

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO

Bárbara Regina Pinto e Oliveira

Simulação dos serviços de atendimento
aos efeitos gerados pelos fenômenos
hidrológicos mais recorrentes em Belo
Horizonte

Belo Horizonte

2014

Bárbara Regina Pinto e Oliveira

Simulação dos serviços de atendimento aos efeitos gerados pelos fenômenos hidrológicos mais recorrentes em Belo Horizonte

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Minas Gerais, para a obtenção de Título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Ricardo Pinto

Belo Horizonte

2014

Pinto e Oliveira, Bárbara Regina.

Gestão de Operações em Desastres Naturais

83 páginas

Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. Departamento de Engenharia de Produção.

1. Gestão de Operações Emergenciais
2. Resposta aos Desastres Naturais
3. Fenômenos Hidrológicos
4. Simulação a Eventos Discretos
5. Simulação Baseada em Agentes

I. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. Departamento de Engenharia de Produção.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr.

Carlos Andrey Maia

Prof. Dr.

Luiz Ricardo Pinto

Prof. Dr.

José Arnaldo Barra Montevechi

Aos meus pais Sérgio e Mary, e à minha irmã Maria Cecília.

O caos é uma ordem por decifrar.

José Saramago

Agradecimentos

Ao meu orientador, Prof. Luiz Ricardo Pinto, por dividir comigo seus conhecimentos, e pela motivação durante o desenvolvimento desta dissertação.

À minha família, especialmente meus pais e minha irmã, pelo apoio e incentivo ao longo de todo o meu percurso acadêmico.

Aos meus amigos e ao Emi, pela ajuda e companheirismo no dia-a-dia.

Agradeço também ao Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais (CBMMG), à Equipe do Centro de Climatologia da PUC Minas (TempoClima), e à Superintendência de Desenvolvimento da Capital (SUDECAP), especialmente ao Major Waldeci Gouveia, ao Capitão José Brito de Souza Neto do Centro Integrado de Informações de Defesa Social - CINDS, à Sra. Rejane Siqueira e à Sra. Ilda Aguiar, pela colaboração através do fornecimento de informações imprescindíveis para a elaboração desta dissertação.

Por fim, agradeço à CAPES pelo apoio financeiro ao desenvolvimento desta pesquisa.

Resumo

Apesar dos grandes impactos econômicos e sociais gerados por desastres que atingiram, e que vão continuar atingindo nossas comunidades, infraestruturas e economias, a sociedade acadêmica ainda não se beneficia de um fluxo coeso e contínuo de pesquisas nesta área. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um modelo de simulação capaz de representar o serviço de atendimento do Corpo de Bombeiros aos efeitos dos fenômenos hidrológicos mais recorrentes de Belo Horizonte. Inicialmente, é feito um levantamento das principais características relativas as chamadas atendidas, e ao sistema de monitoramento pluviométrico do problema analisado. Os tempos envolvidos no deslocamento dos veículos de resgate até o local dos incidentes, e no atendimento das ocorrências registradas são estimados através de alguns testes de aderência. Após validar e verificar o modelo computacional alguns cenários são simulados de forma a observar a variação das variáveis de desempenho, como o tempo médio de resposta as chamadas, segundo diferentes parâmetros e configurações do sistema. Um estudo também foi conduzido integrando o modelo de simulação com um modelo de otimização, de maneira a identificar os pontos com maior incidência de chamadas registradas, e determinar uma melhor distribuição das bases operacionais já instaladas.

Abstract

Despite of the economical and social impacts, generated by disasters, and the ones that will yet affect our communities, infrastructures and economies, the academic society does not take any profit of uninterrupted investigations in this area yet. This research presents the development of a simulation model which is capable of represent the firefighters department response, according to the most recurrent hydrological phenomena's in Belo Horizonte. Initially, an analysis of the received phone calls main characteristics is made, as is made with the pluviometric monitoring system of the studied problem. The time spent in the displacement of rescue vehicles to the location of the incidents, and the service time of the recorded incidents are estimated through some adhesion tests. After validating and verifying the model, some scenarios were simulated in order to analyze the variability response time, and some other variables of interest, used to evaluate the performance of the system. Also, a study was conducted, integrating a simulation model, and an optimization model, to identify most call concentration areas, and establish a better distribution for the existing operational bases.

Lista de Figuras

2.1	Comparativo entre a densidade demográfica e o número de óbitos por região . . .	2
2.2	Deslizamento de terra ocorrido em Angra dos Reis, 2010	3
2.3	Alagamento ocorrido em São Paulo, 2011	4
2.4	Enxurrada ocorrida em Belo Horizonte, 2003	4
2.5	Inundação ocorrida nas margens do Rio Tietê, São Paulo 2012	5
2.6	Enchente ocorrida no Ribeirão Arrudas, Belo Horizonte 2008	5
2.7	Diferença entre as inundações e enchentes	6
2.8	Atividades envolvidas em cada etapa de um desastre natural	7
2.9	Ações envolvidas na gestão de operações em desastres naturais	8
2.10	Série histórica dos municípios atingidos por fenômenos hidrológicos em Minas Gerais	10
2.11	Precipitação acumulada entre novembro de 2011 e janeiro de 2012	11
2.12	Principais bacias hidrográficas de Belo Horizonte	11
3.1	Agentes envolvidos na gestão de operações em desastres naturais	15
3.2	Contribuição da PO na gestão de situações emergenciais	16
3.3	Áreas de aplicação da simulação baseada em agentes	24
4.1	Etapas de um projeto de simulação a eventos discretos	27
4.2	Processo de Verificação e Validação da simulação	29
4.3	Estações de monitoramento hidrológico em Belo Horizonte	32
4.4	Carta de Inundação elaborada para a regional Leste	33
5.1	Fluxograma do processo atendimento das chamadas do CBMMG	37
5.2	Gráfico do volume médio de chuva acumulado no Barreiro	38
5.3	Agentes do sistema simulado	40
5.4	Interação entre os agentes do sistema simulado	41

5.5	Precipitação acumulada nas estações da região	44
5.6	Frequência da ocorrência de chamadas	46
5.7	Diagrama box-plot para identificação de <i>outliers</i>	48
5.8	<i>Box-plot</i> da velocidade média dos veículos de resgate	49
5.9	Distribuição da velocidade dos veículos de resgate por faixa de horário	50
5.10	<i>Box-plot</i> do tempo de atendimento das chamadas do CBMMG	51
5.11	Distribuição do tempo de atendimento das chamadas por natureza	52
5.12	Mapeamento de Belo Horizonte - Sistema UTM	53
5.13	Atendimento da chamada gerada na região Leste	54
5.14	Primeiro módulo da simulação	61
5.15	Segundo módulo da simulação	61
5.16	Terceiro módulo da simulação	62
5.17	Definição do tempo de aquecimento da simulação	63
5.18	Histograma do tempo de resposta atual simulado	67
5.19	Distribuição do atendimento das chamadas por base operacional	67
6.1	Áreas concentradoras de incidentes em Belo Horizonte	72
6.2	Comparativo do tempo médio de deslocamento das viaturas - Cenário Atual	73
6.3	Comparativo do tempo médio de deslocamento das viaturas - Cenário 1	74
6.4	Comparativo do tempo médio de deslocamento das viaturas - Cenário 2	74

Lista de Tabelas

2.1	Danos humanos gerados por desastres naturais em 2012 no Brasil	2
2.2	Danos humanos gerados por desastres naturais entre 1900 e 2013	9
3.1	Período de publicação dos artigos analisados	15
3.2	Metodologias abordadas nas publicações levantadas	17
3.3	Etapas dos desastres abordadas nas publicações levantadas	17
4.1	Dados das estações de monitoramento hidrológico de Belo Horizonte	33
4.2	Registro das chamadas de emergência do CBMMG	34
5.1	Momento da leitura do volume de água acumulado nas regiões	42
5.2	Chamada atendida na região do Barreiro	43
5.3	Distribuição empírica da probabilidade de que uma chamada seja gerada	45
5.4	Distribuição das chamadas do CBMMG por região e natureza	45
5.5	<i>Outliers</i> da velocidade média dos veículos de resgate	48
5.6	Critérios usuais para a classificação do p-value	49
5.7	<i>Outliers</i> do tempo de atendimento das chamadas do CBMMG	51
5.8	Concentradores formados para as chamadas do Tipo 2	57
5.9	Validação do número de ocorrências registradas	60
5.10	Validação do tempo de resposta das ocorrências atendidas	60
5.11	Intervalo de confiança para o tempo de resposta as chamadas geradas	65
5.12	Tempo de resposta no cenário atual	66
5.13	Precipitação média acumulada em Belo Horizonte entre 1961 e 2013	68
6.1	Comparativo do número total de ocorrências simuladas	69
6.2	Comparativo do tempo de resposta as chamadas simuladas	70

6.3	Comparativo do tempo de espera por atendimento	70
6.4	Pontos que mais concentram incidentes de natureza hidrológica em Belo Horizonte	71
6.5	Comparativo do tempo médio de deslocamento das viaturas	73

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Objetivos	2
1.1.1	Objetivos gerais	2
1.1.2	Objetivos específicos	3
1.2	Estrutura	3
2	Gestão de operações em desastres naturais	1
2.1	Desastres naturais	1
2.2	O ciclo de vida da gestão de operações em desastres naturais	6
2.3	Histórico dos impactos provocados por fenômenos hidrológicos em nível global, nacional e local	8
3	Referencial teórico	13
3.1	Estado da arte	14
3.2	Simulação	19
3.2.1	Motivação no uso da simulação	19
3.2.2	Modelos híbridos de simulação	22
4	Metodologia de trabalho	26
4.1	Projeto de simulação	26
4.2	Formulação do problema	30
4.3	Coleta de dados	31
4.3.1	Registros das estações de monitoramento hidrológico de Belo Horizonte . .	31
4.3.2	Chamadas de emergência atendidas pelo CBMMG	34

5	Simulação dos serviços de atendimento às chamadas do CBMMG	36
5.1	Modelo de simulação	36
5.1.1	Definição dos agentes e entidades do sistema	39
5.1.2	Leitura do arquivo texto	42
5.1.3	Probabilidade de ocorrência	43
5.1.4	Natureza da chamada	44
5.1.5	Distância percorrida pelos veículos	46
5.1.6	Velocidade de deslocamento do resgate	47
5.1.7	Tempo de atendimento da chamada	50
5.1.8	Localização das chamadas	51
5.1.9	Localização de concentradores	54
5.1.10	Alocação dos veículos de resgate	56
5.1.11	Antecipação de chamadas em espera	59
5.2	Verificação e validação do modelo computacional	59
5.3	Definição do número de replicações e <i>warm-up</i>	62
5.4	Planejamento dos experimentos	65
5.4.1	Cenário inicial	65
5.4.2	Cenários	67
6	Análise dos Resultados	69
7	Considerações finais	75
	Referências Bibliográficas	78
A	Implementação da API do Google Maps	83

Capítulo 1

Introdução

A magnitude e a recorrência de catástrofes como as inundações ocorridas no Rio de Janeiro em 2010, que de acordo com a EMDAT (2013) totalizaram cerca de 300 vítimas fatais, evidenciam a vulnerabilidade que ainda persiste nos serviços prestados à população afetada por desastres naturais.

Os aspectos climatológicos e geomorfológicos do Brasil contribuem para a ocorrência de diversos tipos de catástrofes naturais, sendo os fenômenos de natureza hidrológica os mais recorrentes no país. A ocupação das áreas de risco e o crescimento desordenado da população exposta são características demográficas e socioeconômicas que intensificam a vulnerabilidade, a extensão e os efeitos danosos desses desastres.

O trabalho de mapeamento dos trechos inundáveis dos corpos de água de Minas Gerais, proposto pela Agência Nacional de Águas (ANA), mostra que a situação de Minas Gerais não difere muito do restante do país. No estado estão localizadas as nascentes de importantes bacias hidrográficas federais, como por exemplo, as bacias do Rio São Francisco, Rio Paraná e Atlântico Sudeste, responsáveis por grande parte dos trechos inundáveis do estado. A Região Metropolitana de Belo Horizonte está entre as mesorregiões mais afetadas, principalmente no período chuvoso, de outubro à março, meses de acúmulo significativo de precipitação pluviométrica.

Assim como a maioria das grandes metrópoles brasileiras a drenagem urbana em Belo Horizonte foi, durante muitos anos, negligenciada do planejamento de expansão urbana, resultando no aumento dos impactos de eventos trágicos a cada período de chuvas. Além disso, o rápido crescimento populacional acabou resultando no desenvolvimento desordenado da cidade ao longo dos principais leitos de suas bacias hidrográficas, agravando ainda mais a situação das populações que são periodicamente atingidas pelo transbordamento de água nas margens dos canais, ou pelo

acúmulo de águas pluviais nas vias.

Algumas obras estruturais já foram executadas para atenuar o impacto gerado por esses fenômenos, entretanto, a eficiência de tais obras a longo prazo é bastante discutível, uma vez que, pouco ainda é feito para conter construções e ocupações irregulares nas bacias hidrográficas. Além disso, a magnitude dos impactos gerados pelos fenômenos hidrológicos depende também de variações climatológicas da região, as quais podem tornar obsoletas algumas soluções já propostas para o município.

O exposto acima reforça a importância da gestão de operações emergenciais na condução de respostas rápidas e eficientes a esses tipos de fenômenos, pressupondo a redução dos danos humanos e materiais da população exposta.

A aleatoriedade e singularidade dos desastres anseiam por soluções altamente dinâmicas e eficientes, tornando o tópico propício ao estudo da pesquisa operacional (PO). Não obstante a importância do tema, poucas pesquisas foram desenvolvidas nesse domínio, entre 1980 e 2006 apenas 109 artigos abordaram a aplicação da PO na gestão de operações em catástrofes decorrentes de causas naturais ou intervenções humanas, dentre os quais apenas 11,9% sugerem a utilização de técnicas de simulação como metodologia de trabalho (Altay and Green III, 2006). Apesar do baixo percentual de publicações, essas técnicas parecem contornar alguns dos maiores desafios enfrentados, a antecipação dos cenários que podem suceder as catástrofes, e o desenvolvimento de modelos capazes de representar, da maneira mais fidedigna possível, o funcionamento do sistema real, sendo portanto a metodologia escolhida para o desenvolvimento desta pesquisa.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos gerais

Desenvolver um modelo de simulação capaz de representar de maneira confiável os serviços de atendimento aos efeitos dos fenômenos hidrológicos que ocorrem com maior frequência em Belo Horizonte. A partir do modelo desenvolvido identificar possíveis áreas de risco, com o fito de reduzir o tempo de resposta, e aprimorar o nível de atendimento das chamadas de emergência recebidas pelo Corpo de Bombeiros de Minas Gerais.

1.1.2 Objetivos específicos

- Desenvolvimento de um modelo de simulação capaz de representar a evolução e os efeitos de um fenômeno hidrológico nas principais estações de monitoramento pluviométrico de Belo Horizonte.
- Desenvolvimento de uma ferramenta para auxiliar na identificação das zonas de maior risco e com maior taxa de demanda dos serviços de emergência.
- Utilização do modelo de simulação e da ferramenta desenvolvida na etapa anterior para auxiliar a alocação dos recursos disponíveis nas áreas de alerta, reduzindo o tempo de resposta às chamadas de emergência, e aumentando a eficiência do atendimento a essas chamadas.

1.2 Estrutura

No primeiro capítulo da proposta de dissertação é feita a introdução ao problema, e a definição dos objetivos gerais e específicos desta pesquisa, buscando delimitar de forma clara seu escopo.

O capítulo 2 apresenta um levantamento dos desastres naturais ocorridos em nível mundial, nacional e local, apontando também o ciclo da gestão de operações emergenciais neste contexto.

O capítulo 3 apresenta uma revisão de literatura sobre diferentes técnicas da Pesquisa Operacional aplicáveis ao objeto de estudo.

O capítulo 4 apresenta a base de dados desenvolvida para armazenar e manipular as principais informações cedidas à esta pesquisa, bem como as etapas e considerações feitas na elaboração de um modelo de simulação que represente os efeitos dos principais fenômenos hidrológicos do município de Belo Horizonte.

O capítulo 5 detalha o modelo computacional desenvolvido bem como as considerações e simplificações necessárias a sua elaboração.

O capítulo 6 apresenta os principais resultados obtidos a partir do cenário atual e de outros cenários analisados.

O capítulo 7 finaliza a proposta de dissertação, apresentando as discussões finais e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Gestão de operações em desastres naturais

2.1 Desastres naturais

Os desastres naturais resultam de eventos catastróficos variados decorrentes de causas naturais ou de intervenções humanas, resultando em graves perturbações à sociedade, na maioria das vezes envolvendo inestimáveis perdas humanas ou mesmo volumosos prejuízos materiais.

Os aspectos climatológicos e geomorfológicos do Brasil contribuem para a ocorrência de estiagens, inundações e deslizamentos de terra presentes entre os desastres mais recorrentes no país. A ocupação das áreas de risco e o crescimento desordenado da população exposta são características demográficas e socioeconômicas que intensificam a vulnerabilidade, a extensão e os efeitos danosos desses desastres.

No ano de 2012, os desastres naturais causaram óbito de 93 pessoas e afetaram mais de 16 milhões de cidadãos brasileiros. Juntos, os movimentos de massa, as enxurradas e as inundações, foram responsáveis por 71% desses óbitos e 42% do total de afetados, Tabela 2.1.

A Figura 2.1 demonstra que de todas as regiões do país, o sudeste é a única a superar a média regional brasileira de 18,6 óbitos ocasionados por desastres naturais em 2012. Essa alta parcela de óbitos na região está diretamente relacionada à densidade demográfica local (86,92 hab./km²) que supera em muito o índice nacional (22,43 hab./km²).

Em face do exposto acima, esta pesquisa tem como objetivo desenvolver uma ferramenta que identifique previamente possíveis áreas de risco, a fim de reduzir o tempo de resposta, e aprimorar o nível de atendimento das chamadas de emergência recebidas pelo Corpo de Bombeiros de Minas

Tabela 2.1: Danos humanos gerados por desastres naturais em 2012 no Brasil

Eventos	Óbitos	Feridos	Enfermos	Desabrigados	Desalojados	Desaparecidos	Afetados
Seca/Estiagem	6	0	14.214	30	750	0	8.956.853
Incêndio Florestal	0	0	0	0	0	0	37.338
Movimentos de massa	26	10	2	1.129	2.801	0	123.555
Erosão	0	0	5	81	2.105	0	55.653
Alagamentos	5	6	6	1.048	954	0	24.581
Enxurradas	26	6.580	14.318	49.768	262.851	2	1.856.359
Inundações	14	2.409	10.665	52.041	216.349	2	5.185.018
Geadas	0	0	0	0	0	0	30.777
Granizo	0	11	4	418	7.971	1.040	103.265
Tornados	0	2	0	1	20	0	4.310
Vendaval	16	150	13	5.769	13.220	0	599.905
Total	93	9.168	39.227	110.286	507.021	1.044	16.977.614

Fonte: CENAD (2012), p.p. 30.

