego do Onça) / Nordeste	Enchente	
	Av. Cristiano Machado (final) / Norte / Norte	Enchente	
	Conjunto Tereza Cristina (Rio Arrudas) / Leste/Oeste	Alagou até o 1º andar	
	Bairro Salgado Filho / Oeste	Destruiu o guarda-corpo	
	Bairro Santa Efigênia / Leste	Inundação	
	Bairro Jardim Alvorada (Rio Arrudas) / Noroeste	Enchente	
	Bairro Horto (ponte Felipe Camarão) / Leste	Guarda corpo destruído	
	Bairro Santa Tereza (Favela Perela) / Leste		
	Av. do Contorno com Av. dos Andradas (Rio Arrudas) / Leste	Destruiu ponte	
	26/01/1982	Bairro São Bernardo (Córrego da Pampulha) / Norte	
24/01/1982	Bairro Dom Cabral (Conjunto Cristina) / Noroeste	Alagamento	Sudecap
	Bairro São Bernardo (Córrego do Onça) / Norte	Transbordamento	
	Av. do Contorno (Praça da estação) / Centro-Sul		
3/1/1982	Bairro Jaraguá (Rib. Arrudas) / Pampulha	Queda de cabeça de ponte	Sudecap
	Bairro Caetano Furquim (Rib. Arrudas) / Leste		
	Córrego Vilarinho / Venda Nova	Alagamento	
	Bairro Jaraguá (Rib. Pampulha) / Pampulha	Queda de ponte	
	Bairro Vera Cruz (Córrego Taquaril) / Leste	Enchentes	
27/11/1981	Vila Ipê (trevo de acesso à Sabará)	Soterramento	Sudecap
	Av. do Contorno (com Rua Grão Mogol) / Centro-Sul	Tampo da galeria estorou	
	Bairro Primeiro de Maio (Rib. Pampulha) / Norte	Favela União	
14/11/1981	Av. Angrilá / Pampulha		Sudecap
13/11/1981	Bairro Glória / Contagem	Ponte destruída	Sudecap
	Bairro Santa Terezinha (Córrego Serrano) / Pampulha	Água sobre a Ponte	

Tabela A.1 – Continuação

Data	Local	Evento	Fonte
11/11/1981	Rib. Arrudas	Enchente	Sudecap
	Bairro Primeiro de Maio (Córrego do Onça) / Norte	Favela Boa União	
	Av. Tereza Cristina com Av. do Contorno / Oeste	Favela atingida	
	Bairro São Bernardo (Córrego do Onça) / Norte		
	Bairro Suzana / Pampulha		
	Av. do Contorno (Rio Arrudas) / Centro-Sul		
10/11/1981	Bairro Esplanada (Rio Arrudas) / Leste		Sudecap
	Bairro Primeiro de Maio / Norte		
	Bairro São João Batista / Venda Nova		
	Av. 12 de Outubro (Córrego do Nado) / Pampulha		
13/01/1981	Av. do Contorno (Savassi) / Centro-Sul	Inundou Residência	Sudecap
12/1/1981	Av. Álvaro da Silveira / Noroeste	Inundou Residência	Sudecap
	Bairro Santa Efigênia / Leste	Inundou Residência	
	Av. Avaí / Noroeste	Inundou Residência	
12/1/1981	Bairro Bonfim / Noroeste	Inundou Residência	
10/1/1981	Bairro São Geraldo / Leste	Inundou Residência	Sudecap
10/12/1980	Bairro Primeiro de Maio (Rib. Arrudas) / Norte		Sudecap
	Bairro Nova América (Rib. Arrudas) / Venda Nova		
	Av. Pedro II / Centro	Alagou rua	
	Bairro Nova América / Venda Nova		
	Elevado Castelo Branco (Rio Arrudas) / Centro-Sul		
7/12/1980	Praça da Estação (Rib. Arrudas) / Centro		Sudecap
5/12/1980	Praça da Estação (Rib. Arrudas) / Centro	Inundação	Sudecap
3/12/1980	Av. Antônio Carlos com Av. Pedro II / Centro		Sudecap
25/11/80	Rua São Paulo (Ponte Perrela) / Centro	Inundou lojas, residências, praças e ruas.	Sudecap
	Rib. Arrudas	Desabamento de barraco	
	Rib. Arrudas	417 desabrigados e 1 menino afogado	
	Bairro Primeiro de Maio / Norte	Inundou barracos	
29/01/80	Av. Flávio dos Santos (Rib. Arrudas) / Leste		Sudecap
	Tirol / Barreiro	Carregou ponte	
2/1/1980	Jatobá / Barreiro		Sudecap

Tabela A.1 – Continuação

Data	Local	Evento	Fonte
28/12/79	Favela do Cardoso (Rib. Arrudas)	Desabamento de 3 barracões	Sudecap
	Praça da Estação (Rib. Arrudas) / Centro	Inundação	
	Bairro Bernardo/Beatriz		
	Praça da Estação (Rib. Arrudas) / Centro		
	Córrego Vilarinho / Venda Nova		
27/12/79	Av. Cristiano Machado (Rib. Da Onça) / Norte		Sudecap
8/2/1979	Parque Municipal / Centro		Sudecap
	Av. dos Andradas		
	Bairro Pe. Eustáquio / Noroeste		
	Escola de Engenharia / Centro		
4/2/1979	Rib. Arrudas	Vítima retirada do Arrudas (próximo do Mesbla) pelos bombeiros	Sudecap
	Rib. Arrudas	Caminhão basculante desvia de buraco e cai no Arrudas	
	Próximo a Rua Rio Grande do Sul / Centro-Sul	1 morto e 3 feridos	
		População ribeirinha socorrida pelos bombeiros.	
	Conjunto Tereza Cristina (Rib. Arrudas) / Leste/Oeste	Barrancos e casas desabando no Conjunto Teresa Cristina	
	Rib. Arrudas (Próximo ao Beco da Viola)	Atingiu a garagem e o 1º andar do prédio.	

APÊNDICE B

Gráficos de Dupla Massa das Estações Seleccionadas para a RMBH

Figura B.1 – Gráfico de consistência da estação 01943004 (Jaboticatubas)

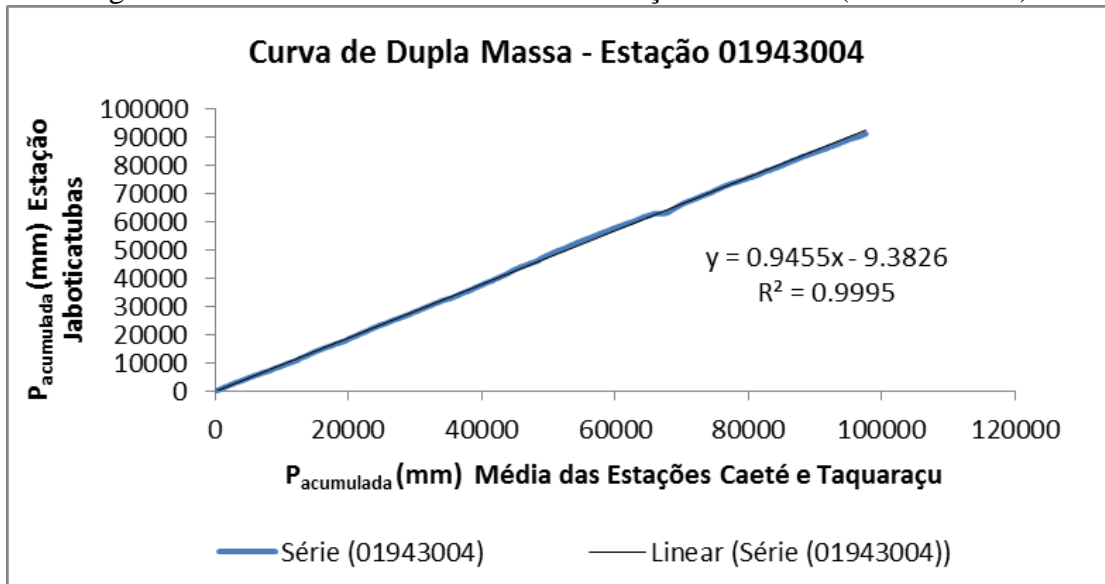


Figura B.2 – Gráfico de consistência da estação 01943006 (Sabará)

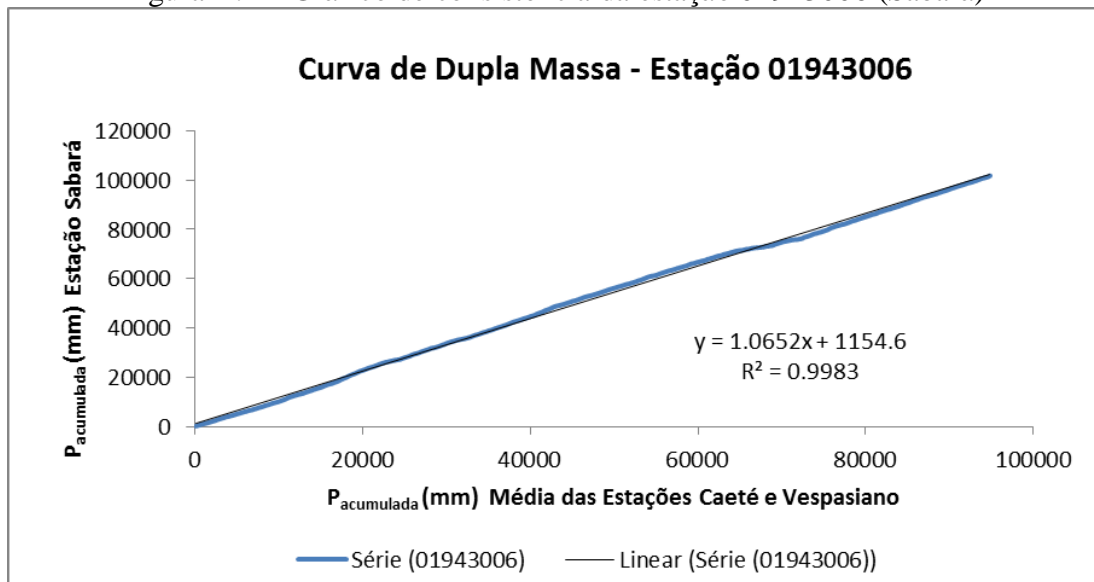


Figura B.3 – Gráfico de consistência da estação 01943009 (Vespasiano)

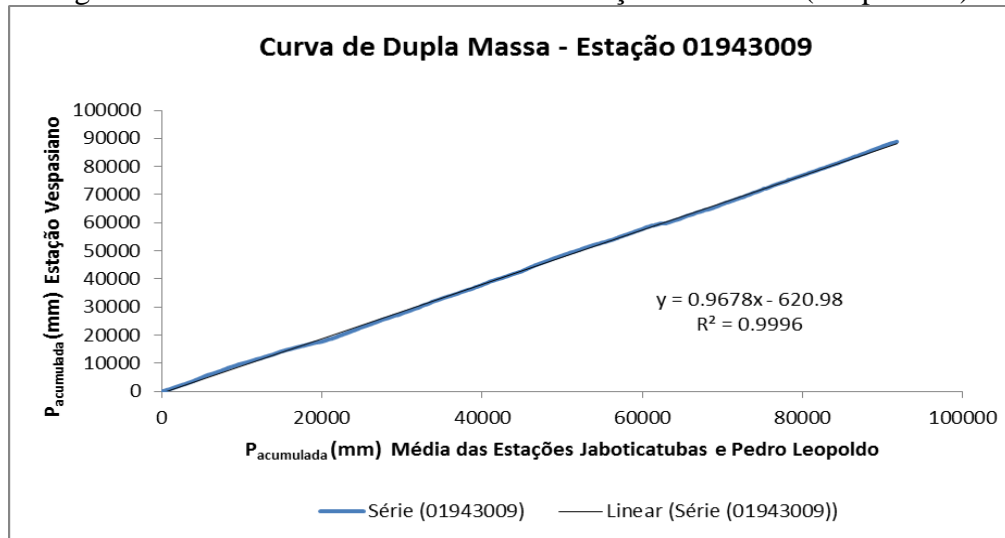


Figura B.4 – Gráfico de consistência da estação 01943010 (Caeté)

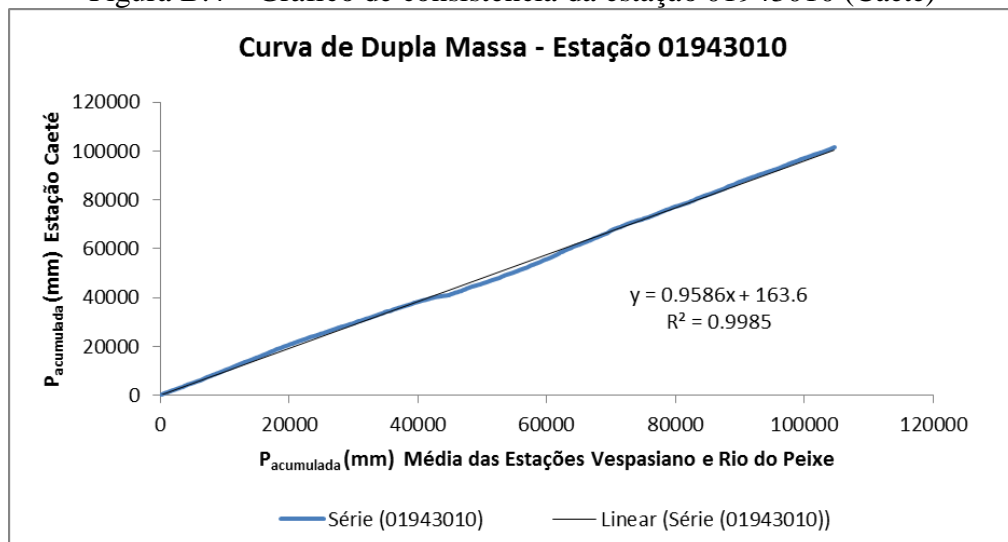


Figura B.5 – Gráfico de consistência da estação 01943023 (Taquaraçu)

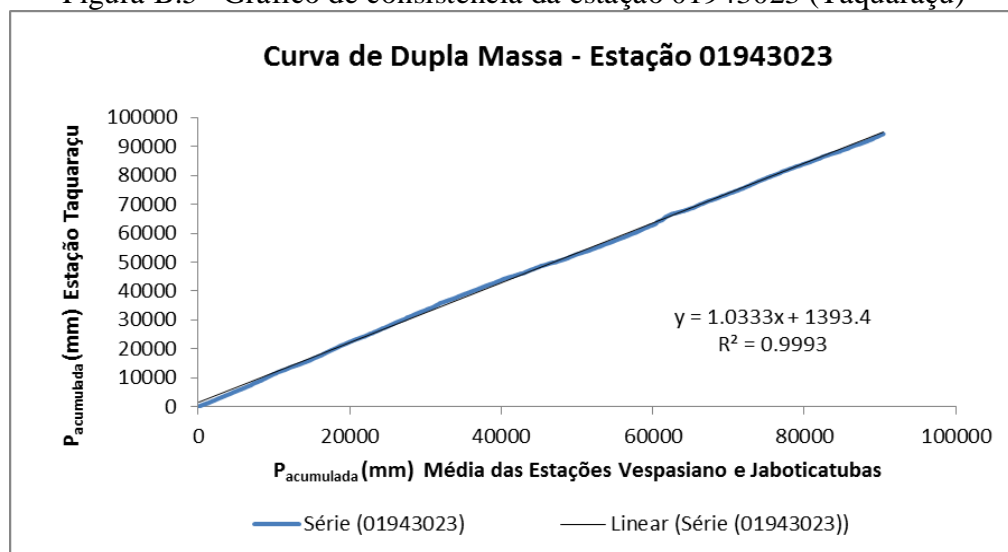


Figura B.6 – Gráfico de consistência da estação 01943024 (José de Melo)

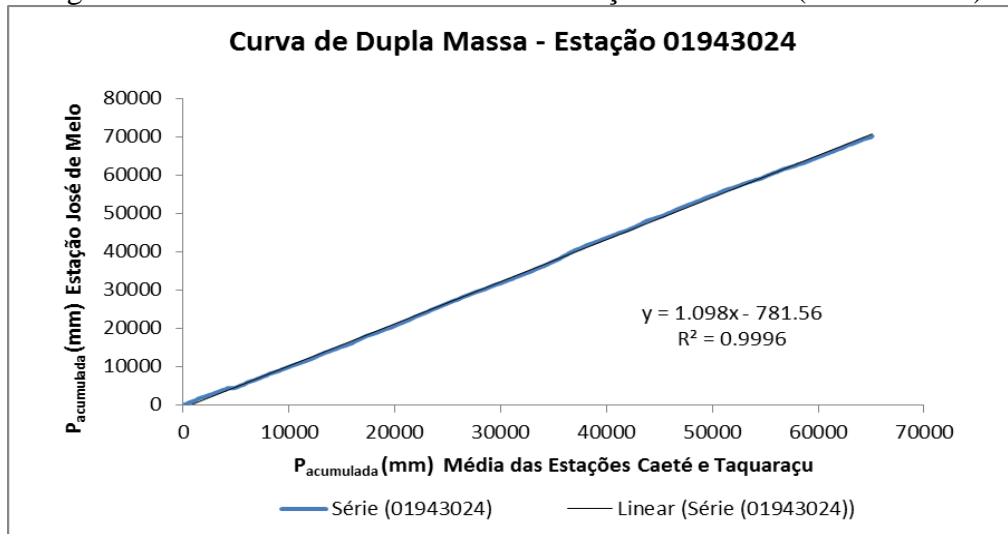


Figura B.7 – Gráfico de consistência da estação 01943055 (Horto)

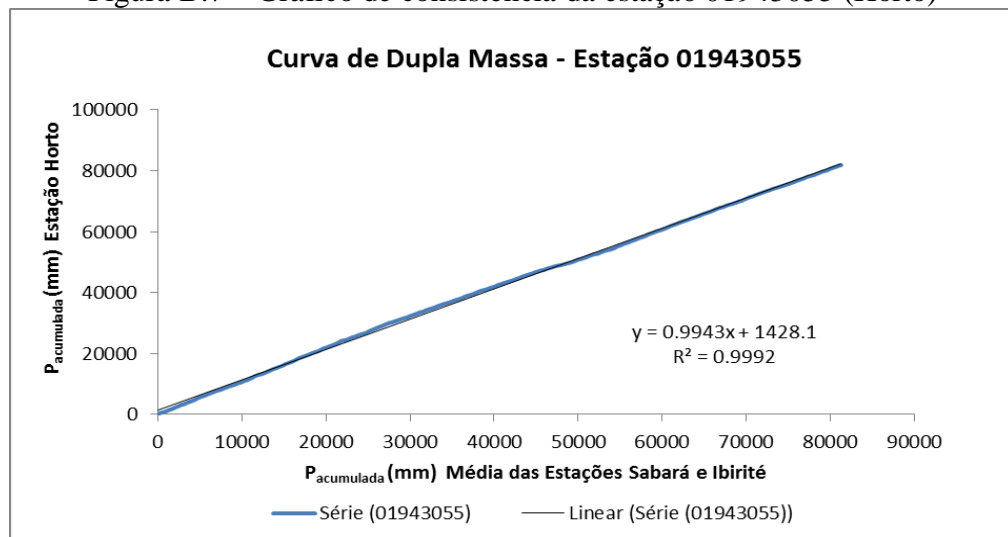


Figura B.8 – Gráfico de consistência da estação 01944004 (Ponte Nova do Paraopeba)

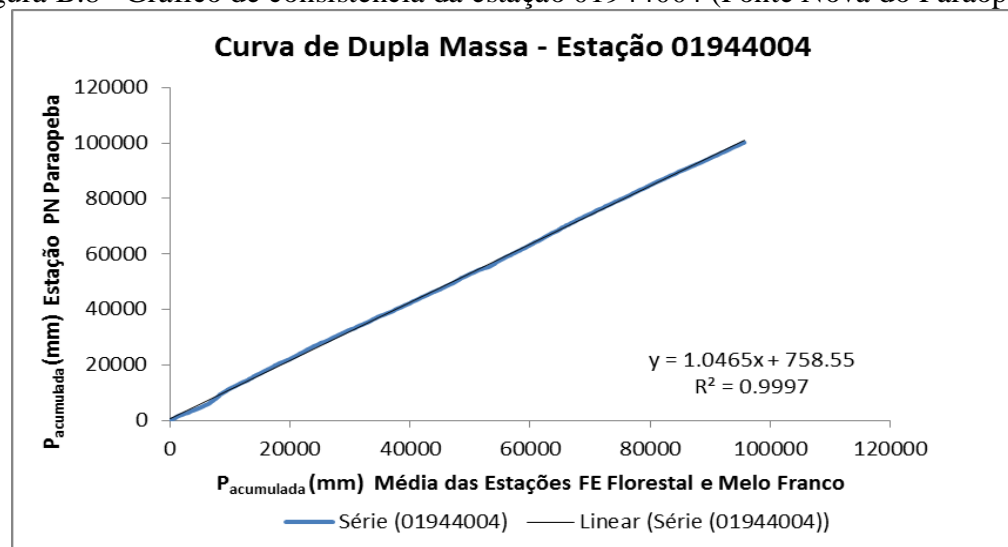


Figura B.9 – Gráfico de consistência da estação 01944007 (FE Florestal)

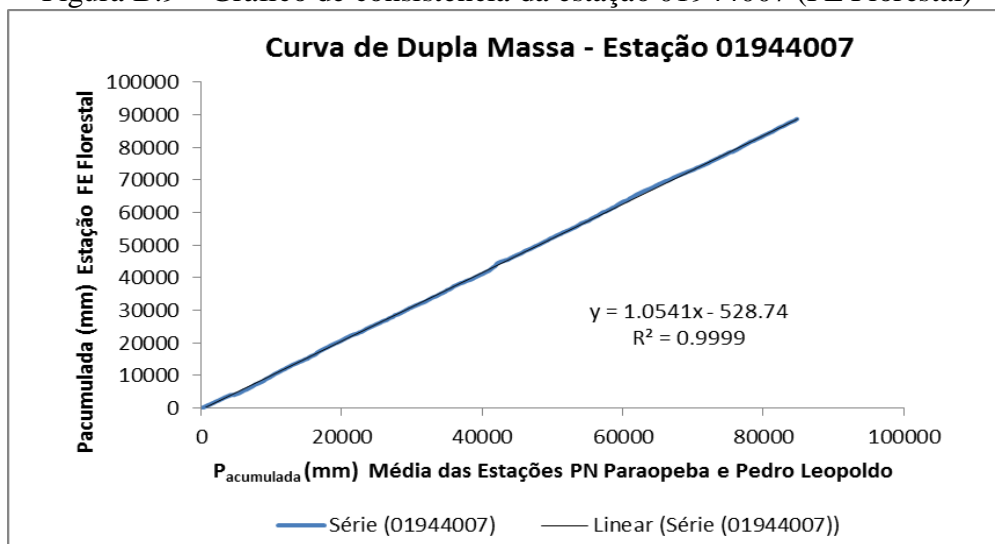


Figura B.10 – Gráfico de consistência da estação 01944009 (Pedro Leopoldo)

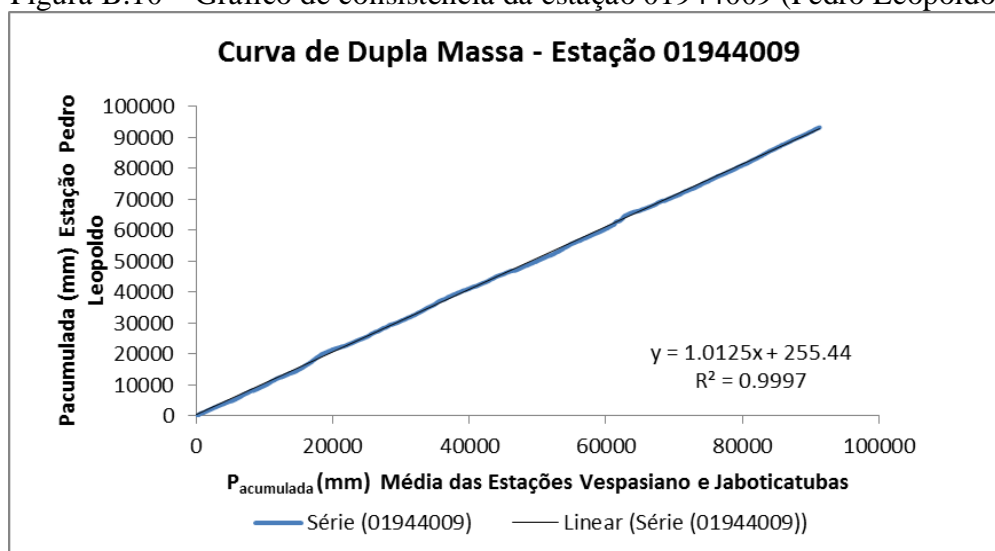


Figura B.11 – Gráfico de consistência da estação 02043002 (Lagoa Grande)