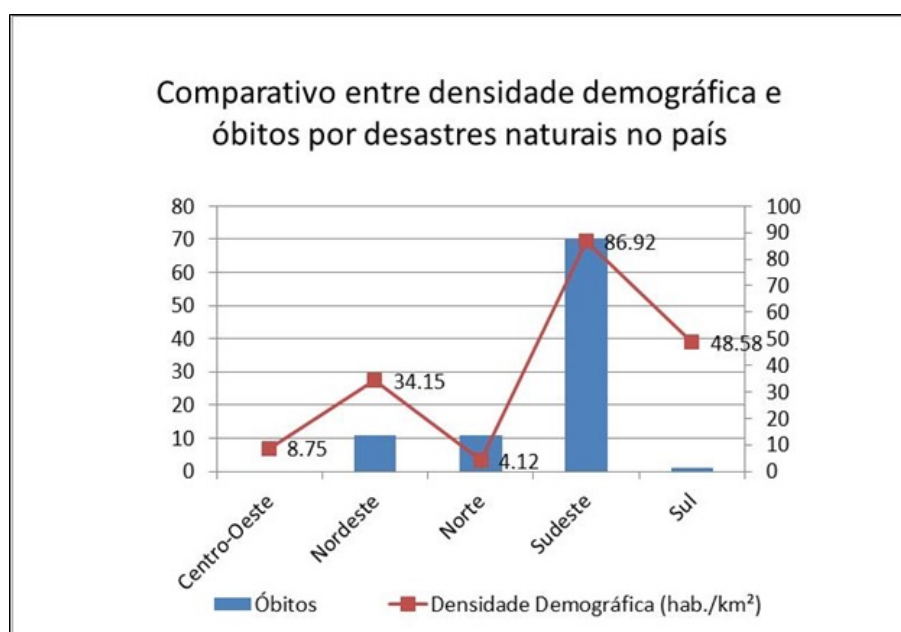


Figura 2.1: Comparativo entre a densidade demográfica e o número de óbitos por região

Fonte: CENAD (2012), p.p. 34

Gerais (CBMMG), pressupondo a redução dos danos humanos e materiais da população.

O passo inicial para atingir esse objetivo é caracterizar os fenômenos hidrológicos de interesse, analisados neste estudo por estarem diretamente relacionados ao aumento dos índices pluviométricos:

- Movimentos de massa;
- Alagamentos;
- Inundações;

- Enxurradas.

No Brasil, as regiões Sul e Sudeste são as mais atingidas por esses fenômenos, principalmente no período chuvoso, de outubro à março, meses de acúmulo significativo de precipitação pluviométrica.

Movimentos de massa

Os movimentos de massa ou deslizamentos de terra, como mostrado na Figura 2.2, são rupturas do solo que podem levar ao escorregamento de lama, detritos ou blocos de rocha, e ao desmoronamento ou soterramento de construções civis. Esses fenômenos naturais ocorrem principalmente em regiões serranas e montanhosas, com clima predominantemente úmido. A retirada da vegetação, o acúmulo de lixo, e a construção de edificações sob condições irregulares são atividades antrópicas que aumentam a susceptibilidade dessas regiões.



Figura 2.2: Deslizamento de terra ocorrido em Angra dos Reis, 2010
Fonte: Estadão (2010)

Alagamentos

Os alagamentos, como mostrado na Figura 2.3, são acúmulos de água resultantes da combinação de intensas precipitações com a baixa capacidade de escoamento dos sistemas de drenagem urbana, muitas vezes agravados pelo acondicionamento incorreto de detritos e resíduos de atividades humanas, que terminam por potencializar o assoreamento dos equipamentos de drenagem, como os arroios e as bocas-de-lobo.



Figura 2.3: Alagamento ocorrido em São Paulo, 2011
Fonte:R7 (2011)

Enxurradas

As enxurradas, como a indicada na Figura 2.4, são desastres naturais associados ao escoamento superficial da água precipitada de forma rápida e intensa, principalmente em locais acidentados e com bacias hidrográficas de menores dimensões. A susceptibilidade desses locais pode ser agravada pela impermeabilização do solo, ocasionada principalmente pela ocupação inadequada de populações ribeirinhas.



Figura 2.4: Enxurrada ocorrida em Belo Horizonte, 2003
Fonte: Manuelzão (2003)

Inundações e enchentes

As inundações e enchentes, ilustradas na Figura 2.5 e 2.6, respectivamente, ocorrem principal-

mente em áreas mais planas e em fundos de vales, e tem potencial de afetar maiores contingentes populacionais. Esses fenômenos evoluem de forma paulatina e relativamente previsível, devido a precipitações intensas e contínuas.



Figura 2.5: Inundação ocorrida nas margens do Rio Tietê, São Paulo 2012
Fonte: G1 (2012)



Figura 2.6: Enchente ocorrida no Ribeirão Arrudas, Belo Horizonte 2008
Fonte: HojeEmDia (2008)

Ainda existe uma grande dificuldade em se distinguir os desastres hidrológicos, principalmente no que se refere aos dois últimos fenômenos descritos. A Figura 2.7 ajuda a entender melhor essa diferença. A inundação é o extravasamento das águas dos canais de drenagem para áreas marginais, ou planícies de inundação; as enchentes consistem no aumento do nível da água até a cota máxima do canal, porém, sem que ocorra o transbordamento.



Figura 2.7: Diferença entre as inundações e enchentes
Fonte: CEDEC (2013)

Uma vez que esses fenômenos estão diretamente relacionados com altos níveis de precipitação pluviométrica e com a ineficiência do sistema de drenagem, o monitoramento dos mesmos, bem como os investimentos em pesquisas e intervenções que aumentem a resiliência dos municípios afetados, são de fundamental importância.

2.2 O ciclo de vida da gestão de operações em desastres naturais

A Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC) estabelece diferentes tipos de ações envolvidas na gestão de operações em desastres naturais:

- **Mitigação e Prevenção:** envolve a aplicação de medidas que podem reduzir as causas e consequências dos desastres naturais com base em análises de risco, e regulamentações que controlem a ocupação e edificação urbana.
- **Preparação:** composta por atividades que capacitam a população para responder de maneira mais adequada ao desastre. São os planos de contingência elaborados nessa etapa que facilitam a mobilização de recursos humanos e logísticos, além da própria articulação do sistema de proteção e defesa civil neste contexto.
- **Resposta:** emprego de recursos e procedimentos de emergência, durante ou imediatamente após a ocorrência de um desastre, com o intuito de reduzir os efeitos gerados pelo mesmo.
- **Recuperação:** conjunto de atividades adotadas após o impacto do desastre, a fim de reconstruir e estabilizar o local afetado. Buscando restabelecer a situação anterior ao episódio ou até mesmo, quando possível, evitar a reincidência dos danos.

Não é possível definir com exatidão o limite entre os dois últimos itens, uma vez que algumas ações de resposta se prolongam por mais tempo podendo ser confundidas com ações de recuperação, como é o exemplo de restabelecimento do fornecimento de água e energia elétrica.

A Figura 2.8 apresenta as atividades típicas envolvidas com cada tipo de ação detalhado.

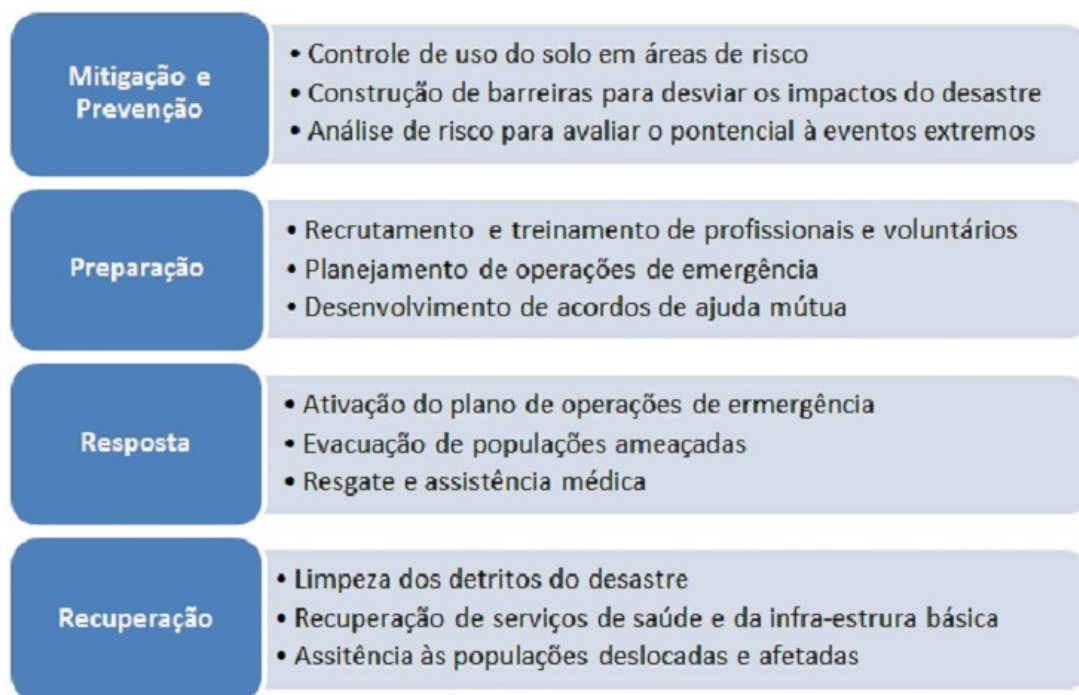


Figura 2.8: Atividades envolvidas em cada etapa de um desastre natural
Fonte: Altay and Green III (2006), p.p. 481

Dentre esses tipos de ações, a prevenção, mitigação e preparação, se relacionam diretamente com a gestão do risco de desastres, enquanto resposta e recuperação se relacionam com a gestão de desastres em si, Figura 2.9.

Segundo CENAD (2012) a gestão do risco de desastres consiste em um processo sistemático que busca eliminar ou diminuir a vulnerabilidade da população aos efeitos adversos desses eventos, mediante a prática de medidas de prevenção, mitigação e preparação. Assim, com uma gestão do risco eficiente também é possível poupar os recursos necessários à gestão de desastres em si, que compreende as fases de resposta e recuperação da área afetada. É muito importante que os envolvidos no problema compreendam a forte inter-relação existente entre os diferentes tipos de ações que podem ser tomados. De acordo com a Organização das Nações Unidas (ONU), cada dólar investido em prevenção poupa sete dólares gastos em reconstrução.

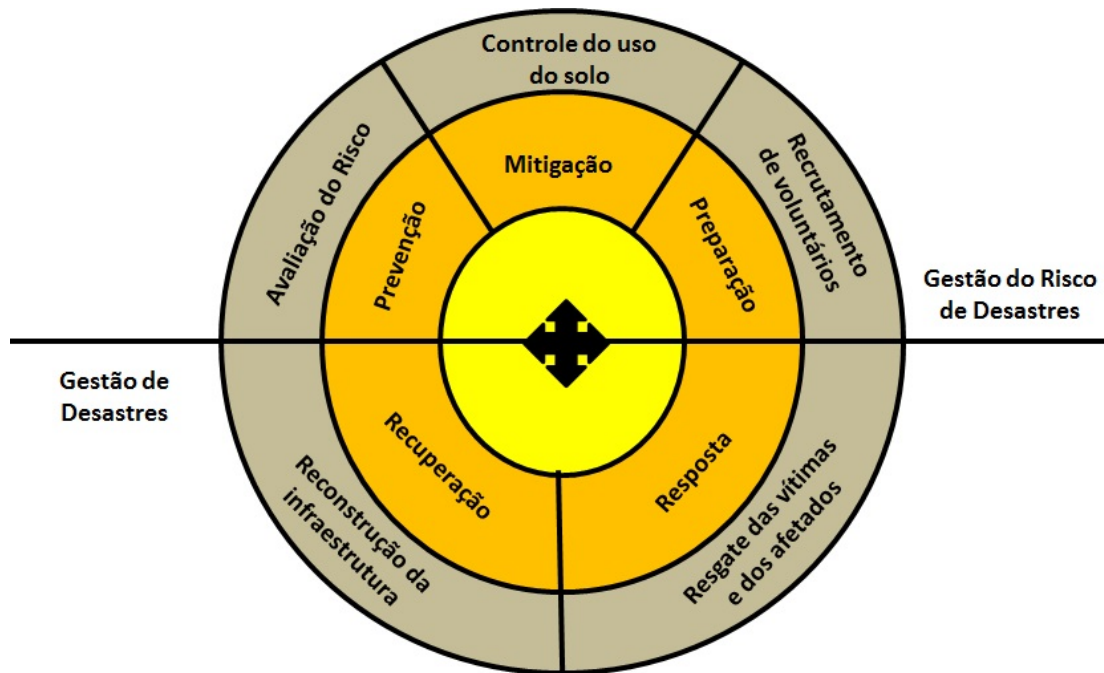


Figura 2.9: Ações envolvidas na gestão de operações em desastres naturais

2.3 Histórico dos impactos provocados por fenômenos hidrológicos em nível global, nacional e local

Desde 1988, o Centro de Pesquisa em Epidemiologia dos Desastres vem registrando em um amplo banco de dados (EM-DAT) informações acerca dos principais eventos emergenciais ocorridos no mundo.

De acordo com Guha-Sapir et al. (2013), no ano de 2012 os desastres naturais, mais uma vez, geraram impactos devastadores sobre a sociedade. No mundo inteiro foram registrados 357 desastres naturais, causando a morte de cerca de 9 mil pessoas, e totalizando uma perda estimada em 157,3 bilhões de dólares. Juntos, China, Estados Unidos, Filipinas, Indonésia e Afeganistão representam 38,1% dos desastres registrados. O montante de U\$ 157,3 bilhões em perda de recursos no ano de 2012 representou a quinta maior cifra dos últimos 10 anos, sendo apenas três países, Estados Unidos, China e Itália, responsáveis por cerca 86% de todo o dano relatado.

Dentre os fenômenos mais impactantes destacam-se os desastres hidrológicos, que totalizaram 49,4% dos registrados em 2012, sendo responsáveis também por 51,9% dos afetados, e por 42% do número total de vítimas fatais.

No Brasil, os fenômenos hidrológicos representam cerca de 70% dos registros de desastres naturais ocorridos entre o período de 1900 e 2013. No total, foram aproximadamente 20 milhões

de pessoas afetadas (desabrigados/desalojados) e 9 mil vítimas fatais, Tabela 2.2. Considerando apenas os eventos ocorridos nesse período, o Brasil ocupa o 6^o lugar entre os países com maior incidência desse tipo de fenômeno.

Tabela 2.2: Danos humanos gerados por desastres naturais entre 1900 e 2013

Tipo de Desastre	Ocorrências	Vítimas Fatais	Afetados	Danos(\$)
Índia	292	66.005	799.598.655	36.100.688
China	289	6.603.926	1.925.439.428	189.612.196
Indonésia	203	8.699	9.171.483	5.616.792
EUA	163	3.406	12.111.296	56.411.260
Filipinas	162	5.878	24.257.293	1.595.036
Brasil	141	9.324	22.043.833	8.506.781
Colômbia	109	6.328	14.877.299	3.579.753
Paquistão	97	16.707	69.491.542	17.486.178
Bangladesh	88	52.329	313.328.092	12.038.400
Afganistão	87	5.187	1.496.089	396.000

Fonte: EMDAT (2013).

O trabalho de mapeamento dos trechos inundáveis dos corpos de água de Minas Gerais, proposto pela Agência Nacional de Águas (ANA), mostra que a situação em Minas Gerais não difere do restante do Brasil. O estado possui uma área de 586,522.122 km², cerca de 7% da área total do país, nele também estão localizadas as nascentes de importantes bacias hidrográficas federais, como por exemplo, as bacias do Rio São Francisco, Rio Paraná e Atlântico Sudeste. De acordo com o Mapa de Vulnerabilidade a Inundações do Estado de Minas Gerais, juntas essas bacias são responsáveis por 77,6% dos 1518 trechos inundáveis do estado.

Em decorrência da localização geográfica, das características do relevo e das condições climatológicas, diversos municípios mineiros apresentam frequentes ocorrências de desastres hidrológicos com impactos sociais e ambientais relevantes. De acordo com o Plano de Emergência Pluviométrica 2012/2013 da Defesa Civil de Minas Gerais, no período chuvoso de 2011/2012 houve um aumento de 24% em relação à média histórica de municípios mineiros atingidos por esses tipos de desastres, Figura 2.10.