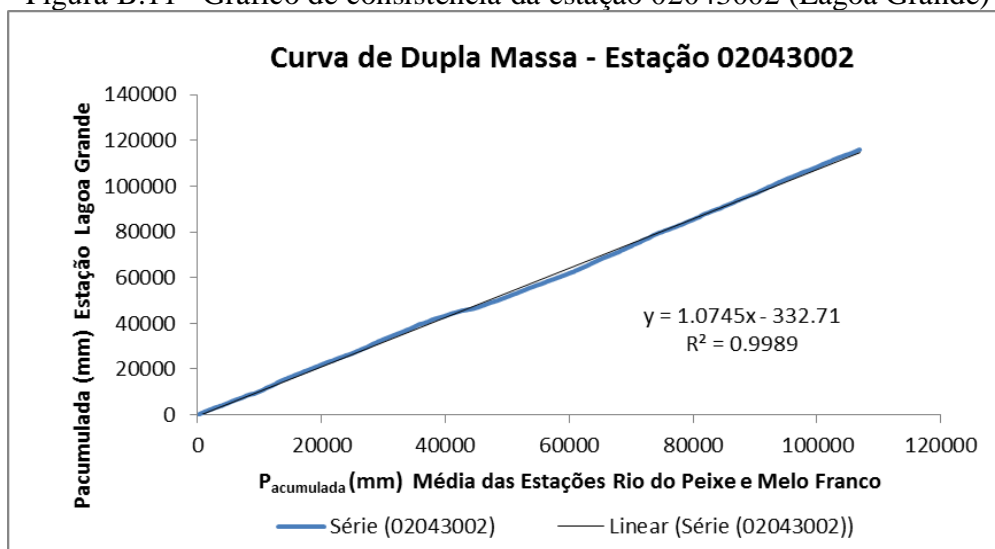


Figura B.12 – Gráfico de consistência da estação 02043004 (Rio do Peixe)

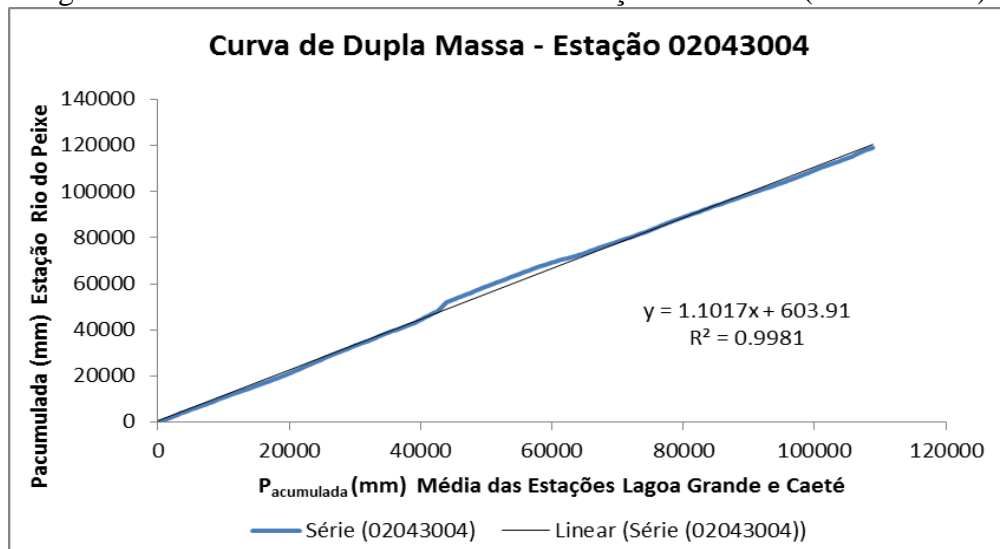


Figura B.13 – Gráfico de consistência da estação 02044008 (Melo Franco)

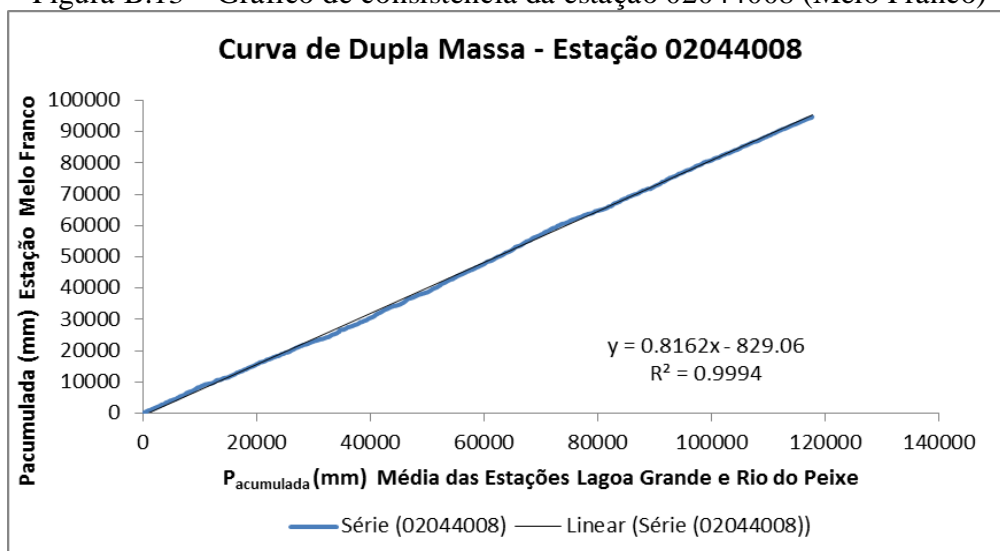
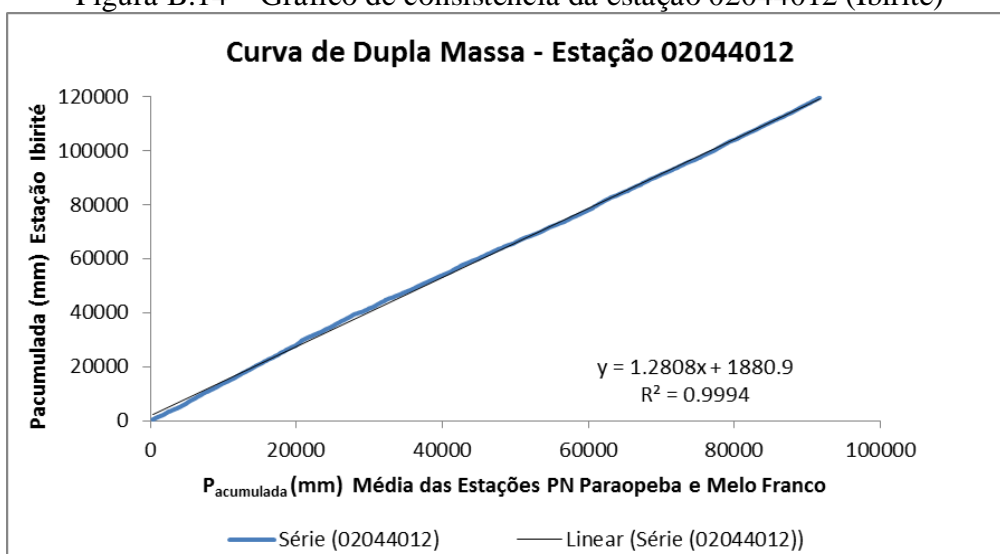


Figura B.14 – Gráfico de consistência da estação 02044012 (Ibirité)



APÊNDICE C

Quadro C.1 – Intensidades máximas por ano hidrológico para diferentes durações (Estação 83587)

ANO HIDROLÓGICO	10 min i (mm/h)	15min i (mm/h)	30min i (mm/h)	45min i (mm/h)	1 hora i (mm/h)	2 horas i (mm/h)	3 horas i (mm/h)	4 horas i (mm/h)	8 horas i (mm/h)	14 horas i (mm/h)	24 horas i (mm/h)
1956	93,00	63,90	58,60	43,47	42,40	24,85	18,57	14,10			
1957	78,00	60,60	48,00	35,60	25,50	16,80	13,03	10,03			
1958		48,00	40,00	33,60	29,90	17,55	16,20	14,33			
1959	113,40	80,70	54,80	37,47	35,70	26,35	18,17	14,00			
1960	96,00	66,00	64,00	47,73	42,30	21,60	14,40	10,80			
1961	111,00	67,50	48,00	42,00	36,60	27,90	19,77	15,48			
1962	140,40	70,20	55,20	43,33	35,20	25,55	17,17	13,30			
1963	121,20	90,60	80,00	67,33	55,80	29,50	20,43	15,33			
1964	138,60	111,60	84,60	69,20	52,00	26,10	17,87	13,40			
1965	84,00	62,10	45,00	34,27	35,60	28,35	19,40	17,18			
1966	129,00	97,50	85,00	68,67	53,10	29,95	21,73	17,10			
1967	112,80	77,70	68,00	58,00	43,50	21,75	14,50	10,88			
1968	72,60	69,00	53,60	50,40	39,40	23,55	16,87	14,45			
1969	115,20	54,60	57,20	51,47	44,60	22,30	15,00	12,50			
1970	91,20	78,90	54,00	48,27	40,50	24,80	16,53	12,40			
1971	90,00	94,50	75,00	67,33	51,30	26,90	19,27	14,70			
1972	160,80	128,40	114,00	80,27	66,90	36,40	24,83	18,65			

Quadro C.1 – Continuação

ANO HIDROLÓGICO	10 min i (mm/h)	15min i (mm/h)	30min i (mm/h)	45min i (mm/h)	1 hora i (mm/h)	2 horas i (mm/h)	3 horas i (mm/h)	4 horas i (mm/h)	8 horas i (mm/h)	14 horas i (mm/h)	24 horas i (mm/h)
1973	90,00	70,50	70,00	54,67	44,30	22,15	15,03	11,28			
1974	121,80	91,50	64,80	47,47	37,70	22,10	15,83	12,15			
1975	192,00	96,00	69,00	55,33	41,50	22,50	25,67	21,25			
1976	73,20	55,50	44,00	34,67	29,00	21,50	14,33	11,75			
1977	102,60	90,00	75,40	61,07	47,30	23,65	15,77	12,70			
1978	142,20	103,50	82,00	63,07	47,60	24,00	16,83	13,00			
1979	168,00	99,90	67,60	45,07	34,00	23,10	16,03	12,88			
1980	120,00	99,00	67,20	57,33	48,90	29,80	19,87	14,90			
1981											
1982											
1983											
1984	127,20	104,40	124,40	69,60	88,50	32,55	21,70	21,45	11,33	6,69	4,75
1985	120,00	119,20	80,00	69,47	53,20	30,00	20,00	18,78	9,86	6,63	3,87
1986	180,00	149,80	72,20	63,87	53,60	32,90	21,93	17,23	8,66	5,34	4,45
1987	120,00	102,40	66,00	54,93	55,70	29,85	19,90	18,90	10,29	5,89	3,64
1988	120,00	120,00	80,00	66,40	52,30	27,25	18,17	17,13	10,94	7,80	4,55
1989	93,60	80,00	59,40	47,47	37,50	26,85	17,90	13,93	8,66	5,71	3,33
1990	91,20	76,40	49,60	40,40	30,80	17,70	11,80	10,90	8,73	6,22	3,88
1991	120,00	80,00	45,00	34,13	27,80	15,60	10,40	9,88	6,56	3,75	2,69
1992	78,00	64,40				17,45	11,63	13,73	10,98	7,09	5,45
1993	144,00	112,00	81,80	56,67	43,50	23,45	15,63	12,13	6,06	3,47	3,38
1994	90,00	65,20	51,20	39,73	30,80	15,85	10,90	10,10	6,34	3,62	
1995	138,00	100,00	82,00	72,00	57,30	29,50	25,17	18,88	14,35	11,19	6,67