Dentre as mesorregiões mais afetadas pela ocorrência de fenômenos hidrológicos está a Região Metropolitana de Belo Horizonte. Projetada entre 1894 e 1897 pelo engenheiro Aarão Reis, a capital do Estado de Minas Gerais foi a primeira cidade brasileira a ser planejada. Esperava-se que em 1997 a população de Belo Horizonte alcançasse 100 mil habitantes, entretanto, nesse ano a população da cidade ultrapassou 2 milhões de habitantes. Atualmente o município está entre os dez mais populosos do Brasil, com uma extensão territorial de aproximadamente 331 km²,

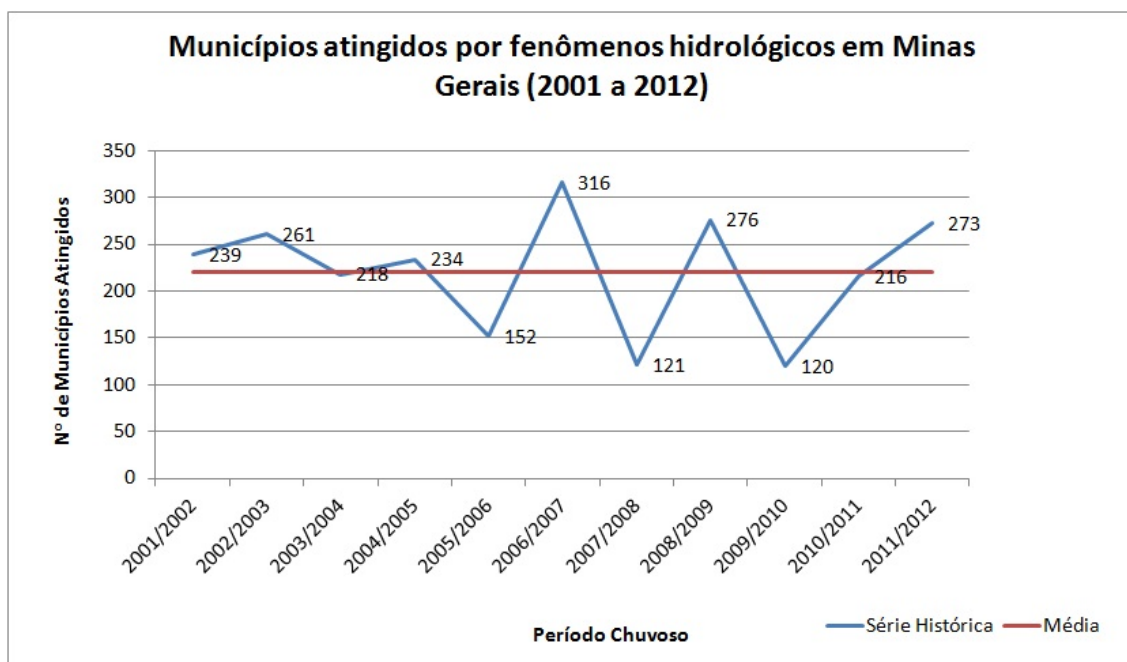


Figura 2.10: Série histórica dos municípios atingidos por fenômenos hidrológicos em Minas Gerais
Fonte: CEDEC (2013)

e 100% de sua população (2.375.151 habitantes) em situação urbana. Em relação às condições climáticas do município, o volume de precipitação total anual concentra-se nos meses de outubro a março, definidos como estação chuvosa. A Figura 2.11 mostra que no período compreendido entre novembro de 2011 e janeiro de 2012 houve um acúmulo de aproximadamente 900 milímetros de precipitação na capital mineira.

Belo Horizonte apresenta em seu território duas bacias principais que deságuam no Rio das Velhas, a Bacia do Ribeirão Arrudas e a Bacia do Ribeirão do Onça, ao sul e ao norte do município, respectivamente, além de outras duas, a do Ribeirão Isidoro e do Rio das Velhas. As duas primeiras apresentam uma área de 208,47 km² e 212 km², respectivamente, aproximadamente 85% da área total dessas bacias está inserida no município de Belo Horizonte, sendo o restante distribuído entre os municípios de Contagem, Sabará e Santa Luzia, Figura 2.12.

Assim como a maioria das grandes metrópoles brasileiras a drenagem urbana em Belo Horizonte foi, durante muitos anos, negligenciada do planejamento de expansão urbana, resultando no aumento dos impactos de eventos trágicos a cada período de chuvas.

Além disso, o rápido crescimento populacional acabou resultando no desenvolvimento desordenado da cidade ao longo dos principais leitos de suas bacias hidrográficas, agravando ainda mais a situação das populações que são periodicamente atingidas pelo transbordamento de água nas margens dos canais, ou pelo acúmulo de águas pluviais nas vias. Diversas atividades antró-

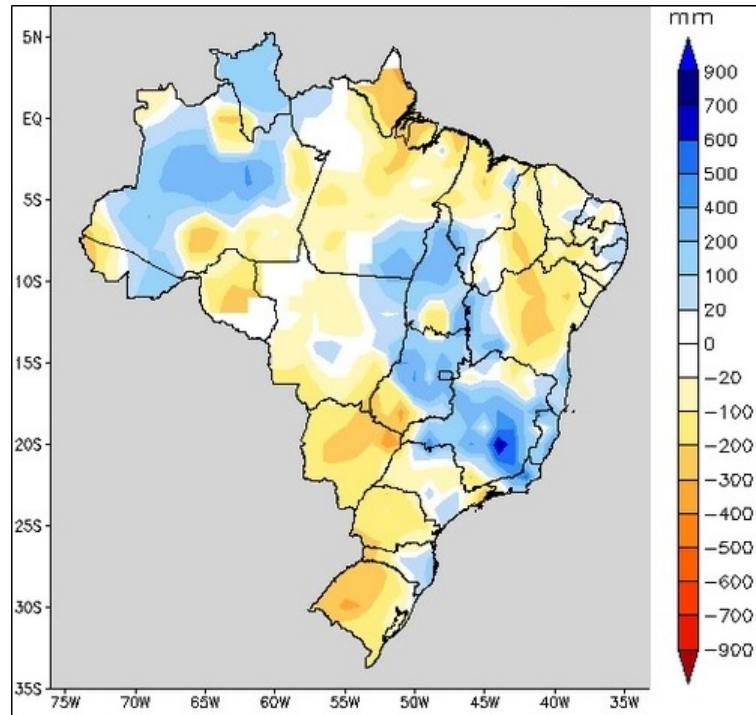


Figura 2.11: Precipitação acumulada entre novembro de 2011 e janeiro de 2012
 Fonte: INMET (2013)



Figura 2.12: Principais bacias hidrográficas de Belo Horizonte
 Fonte: PBH (2013)

picas foram responsáveis por importantes alterações nas características físicas e climatológicas dessas bacias, destacam-se:

- A modificação do regime hidrológico devido à canalização dos recursos hídricos;
- A impermeabilização da superfície do solo decorrente da intensa construção de edificações e pavimentação das vias;
- A criação de áreas de risco à ocorrência de fenômenos hidrológicos devido à ocupação inadequada de populações ribeirinhas.

Algumas obras estruturais já foram executadas para atenuar o impacto gerado por esses fenômenos, como por exemplo, a barragem Santa Lúcia e a bacia de contenção Bonsucesso. Entretanto, a eficiência de tais obras a longo prazo é bastante discutível, uma vez que, pouco ainda é feito com relação ao controle de ocupações e construções irregulares nas bacias hidrográficas. Além disso, a magnitude dos impactos gerados pelos fenômenos hidrológicos depende também de variações climatológicas da região, as quais podem tornar obsoletas algumas soluções já propostas.

Capítulo 3

Referencial teórico

Para garantir a eficiência da gestão de operações em situações emergenciais é fundamental compreender a diferença entre os problemas relacionados aos serviços de rotina, e aos serviços prestados em catástrofes e desastres naturais.

Um evento de rotina normalmente é tratado por procedimentos padronizados, que visam principalmente à redução do tempo de atendimento e dos recursos empregados a fim de que estejam prontamente disponíveis para atender outras ocorrências.

No caso dos desastres naturais, os recursos se tornam extremamente escassos, forçando a adoção de procedimentos não padronizados para reduzir ao máximo o impacto causado à população e à infraestrutura do local afetado. Esse caráter aleatório e singular do problema força a busca por soluções dinâmicas e eficientes, tornando o tópico propício ao estudo da Pesquisa Operacional (PO) (Altay and Green III, 2006).

A questão chave é determinar qual dos diversos métodos utilizar para abordar uma classe específica de desastres naturais. Para Dai et al. (1994), independente do método selecionado é preciso garantir que ele seja:

- Conciso, suficientemente acessível para que profissionais de diversas áreas possam compreendê-lo e utilizá-lo;
- Fundamentado, fazendo com que as preposições e suposições declaradas sejam sempre válidas;
- Robusto, ou seja, insensível à imprecisão dos dados de entrada;
- Versátil e interativo, permitindo que os parâmetros de entrada sejam alterados a qualquer momento para controle e experimentação.

Muitos trabalhos já publicados na área sugerem a adoção de métodos convencionais da PO para melhorar a eficiência das ações envolvidas na gestão de operações em desastres naturais. No entanto, é preciso levar em conta que tais problemas tratam de eventos inesperados e de alto risco, caracterizados principalmente pelo tempo crítico de reposta. Além disso, segundo Dai et al. (1994), existem outras particularidades que devem ser consideradas:

- Os atributos importantes do problema são incertos, tais como sua natureza, dimensão, ou o momento e local exato onde irá ocorrer;
- O ambiente de decisão muda frequentemente de forma rápida e incontrolável;
- As decisões devem ser tomadas rapidamente, mesmo que nem todas as informações estejam disponíveis ou sejam confiáveis;
- Em muitas situações, para que a resposta seja mais eficiente, deve-se priorizar alguns objetivos.

Por fim, o fato de que múltiplos agentes, Figura 3.1, estejam envolvidos nas ações de mitigação, preparação, reposta e recuperação dos desastres naturais faz com que a complexidade do problema seja ainda maior, principalmente no que se refere à clara definição dos objetivos e estratégias a serem tomadas.

3.1 Estado da arte

Introduzida na Segunda Guerra Mundial com intuito de propor a melhor utilização dos recursos na época limitados, a PO ainda está em processo de evolução no que se refere à gestão de operações em situações emergenciais.

Grande parte dos estudos feitos em gestão de desastres naturais está relacionada às ciências sociais. Este tipo de pesquisa tem foco principalmente nos impactos sociológicos e psicológicos dos sobreviventes, e nos problemas de comunicação existentes durante a ocorrência desses eventos (Altay and Green III, 2006).

Em Altay and Green III (2006) os autores disponibilizam um levantamento de publicações com aplicações da PO na gestão de operações em catástrofes como furacões, inundações, secas, terremotos, erupções vulcânicas e epidemias. Não foram consideradas pesquisas relacionadas aos serviços de emergência prestados cotidianamente à população tais como serviço de ambulância,



Figura 3.1: Agentes envolvidos na gestão de operações em desastres naturais

polícia e corpo de bombeiros. O período de análise se limitou aos estudos feitos entre 1980 e 2006, ano de publicação da pesquisa, devido ao fato de que até 1980 o enfoque da área era dado à preparação e proteção da população à guerra nuclear. A busca resultou em 109 artigos, número relativamente baixo se considerarmos a amplitude e o aprofundamento potencial existente no campo de estudo. Desses 109 artigos levantados, 77 foram publicados em jornais de PO, e o restante publicado em jornais de outras áreas. A Tabela 3.1 apresenta uma síntese das bibliografias analisadas.

Tabela 3.1: Período de publicação dos artigos analisados

Período	Publicações	Jornais de PO	Outros jornais
Década de 80	12,80%	13,00%	19,00%
Década de 90	40,40%	40,20%	40,50%
A partir de 2000	46,80%	46,80%	40,50%

Fonte: Altay and Green III (2006), p.p 479.

A pesquisa evidencia que o interesse pela aplicação da PO na gestão de operações emergenciais aumentou significativamente nas últimas duas décadas, em consequência do aumento da frequência e magnitude dos impactos, econômicos e sociais, destes eventos.

Este fato pode ser comprovado pelo amplo conjunto de publicações levantadas entre 1965

e 2007 por Simpson and Hancock (2009), que auxilia no delineamento da história da PO na gestão de situações emergenciais. Dentro do período de análise dos artigos levantados, o pico de publicações se deu no ano de 2007, totalizando 40 de 361 artigos, superior ao dobro de qualquer outro ano da série histórica, Figura 3.2.

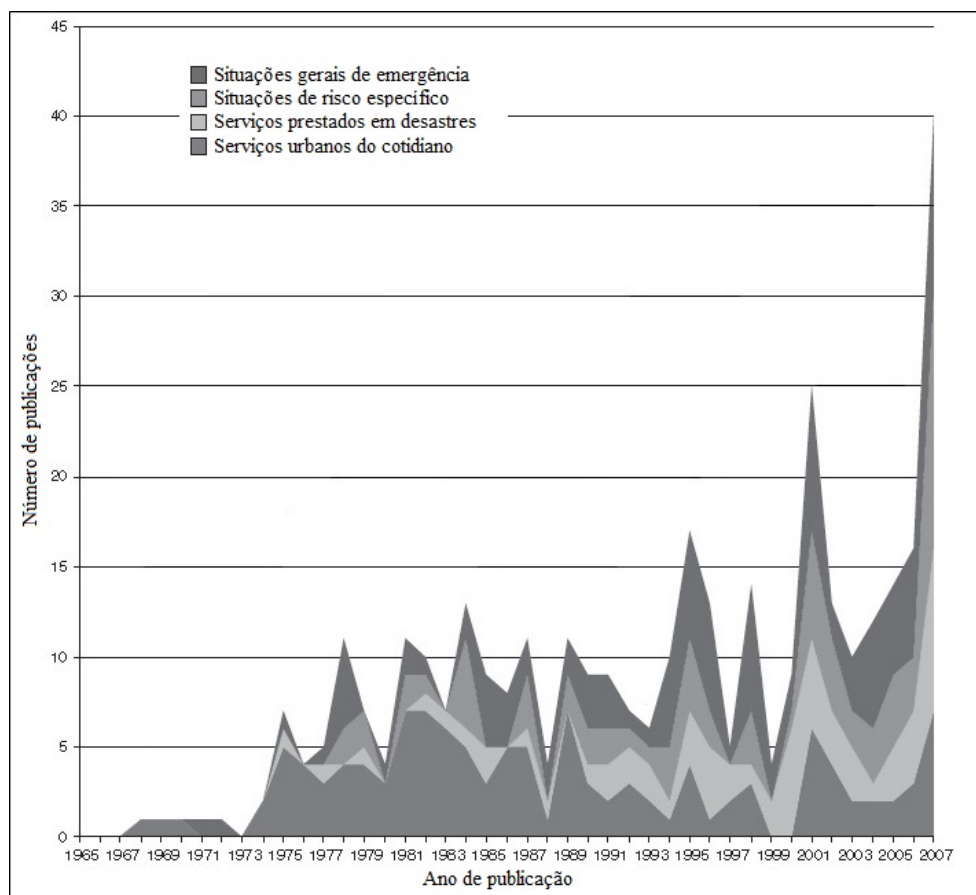


Figura 3.2: Contribuição da PO na gestão de situações emergenciais
 Fonte: Simpson and Hancock (2009), p.p. 128

Com relação às metodologias utilizadas, a Tabela 3.2 mostra que a programação matemática, incluindo as heurísticas e os algoritmos exatos, é a mais difundida no que se refere aos problemas existentes nas operações emergenciais. As técnicas de simulação aparecem em terceiro lugar, embora sejam muito menos frequentes que as duas primeiras, entre 1980 e 2006 apenas nove publicações em jornais voltados à PO abordaram tais técnicas.

A pesquisa revela também que dos artigos revisados, 44% se referem as ações de mitigação. Quase todas as publicações desse grupo enfatizam desastres causados pelo homem. Devido ao fato de que esses eventos sejam mais previsíveis se comparados às catástrofes naturais. Ações de preparação, resposta e recuperação seguem as de mitigação entre as publicações, representando respectivamente 21,1%, 23,9% e 11% dos artigos publicados.

Tabela 3.2: Metodologias abordadas nas publicações levantadas

Metodologia	Publicações	Jornais de PO	Outros jornais
Programação matemática	32,1%	36,4%	42,9%
Estatística e probabilidade	19,2%	15,6%	16,7%
Simulação	11,9%	11,7%	11,9%
Sistemas de apoio a decisão	10,1%	9,1%	4,8%
Teoria das filas	9,2%	13,0%	11,9%
Lógica Fuzzy	5,5%	3,9%	0,0%
Programação estocástica	3,7%	5,2%	4,8%
Inteligência artificial	3,7%	2,6%	2,4%
Outros	3,6%	2,6%	4,8%

Fonte: Altay and Green III (2006), p.p 479.

Tabela 3.3: Etapas dos desastres abordadas nas publicações levantadas

Abordagem	Publicações	Jornais de PO	Outros jornais
Mitigação	44,0%	48,1%	45,2%
Preparação	21,1%	19,5%	19,0%
Resposta	23,9%	26,0%	33,3%
Recuperação	11,0%	6,4%	2,5%

Fonte: Altay and Green III (2006), p.p 479.

Quanto as ações de mitigação, Tamura et al. (2000) propõem o desenvolvimento de um modelo de Apoio à Decisão baseado no cálculo do valor da função de risco da reconstrução total ou parcial de um edifício, a fim de reduzir ou eliminar os impactos de um terremoto.

Para esse mesmo tipo de ação, Esogbue (1996) sugere o desenvolvimento de um modelo baseado na Técnica de Programação Dinâmica Fuzzy aplicado à redução dos impactos gerados pelas inundações. Na análise do modelo foram consideradas medidas estruturais, como a construção de diques e reservatórios de água, e não estruturais, como a definição de zonas de inundação e evacuação em áreas de risco.

Com relação as ações de preparação, Sherali et al. (1991) apresentam o desenvolvimento de um Modelo de Localização e Alocação com o objetivo de definir locais de refúgio, e rotas de evacuação, durante a passagem de um furacão. Para resolver o problema não-linear inteiro misto os autores propuseram uma heurística e um algoritmo exato baseado no método de Decomposição de Benders Generalizado.

Pidd et al. (1996) propõem uma ferramenta que relaciona dados de um Sistema de Informação Geográfica (SIG) com um Simulador Orientado a Objetos. Sistemas de apoio à decisão como o desenvolvido pelo autor são apontados por Simpson and Hancock (2009) como métodos ainda pouco explorados na gestão de operações emergenciais.

Ações de resposta aos desastres são abordadas por Brown and Vassiliou (1993), os autores introduzem o ARES, um Sistema de Apoio à Decisão Tática e Operacional capaz de operar em tempo real. A atribuição de tarefas operacionais no ARES é feita a partir um Modelo de Programação Inteiro, as soluções propostas são então repassadas para um Modelo de Programação Linear, responsável pela alocação tática dos recursos necessários a cada tarefa anteriormente atribuída.

Özdamar et al. (2004) também abordam a resposta aos desastres naturais, mas com o enfoque um pouco diferente. Nesse trabalho os autores apresentam um modelo de otimização das operações de logística de emergência, de forma a reduzir a demanda total não atendida por alimentos, medicamentos, roupas e outros recursos. O modelo integra dois problemas de fluxo em rede com multi-commodities, um subproblema linear e outro inteiro, variantes do problema de fluxo de custo mínimo e de roteirização de veículos, respectivamente.

Como mostra a Tabela 3.3 no que se refere ao número de publicações realizadas em cada uma das ações envolvidas na gestão de operações emergenciais, a recuperação de áreas afetadas por um desastre é a que apresenta menor contribuição. Em contrapartida, Millar et al. (2002) destacam como a PO ainda pode ser utilizada para fornecer apoio à importante decisão estratégica envolvida na seleção de Planos de Recuperação de Desastres (PRD). Os autores propõem um modelo matemático inteiro-misto que tem como objetivo a maximização do valor total da capacidade de recuperação proporcionada pelos planos selecionados.