Quadro C.1 – Continuação

ANO HIDROLÓGICO	10 min i (mm/h)	15min i (mm/h)	30min i (mm/h)	45min i (mm/h)	1 hora i (mm/h)	2 horas i (mm/h)	3 horas i (mm/h)	4 horas i (mm/h)	8 horas i (mm/h)	14 horas i (mm/h)	24 horas i (mm/h)
1996	105,0	102,0	78,0	69,3	58,5	33,7	22,7	17,5	11,7	7,8	5,7
1997	111,0	96,0	77,0	59,1	44,3	22,2	15,3	12,0	6,3	3,6	2,1
1998	90,0	98,0	80,0	72,0	66,0	41,8	28,8	21,6	10,8	6,2	3,6
1999	90,0	80,0	55,0	48,0	32,0	28,0	19,7	15,8	9,6	5,6	3,4
2000	66,0	68,0	49,0	30,0	26,5	22,7	20,7	18,1	15,3	9,1	6,1
2001	102,0	80,0	48,0	40,7	40,0	20,7	13,8	11,4	6,3	4,3	2,6
2002	162,0	120,0	95,2	77,3	66,0	33,7	22,4	17,0	9,9	5,4	3,3
2003	132,0	104,0	70,0	52,7	42,0	25,8	18,7	16,3	9,4	5,4	3,1
2004	150,0	144,0	92,8	62,0	52,0	26,5	17,8	13,4	8,3	4,9	3,0
2005	120,0	100,0	60,0	42,8	32,6	16,5	11,3	10,6	8,0	5,6	3,3
2006	120,0	100,0	77,0	55,5	48,5	32,1	20,9	20,4	13,8	9,4	6,1
2007	90,0	88,0	80,0	57,5	43,1	21,8	14,5	11,1	5,8	4,7	3,0
2008	168,0	152,0	112,8	96,7	76,7	49,4	33,0	24,8	12,4	7,1	4,1
2009	120,0	108,0	100,0	70,9	57,0	32,0	21,3	16,2	8,1	4,8	3,2
2010	91,8	72,0	50,0	40,7	42,8	23,3	15,7	15,0	8,8	5,2	3,0
2011	111,0	92,0	64,0	64,0	54,4	31,0	20,7	15,5	9,9	6,0	3,5
2012	150,0	148,0	104,0	72,0	55,8	35,5	23,9	18,0	9,6	5,5	3,2
2013	129,0	102,0	68,8	70,0	53,6	28,5	23,7	19,5	9,8	5,6	3,4
2014	120,0	104,8	62,0	48,5	37,4	19,5	13,0	10,8	7,2	4,9	2,9

APÊNDICE D

Figura D.1 – Ajuste dos dados à distribuição GEV para 10 min de duração

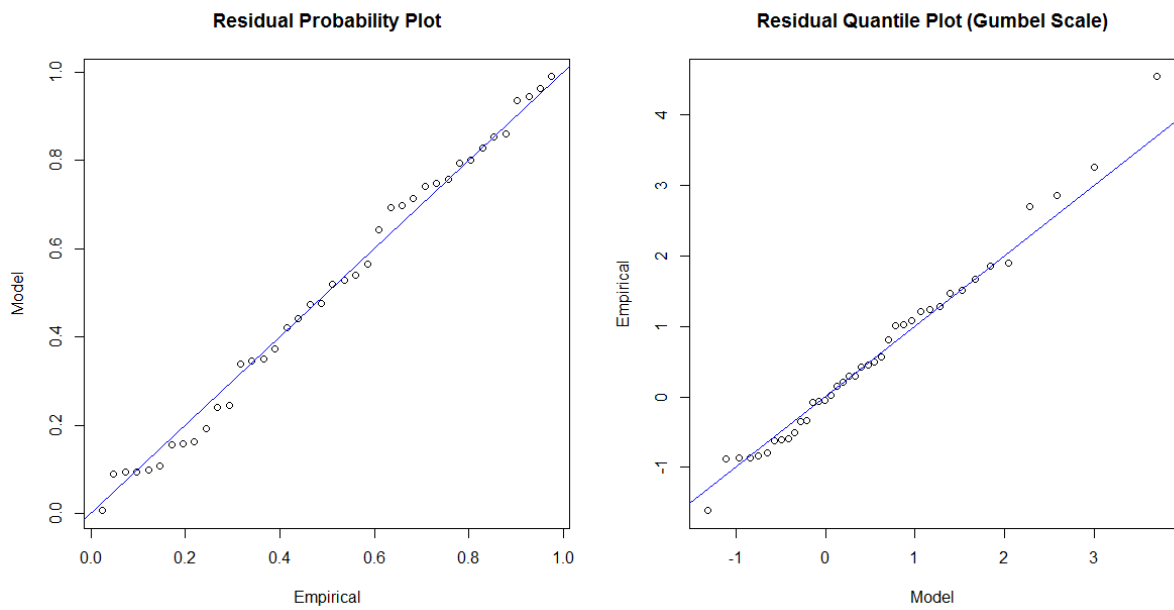


Figura D.2 – Ajuste dos dados à distribuição GEV para 15 min de duração

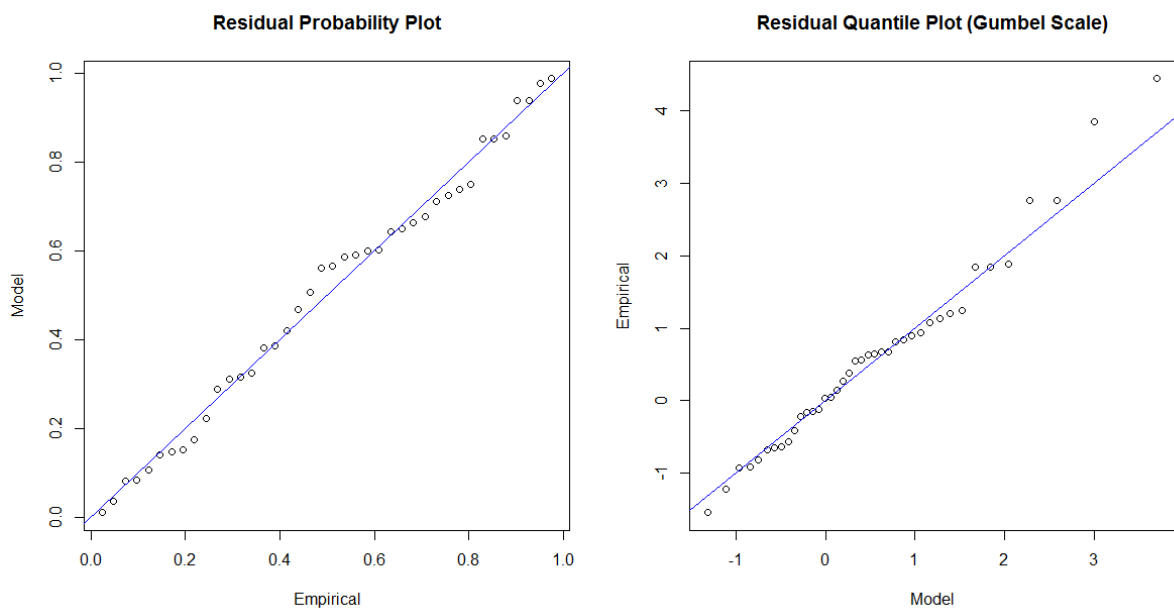


Figura D.3 – Ajuste dos dados à distribuição GEV para 30 min de duração

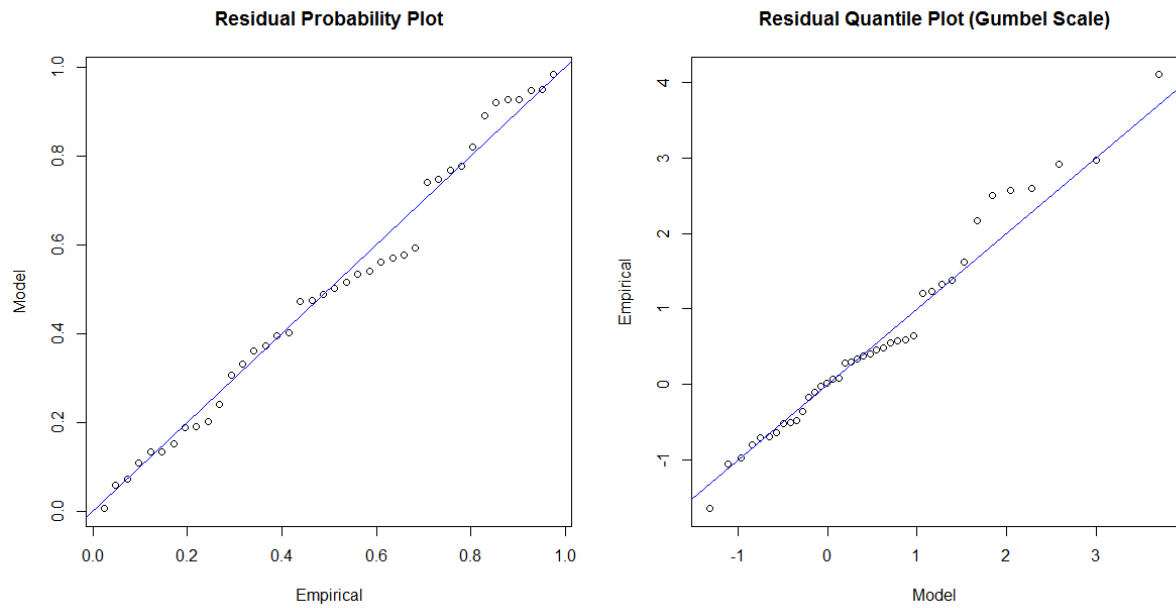


Figura D.4 – Ajuste dos dados à distribuição GEV para 45 min de duração

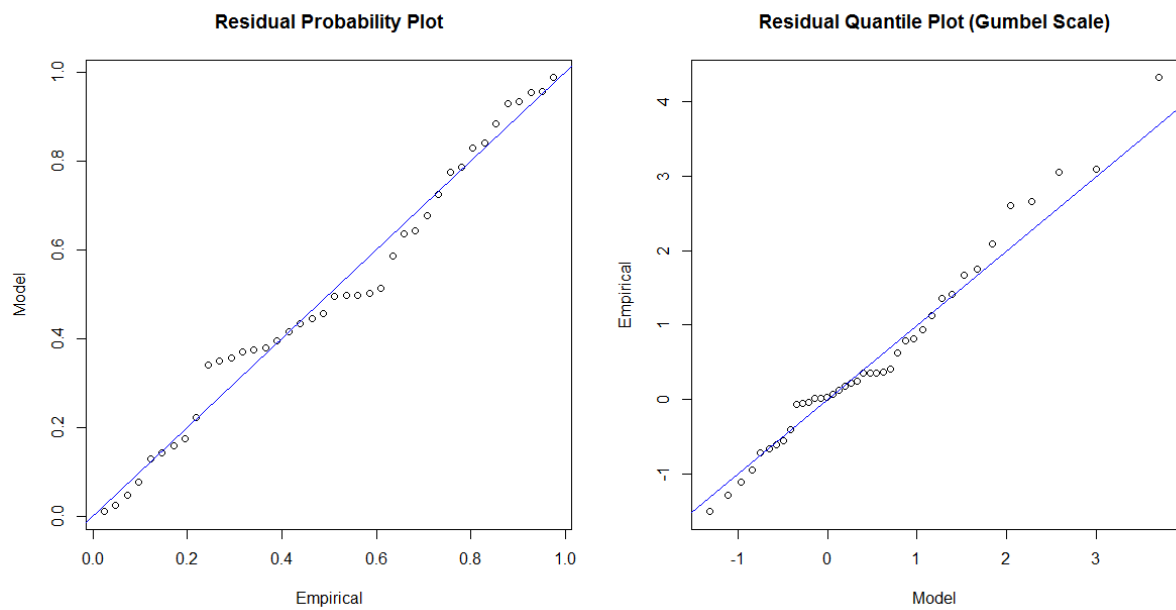
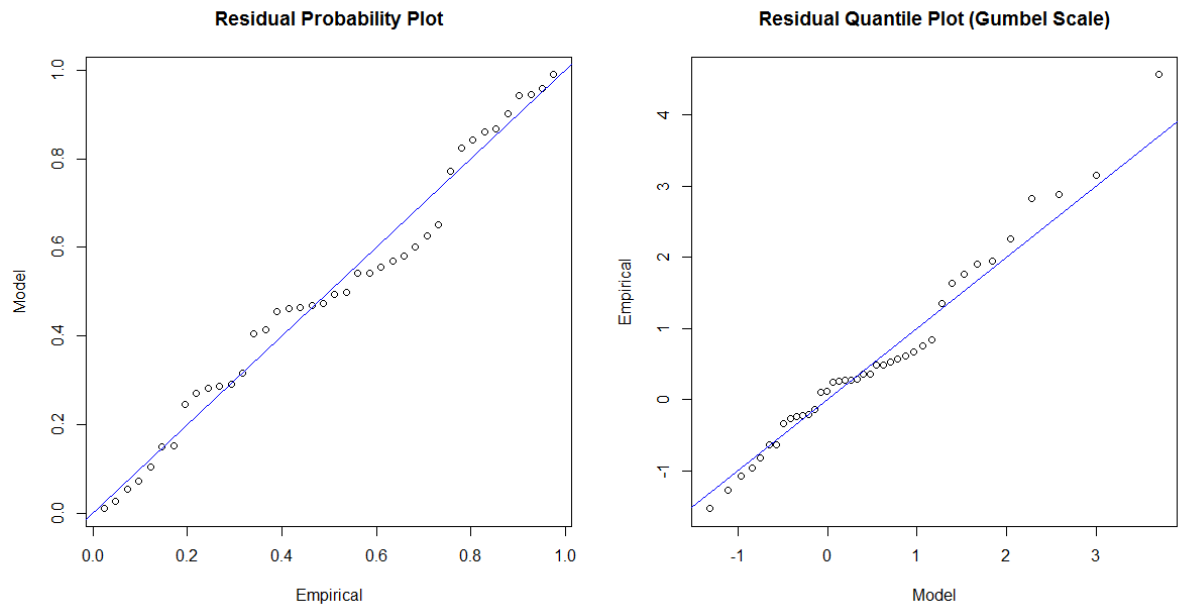


Figura D.5 – Ajuste dos dados à distribuição GEV para 60 min de duração



APÊNDICE E

Quadro E.1 – Processos de licenciamento e regularização na bacia do Córrego Ressaca (por sub-bacia), no ano de 2014

ENDEREÇO	Sub-Bacia	Área construída (m ²)	Nº Pavimentos	Área construída/ Pavimento (m ²)	Área total (m ²)
RUA CUSTODIO PINTO COELHO, 158	1	188,32	1	188,32	523,42
AVE PRESIDENTE TANCREDO NEVES, 3900, 3902, 3904	1	1005,30	3	335,10	
RUA GLAUBER ROCHA 77	2	1654,35	5	330,87	2251,26
RUA PEDROGAO PEQUENO 477	2	756,88	6	126,15	
RUA DOUTOR JULIO SOARES, 216	2	1975,49	6	329,25	
RUA TREVISÓ, 205	2	602,12	3	200,71	
RUA PROFESSOR AFONSO DOS SANTOS, 35	2	589,81	6	98,30	
RUA PEDRO COELHO VERGARA, 131	2	344,85	3	114,95	
RUA CRESO BARBI, 222	2	419,82	3	139,94	
RUA BERGAMO, 41	2	463,49	3	154,50	
RUA CAMPOBASSO, 367	2	237,24	2	118,62	
RUA POVOA DE VARZIM, 435	2	186,14	1	186,14	
RUA PEDROGAO PEQUENO, 395, 397	2	471,39	3	157,13	
RUA PEDROGAO PEQUENO 429,	2	681,29	5	136,26	
RUA VITERBO, 60	2	475,37	3	158,46	
RUA CASTELO DE ALMADA 38 36	3	427,25	6	71,21	
RUA CASTELO EVORA 261	3	522,34	6	87,06	
RUA CASTELO DE ALMADA 217	3	635,17	7	90,74	
RUA CASTELO EVORA 247	3	703,29	5	140,66	

Quadro E.1 – Continuação

ENDEREÇO	Sub-Bacia	Área construída (m ²)	Nº Pavimentos	Área construída/ Pavimento (m ²)	Área total (m ²)
RUA CASTELO DE OBIDOS 269	3	611,21	5	122,24	
RUA CASTELO DE AVIS 46	3	225,01	3	75,00	
RUA CASTELO DE OBIDOS 238	3	405,96	3	135,32	
RUA CASTELO DE LISBOA, 40	3	1737,12	9	193,01	
AVE MIGUEL PERRELA, 520	3	386,57	1	386,57	
RUA CASTELO SETUBAL, 670	3	2097,11	10	209,71	
RUA CASTELO DE ARRAIOLOS, 200	3	923,20	7	131,89	
AVE MIGUEL PERRELA, 510	3	386,57	1	386,57	
AVE MIGUEL PERRELA, 530, 534, 536, 540	3	324,79	1	324,79	
RUA CASTELO DE BEJA, 51	3	2705,57	9	300,62	
AVE MIGUEL PERRELA, 975	3	37863,61	88	430,27	
RUA CASTELO DA BEIRA, 360	3	157,35	2	78,68	
RUA CASTELO DE OBIDOS, 160	3	495,33	6	82,56	
RUA CASTELO DE CRATO, 150	3	72,32	1	72,32	
RUA SALOMAO RODRIGUES DA SILVA, 89	4	298,07	3	99,36	
RUA JOAO BERNARDINO SANTOS, 479	4	212,41	1	212,41	
RUA MANOEL ELIAS DE AGUIAR, 245	4	730,18	6	121,70	
RUA DIOMAR DE SOUZA E SILVA 78	5	730,08	5	146,02	2339,83
RUA SENADOR FIRMINO 105	5	930,72	7	132,96	
RUA APIO CARDOSO DA PAIXAO, 15, 13 / RUA ETEL	5	475,14	4	118,79	
RUA ADEMAR MARTINS VIEIRA, 323	5	3863,88	13	297,22	
RUA SENADOR FIRMINO, 163	5	3242,41	10	324,24	

Quadro E.1 – Continuação

ENDEREÇO	Sub-Bacia	Área construída (m ²)	Nº Pavimentos	Área construída/ Pavimento (m ²)	Área total (m ²)
RUA SEBASTIAO MENESES SILVA, 40	5	1102,09	6	183,68	
RUA JULIO SOARES SANTANA, 170	5	339,69	4	84,92	
RUA APIO CARDOSO DA PAIXAO, 127	5	414,05	4	103,51	
RUA DESEMBARGADOR PEDRO LICINIO, 765, 767	5	481,73	4	120,43	
RUA GERALDINA CANDIDA DE JESUS, 31	5	528,96	4	132,24	
RUA JOSE AMARAL, 120	5	1936,97	8	242,12	
AVE JOSE GONCALVES VIDAL, 41, 43	5	314,48	3	104,83	
RUA SEBASTIAO MENESES SILVA, 70	5	3139,83	9	348,87	
RUA ALUISIO LOBAO VERAS, s/n / AVENIDA HERACLITO MOURAO DE MIRANDA, s/n / RUA SYLVIO ANDRADE, s/n	7	12335,38	20	616,77	1224,87
RUA ONDINA PEDROSA NAHAS, 332, 334, 336	7	283,87	2	141,94	
RUA ROSALINA CALEGARIO, 105	7	253,00	2	126,50	
AVE HERACLITO MOURAO DE MIRANDA, 1615, 1617 / RUA MARIA DE DEUS, 25, 35, 45	7	5774,38	17	339,67	
Rua Castelo Moura 151	8	1846,33	10	184,63	6834,05
RUA CASTELO DE WINDSOR 413	8	119,26	2	59,63	
RUA DOUTOR SYLVIO MENICUCCI 27	8	835,54	6	139,26	
AVE MIGUEL PERRELA 300	8	523,07	2	261,54	
RUA DESEMBARGADOR JOSE BURNIER 190	8	2640,58	10	264,06	
AVENIDA PRESIDENTE TANCREDO NEVES s/n	8	1015,52	4	253,88	

Quadro E.1 – Continuação

ENDEREÇO	Sub-Bacia	Área construída (m²)	Nº Pavimentos	Área construída/ Pavimento (m²)	Área total (m²)
RUA CASTELO DE ALENQUER 245	8	552,25	4	138,06	
RUA CASTELO DE EDIMBURGO 329	8	504,28	6	84,05	
RUA CASTELO DE TORDESILHAS s/n	8	391,27	3	130,42	
RUA CASTELO DE WINDSOR, 530	8	401,18	3	133,73	
RUA CASTELO DE TORDESILHAS, 102, 100, 98, 94, 104, 96	8	1412,54	5	282,51	
RUA CASTELO SANTAREM, 362, 360	8	424,23	3	141,41	
RUA CASTELO DE ALENQUER, 440	8	2262,89	8	282,86	
RUA CASTELO DA FEIRA, 32, 30	8	402,06	3	134,02	
RUA CASTELO DE ALMADA, 301	8	524,47	6	87,41	
RUA DESEMBARGADOR JOSE BURNIER, 91	8	1155,00	7	165,00	
RUA CASTELO SERPA, 477	8	217,50	3	72,50	
RUA JOSE MENDES DE CARVALHO, 129	8	445,40	3	148,47	
RUA CASTELO DE TORDESILHAS, 520	8	1723,03	6	287,17	
RUA CASTELO DE WINDSOR, 120	8	385,52	3	128,51	
RUA CASTELO SANTAREM, 34	8	1427,78	8	178,47	
RUA MINISTRO JORGE VARGAS, 43	8	881,44	5	176,29	
RUA DESEMBARGADOR JOSE SATYRO, 767 / RUA CECILIA FONSECA COUTINHO, 175	8	1936,27	2	968,14	
RUA CASTELO GUIMARAES, 520	8	464,56	3	154,85	

Quadro E.1 – Continuação

ENDEREÇO	Sub-Bacia	Área construída (m ²)	Nº Pavimentos	Área construída/ Pavimento (m ²)	Área total (m ²)
RUA CASTELO SANTAREM, 378, 380	8	239,48	2	119,74	
RUA CASTELO SERPA, 250 / RUA CASTELO SANTO ANGELO, 153	8	294,64	3	98,21	
RUA CASTELO DE ABRANTES, 400	8	2212,88	9	245,88	
RUA CASTELO DE ABRANTES, 62	8	820,35	5	164,07	
RUA CASTELO ELVAS, 81	8	492,66	6	82,11	
AVE MIGUEL PERRELA, 355, 357, 359, 361, 367, 369, 371	8	2980,21	9	331,13	
RUA DOUTOR AGUINALDO MONTEIRO, 227	8	1835,01	3	611,67	
RUA DOUTOR SYLVIO MENICUCCI, 110	8	1108,19	6	184,70	
RUA CASTELO DE WINDSOR, 23 / RUA CASTELO DE SÃO JORGE 56	8	1117,44	8	139,68	
RUA CONSTANTINO SIQUEIRA DOS SANTOS 421	9	438,52	4	109,63	
RUA CONSTANTINO SIQUEIRA DOS SANTOS, 555	9	429,55	4	107,39	
RUA JOSE ALEXANDRE FERREIRA, 329	10	530,83	4	132,71	268,52
RUA JOSE ROTHEIA, 316	10	543,25	4	135,81	
RUA ALUISIO LOBAO VERAS s/n / AVENIDA HERACLITO	11	12335,38	20	616,77	2256,65
AVE SERRANA, 448	11	490,48	3	163,49	
AVE HERACLITO MOURAO DE MIRANDA, 1432	11	2912,59	3	970,86	
RUA ADENIR PEREIRA DE SOUZA, 165	11	916,81	7	130,97	
RUA HUDSON MAGALHAES MARQUES, 172	11	188,93	2	94,47	