Ainda com relação as ações de recuperação, Chang and Nojima (2001) enfatizam a importância de se determinar medidas para avaliar a performance do sistema de transporte em situações com perdas de acessibilidade. Segundo os autores, essa avaliação pode ser feita para medir a deterioração do sistema após o desastre, e também para medir sua capacidade de restauração.

Na última década observou-se ainda maior disseminação das aplicações da Pesquisa Operacional na gestão de operações emergenciais, dentre as pesquisas publicadas neste período Falasca et al. (2009) utilizam a otimização multicritérios para auxiliar o processo de atribuição de tarefas aos voluntários de ajuda humanitária. Um sistema de apoio as decisões tomadas nas etapas de resposta e recuperação aos desastres naturais é proposto em Rolland et al. (2010), os autores apresentam um modelo de programação matemática para sequenciar e alocar unidades de resgate a incidentes relatados. Wex et al. (2014) desenvolvem um modelo similar, porém, os tempos necessários ao atendimento dos incidentes são ponderados pela gravidade dos mesmos. A modelagem apresentada é baseada no problema de sequenciamento em máquinas paralelas não

relacionadas com tempos de preparação dependentes da sequência.

Apesar do crescente interesse de estudo deste campo e dos grandes impactos econômicos e sociais gerados por desastres que atingiram, e que vão continuar atingindo nossas comunidades, infraestruturas e economias, a sociedade acadêmica não se beneficia de um fluxo coeso e contínuo de pesquisas na área. Ainda existe uma ampla necessidade de desenvolvimento prático e teórico, mas, para isso, é preciso um melhor entendimento dos inputs necessários aos modelos de gestão, e o desenvolvimento de métodos e tecnologias que ajudem a solucionar os problemas enfrentados nestas situações (Altay and Green III, 2006).

3.2 Simulação

3.2.1 Motivação no uso da simulação

Catástrofes recentes, como as inundações ocorridas no Rio de Janeiro em 2010, que mataram cerca de 300 pessoas, e afetaram aproximadamente 75 mil civis, causando um dano estimado de 200 milhões de dólares, evidenciam a vulnerabilidade que ainda persiste no país com relação aos serviços de atendimento à população em desastres naturais. O bom gerenciamento das operações realizadas nestas situações pode não só melhorar a prontidão e a qualidade da resposta dos serviços emergenciais prestados, como também facilitar a recuperação e reconstituição do local e da população afetada.

Um dos maiores desafios enfrentados nesta gestão é antecipar os cenários que podem suceder as catástrofes, e desenvolver modelos capazes de representar, da maneira mais fidedigna possível, o funcionamento do sistema real. De acordo com Kelton and Law (2000) se o comportamento desse sistema apresenta baixa complexidade, sua modelagem pode ser feita através de métodos analíticos, capazes de propor soluções exatas as questões chaves do problema. Caso contrário, se o comportamento do sistema apresenta alta complexidade, a modelagem via simulação parece ser mais adequada.

O caráter altamente dinâmico do problema, com alterações frequentes no ambiente de decisão, e a incerteza com relação a natureza e dimensão do desastre, dificultam sua modelagem analítica. Além disso, o envolvimento de múltiplos agentes aumenta ainda mais sua complexidade, principalmente no que se refere a definição exata dos objetivos e estratégias a serem tomadas. A simulação aparece como uma ferramenta adequada para contornar estas dificuldades, e captar a variabilidade e incerteza intrínsecas no problema.

Bankes (1993) também sugere o uso de modelos de simulação abrangentes na gestão de operações em desastres naturais, de preferência modelos com natureza interdisciplinar, de forma a representar alguns aspectos desses fenômenos utilizando, por exemplo, princípios meteorológicos e geológicos.

Segundo Shannon (1998), a simulação consiste na concepção de um modelo representativo de um sistema real, e na condução de determinados experimentos, com o objetivo de compreender o comportamento do ambiente em estudo, e avaliar diferentes estratégias de operação.

Para Kelton and Law (2000) os modelos de simulação são classificados em três diferentes dimensões:

- Estáticos ou dinâmicos: os modelos estáticos desconsideram a variável tempo em suas formulações, por outro lado, os modelos dinâmicos representam a evolução do sistema no decorrer do tempo de simulação.
- Determinísticos ou estocásticos: modelos determinísticos são aqueles que não possuem componentes randômicos, para cada conjunto de dados de entrada esses modelos geram determinadas saídas, ao contrário dos modelos estocásticos, em que as saídas são meras estimativas do sistema real, cuja dinâmica é representada por um conjunto de distribuições probabilísticas.
- Discretos ou contínuos: nos modelos discretos o avanço da simulação, e a atualização de suas variáveis de estado, ocorrem apenas a cada intervalo de tempo predeterminado, ou na ocorrência de um evento em espera, já nos modelos contínuos o avanço da simulação se dá de forma ininterrupta, permitindo que o estado do sistema seja definido a qualquer momento.

Independente da classificação, todos os modelos de simulação fazem uso de uma terminologia específica para caracterizar a dinâmica do sistema que representam. Utilizando-se do sistema financeiro banco/cliente para analogia dos conceitos abaixo teríamos:

- Entidade: qualquer objeto que entre e saia do sistema após passar por alguns processos (os clientes do banco);
- Atributo: característica específica de uma entidade (tipo de cliente, pessoa física ou jurídica);

- Processo: qualquer atividade que consuma tempo para ser realizada (um depósito bancário);
- Recurso: tudo que a entidade necessita para ser processada (um caixa eletrônico ou um funcionário);
- Variável global: controla e caracteriza o sistema em geral (número médio de clientes na fila ou tempo médio de espera);
- Estado do sistema: conjunto de variáveis que descrevem o sistema em determinado instante;
- Evento: ocorrência que pode alterar o estado do sistema (chegada de um cliente).

Um modelo de simulação é, portanto, a representação lógica de um sistema onde entidades com atributos específicos ingressam, aguardam pela disponibilidade de recursos, e saem após serem processadas.

As técnicas de simulação já estão bem consolidadas em diferentes áreas de aplicação, dentre elas:

- Análise e concepção de sistemas de manufatura;
- Determinação dos requisitos necessários em redes de telecomunicação;
- Planejamento de redes logísticas;
- Definição de políticas de estoque;
- Reestruturação de processos e serviços.

Com relação aos problemas envolvidos na prestação dos serviços de emergência, o uso dessas técnicas se destacam na roteirização de veículos de resgate, concepção de planos de contingência, e no dimensionamento de recursos e instalações de saúde. Diversas características garantem a vasta aplicabilidade da simulação nos problemas destacados:

- Ao invés de abstraírem o sistema através de uma forma estritamente matemática, os modelos de simulação enfatizam a representação mais aproximada possível da estrutura, e da dinâmica que delinea o sistema real (Standridge, 1999);
- Os modelos de simulação permitem a execução e análise de experimentos à baixo custo e risco mínimo, em sistemas já existentes ou em fase de planejamento (Standridge, 1999);

- Com as técnicas de simulação o analista se torna livre para definir e calcular qualquer medida de interesse acerca da performance do sistema (Standridge, 1999);
- Os modelos de simulação permitem a consideração de múltiplos, e muitas vezes conflitantes, objetivos de desempenho (Lowery, 1996);
- O uso de uma abordagem estocástica na simulação permite a modelagem de sistemas caracterizados por um alto grau de incerteza e variabilidade (Henderson et al., 2007).

Apesar de apresentar estas vantagens, a Tabela 3.2 mostra que, dentre as metodologias utilizadas no aprimoramento das operações de emergência, a simulação aparece em terceiro lugar entre as mais utilizadas, apresentando apenas nove publicações entre 1980 e 2006 em jornais de PO. Este fato indica a existência de um campo ainda pouco explorado pelas técnicas de simulação, e de uma grande oportunidade para pesquisas futuras. Entretanto, na literatura alguns autores também levantam barreiras no uso dessas técnicas na gestão de operações em desastres naturais, como por exemplo:

- Indisponibilidade ou inexistência de um histórico de informações que possam ser tratadas estatisticamente na determinação dos parâmetros de entrada do problema (Standridge, 1999);
- Necessidade de análises estatísticas avançadas devido ao alto volume de dados de entrada e suas diversas fontes (Standridge, 1999);
- Incapacidade dos modelos de simulação em determinar uma única solução ótima para o problema analisado, funcionando muito mais como uma ferramenta de análise do comportamento de um sistema para determinado conjunto de dados de entrada (Shannon, 1998);
- Desconhecimento por parte dos administradores, e profissionais de outras áreas, de que os modelos de simulação sejam capazes de capturar a complexidade e a singularidade dos problemas (Lowery, 1996).

A maneira mais eficiente para lidar com estas limitações é estruturar bem as diversas etapas envolvidas na condução de um projeto de simulação, detalhadas no Capítulo 4.

3.2.2 Modelos híbridos de simulação

Apesar das vantagens apresentadas na modelagem de sistemas através da simulação a eventos discretos, o aumento da complexidade dos problemas reais analisados tem dificultado em muito

a aplicação dessas ferramentas clássicas da Pesquisa Operacional. A definição de diversas suposições e simplificações do problema vem sendo uma alternativa para contornar essa dificuldade. Entretanto, em alguns casos, é preciso ter uma visão mais realística e aproximada do sistema simulado. De acordo com North and Macal (2007), devido ao aumento da complexidade dos sistemas analisados, a similaridade com a programação orientada a objetos, e ao aumento da eficiência computacional, a simulação baseada em agentes (ABS - *Agent-Based Simulation*) será abordagem predominante dos futuros projetos de simulação.

A ABS parece mais adequada para modelar e simular sistemas reais mais complexos e constituídos de agentes autônomos que podem interagir entre si. A definição exata do termo *agentes* ainda não é muito clara na literatura, Macal and North (2005) apresentam algumas características dos agentes que podem ajudar no entendimento deste conceito:

- Identificáveis: todo agente pode ser identificado por um conjunto de características que regem suas condutas e decisões.
- Descontínuos: os agentes são indivíduos discretos, ou sejam, é possível determinar facilmente se algo faz parte ou não do agente.
- Interativos: através de sua capacidade de comunicação e resposta ao ambiente onde estão situados os agentes podem interagir com outros indivíduos.
- Autônomos: os agentes podem tomar decisões independentemente do ambiente onde estão situados e de suas relações com outros indivíduos.
- Cognitivos: um agente tem a capacidade de aprender e adaptar suas condutas ao longo do tempo com base em sua memória e experiência.

Além de possuírem estas características em comum, segundo Anagnostou et al. (2013) existem dois tipos de agentes, os passivos, que apenas fazem parte do ambiente em que estão situados, e os ativos, capazes de interagir com outros indivíduos e com o ambiente simulado.

A aplicação deste tipo de abordagem vem crescendo consideravelmente nos últimos anos. As pesquisas vão desde problemas clássicos da simulação, como *supply chain*, até problemas ainda pouco estudados sob a ótica da PO, como a propagação de epidemias e a evacuação de populações sujeitas aos ataques terroristas ou desastres naturais. A Figura 3.3 indica outras áreas de aplicação da ABS.

Bonabeau (2002) cita algumas vantagens na utilização desse tipo de abordagem:

Organizações	Economia
• Processos industriais	• Mercados financeiros
• Mercados consumidores	• Infraestrutura das redes de comércio
• Cadeias logísticas	• Transporte
Multidões	Terrorismo
• Movimentação humana	• Determinantes sociais
• Evacuações em catástrofes	• Redes organizacionais
Militar	Biologia
• Comando e controle	• Ecologia
• Táticas de guerrilha	• Comportamento de animais, células e moléculas

Figura 3.3: Áreas de aplicação da simulação baseada em agentes
 Fonte: Adaptado de Macal and North (2005)

- Capacidade de analisar os fenômenos emergentes resultantes da interação entre os indivíduos, através da constatação do impacto dessas interações no comportamento do sistema como um todo.
- Capacidade de descrever os sistemas simulados de maneira mais realística e natural, pois, diferentemente da simulação a eventos discretos, a ABS tem sua perspectiva nas unidades constituintes do sistema, e não em seus processos.
- Flexibilidade de adicionar e remover agentes de uma população do modelo, além de alterar suas características e condutas no decorrer da simulação.

Apesar das vantagens descritas, a simulação do comportamento de todos os agentes, e de suas interações, pode resultar em elevados custos computacionais. Segundo Parunak et al. (1998), a modelagem baseada em agentes compete neste e em outros domínios com os modelos baseados em equações diferenciais, em que um conjunto de variáveis inter-relacionadas são agrupadas e resolvidas sistematicamente, de forma a compreender o comportamento de um sistema. Ainda assim, Parunak et al. (1998) evidenciam a dificuldade de representar características qualitativas dos sistemas, como o comportamento dos agentes e a ocorrência de fenômenos emergentes, através de equações matemáticas.

Desta forma, é muito importante que a aplicação da modelagem baseada em agentes se limite as situações em que realmente se faz necessária, como por exemplo:

- Alto nível de complexidade e dinamismo envolvido no comportamento e nas interações entre os agentes do sistema, dificultando sua análise via equações diferenciais.
- Mobilidade dos agentes no ambiente em que estão localizados, tornando o espaço crucial para o problema.

- Caráter heterogêneo da população de agentes, ou seja, existência de indivíduos potencialmente diferentes.
- Instabilidade do sistema quando submetido à maiores perturbações, suavizadas através de valores médios calculados na resolução sistemática de equações diferenciais.

A simulação baseada em agentes pode ser combinada com outras técnicas de modelagem, como por exemplo, a simulação a eventos discretos, resultando no desenvolvimento dos chamados modelos híbridos. Atualmente, diversos *softwares* já suportam mais de uma técnica de simulação em um mesmo ambiente desenvolvimento, dentre os quais podemos citar o Anylogic, utilizado na elaboração do modelo proposto nesta pesquisa.

Capítulo 4

Metodologia de trabalho

4.1 Projeto de simulação

Segundo Kelton and Law (2000) o modelo de programação é apenas uma parte do esforço global para desenvolver ou analisar um sistema complexo via simulação. Uma série de outras preocupações devem ser consideradas neste processo, tais como, a modelagem da aleatoriedade intrínseca ao problema, a validação do modelo, e a análise estatística dos dados de entrada e saída. A Figura 4.1 mostra as etapas envolvidas no desenvolvimento de um modelo de simulação.

A formulação e planejamento do estudo envolve a definição do escopo do problema, e o levantamento das questões chaves que deverão ser abordadas pelo modelo de simulação. Nesta etapa, é imprescindível a participação dos principais agentes envolvidos no sistema, que poderão auxiliar na determinação das medidas de desempenho utilizadas para avaliar suas diferentes configurações.

Na etapa seguinte, coleta de dados e formulação do modelo conceitual, deve-se definir inicialmente quais informações são necessárias para representar a dinâmica do sistema, também se estão disponíveis, e se são confiáveis. Esses dados podem ser obtidos através de diversas fontes:

- Registros históricos;
- Observações do sistema real;
- Aproximações de sistemas similares;
- Considerações teóricas;
- Estimativas dos principais agentes envolvidos.

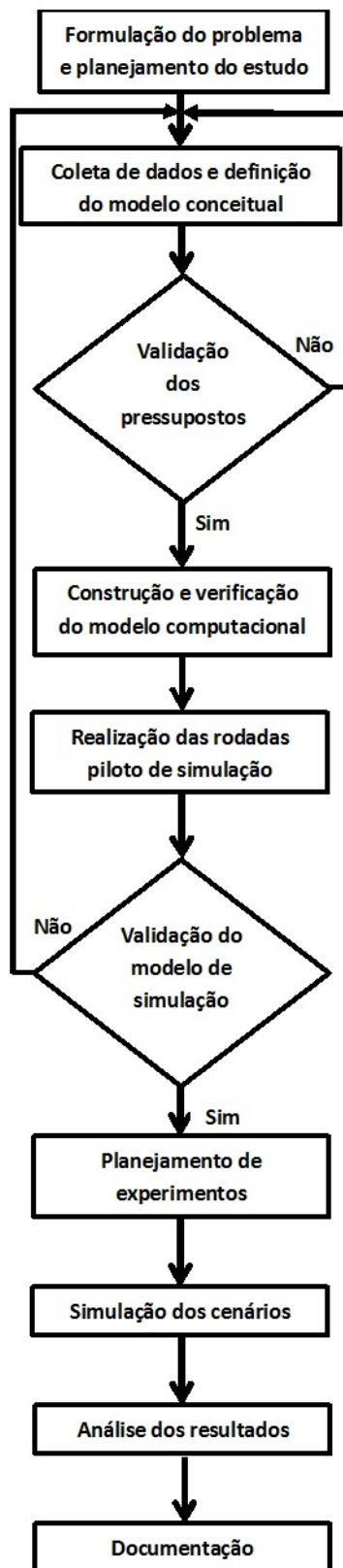


Figura 4.1: Etapas de um projeto de simulação a eventos discretos
 Fonte: Kelton and Law (2000), p.p. 67

O nível de detalhamento da coleta está diretamente relacionado à formulação proposta na etapa anterior. A manipulação e avaliação desses dados pode ser muito custosa, frequentemente um terço do tempo total utilizado em um projeto de simulação é gasto nesta tarefa (Shannon, 1998).

A partir das informações levantadas é possível iniciar a elaboração do modelo conceitual. De acordo com Robinson (2008) nesta etapa é realizada uma descrição detalhada dos objetivos, entradas, saídas, pressupostos e simplificações do sistema real através de um modelo, que consiste em uma representação matemática, lógica ou verbal do problema analisado (Sargent, 2005).

Segundo Robinson (2006) a modelagem conceitual pode influenciar em todos os aspectos de um projeto de simulação, desde a velocidade de desenvolvimento do modelo computacional até a facilidade de verificação e validação do mesmo.

Apesar de estar entre os aspectos mais importantes dos projetos de simulação (Kelton and Law, 2000), a modelagem conceitual é frequentemente ignorada pelos livros e analistas do assunto (Chwif and Medina, 2006).

Concluída a formulação do modelo e o levantamento dos dados necessários a sua modelagem, é preciso validar as suposições e simplificações feitas a fim de garantir que estejam de acordo com o sistema real representado, e evitar retrabalho nas etapas posteriores.

O modelo computacional do problema definido anteriormente pode então começar a ser desenvolvido, uma vez implementado, o mesmo também passa por um processo de verificação, para avaliar se funciona exatamente como esperado. Após essa verificação, o modelo é testado a partir de rodadas piloto, para que ele possa então ser validado.

Durante a validação, os valores das variáveis de resposta, definidas no modelo computacional, devem ser confrontados com os dados reais. Diferentes análises de sensibilidade podem ser feitas nesta etapa a fim de determinar o efeito da variação de alguns fatores no desempenho global do sistema.

O processo de verificação e validação da simulação pode ser dividido em três etapas principais, indicadas na Figura 4.2.

Segundo Sargent (2005) essas etapas se referem à:

1. Validação do Modelo Conceitual: determina se o entendimento e os pressupostos do problema estão corretos, e se o modelo representativo do sistema real analisado é compatível com a sua finalidade. A avaliação das suposições e pressupostos pode ser realizada através de métodos estatísticos, como por exemplo, os testes de aderência, já a avaliação da

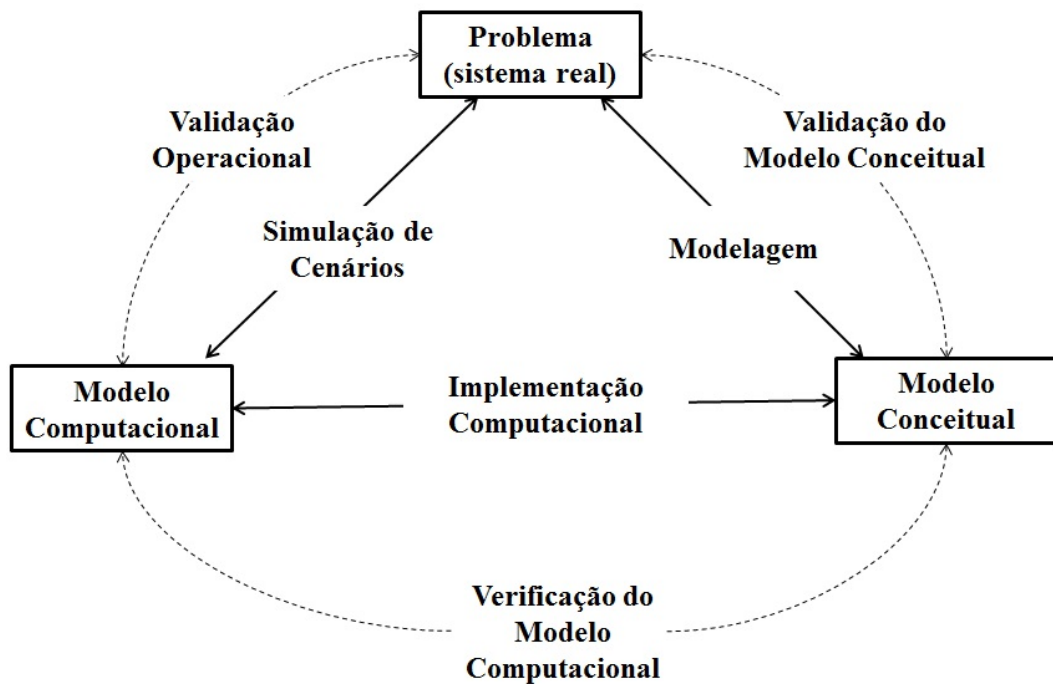


Figura 4.2: Processo de Verificação e Validação da simulação
 Fonte: Adaptado de Sargent (2005) p.p. 132

adequação do modelo pode ser feita com a participação de especialistas.

2. Verificação do Modelo Computacional: avalia a correta implementação do modelo conceitual. Caso a linguagem de programação adotada seja de nível superior, técnicas da engenharia de *software*, como a implementação modular, devem ser utilizadas no desenvolvimento e verificação do modelo.
3. Validação Operacional: define se os resultados obtidos apresentam um nível de precisão aceitável dada a finalidade e aplicabilidade do modelo desenvolvido. Este tipo de validação pode ser realizado de diversas formas, como por exemplo, através de um comparativo dos resultados obtidos no modelo com os dados históricos do sistema real simulado, ou através da avaliação do comportamento do modelo pelos principais envolvidos no problema.

Após a verificação e validação do modelo, é preciso planejar e especificar os cenários a serem simulados, esta seleção busca garantir que informações suficientes sejam fornecidas para auxiliar a tomada de decisão dos envolvidos no problema. Os parâmetros necessários à simulação, tais como duração de cada rodada de simulação, quantidade de replicações a serem feitas, e o tempo de aquecimento do sistema, também precisam ser definidos.

Os cenários selecionados anteriormente serão então simulados, e os resultados obtidos armazenados de forma a fomentar as análises de desempenho a serem realizadas sob diferentes

configurações, permitindo assim a comparação entre as mesmas.

Por fim, todas as suposições definidas inicialmente, o modelo computacional desenvolvido e os resultados obtidos precisam ser documentados para que o projeto realizado possa ser utilizado futuramente.

4.2 Formulação do problema

Como já mencionado, o objetivo desta pesquisa é desenvolver um modelo de simulação capaz de representar a evolução e os efeitos dos fenômenos hidrológicos que ocorrem com maior frequência no município de Belo Horizonte. Vale ressaltar que neste contexto, entende-se por efeitos as chamadas de emergência atendidas pelo corpo de bombeiros, e não os danos humanos e materiais gerados à população. A proposta se baseia no desenvolvimento de uma ferramenta que identifique previamente possíveis áreas de risco, e que funcione como um sistema de apoio à gestão das operações de emergência, a fim de reduzir o tempo de resposta, e aprimorar o nível de atendimento das chamadas recebidas pelo Corpo de Bombeiros de Minas Gerais (CBMMG).

Segundo Hernandez and Serrano (2001), um sistema de apoio à gestão de operações em situações de emergência, como o que se pretende desenvolver nesta pesquisa, deve ser capaz de:

- Fornecer informações e análises acerca dos eventos mais relevantes do local de estudo;
- Determinar a evolução desses eventos em curto prazo para diversos cenários possíveis;
- Definir um conjunto de decisões aconselháveis a serem tomadas caso esses eventos ocorram.

Para tanto, o modelo de simulação proposto deve englobar as relações de causa e efeito existentes entre seus diversos conjuntos de variáveis. No caso dos fenômenos hidrológicos, essas relações podem ser definidas a partir de registros da ocorrência de precipitações, e dos efeitos gerados por esses eventos. Hernandez and Serrano (2001) sugerem algumas representações para essas relações:

- Restrições que garantam a coerência dos índices pluviométricos em diferentes regiões do município, por exemplo, uma restrição que assegure a incidência de chuva em uma região A sempre que outra região B seja atingida;
- Expressões causais do tipo $nível\ de\ precipitação(t) \rightarrow fenômeno\ hidrológico(t + t')$, para representar o efeito das chuvas nas bacias hidrográficas durante um curto período de tempo;

- Expressões causais do tipo *nível de água em $A(t) \rightarrow$ nível de água em $B(t + t')$* , para representar a propagação da chuva ao longo das bacias hidrográficas;
- Expressões causais do tipo *nível de água(t) ou nível de precipitação(t) \rightarrow efeitos($t+ t'$)*, para representar a relação entre o nível de água, ou o índice de precipitação nas bacias, e os impactos gerados à comunidade.

Com base nos dados disponíveis para a elaboração desta pesquisa, as relações de causa e efeito foram definidas por expressões do tipo *nível de precipitação(t) \rightarrow efeitos($t+ t'$)*, detalhadas na sequência.

4.3 Coleta de dados

4.3.1 Registros das estações de monitoramento hidrológico de Belo Horizonte

Os dados necessários à elaboração desta pesquisa foram fornecidos pelos principais agentes envolvidos na gestão de operações emergenciais em Belo Horizonte. Essas informações foram utilizadas para abastecer uma ampla base de dados armazenada em MS SQL Sever, com o objetivo de facilitar o cruzamento e a manipulação dos registros fornecidos por diferentes fontes.

Dentre os colaboradores desta pesquisa, pode-se citar a Superintendência de Desenvolvimento da Capital (SUDECAP), responsável pela implantação, em 1999, do Plano Diretor de Drenagem Urbana de Belo Horizonte (PDDUBH), instrumento de planejamento do controle dos recursos hidrográficos da capital. Em sua segunda etapa, iniciada em 2001, o PDDUBH contemplou a implantação de um sistema de monitoramento e alerta contra inundações. Esse sistema tem como objetivos:

- Monitorar os índices pluviométricos, e os níveis de água dos principais córregos do município;
- Implantar um sistema de alerta à população afetada pelos fenômenos hidrológicos;
- Subsidiar a elaboração de projetos, e a execução de obras, no que se refere a mitigação dos eventos que ocorrem com maior frequência na capital.

Atualmente o sistema de monitoramento e alerta é composto por 11 estações pluviométricas, 27 estações fluviométricas e 4 estações climatológicas, espacialmente distribuídas como indicado na Figura 4.3.

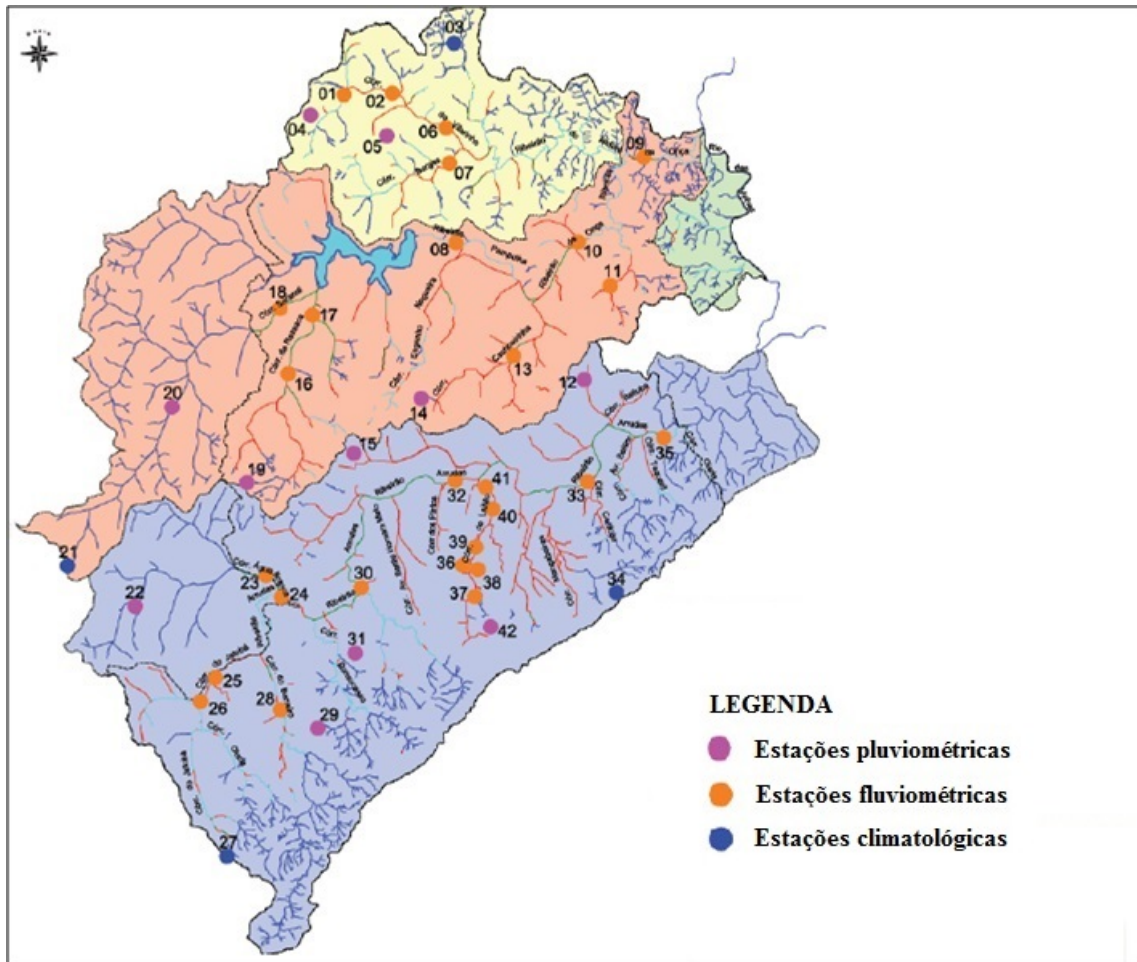


Figura 4.3: Estações de monitoramento hidrológico em Belo Horizonte
 Fonte: SUDECAP (2013)

A seleção do local de implantação dos sensores de medição resultou da identificação de um total de 82 trechos críticos, ou potencialmente sujeitos à ocorrência de inundações em Belo Horizonte. Para cada uma das nove regionais que compõem o município foi desenvolvida uma Carta de Inundação, esta carta destaca os trechos identificados como potencialmente inundáveis, e traz também um Gráfico do Risco de Inundação, que relaciona a duração de uma chuva, e o volume de água precipitado, com o nível de risco estimado para determinada região, Figura 4.4.

Além dos dados obtidos a partir das estações de monitoramento da SUDECAP, esta pesquisa também contou com informações fornecidas pelo Centro de Climatologia da PUC Minas, em operação há mais tempo. Este segundo levantamento de registros, em diferentes pontos do município, foi de extrema importância para a confiabilidade da pesquisa, devido ao fato de que os dados fornecidos pela SUDECAP sejam relativamente recentes, e suas estações ainda estejam em uma etapa de ajuste.

A coleta de dados feita nestas estações englobou dois períodos chuvosos: outubro de 2011 à

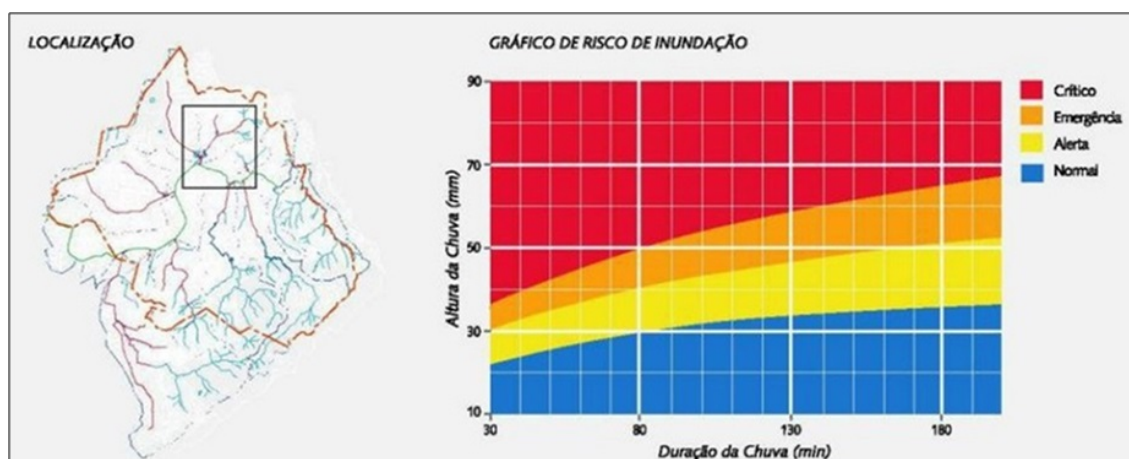


Figura 4.4: Carta de Inundação elaborada para a regional Leste
 Fonte: SUDECAP (2013)

março de 2012, e outubro de 2012 à março de 2013. De maneira geral, os registros são feitos a cada intervalo de 10, ou 15 minutos, mas, para facilitar sua manipulação e análise também foram utilizados intervalos mais abrangentes.

Na base de dados desta pesquisa os registros de monitoramento hidrológico foram dispostos como indicado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Dados das estações de monitoramento hidrológico de Belo Horizonte

Estações	Data/Hora	Precipitação Acumulada (mm)	Nível (cm)
E35	15/11/2012 20:30:00	0	140
E35	15/11/2012 21:00:00	27,2	143
E35	15/11/2012 21:30:00	29,8	444
E35	15/11/2012 22:00:00	2,6	364
E35	15/11/2012 22:30:00	10,2	348
E35	15/11/2012 23:00:00	1,8	322
E35	15/11/2012 23:30:00	0	271

Fonte: SUDECAP, 2013.

Esta disposição nos permite determinar o instante inicial e final de cada precipitação, e sua intensidade. Os dados da Tabela 4.1, indicam a ocorrência de uma chuva entre 21 e 23 horas do dia 15/11/2012, com um acúmulo total de 71,6 mm de precipitação, valor considerado crítico se levarmos em conta o Gráfico de Risco de Inundação da região, Figura 4.4. Além disso, os dados também indicam que o nível máximo atingido na estação 35 durante o período de análise foi de 444 cm, o que corresponde a um alcance de aproximadamente 60% da seção monitorada em apenas duas horas.

Outra questão a ser considerada, se refere à localização da estação de monitoramento, caso esteja localizada em um ponto mais alto da região, os pontos mais baixos podem apresentar risco

de inundação antes mesmo de ocorrer o transbordamento na seção monitorada.

4.3.2 Chamadas de emergência atendidas pelo CBMMG

Além dos dados das estações de monitoramento hidrológico, esta pesquisa também contou com informações cedidas pelo Corpo de Bombeiros de Minas Gerais. Os registros fornecidos se referem as chamadas de emergência atendidas no período de 2007 à 2013. Porém, nesta pesquisa foram usados apenas os dados levantados a partir de 2012, uma vez que somente neste período é que o sistema automatizado de Registro de Eventos de Defesa Social (REDS) passou a ser utilizado, aumentando a confiabilidade dos registros das chamadas de emergência.

Para facilitar a manipulação dessa base de dados, foram filtradas apenas as chamadas relacionadas a desastres de natureza hidrológica, dentre eles, as inundações e os deslizamentos de terra.

Como a análise se limitou ao período de utilização do sistema REDS, o número total de registros levantados não foi tão expressivo. Para contornar esta dificuldade os dados referentes ao monitoramento hidrológico, e as chamadas de emergência, foram agrupados por região do município, transformando as informações mais relevantes e significativas.

Na base de dados desenvolvida nesta pesquisa os registros de chamadas de emergência foram dispostos na seguinte forma:

Tabela 4.2: Registro das chamadas de emergência do CBMMG

Chamada	821
Data do Fato	15/11/2012
Horário do Fato	21:18:00
Logradouro da Ocorrência	Rua Caiçara, 459
Bairro	São Geraldo
Causa	Inundação
Latitude	-19,9011
Longitude	-43,8998
UE	615158,27
UN	7799071
Região	Leste

Fonte: CBMMG, 2013.