Quadro E.1 – Continuação

ENDEREÇO	Sub-Bacia	Área construída (m ²)	Nº Pavimentos	Área construída/ Pavimento (m ²)	Área total (m ²)
RUA MARIA DAS GRACAS TEIXEIRA, 311	11	518,05	6	86,34	
RUA ZILAH SOUZA SPOSITO, 35	11	190,04	2	95,02	
RUA ALUISIO LOBAO VERAS, 98	11	197,44	2	98,72	
RUA VERONICA 252	12	380,54	2	190,27	647,14
RUA VERONICA 545	12	301,19	2	150,60	
RUA FIGUEIRO, 186	12	2450,21	8	306,28	
RUA MARIO CAMPOS 296	13	345,31	4	86,33	1419,72
RUA DOS CONSTRUTORES 572	13	316,87	3	105,62	
RUA DA DESCIDA 187	13	255,76	3	85,25	
RUA CANTOR LUIZ GONZAGA, 283	13	835,17	6	139,20	
RUA CLEMENTE BARRETO, 270	13	349,18	5	69,84	
AVE JOAO PAULO I, 96	13	223,53	2	111,77	
RUA VIOLETA DE MELO, 295, 297, 299, 301 / RUA FLOR DE ABOBORA, 162, 164, 166	13	317,44	5	63,49	
RUA DAVID RABELO, 729	13	700,66	3	233,55	
RUA ROMUALDO LOPES CANCELO, 19 / AVE DOS ENGENHEIROS, 376	13	1319,71	6	219,95	
AVE IVAI, 240	13	472,98	4	118,25	
RUA DAVID RABELO, 1034	13	412,20	3	137,40	
RUA MARIO CAMPOS, 231	13	196,34	4	49,09	

Quadro E.1 – Continuação

ENDEREÇO	Sub-Bacia	Área construída (m ²)	Nº Pavimentos	Área construída/ Pavimento (m ²)	Área total (m ²)
AVENIDA PRESIDENTE TANCREDO NEVES, 2100 / RUA MARILDO GERALDO DA SILVA, 10	14	11477,48	16	717,34	763,69
RUA FLOR DO CAMPO, 129	14	139,03	3	46,34	
RUA CONCHAS 108	16	1234,90	5	246,98	718,85
RUA COLINA, 164	16	520,14	6	86,69	
RUA FUNDAO, 99	16	385,18	1	385,18	
RUA DELIO VIEIRA SALOMON, 535	17	271,67	3	90,56	296,03
RUA SAO COSME, 166	17	111,79	2	55,90	
RUA SAO COSME, 172	17	116,23	2	58,12	
RUA MARIA EVARISTA, 35, 37	17	365,87	4	91,47	
RUA MARATAIZES 320	18	274,14	2	137,07	1767,8
AVENIDA BRIGADEIRO EDUARDO GOMES s/n	18	172,23	2	86,12	
RUA ALEXANDRE HENRIQUE 115 / AVE BRIGADEIRO EDUARDO GOMES, 2110, 2114, 2080,	18	6958,96	31	224,48	
AVE ABILIO MACHADO 1948	18	416,81	2	208,41	
RUA PRESIDENTE ROOSEVELT, 142	18	363,17	2	181,59	
RUA NINIVE, 75	18	465,02	3	155,01	
RUA DEPUTADO CLAUDIO PINHEIRO DE LIMA, 874, 876	18	284,30	4	71,08	
RUA GUAPIRA, 307, 309	18	358,71	2	179,36	
RUA ARCADIA, 135	18	209,71	2	104,86	

Quadro E.1 – Continuação

ENDEREÇO	Sub-Bacia	Área construída (m²)	Nº Pavimentos	Área construída/ Pavimento (m²)	Área total (m²)
RUA ARAPONGA, 138	18	272,56	3	90,85	
RUA GRAMADO, 174	18	270,94	3	90,31	
RUA EUGENIA NERY, 720	18	332,26	5	66,45	
RUA JULIA LINA, 45	18	369,11	5	73,82	
AVE ABILIO MACHADO, 955	18	393,64	4	98,41	
RUA CAMBE 400	20	498,60	6	83,10	893,73
RUA TACIBA,31	20	710,06	6	118,34	
RUA ELIZABETH, 451, 447, 443	20	408,13	3	136,04	
RUA CAPANEMA, 327, 321, 315 / RUA MAFRA, 656	20	308,57	2	154,29	
RUA TACIBA, 195	20	284,61	1	284,61	
RUA ASSUMAR, 320	20	704,07	6	117,35	
RUA ALINE s/n / RUA MARFIM s/n	21	374,56	3	124,85	430,70
RUA CACHOEIRA DA PRATA, 380	21	898,12	6	149,69	
RUA FLOR DE UVA, 65	21	156,16	1	156,16	
RUA ALVARENGA 500	23	6309,00	21	300,43	1579,20
RUA SANDOVAL CAMPOS, 63	23	213,18	2	106,59	
RUA PROFESSOR ADELMO LODI, 10	23	326,32	3	108,77	
RUA AUGUSTO SOUZA COUTINHO, 763	23	3311,44	12	275,95	

Quadro E.1 – Continuação

ENDEREÇO	Sub-Bacia	Área construída (m²)	Nº Pavimentos	Área construída/ Pavimento (m²)	Área total (m²)
RUA AUGUSTO SOUZA COUTINHO, 584, 588	23	328,26	2	164,13	
RUA PROFESSOR ADELMO LODI, 81	23	278,37	4	69,59	
RUA PROCOPIO FERREIRA, 120	23	310,61	7	44,37	
RUA ACAIACA, 419	23	140,89	2	70,45	
RUA PROFESSOR FERNANDO DE MAGALHAES, 195	23	338,77	3	112,92	
RUA ARGIRITA, 144	23	260,66	4	65,17	
RUA MELO TEIXEIRA, 217	23	1564,95	6	260,83	

Quadro E.2 – Processos de licenciamento e regularização na bacia do Córrego Ressaca (por sub-bacia), no ano de 2015

ENDEREÇO	Sub-Bacia	Área construída (m ²)	Nº Pavimentos	Área construída/ Pavimento (m ²)	Área total (m ²)
RUA CUSTODIO PINTO COELHO, 165	1	293,74	2	146,87	582,05
AVE PRESIDENTE TANCREDO NEVES, 4450	1	101,80	1	101,80	
RUA CORONEL DURAES, 165	1	666,75	2	333,38	
RUA MARIA CANDIDA DE JESUS, 455	2	1061,47	7	151,64	1779,32
RUA POVOA DE VARZIM, 252	2	1017,53	5	203,51	
RUA VITERBO, 380	2	830,42	5	166,08	
RUA PESCARA, 135	2	185,79	3	61,93	
RUA MARIA FRANCISCA GOMES, 27	2	563,36	7	80,48	
RUA PEDRO COELHO VERGARA, 320	2	225,69	2	112,85	
RUA NILTON BALDO, 612	2	352,55	2	176,28	
RUA FLOR DE ESPARODIA, 96,98	2	511,70	3	170,57	
RUA PEDRO COELHO VERGARA, 91	2	433,13	6	72,19	
RUA FLOR DE ESPARODIA, 33/ RUA FLOR DE TIPOANA, 99	2	1430,68	15	95,38	
RUA MARIA FRANCISCA GOMES, 66, 74	2	283,78	2	141,89	
RUA BERGAMO, 20/ RUA VARESE	2	364,34	3	121,45	
RUA MARIA CANDIDA DE JESUS, 181	2	925,80	6	154,30	
RUA JOAO BERNARDINO SANTOS, 104	2	70,79	1	70,79	
AVE MIGUEL PERRELA, 698, 700, 694, 690,	3	1225,57	4	306,39	
RUA CASTELO DE BELMONTE, 292	3	495,24	6	82,54	
RUA CASTELO DE CRATO, 101	3	1174,91	5	234,98	

Quadro E.2 – Continuação

ENDEREÇO	Sub-Bacia	Área construída (m ²)	Nº Pavimentos	Área construída/ Pavimento (m ²)	Área total (m ²)
RUA CASTELO DE ARRAIOLOS, 148	3	918,36	8	114,80	
RUA CASTELO SETUBAL, 272	3	1075,56	5	215,11	
RUA CASTELO GUIMARAES, 187	3	647,49	6	107,92	
RUA CASTELO EVORA, 301	3	953,19	7	136,17	
RUA CASTELO DE FARO, 20, 22 / AVE MIGUEL PERRELA, 445, 447, 449, 451, 453,	3	1071,67	5	214,33	
RUA CASTELO DE ARRAIOLOS, 45	3	3892,22	10	389,22	
RUA FREI MARTINHO BURNIER, 721	3	8100,30	13	623,10	
RUA CASTELO DE ALMADA, 111	3	832,76	6	138,79	
RUA CASTELO ELVAS, 200	3	914,58	7	130,65	
RUA CASTELO DE ALMADA, 37	3	430,12	3	143,37	
RUA CASTELO DA BEIRA, 504	3	1283,94	7	183,42	
RUA CASTELO DE LISBOA, 295	3	663,73	6	110,62	
AVE PRESIDENTE TANCREDO NEVES, 3570,3840,3844,3850	3	483,94	4	120,99	
RUA CASTELO ELVAS, 247	3	1227,35	8	153,42	
RUA CASTELO DE ALMADA, 148	3	933,42	7	133,35	
RUA CASTELO LAMEGO, 573	3	329,04	5	65,81	
RUA CASTELO DE OBIDOS, 39	3	683,94	7	97,71	

Quadro E.2 – Continuação

ENDEREÇO	Sub-Bacia	Área construída (m ²)	Nº Pavimentos	Área construída/ Pavimento (m ²)	Área total (m ²)
RUA JOAO BERNARDINO SANTOS, 467	4	60,51	1	60,51	
RUA SENA MADUREIRA, 247, 253 / RUA MANOEL ELIAS DE AGUIAR, 88, 40, 90, 96, / RUA PROFESSOR DOMICIO MURTA, 181	4	7963,57	26	306,29	
RUA JOSE MOURA PECANHA, 95	4	2149,30	8	268,66	
RUA SENA MADUREIRA, 565	4	422,00	1	422,00	
RUA SENA MADUREIRA, 489	4	3599,48	10	359,95	1417,41
RUA JULIO SOARES SANTANA, 364	5	272,22	3	90,74	
RUA DEPUTADO ANDRE DE ALMEIDA, 551	5	581,07	4	145,27	
RUA JOAO ANTONIO CARDOSO, 643	5	1472,51	11	133,86	
RUA GERALDINA CANDIDA DE JESUS, 91	5	754,33	7	107,76	
RUA DESEMBARGADOR PAULO MOTA, 1048	5	548,32	4	137,08	
RUA JULIO SOARES SANTANA, 96	5	205,29	5	41,06	655,77
AVENIDA SANTA TEREZINHA, 1201,1205 TRAVESSA UM MIL SETECENTOS E SETENTA E UM	6	1006,72	4	251,68	251,68
RUA ITAMBE DO MATO DENTRO, 552	7	273,06	3	91,02	
RUA ONDINA PEDROSA NAHAS, 269	7	817,91	7	116,84	
RUA AGILIO CRUZ DE SOUZA, 465	7	516,60	3	172,20	
RUA ROSALINA CALEGARIO, 38, 40	7	355,57	4	88,89	
RUA ITAMBE DO MATO DENTRO, 436	7	884,05	7	126,29	1227,81

Quadro E.2 – Continuação

ENDEREÇO	Sub-Bacia	Área construída (m²)	Nº Pavimentos	Área construída/ Pavimento (m²)	Área total (m²)
RUA AGILIO CRUZ DE SOUZA, 174	7	425,50	3	141,83	
RUA HELIA RICARDONI DE FREITAS, 310	7	849,08	5	169,82	
AVENIDA HERACLITO MOURAO DE MIRANDA, 1371/ RUA SYLVIO ANDRADE	7	10910,99	34	320,91	
RUA CASTELO EVORA, 570	8	123,25	1	123,25	
RUA CASTELO DE WINDSOR, 260	8	328,97	3	109,66	
RUA DESEMBARGADOR JOSE SATYRO, 584	8	1124,69	7	160,67	
RUA DOUTOR SYLVIO MENICUCCI, 228	8	273,65	2	136,83	
RUA CASTELO RODRIGO, 187	8	528,24	6	88,04	
AVE ALTAMIRO AVELINO SOARES, 342,	8	1586,84	7	226,69	
RUA CASTELO DE TORDESILHAS, 374	8	530,53	6	88,42	
RUA CASTELO SETUBAL, 97	8	1247,01	7	178,14	
RUA CASTELO DE ABRANTES, 175	8	908,96	9	101,00	
RUA CASTELO DE ABRANTES, 62	8	803,23	5	160,65	
RUA CASTELO DE TORDESILHAS, 228	8	919,56	7	131,37	
AVE ALTAMIRO AVELINO SOARES, 121,123,145,147					
RUA CECILIA FONSECA COUTINHO, 752	8	8713,07	18	484,06	
RUA CASTELO MOURA, 193	8	864,26	7	123,47	
RUA CASTELO SANTAREM, 445	8	986,58	9	109,62	
RUA ELSON NUNES DE SOUZA, 591	8	517,30	4	129,33	7426,30