A Tabela 4.2 indica que a chamada 821 foi gerada no dia 15/11/2012 às 21:18, devido à ocorrência de uma inundação no bairro São Geraldo, região leste da cidade.

Apesar destas chamadas estarem diretamente relacionados aos altos volumes de precipitação registrados nas estações de monitoramento, a relação de causa e efeito existente entre esses dados

não é muito bem definida. Além disso, o relacionamento dos principais agentes envolvidos na gestão de operações emergenciais, quase sempre se restringe as operações executadas durante, ou logo depois da ocorrência de um fenômeno. Tal fato demonstra a necessidade de uma melhor articulação institucional em torno da gestão do risco de desastres naturais, e evidencia a existência de uma lacuna ainda pouco explorada pela sociedade acadêmica brasileira.

A partir das informações levantadas o Capítulo 5 detalha o modelo de simulação desenvolvido bem como as considerações e simplificações necessárias a sua elaboração.

Capítulo 5

Simulação dos serviços de atendimento às chamadas do CBMMG

5.1 Modelo de simulação

O modelo computacional proposto neste trabalho foi desenvolvido no *software* AnyLogic 7. A Figura 5.1 apresenta um fluxograma básico de seu funcionamento.

O processo se inicia com a leitura dos índices pluviométricos registrados nas 9 regiões administrativas de Belo Horizonte. Esses índices representam a média móvel do volume de água acumulado diariamente nas 54 estações de monitoramento hidrológico distribuídas no município. Em outras palavras, ao se completar 24 horas de observação do índice pluviométrico em uma determinada estação, o registro mais antigo é subtraído do conjunto e o mais recente é então adicionado. A Figura 5.2 exemplifica este cálculo para a região do Barreiro.

De acordo com os dados históricos no dia 01/01/2012 às 05:00 foi constatado uma acúmulo de 39,27 mm de precipitação nessa região, valor que corresponde à média do volume de água acumulado nas estações 25, 26, 28, 29, 43, e 44. Como indicado na Figura 5.2, algumas estações não possuem determinados registros, isto se deve ao fato de que esporadicamente exista a necessidade de manutenção ou calibragem dos equipamentos de medição.

Com base nesse volume de chuva acumulado o modelo calcula então a probabilidade de que uma chamada de emergência seja gerada em determinada localidade. Caso a chamada não seja gerada o modelo continua a leitura do arquivo texto com os índices pluviométricos. Caso contrário, a chamada gerada é vinculada à um par de coordenadas UTM (*Universal Transverse Mercator*).

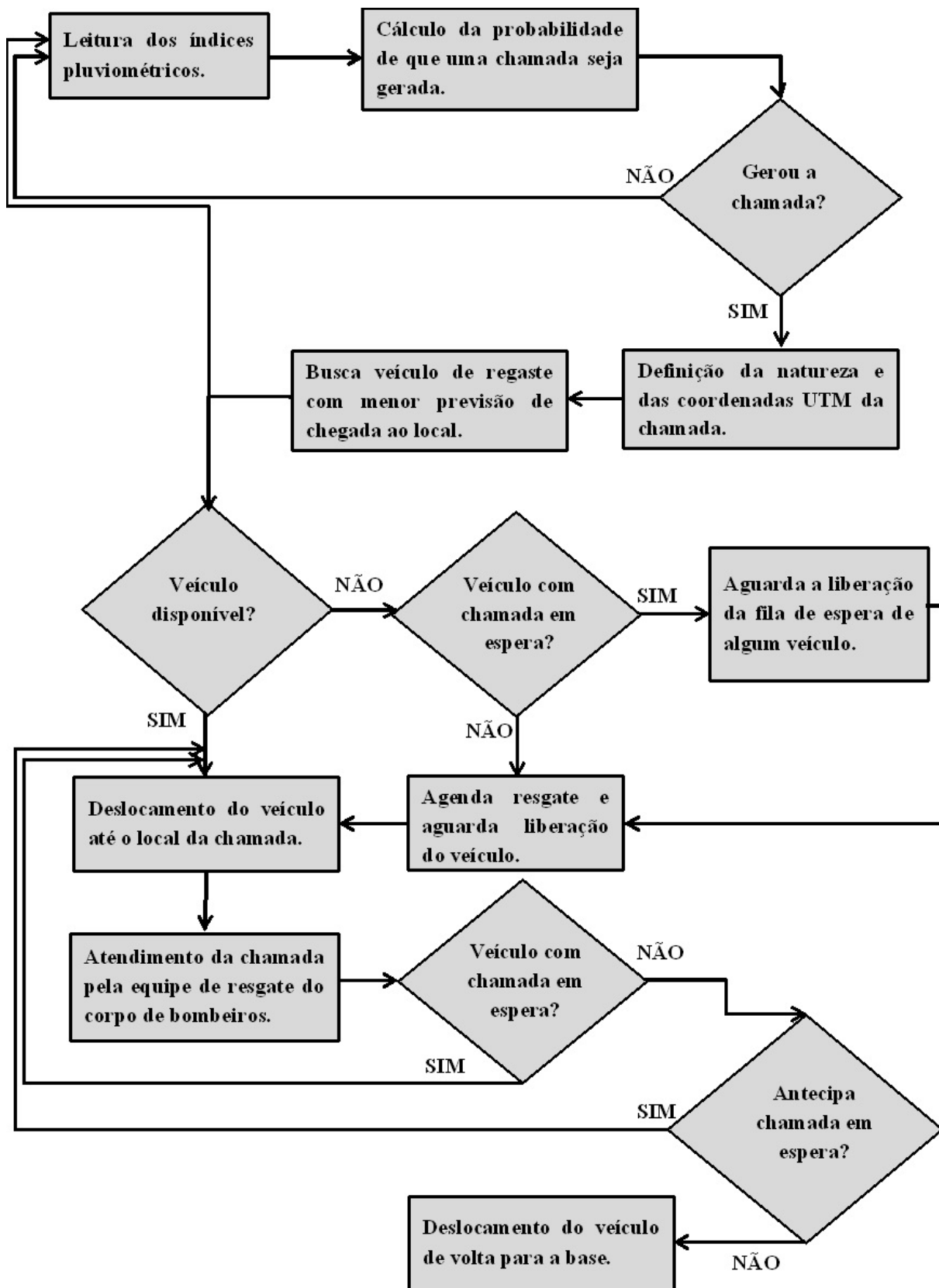


Figura 5.1: Fluxograma do processo atendimento das chamadas do CBMMG

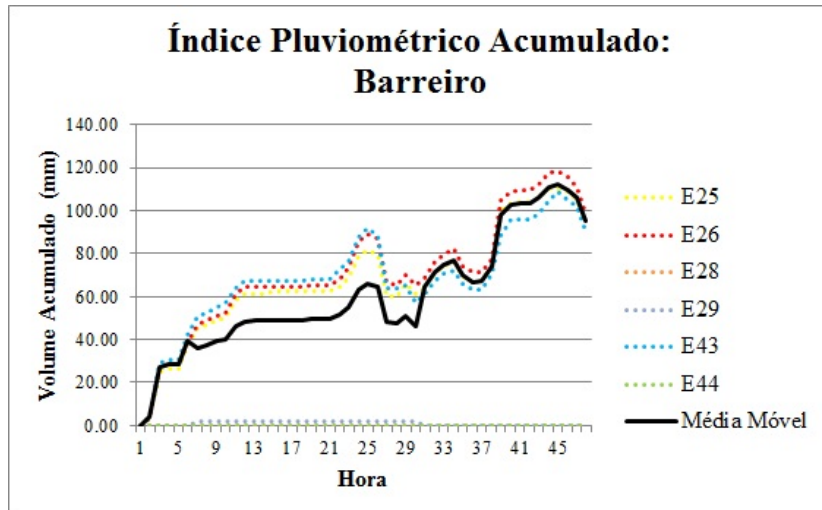


Figura 5.2: Gráfico do volume médio de chuva acumulado no Barreiro

Definido o local da emergência gerada, o modelo identifica o veículo de resgate com o menor tempo de reposta possível para atender a chamada. Caso todos os veículos estejam ocupados, e já possuam chamadas em espera por sua disponibilidade, a ocorrência é direcionada para uma fila de espera, liberada apenas quando um dos veículos da frota finalize seu atendimento corrente. Caso contrário, três situações devem ser analisadas:

1. Redirecionamento do veículo alocado: ocorre quando o veículo apontado para executar o resgate está retornando para sua base original de operação, neste caso, o deslocamento da viatura é cancelado, e a mesma é redirecionada para o local do novo incidente.
2. Execução imediata do atendimento da chamada: ocorre quando o veículo apontado para executar o resgate se encontra disponível em sua base de operação ou no local em que a última chamada foi atendida.
3. Agendamento do deslocamento da equipe de resgate: ocorre quando o veículo apontado para executar o resgate se encontra indisponível no momento em que a chamada de emergência é gerada, fazendo com que a chamada aguarde sua disponibilidade em uma fila de espera.

Uma vez no local, inicia-se o atendimento da chamada pela equipe do corpo de bombeiros, ao finalizar este atendimento a equipe verifica se existe alguma chamada em espera por aquele veículo. Caso exista, o veículo se desloca diretamente até o local do incidente, dado que o mesmo foi selecionado para realizar o atendimento. Caso contrário, duas situações devem ser analisadas:

1. Retorno imediato do veículo para sua base de origem: esta situação ocorre quando o veículo não possui chamada em espera por sua disponibilidade, e não pode antecipar as chamadas em espera que ainda não foram alocadas a um veículo, retornando à sua base de origem e se tornando disponível para novo atendimento.
2. Antecipação de uma chamada em espera: esta situação ocorre quando apesar do veículo não possuir chamada em espera por sua disponibilidade, é possível antecipar uma chamada em espera ainda não alocada à outro veículo.

A seguir serão detalhadas as definições dos principais parâmetros de entrada do modelo computacional, assim como as lógicas implementadas para o controle do fluxo de agentes no sistema.

5.1.1 Definição dos agentes e entidades do sistema

A simulação baseada em agentes tem sido muito adotada pela Pesquisa Operacional para modelar sistemas complexos formados por entidades que interagem entre si (Heath et al., 2011). Segundo Anagnostou et al. (2013), uma parcela significativa das pesquisas elaboradas consiste na simulação de serviços médicos de emergência (*Emergency Medical Service*, EMS). A utilização da simulação a eventos discretos em problemas desta natureza é bastante discutível, pois, nestes casos as entidades/agentes tomam decisões constantemente, alterando suas propriedades e comportamento ao longo do tempo. Como por exemplo, no caso em que uma rota deve ser recalculada pelo fato do caminho original estar bloqueado, ou pelo fato de que um novo incidente tenha sido registrado em outro local.

Nesta pesquisa, a simulação baseada em agentes é utilizada para modelar o serviço de atendimento das chamadas recebidas pelo corpo de bombeiros. No modelo implementado foram considerados agentes ativos, ou seja, entidades que interagem com outros indivíduos e com o ambiente de simulação, as chamadas recebidas pelo corpo de bombeiros e os veículos utilizados para atender as mesmas. As estações de monitoramento e as bases de operação do corpo de bombeiros foram modeladas como agentes passivos, ou seja, entidades que fazem parte do ambiente de simulação, mas, que não interagem com nenhum outro agente.

Como indicado na Figura 5.3 cada agente, independente se ativo ou não, possui um conjunto de atributos que o caracteriza, sua latitude e longitude, por exemplo, informam seu posicionamento em qualquer momento da simulação.



Figura 5.3: Agentes do sistema simulado

A interação entre os agentes modelados ocorre em distintos momentos da simulação.

A Figura 5.4 A, por exemplo, representa a situação em que uma viatura ao finalizar o atendimento de um incidente dispara a ordem de atendimento da ocorrência que aguardava pela sua disponibilidade em uma fila de espera.

A Figura 5.4 B representa uma situação semelhante, porém, a viatura em questão não possui um incidente aguardando especificadamente sua disponibilidade, neste caso é disparado o atendimento de uma ocorrência ainda não alocada a qualquer outro veículo da frota do corpo de bombeiros.

A Figura 5.4 C representa uma situação distinta das apresentadas, neste caso a viatura apontada para executar o atendimento de uma chamada está retornando para sua base de operação, o deslocamento é então cancelado por um novo incidente relatado, responsável também por redirecionar o veículo até sua localização.

As situações apresentadas demonstram possíveis contribuições da simulação baseada em agentes na modelagem dos serviços de atendimento prestados pelo corpo de bombeiros, pois, mesmo

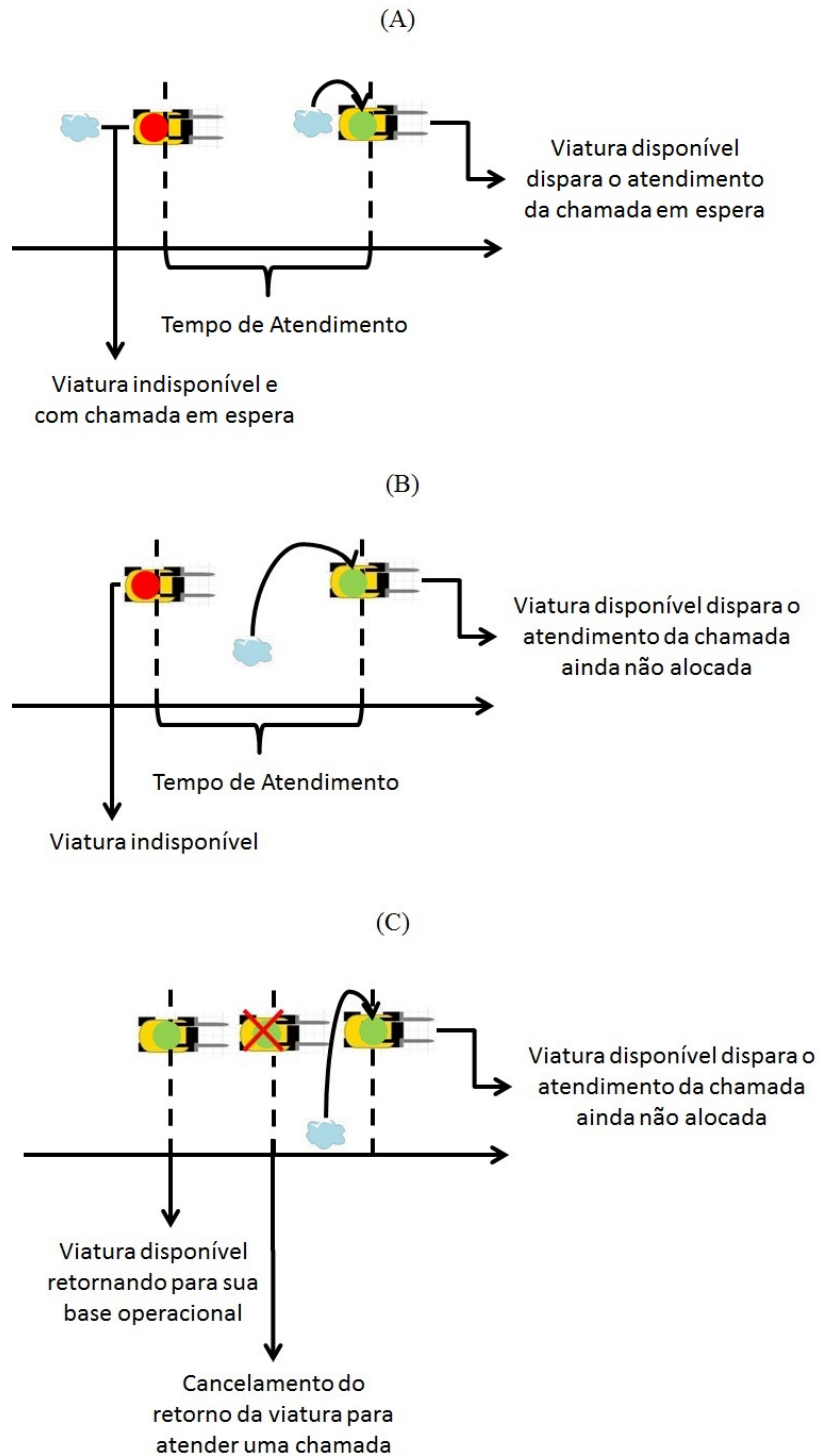


Figura 5.4: Interação entre os agentes do sistema simulado

que as entidades simuladas não apresentem total autonomia quanto à tomada de decisões, as mesmas possuem a capacidade interagir com as demais entidades situadas no ambiente simulado, alterando diretamente o seu estado e/ou o seu comportamento durante a simulação.

Apesar das entidades descritas serem modeladas através da abordagem de simulação baseada

em agentes, a simulação a eventos discretos é utilizada para representar a lógica dos processos aos quais esses agentes estão sujeitos, como por exemplo, os deslocamentos das viaturas do corpo de bombeiros, e o atendimentos dos incidentes relatados. A combinação destas duas técnicas na modelagem dos agentes envolvidos no sistema, e de seus comportamentos no ambiente simulado, resultou no desenvolvimento de um modelo híbrido de simulação a ser detalhado nas próximas seções.

5.1.2 Leitura do arquivo texto

O processo de disparo e atendimento das chamadas de emergência recebidas pelo corpo de bombeiros se inicia através da leitura de um arquivo texto. Apesar deste arquivo dispor do volume de água acumulado nas regiões administrativas a cada intervalo de 1 hora, sua leitura só é executada em um momento aleatório do dia, esta simplificação evita que chamadas repetidas sejam geradas em sequencia para um único registro de precipitação de longa duração.

Para determinar quando a leitura do arquivo texto deve ser feita o modelo cria, no início de cada replicação, uma matriz *Momento* semelhante a indicada na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Momento da leitura do volume de água acumulado nas regiões

Momento (min)	Região
60	4
60	5
230	3
450	2
710	6
800	1
960	8
1050	9
1310	7
...	...

A primeira coluna da matriz indica em que momento o modelo faz a leitura do volume de água acumulado na região especificada pela segunda coluna. Neste exemplo na primeira hora da simulação será analisada a precipitação acumulada nas regiões 4 e 5. Desta forma, a matriz tem como objetivo sequenciar uma lista de eventos futuros a serem executados.