Quadro E.2 – Continuação

ENDEREÇO	Sub-Bacia	Área construída (m ²)	Nº Pavimentos	Área construída/ Pavimento (m ²)	Área total (m ²)
RUA CASTELO DE WINDSOR, 360	8	914,93	9	101,66	
RUA CASTELO DE TORDESILHAS, 18,20	8	358,06	4	89,52	
RUA DOUTOR SYLVIO MENICUCCI, 263	8	352,42	2	176,21	
RUA GERALDO MAGELA PEREIRA, 28	8	917,89	5	183,58	
RUA CASTELO EVORA, 650	8	3802,57	16	237,66	
RUA ROMUALDO LOPES CANCELADO, 122	8	1439,05	7	205,58	
RUA CASTELO DE ALCOBACA, 68	8	915,50	8	114,44	
RUA CASTELO EVORA, 726	8	911,62	9	101,29	
AVENIDA MIGUEL PERRELA, 340, 344	8	424,01	3	141,34	
RUA CASTELO DE OBIDOS, 780	8	862,79	8	107,85	
RUA DOUTOR RUBENS GUIMARAES, 181	8	96,31	2	48,16	
RUA CASTELO DE LISBOA, 640, 640/ RUA CASTELO DE VIDE/ RUA CASTELO DE VIDE	8	3034,57	11	275,87	
RUA CASTELO RODRIGO, 199	8	505,81	5	101,16	
RUA CASTELO DE SINTRA, 106	8	611,38	2	305,69	
RUA CASTELO RODRIGO, 309	8	869,99	5	174,00	
AVENIDA ALTAMIRO AVELINO SOARES, 1010/ RUA CASTELO MOURA, 303, 305	8	1008,00	5	201,60	
RUA CASTELO DE SINTRA, 783	8	135,85	2	67,93	
RUA DOUTOR SYLVIO MENICUCCI, 1125	8	715,51	2	357,76	

Quadro E.2 – Continuação

ENDEREÇO	Sub-Bacia	Área construída (m ²)	Nº Pavimentos	Área construída/ Pavimento (m ²)	Área total (m ²)
AVENIDA PRESIDENTE TANCREDO NEVES, 2640, 2700, / RUA MARILDO GERALDO DA SILVA, 10	8	12471,60	15	831,44	
RUA CASTELO RODRIGO, 159	8	706,36	7	100,91	
RUA CASTELO DE EDIMBURGO, 329	8	700,13	7	100,02	
AVENIDA MIGUEL PERRELA, 83, 85, 87	8	342,92	2	171,46	
RUA CASTELO GUIMARAES, 615	8	982,33	3	327,44	
RUA CASTELO GUIMARAES, / RUA CASTELO SANTAREM, 10, 20	8	461,38	3	153,79	
RUA CASTELO SERPA, 110	8	733,61	6	122,27	
RUA CASTELO DE SINTRA, / RUA CASTELO MONTALVAO, 196	8	3318,21	12	276,52	
RUA CARLOS LOPES DA COSTA, 132	9	319,19	3	106,40	1652,85
RUA CONSTANTINO SIQUEIRA DOS SANTOS, 400	9	559,91	4	139,98	
RUA CARLOS LOPES DA COSTA, 177	9	538,03	3	179,34	
RUA JOSE ROTHEIA, 96	9	488,92	4	122,23	
RUA JOSE ROTHEIA, 500	9	440,02	4	110,01	
RUA CONSTANTINO SIQUEIRA DOS SANTOS, 602	9	656,02	4	164,01	
RUA JOSE ROTHEIA, 527	9	595,09	4	148,77	
RUA JAIR GOMES BASTOS, 51	9	736,91	5	147,38	
RUA CONSTANTINO SIQUEIRA DOS SANTOS, 285	9	587,82	4	146,96	
RUA CONSTANTINO SIQUEIRA DOS SANTOS, 528	9	336,22	2	168,11	

Quadro E.2 – Continuação

ENDEREÇO	Sub-Bacia	Área construída (m ²)	Nº Pavimentos	Área construída/ Pavimento (m ²)	Área total (m ²)
RUA CONSTANTINO SIQUEIRA DOS SANTOS, 185	9	286,27	3	95,42	
RUA RAFAEL JOSE SILVA, 20	9	248,49	2	124,25	
RUA MARIA FORTUNATA ROTHEIA, 528	10	447,19	4	111,80	439,16
RUA SILVIO PEREIRA BATISTA, 108	10	388,30	3	129,43	
RUA JOSE ALEXANDRE FERREIRA, 490	10	271,77	4	67,94	
RUA MARIA FORTUNATA ROTHEIA, 427	10	389,97	3	129,99	
RUA PARAUNA, 272	11	195,37	2	97,69	
RUA ZILAH SOUZA SPOSITO, 32	11	1449,77	8	181,22	2497,54
AVE SERRANA, 278	11	329,91	3	109,97	
AVE SERRANA, 508,510	11	854,01	5	170,80	
RUA HUDSON MAGALHAES MARQUES, 216	11	246,19	2	123,10	
RUA OURINHOS, 234	11	242,29	2	121,15	
RUA IBICARAI, s/n	11	212,40	2	106,20	
RUA IZABEL ALVES MARTINS, s/n	11	1028,01	2	514,01	
RUA JORNALISTA GERALDO RESENDE, 520/ RUA OSIAS BAPTISTA	11	520,28	6	86,71	
RUA ROSALINA CALEGARIO, / RUA SYLVIO ANDRADE, 564/ RUA SYLVIO ANDRADE, 564	11	2676,78	9	297,42	
RUA ROSALINA CALEGARIO, / RUA SYLVIO ANDRADE, 585	11	3962,38	12	330,20	
AVENIDA SERRANA, 160	11	285,21	2	142,61	
AVENIDA SERRANA, 162	11	432,96	2	216,48	

Quadro E.2 – Continuação

ENDEREÇO	Sub-Bacia	Área construída (m ²)	Nº Pavimentos	Área construída/ Pavimento (m ²)	Área total (m ²)	
RUA MERIDIONAL, 49	12	655,19	5	131,04	642,89	
RUA QUITANDINHA, 335	12	517,80	6	86,30		
RUA LOPES DA COSTA, 26 / RUA REAL MADRID, 261	12	712,90	8	89,11		
RUA ANDRADE MELO, s/n	12	280,24	2	140,12		
RUA LUME, / RUA SAO MATIAS, 74/ RUA SAO MATIAS, 76	12	392,63	2	196,32		
RUA DOS PSICOLOGOS, 78	13	202,52	2	101,26	1516,69	
RUA FLORENCIO JOSE DOS SANTOS, 88	13	311,74	4	77,94		
AVE JOAO XXIII, 540	13	298,21	3	99,40		
RUA ARROJADO LISBOA, 145	13	519,73	5	103,95		
RUA JAO, 160	13	399,98	5	80,00		
RUA DAVID RABELO, 1008	13	203,66	2	101,83		
RUA JOAQUIM DE PAULA, 464	13	350,60	3	116,87		
AVENIDA DOS ENGENHEIROS, 1300	13	2917,30	12	243,11		
RUA CLEMENTE BARRETO, 626	13	130,57	1	130,57		
AVENIDA DOS ENGENHEIROS, 705, 707, 709	13	134,39	1	134,39		
RUA DOS ARQUITETOS, 315/ RUA DOS ELETROTECNICOS	13	505,52	4	126,38		
AVENIDA JOAO XXIII, 450	13	201,00	1	201,00		
AVE PRESIDENTE TANCREDO NEVES, 1965	14	696,94	2	348,47		348,47

Quadro E.2 – Continuação

ENDEREÇO	Sub-Bacia	Área construída (m ²)	Nº Pavimentos	Área construída/ Pavimento (m ²)	Área total (m ²)
RUA PALMITAL, 76	16	697,40	5	139,48	576,14
RUA COLINA, s/n	16	342,24	2	171,12	
RUA CASTELO NUEVO, 744	16	267,04	2	133,52	
RUA CONCEICAO DA BARRA, 467	16	264,03	2	132,02	
RUA PASSO FUNDO, 124	17	310,46	3	103,49	103,49
RUA MARIO DE MELO, 70, 80	18	276,01	1	276,01	2593,59
RUA GUARARAPES, 107, 105, 109	18	226,40	3	75,47	
RUA URSULINA DE MELO, 234	18	196,77	1	196,77	
RUA ACAIACA, 836,840	18	310,58	2	155,29	
RUA SETIBA, 227,229,231	18	237,47	3	79,16	
AVE ABILIO MACHADO, 3123	18	141,46	3	47,15	
RUA CAITITE, 853,855,857,859	18	406,90	3	135,63	
RUA MARIO DE MELO, 48, 50, 52, 54, 56, 58, 60	18	791,27	2	395,64	
RUA EUGENIA NERY, 113	18	336,19	4	84,05	
RUA ADELINA RITA DE JESUS, 29/ RUA URSULINA DE MELO, 70	18	410,68	4	102,67	
RUA DEPUTADO CLAUDIO PINHEIRO DE LIMA, 330	18	3719,72	5	743,94	
RUA MARIA MAGALHAES DE SOUZA, 18	18	477,17	4	119,29	
RUA ARAGUA, 35	18	332,12	4	83,03	
RUA EUGENIA NERY, 215	18	397,97	4	99,49	

Quadro E.2 – Continuação

ENDEREÇO	Sub-Bacia	Área construída (m²)	Nº Pavimentos	Área construída/ Pavimento (m²)	Área total (m²)
RUA URUCANIA, 29	19	580,99	7	83,00	240,04
RUA DO BATISMO, 192	19	471,11	3	157,04	
RUA MARFIM, 610	20	1174,91	5	234,98	953,78
RUA ROGERIO SALLES BARBOSA, 158, 166	20	288,66	2	144,33	
RUA TAIOBEIRAS, 801	20	243,68	3	81,23	
RUA MARFIM, 826	20	1183,21	6	197,20	
RUA CANELINHA, 41	20	231,68	2	115,84	
RUA TACIBA, 272	20	180,20	1	180,20	
RUA IMBITUBA, 203, 207, 211	21	318,10	4	79,53	
RUA AMARILIS, s/n	21	130,00	2	65,00	
RUA ITAPOA, 262	21	321,60	2	160,80	
RUA JACAREI, 890	21	211,56	1	211,56	
RUA GUACIRA, 116	21	402,48	2	201,24	
RUA CONCEICAO COSTA, 41	21	786,68	6	131,11	
AVE DAS CASTANHOLAS, 244	23	32793,42	120	273,28	1211,09
RUA MELO TEIXEIRA, 59	23	1433,30	7	204,76	
RUA AUGUSTO SOUZA COUTINHO, 176	23	327,99	4	82,00	
RUA AUGUSTO SOUZA COUTINHO, 844	23	1199,73	8	149,97	

Quadro E.2 – Continuação

ENDEREÇO	Sub-Bacia	Área construída (m²)	Nº Pavimentos	Área construída/ Pavimento (m²)	Área total (m²)
RUA AROEIRA NEVES, 238	23	242,37	3	80,79	
RUA AUGUSTO SOUZA COUTINHO, 33	23	863,87	8	107,98	
RUA ASSARAI, 10	23	214,37	3	71,46	
RUA MELO TEIXEIRA, 237	23	389,41	4	97,35	
RUA AUGUSTO SOUZA COUTINHO, 272	23	717,55	5	143,51	

Quadro E.3 – Processos de licenciamento e regularização na bacia do Córrego Ressaca (por sub-bacia), no ano de 2016

ENDEREÇO	Sub-Bacia	Área construída (m ²)	Nº Pavimentos	Área construída/ Pavimento (m ²)	Área total (m ²)	
AVENIDA PRESIDENTE TANCREDO NEVES, 5137, 5141, 5145/ RUA CASTELO DE AJUDA, 50, 70/ RUA JOAO ALVES DA SILVA	1	1773,39	5	354,68	496,69	
RUA FLORENCA, 235, 245, 255	1	426,03	3	142,01		
RUA LIGURIA, 653	2	658,42	4	164,61	671,00	
RUA MARIA FRANCISCA GOMES, 100	2	389,55	5	77,91		
RUA LUCIA HELENA, 165	2	162,49	1	162,49		
RUA VITERBO, 320	2	417,81	3	139,27		
RUA PEDROGAO PEQUENO, 395, 397	2	506,89	4	126,72		
AVENIDA PRESIDENTE TANCREDO NEVES, 3534/ RUA ANTENOR PRATA	3	1058,12	2	529,06		1986,70
AVENIDA ALTAMIRO AVELINO SOARES, 4/ AVENIDA PRESIDENTE TANCREDO NEVES, 2797, 2811	3	5140,15	9	571,13		
RUA CASTELO DE OBIDOS, 441	3	946,81	6	157,80		
RUA CASTELO DE LISBOA, 96, 98	3	510,36	6	85,06		
AVENIDA MIGUEL PERRELA, 633/ RUA CASTELO DA BEIRA/ RUA CASTELO GUIMARAES	3	952	4	238,00		
RUA CASTELO DE ALMADA, 60, 64	3	566,28	3	188,76		
RUA CASTELO DE CRATO, 76	3	322,1	4	80,53		
RUA CASTELO DE ALMADA, 111	3	818,17	6	136,36		
R. PROF. DOMICIO MURTA, 80/ R. WADY J. ALAU	4	3936,34	14	281,17	1034,90	

Quadro E.3 – Continuação

ENDEREÇO	Sub-Bacia	Área construída (m ²)	Nº Pavimentos	Área construída/ Pavimento (m ²)	Área total (m ²)
RUA JOAO BERNARDINO SANTOS, 515/ RUA MONTE SINAI	4	624,30	4	156,08	
RUA SENA MADUREIRA, 493, 489, 491, 487	4	4183,60	7	597,66	
RUA MANOEL ELIAS DE AGUIAR, 223, 225, 227, 229	4	2864,48	9	318,28	
RUA ANTENOR PRATA, 14	5	830,55	5	166,11	
RUA SERGIO MIRANDA MOREIRA, 575	5	52,27	1	52,27	
RUA OSORIO DE MORAIS, 131	5	451,83	4	112,96	
RUA PROFESSOR MANOEL CASASSANTA, 483	5	376,48	2	188,24	
RUA JOAQUIM HENRIQUES CARDOSO, 38/ RUA SERGIO MIRANDA MOREIRA, 448	5	125,67	2	62,84	
RUA DESEMBARGADOR PEDRO LICINIO, 537	5	299,24	3	99,75	
RUA ARNALDO BUENO AZEVEDO, 452, 456	5	354,20	4	88,55	
AVENIDA ANTONIO AUGUSTO DA SILVA, 293	5	246,30	4	61,58	
RUA SENADOR FIRMINO, 123	5	888,67	6	148,11	
RUA OSORIO DE MORAIS, 50	5	300,59	3	100,20	
RUA AUGUSTO PASSOS MAIA, 52, 54	5	299,77	4	74,94	
RUA ADEMAR MARTINS VIEIRA, 13, 13	5	10773,58	24	448,90	1604,43
RUA AGILIO CRUZ DE SOUZA, 382	7	1011,89	8	126,49	
RUA HELIA RICARDONI DE FREITAS, 513, 515	7	480,54	4	120,14	
RUA MARIA DE DEUS, 127	7	1024,70	8	128,09	956,48

Quadro E.3 – Continuação

ENDEREÇO	Sub-Bacia	Área construída (m ²)	Nº Pavimentos	Área construída/ Pavimento (m ²)	Área total (m ²)
RUA MARIA DE DEUS, 136	7	472.24	3	157.41	
RUA HELIO DE SENNA FIGUEIREDO, 240	7	741.42	6	123.57	
RUA MARIA CECILIA, 66	7	1156.14	8	144.52	
RUA SYLVIO ANDRADE,	7	312.54	2	156.27	
RUA DOUTOR AGUINALDO MONTEIRO, 67	8	767.32	2	383.66	4704,79
RUA ROMUALDO LOPES CANCADO, 88, 100	8	1543.52	6	257.25	
RUA CASTELO DE TORDESILHAS, 492	8	670.14	7	95.73	
RUA CASTELO SANTAREM, 341, 345	8	478.15	3	159.38	
RUA CASTELO DE ALCOBACA, 159	8	320.24	3	106.75	
RUA ROMUALDO LOPES CANCADO, 399	8	421.10	2	210.55	
RUA CASTELO DE SINTRA, 869	8	309.83	3	103.28	
RUA CASTELO DE ALENQUER, 185	8	899.08	6	149.85	
RUA CASTELO RODRIGO, 110	8	735.86	5	147.17	
RUA CASTELO DE AMIEIRA, 63	8	2304.67	11	209.52	
RUA CASTELO SANTAREM, 103, 105	8	422.00	3	140.67	
RUA CASTELO LAMEGO, 189, 217, 231, 245, 261	8	6313.90	30	210.46	
AVENIDA ALTAMIRO AVELINO SOARES, 380	8	2188.46	7	312.64	
RUA CASTELO MOURA, 439	8	1280.15	8	160.02	

Quadro E.3 – Continuação

ENDEREÇO	Sub-Bacia	Área construída (m²)	Nº Pavimentos	Área construída/ Pavimento (m²)	Área total (m²)
RUA CASTELO RODRIGO, 155, 159	8	466,21	3	155,40	
AVENIDA ALTAMIRO AVELINO SOARES, 81/ RUA ELSON NUNES DE SOUZA, 824	8	436,89	3	145,63	
RUA CASTELO DE EDIMBURGO, 422	8	753,82	5	150,76	
RUA CASTELO DE SINTRA, 768	8	460,57	1	460,57	
AVENIDA ALTAMIRO AVELINO SOARES, 1110	8	528,90	5	105,78	
RUA CASTELO DE LISBOA, 465, 469	8	363,52	2	181,76	
RUA CASTELO RODRIGO, 310	8	1854,62	10	185,462	
RUA CASTELO EVORA, 650	8	3554,29	10	355,429	
RUA CASTELO DE ALCOBACA, 68	8	541,87	6	90,31	
RUA CASTELO DE ABRANTES,	8	675,15	7	96,45	
AVENIDA ALTAMIRO AVELINO SOARES, 711	8	126,14	2	63,07	
AVENIDA MIGUEL PERRELA, 320	8	268,94	4	67,24	
RUA CONSTANTINO SIQUEIRA DOS SANTOS, 460	9	424,45	3	141,48	486,04
RUA JONAS VANUCCI LINS, 137	9	310,00	2	155,00	
RUA CONSTANTINO SIQUEIRA DOS SANTOS, 518	9	305,78	4	76,45	
RUA CONSTANTINO SIQUEIRA DOS SANTOS, 235	9	339,34	3	113,11	
RUA JOSE ROTHEIA, 223	10	399,94	3	133,31	432,57
RUA JOSE ALEXANDRE FERREIRA, 80	10	387,63	2	193,82	
RUA JOSE ALEXANDRE FERREIRA, 418	10	421,78	4	105,45	

Quadro E.3 – Continuação

ENDEREÇO	Sub-Bacia	Área construída (m²)	Nº Pavimentos	Área construída/ Pavimento (m²)	Área total (m²)	
RUA ALUISIO LOBAO VERAS, 184	11	289,06	1	289,06		
RUA SETENTRIONAL, 160	11	215,12	3	71,71		
RUA JORNALISTA MARIO EUGENIO, 425/ RUA ROSALINA CALEGARIO	11	565,41	4	141,35		
RUA CRISTALINA, 179/ RUA TOCANTINS, 310/ RUA TOCANTINS, 320	11	283,09	3	94,36		
RUA IZABEL ALVES MARTINS, 96	11	1921,01	8	240,13		
AVENIDA SERRANA, 511/ RUA HUDSON MAGALHAES MARQUES, 500/ RUA MARIA DE DEUS, 645	11	2092,90	4	523,23		1359,83
RUA NILO, 242	12	155,86	1	155,86	155,86	
RUA DOS ASSISTENTES SOCIAIS, 301/ RUA DOS CONTADORES, 443	13	260,73	4	65,18		
RUA ALAN KARDEC, / RUA VIOLETA DE MELO, 383/ RUA VIOLETA DE MELO, 387/ RUA VIOLETA DE MELO, 395/ RUA VIOLETA DE MELO, 399	13	335,61	3	111,87		
RUA CENACULO, 117	13	80,91	1	80,91		
RUA MARIO CAMPOS, 163	13	297,11	3	99,04		
RUA JOAQUIM DE PAULA, 630, 634	13	309,60	3	103,20		
AVENIDA JOAO XXIII, 480	13	294,60	1	294,60		
RUA DOS ARQUITETOS, 595	13	317,41	3	105,80		
RUA DOS GEOLOGOS, 525	13	205,33	2	102,67		
RUA DOS ARQUITETOS, 619	13	188,23	1	188,23		1930,31

Quadro E.3 – Continuação

ENDEREÇO	Sub-Bacia	Área construída (m ²)	Nº Pavimentos	Área construída/ Pavimento (m ²)	Área total (m ²)
RUA DAVID RABELO, 997, 999	13	193,45	3	64,48	
RUA DOS ARQUITETOS, 477	13	279,47	2	139,74	
RUA CREJUA, 10, 12, 14, 16	13	253,44	3	84,48	
A. DOS ENGENHEIROS, 560/ R. CONCEICAO APARECIDA AUGSTEN, 10/ R. ELISA FELIPPETO RICALDONI, 45	13	12252,91	25	490,12	
RUA TAVARES, 198	16	1213,22	5	242,64	242,64
RUA ELIAS SALIBA, 436	17	287,06	3	95,69	95,69
AV. BRIGADEIRO EDUARDO GOMES, 1550	18	1159,16	2	579,58	
R. FERN. NORONHA/R. MARIA SILVEIRA, 445	18	368,53	5	73,71	
AV. ABILIO MACHADO, / R. ALAN KARDEC/ RUA URSULINA DE MELO, 139	18	4960,00	2	2480,00	
RUA GALILEU, 212	18	370,24	3	123,41	
RUA PORANGA, 344	18	153,13	2	76,57	
R. DEPUTADO CLAUDIO PINHEIRO LIMA, 109	18	733,56	2	366,78	
RUA GRAMADO, 27	18	304,38	1	304,38	
RUA VIOLETA DE MELO, 45, 47	18	255,64	1	255,64	
RUA GALBA, 304	18	183,54	1	183,54	
RUA DAVID RABELO, 72	18	557,89	4	139,47	
R. MIGUEL ANGELO, 158, 162, 168/ R. TRAJ., 153/ RUA TRAJANO, 155/ R. TRAJANO, 157	18	702,82	7	100,40	
RUA BOASSARA, 101	18	383,75	4	95,94	4779,42

Quadro E.3 – Continuação

ENDEREÇO	Sub-Bacia	Área construída (m ²)	Nº Pavimentos	Área construída/ Pavimento (m ²)	Área total (m ²)
RUA CRUCIFICACAO, 135	19	125,00	1	125,00	125,00
RUA VALAO, 202, 204, 206/ RUA VILA VELHA	20	361,17	6	60,20	338,72
AVENIDA AMINTAS JACQUES DE MORAES, 1511	20	335,76	3	111,92	
RUA ASSUMAR, 655, 675/ RUA RUTILO	20	333,21	2	166,61	
RUA ITAJAI, 75	21	211,73	3	70,58	151,18
RUA CERRO CORA, 52	21	241,80	3	80,60	
RUA AUGUSTO SOUZA COUTINHO, 772, 776	23	319,20	3	106,40	782,91
AVENIDA BRIGADEIRO EDUARDO GOMES, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19,21/ RUA ARINOS	23	732,25	4	183,06	
RUA MARCELO COIMBRA TAVARES, 272	23	188,71	3	62,90	
RUA MARCELO COIMBRA TAVARES, 166	23	168,56	2	84,28	
RUA NICANOR CARVALHO, 407	23	733,37	5	146,67	
PRACA PRIMEIRO DE OUTUBRO, 52	23	681,23	6	113,54	
RUA MELO TEIXEIRA, 175	23	344,19	4	86,05	