Como mencionado anteriormente o levantamento dos dados de monitoramento hidrológico se limitou aos períodos chuvosos de outubro à março de 2012 e 2013, e janeiro à março de 2014, totalizando 455 dias. De forma a garantir que a leitura desse banco fosse feita em diferentes instantes do dia foram gerados 455 valores aleatórios para cada região, sorteados conforme a

Equação 5.1.

$$Momento = \text{uniforme}((dia - 1) * 24, ((dia - 1) * 24 + 24)) \quad (5.1)$$

Com base no cálculo apresentado a leitura do arquivo texto de entrada poderá ser feita a qualquer hora dos dias inseridos no período total analisado.

5.1.3 Probabilidade de ocorrência

O cálculo da probabilidade de que uma chamada seja gerada em determinada região consiste, basicamente, na relação existente entre os registros de monitoramento hidrológico, e os incidentes observados na mesma região.

Para ilustrar essa relação tomemos como exemplo a chamada indicada na Tabela 5.2. De acordo com as rotinas implementadas, a chamada 1792, de coordenadas (603419,0751; 7792479,3746), se encontra na região do Barreiro.

Tabela 5.2: Chamada atendida na região do Barreiro

Chamada 1792	
Natureza	Inundação
Data/Hora do Fato	2013-12-11 18:51:00.000
Logradouro	Av. Tereza Cristina, 8723
Latitude	-19,9614
Longitude	-44,0116
UTX	603419,0752
UTMY	7792479,3747
Regiao	Barreiro

A partir destas informações, e de consultas feitas ao banco de dados, é possível obter uma lista com os registros das estações que se encontram na mesma região onde a chamada foi gerada.

No total 6 estações de monitoramento estão localizadas na região do Barreiro, sendo a estação E28 desconsiderada desta análise por não haver registros de precipitação no período pesquisado. Conforme os dados da Figura 5.5, no dia em que a chamada foi registrada houve um acúmulo médio de aproximadamente 59 mm de precipitação, valor característico de chuvas fortes.

Através de algumas consultas semelhantes à detalhada acima, cada chamada recebida pelo CBMMG no período de pesquisa foi relacionada com um registro de precipitação diário. O objetivo da análise desta relação é calcular a probabilidade de que uma chamada de emergência seja gerada dada a ocorrência de um determinado volume de precipitação durante certo intervalo de

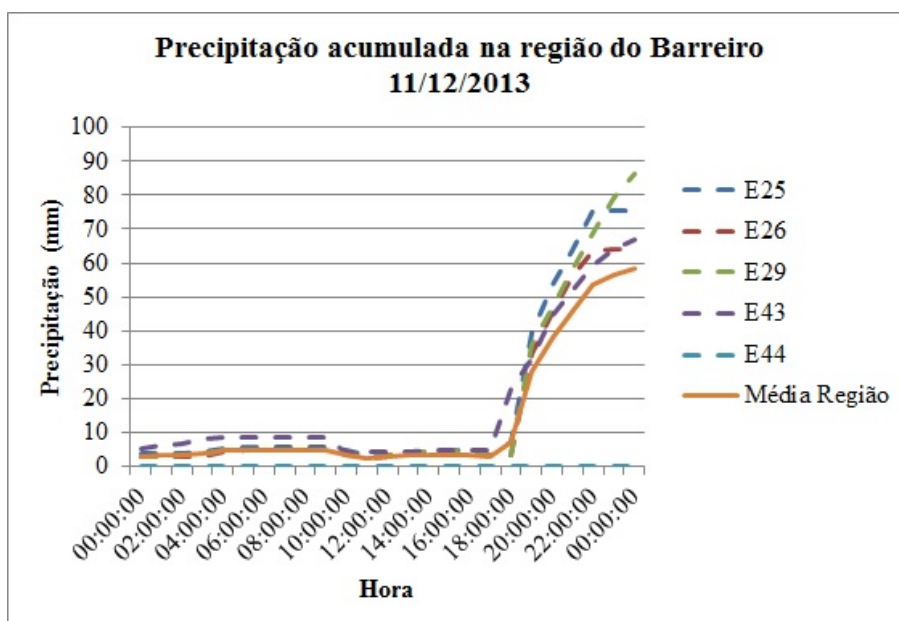


Figura 5.5: Precipitação acumulada nas estações da região

tempo, definido como 24 horas. Este valor é calculado a partir da Equação 5.2.

$$PChamada(r,v) = \frac{NDiasChamada(r,v)}{NOcorrencia(r,v)} \quad (5.2)$$

De acordo com a Equação 5.2 a probabilidade de que uma ocorrência seja gerada em uma região r , dado que nesta localidade houve o registro de um volume v de precipitação durante um intervalo de tempo de 24 horas, é dada pela divisão do número de dias com chamadas registradas nas mesmas condições citadas durante todo o período de análise, pelo número total de vezes em que estas condições de precipitação foram observadas no local.

Neste caso, porém, o número total de informações levantadas, referentes à apenas três períodos chuvosos, impossibilitou uma análise estatística mais consistente, desta forma, a probabilidade de que uma ocorrência seja gerada foi aproximada de uma distribuição empírica apresentada no Tabela 5.3.

5.1.4 Natureza da chamada

A definição da natureza das chamadas geradas pelo modelo de simulação se baseia na frequência histórica dessas ocorrências em cada região do município.

Como indicado na Tabela 5.4, entre o período de jan/2012 à mar/2014 foram levantados 2276 chamadas relacionados com a ocorrência de fenômenos hidrológicos no município de Belo

Tabela 5.3: Distribuição empírica da probabilidade de que uma chamada seja gerada

Volume Acumulado em 24 hrs (mm)	Classificação da Chuva	Regiões								
		Barreiro	Oeste	Centro Sul	Leste	Norte	Venda Nova	Pampulha	Nordeste	Noroeste
ip <=10	Fraca	30%	50%	54%	33%	13%	21%	39%	30%	30%
0 < ip <=20	Moderada	31%	55%	69%	43%	19%	29%	60%	35%	37%
20 < ip <=50	Forte	46%	63%	84%	67%	54%	48%	65%	55%	54%
50 < ip <= 80	Muito Forte	71%	75%	100%	100%	86%	60%	75%	100%	100%
80 < ip	Extrema	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Horizonte, dos quais 22% foram registradas na região Centro Sul.

Tabela 5.4: Distribuição das chamadas do CBMMG por região e natureza

Causa	Região								
	Barreiro	Oeste	Centro Sul	Leste	Norte	Venda Nova	Pampulha	Nordeste	Noroeste
Corte/Poda de árvore	25	50	71	55	20	23	32	65	20
Corte/Poda de árvore em risco	17	30	16	10	11	9	12	12	9
Corte de árvore caída	64	151	284	107	55	41	136	92	100
Vistoria em risco de queda de árvore	33	40	44	50	28	26	43	35	29
Defesa civil inundação	1	0	1	1	0	1	4	0	0
Inundação	9	12	13	9	7	12	13	11	7
Salvamento de pessoa ilhada	2	2	2	2	8	5	4	5	1
Enchente	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Perigo de desabamento	14	19	23	10	7	7	9	14	12
Risco de desmoronamento	1	0	4	2	2	2	2	0	3
Desabamento/Desmoronamento	8	9	27	32	3	7	20	14	24
Soterramento, deslizamento ou rompimento	2	1	1	0	0	1	5	2	1
Risco de soterramento, deslizamento ou rompimento	0	3	3	1	1	0	0	1	1
Total	176	317	490	279	142	134	280	251	207
Percentual	8%	14%	22%	12%	6%	6%	12%	11%	9%

Com o intuito de facilitar a análise dos dados, as chamadas foram reagrupadas entre as naturezas mais relevantes observadas:

- **Tipo 1:** chamadas mais brandas que envolvem principalmente o corte de árvores ou a remoção de outros obstáculos das vias.

- **Tipo 2:** chamadas ocasionadas basicamente pela ocorrência de enchentes e inundações.
- **Tipo 3:** chamadas relacionadas com a ocorrência de movimentos de massa.

A Figura 5.6 indica o percentual histórico de ocorrência dos três tipos de chamada em cada região analisada.

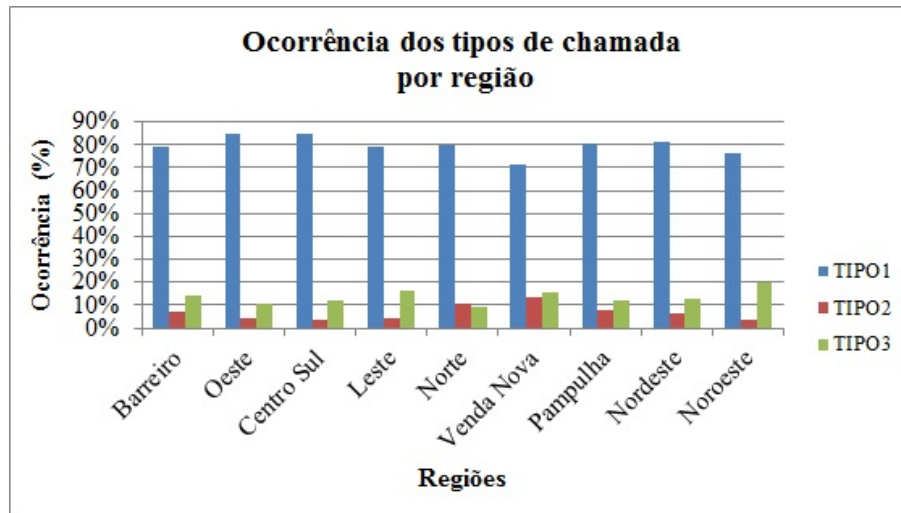


Figura 5.6: Frequência da ocorrência de chamadas

Com base nos percentuais apresentados, a maior parte das chamadas de natureza hidrológica ocorridas entre 2012 e 2014 se referem as chamadas do Tipo 1. Entretanto, esta constatação não isenta o estudo dos outros tipos de chamada, pois, os mesmos além de possuírem maior potencial de impacto à população exposta, também apresentaram incidência significativa no período analisado.

5.1.5 Distância percorrida pelos veículos

A distância percorrida do local em que um veículo do corpo de bombeiros se encontra até o incidente a ser atendido pelo mesmo é calculada com base na distância euclidiana entre estes pontos. O valor calculado representa a menor distância entre um ponto A de coordenadas (x_A, y_A) , e um ponto B de coordenadas (x_B, y_B) , definido pela Equação 5.3:

$$d_{a,b} = \sqrt{(x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2} \quad (5.3)$$

Apesar da simplicidade do cálculo a distância euclidiana nem sempre representa uma boa estimativa para a distância real entre dois pontos, principalmente em estudos que envolvam a movimentação de veículos/pessoas em malhas urbanas, onde é frequente a alternância do sentido

das vias, e a existência de ruas sem saída. Nestes casos, a multiplicação da distância euclidiana por um fator de correção permite a aproximação do valor calculado com o observado no sistema real.

Silva and Pinto (2010) sugerem a utilização de um fator de correção de 1,366, valor calculado especificadamente para a cidade de Belo Horizonte. Segundo os autores a estimativa do fator foi feita com base na comparação entre a distância euclidiana e a distância real de diversos pontos do município. Como o estudo foi realizado na mesma cidade analisada nesta pesquisa foi adotado esse mesmo fator de correção.

5.1.6 Velocidade de deslocamento do resgate

O cálculo do tempo de deslocamento gasto pelo veículo de resgate até o local da ocorrência leva em consideração a distância euclidiana até a chamada a ser atendida, e a velocidade média de deslocamento da viatura.

A estimativa da velocidade média alcançada pelos veículos foi feita com base nos dados históricos fornecidos pelo CBMMG. Inicialmente esses dados foram analisados de forma a retirar valores discrepantes da amostra levantada. Segundo Chwif and Medina (2006) todo o levantamento de dados está sujeito a valores não usuais conhecidos como *outliers*, esses valores surgem, principalmente, devido ao erro na coleta de dados (falha nos equipamentos de medição, problemas na conversão de arquivos, suspensão temporária de máquinas, etc...), ou à ocorrência de algum evento raro. Ainda segundo os autores, os *outliers* podem distorcer os resultados, levando muitas vezes a conclusões equivocadas.

Existem diversas técnicas para identificar esses valores em uma amostra, dentre as quais podemos citar a representação dos valores coletados através de gráficos *box-plot*.

Como indicado na Figura 5.7 os gráficos *box-plot* são formados por duas linhas principais:

1. Primeiro Quartil (Q_1): representa 25% das observações ordenadas do menor para o maior valor coletado.
2. Terceiro Quartil (Q_3): representa 75% das observações ordenadas do menor para o maior valor coletado.

As observações são consideradas *outliers* caso estejam fora dos limites inferior e superior do gráfico, calculado a partir das Equações 5.4 e 5.5, respectivamente.

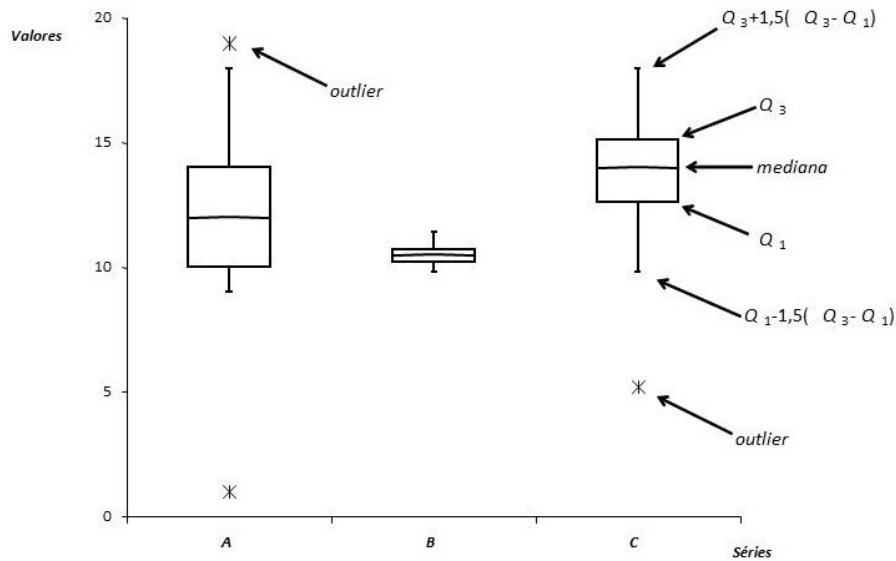


Figura 5.7: Diagrama box-plot para identificação de *outliers*
 Fonte: Chwif and Medina (2006), p.p. 29

$$LI = Q_1 - 1,5 * (Q_3 - Q_1) \quad (5.4)$$

$$LS = Q_3 + 1,5 * (Q_3 - Q_1) \quad (5.5)$$

Os resultados do *box-plot* da velocidade média assumida pelos veículos de resgate estão dispostos na Tabela 5.5.

Tabela 5.5: *Outliers* da velocidade média dos veículos de resgate

BOX-PLOT	8 AS 10	10 AS 17	17 AS 20	20 AS 8	TODAS
LI	5,14	5,03	5,21	5,05	5,03
LS	45,62	38,53	32,21	39,38	39,75

Como observado na Figura 5.8 os dados levantados foram distribuídos em 4 faixas de horário, de 8:00 as 10:00, 10:00 as 17:00, 17:00 as 20:00 e 20:00 as 08:00, períodos estes determinados com base na facilidade ou dificuldade de deslocamento dos veículos de resgate em diferentes momentos do dia.

Após a exclusão dos *outliers* indicados no conjunto de observações, foi realizado, para cada faixa de horário, o teste de aderência disponível no aplicativo *Input Analyzer* do *software* Arena. Neste teste a hipótese de aderência, ou hipótese nula, é confrontada com a hipótese alternativa, sendo:

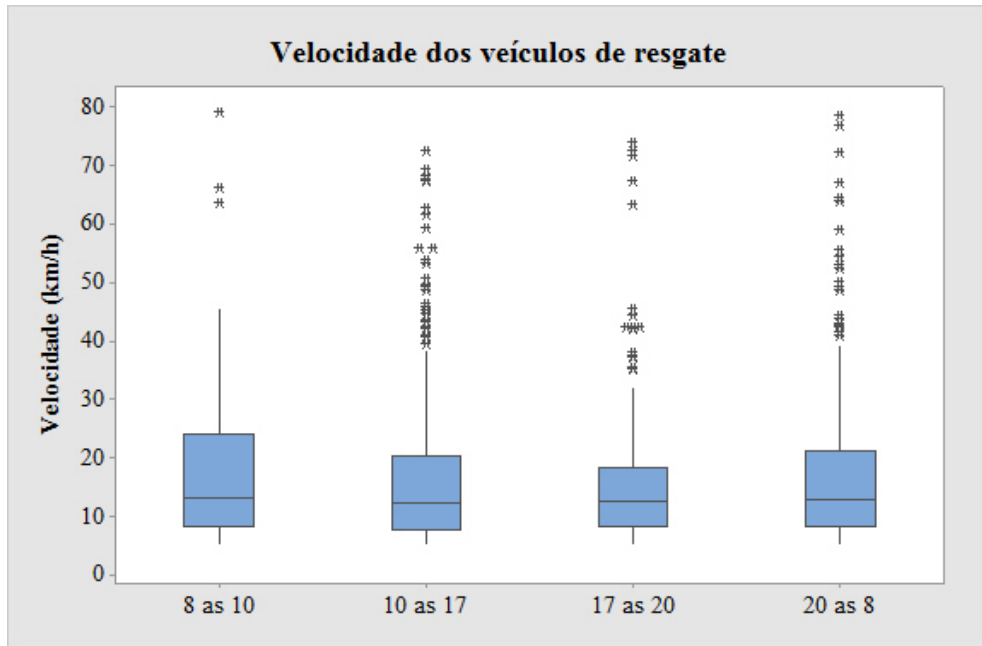


Figura 5.8: *Box-plot* da velocidade média dos veículos de resgate

- H_0 : modelo adequado para representar a distribuição das observações.
- H_a : modelo inadequado para representar a distribuição das observações.

O *software* utilizado disponibiliza os dois principais testes de aderência existentes, o qui-quadrado e Kolmogorov-Smirnov, porém, segundo Chwif and Medina (2006), quando o número de valores observados é pequeno, o teste qui-quadrado pode não ser conclusivo, sendo mais adequado neste caso o teste Kolmogorov-Smirnov.

Em linhas gerais, para analisar o ajuste das distribuições probabilísticas aos dados amostrados o teste de aderência Kolmogorov-Smirnov se baseia na diferença entre as probabilidades acumuladas da distribuição teórica e da observada. A qualidade desse ajuste pode ser mensurada a partir do *p-value* do teste realizado. Nos testes de aderência conduzidos para os dados coletados nesta pesquisa foram utilizados os critérios indicados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6: Critérios usuais para a classificação do p-value

Valor	Critério
$p\text{-value} < 0,01$	Evidência forte contra a hipótese de aderência
$0,01 \leq p\text{-value} < 0,05$	Evidência moderada contra a hipótese de aderência
$0,05 \leq p\text{-value} < 0,10$	Evidência potencial contra a hipótese de aderência
$0,10 \leq p\text{-value}$	Evidência fraca ou inexistente contra a hipótese de aderência

Fonte: Chwif and Medina (2006), p.p. 42

A partir deste teste foi possível verificar que os valores correspondentes à velocidade média

assumida pelos veículos de resgate seguem diferentes distribuições teóricas para cada faixa de horário. Os histogramas e principais resultados dos testes de aderência realizados estão dispostos na Figura 5.9.

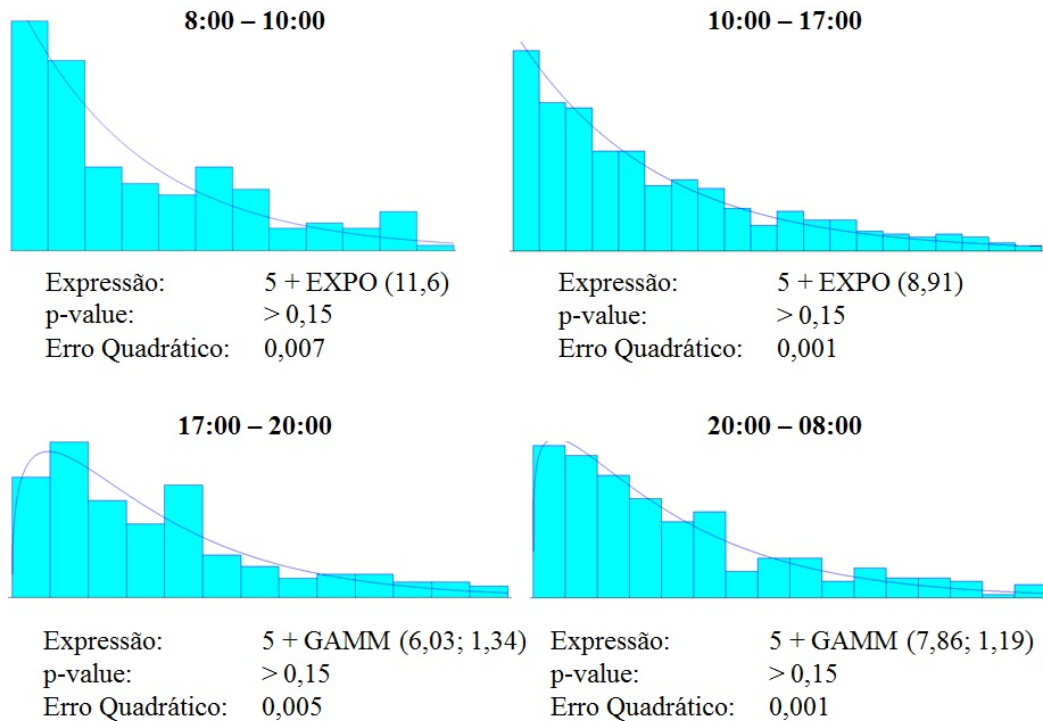


Figura 5.9: Distribuição da velocidade dos veículos de resgate por faixa de horário

Como observado na Figura 5.9 os testes de aderência do *Input Analyzer* também fornecem o valor do erro quadrático da distribuição de probabilidade encontrada, outro indicador da qualidade do ajuste realizado. Segundo De Freitas Filho (2001), este valor é obtido a partir do somatório das diferenças entre as frequências relativas observadas f_i e as frequências relativas esperadas $f(x_i)$ tomadas ao quadrado, para todos os intervalos do histograma representativo da amostra.

5.1.7 Tempo de atendimento da chamada

Os tempos necessários para o atendimento das chamadas recebidas pelo corpo de bombeiros foram estimados à partir dos dados levantados diretamente da central de operações. Assim como na análise da velocidade média assumida pelos veículos de resgate, antes de realizar os testes de aderência para esse conjunto de dados foi preciso retirar os *outliers* existentes na amostra.

Os resultados do *box-plot* do tempo de atendimento das chamadas recebidas estão dispostos na Tabela 5.7.

Tabela 5.7: *Outliers* do tempo de atendimento das chamadas do CBMMG

BOX-PLOT	TIPO1	TIPO2	TIPO3
LI	10	10	10
LF	260	137	216

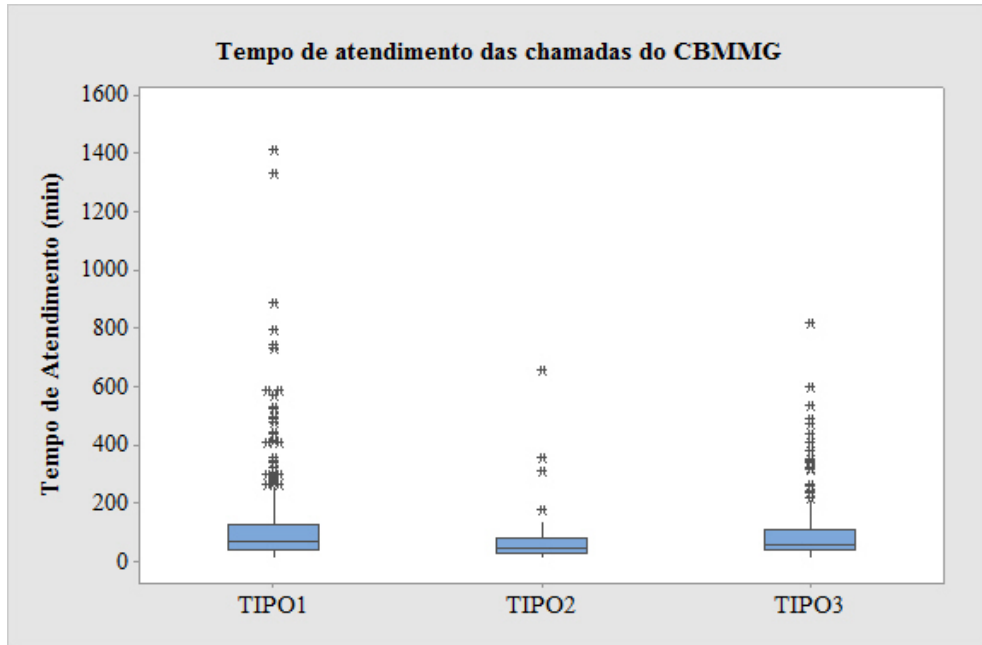


Figura 5.10: *Box-plot* do tempo de atendimento das chamadas do CBMMG

Como observado na Figura 5.10 as chamadas foram distribuídos entre as principais naturezas levantadas anteriormente, dado que o tipo de ocorrência interfere diretamente em seu tempo médio de atendimento pela equipe de resgate.

Após a exclusão dos *outliers* indicados no conjunto de observações, foi realizado, para cada natureza das chamadas, o teste de aderência Kolmogorov-Smirnov. Os histogramas e os principais resultados dos testes realizados estão dispostos na Figura 5.11.

5.1.8 Localização das chamadas

Ao simular a ocorrência de uma chamada em determinada região do município, o modelo de simulação determina também suas coordenadas através da função *GeraLocalEmergencia*.

O valor das coordenadas retornadas por essa função se baseiam no mapeamento do município de Belo Horizonte e suas regionais através do sistema UTM.

A Figura 5.12 apresenta o contorno do município e de cada uma das nove regionais à ele pertencentes.

Além do mapeamento do município esse sistema foi utilizado para determinar a localização

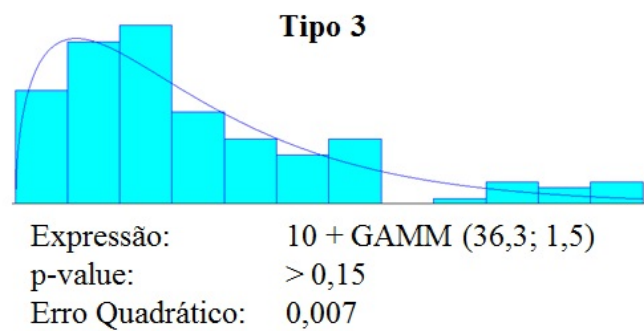
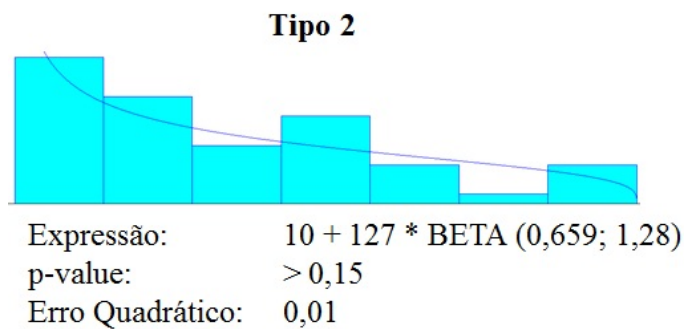
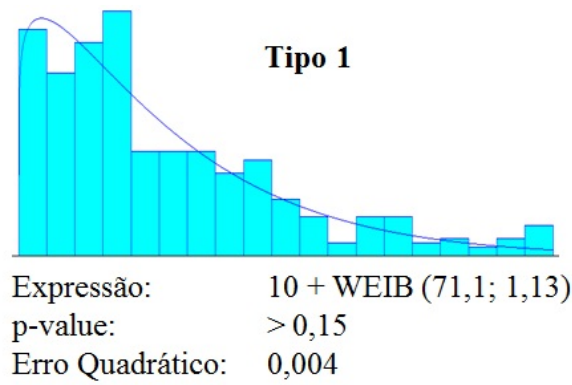


Figura 5.11: Distribuição do tempo de atendimento das chamadas por natureza

exata das bases onde se encontram os veículos e as equipes de resgate, e das estações de monitoramento, também representados na Figura 5.12. A utilização de coordenadas UTM se justifica pelo fato deste sistema estar baseado no plano cartesiano (x,y), facilitando dessa forma o cálculo da distância euclidiana entre as viaturas e os incidentes relatados.

Para determinar as coordenadas de uma chamada a função *GeraLocalEmergencia* aproxima os polígonos representativos de cada região a retângulos cujas arestas equivalem aos valores máximos e mínimos de suas coordenadas x e y. Dessa forma as coordenadas UTM de uma chamada localizada em uma região r são sorteadas através das Equações 5.6 e 5.7:

$$UTM_X = uniforme(min(UTM_{X_r}), max(UTM_{X_r})) \quad (5.6)$$

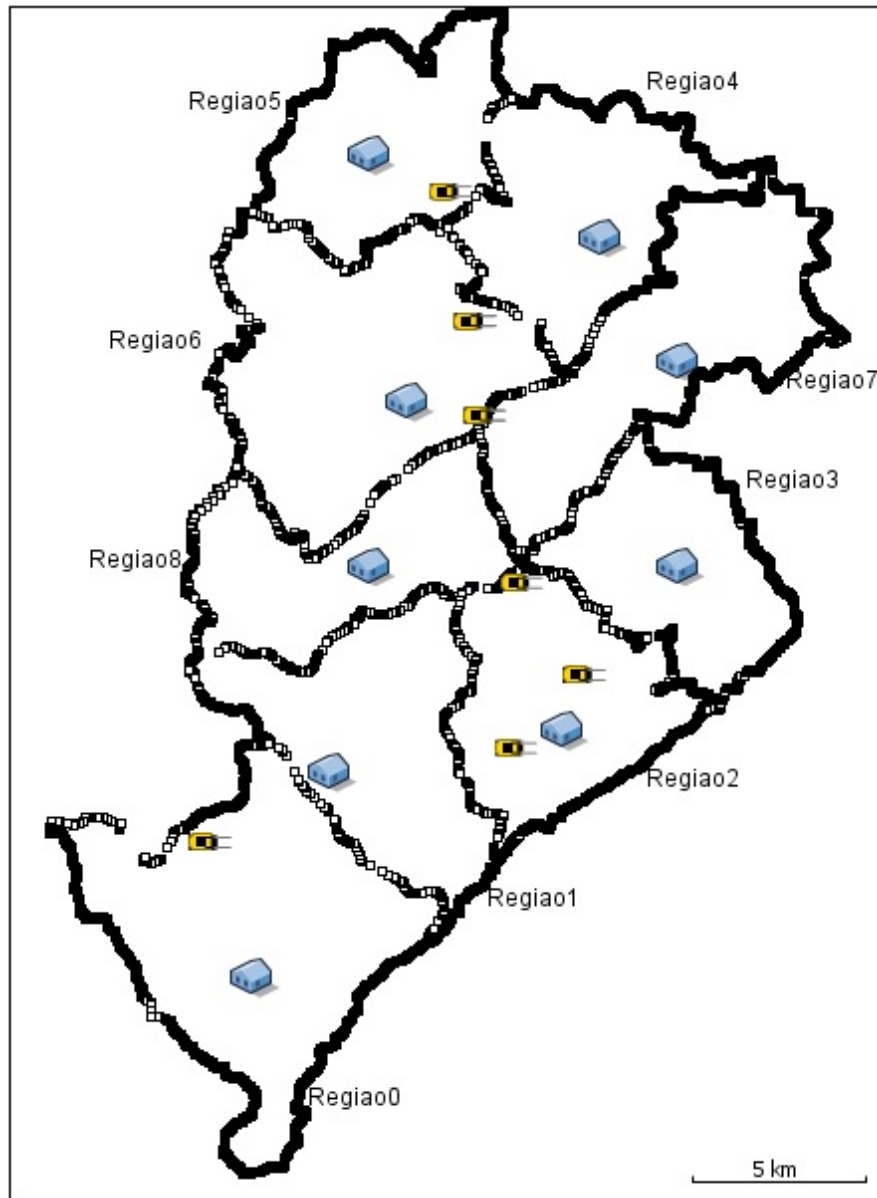


Figura 5.12: Mapeamento de Belo Horizonte - Sistema UTM

$$UTM_Y = \text{uniforme}(\min(UTM_{Y_r}), \max(UTM_{Y_r})) \quad (5.7)$$

Em que $\min(UTM_{X/Y_r})$ e $\max(UTM_{X/Y_r})$, representam respectivamente as coordenadas mínimas e máximas de uma região r .

Após o sorteio destes valores uma rotina, implementada em JAVA, verifica se as coordenadas se encontram dentro da região mapeada, caso estejam fora do polígono um novo ponto é sorteado e verificado até que a condição seja satisfeita.

Quando satisfeita essa condição uma outra rotina, também implementada em JAVA, executa a conversão das coordenadas do sistema UTM para o sistema georreferenciado. Essa conversão

garante o acompanhamento do processo de geração de chamadas através da ferramenta *GIS Space*, disponível no *software* Anylogic. Esta ferramenta possibilita a definição ou alteração da localização do agente em um mapa GIS (*Geographic Information System*), e a sua movimentação de um ponto a outro com velocidade especificada. A Figura 5.13 ilustra a animação do processo de geração de uma chamada na região Leste, com latitude -19,9032, e longitude -43,9136, e o deslocamento de um veículo do corpo de bombeiros até o local do incidente.

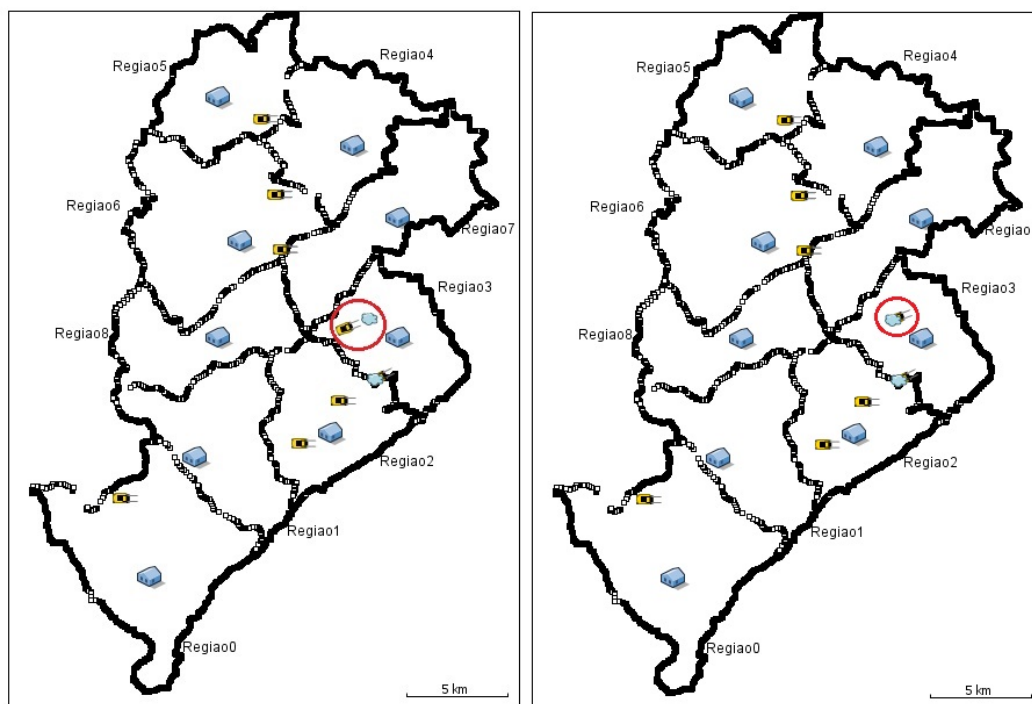


Figura 5.13: Atendimento da chamada gerada na região Leste

A lógica implementada para a alocação desses veículos as chamadas geradas será detalhada posteriormente.

5.1.9 Localização de concentradores

Após uma análise detalhada das chamadas atendidas pelo corpo de bombeiros, entre janeiro de 2012 e março de 2014, foi possível observar que, em cada região, existem determinados locais que concentram boa parte dos incidentes relatados. A partir desta constatação foram feitos alguns refinamentos, aproximando ainda mais o modelo do sistema real simulado. Dessa forma, a definição das coordenadas UTM de uma chamada passam a ser calculadas não apenas com base nos limites da região onde será localizada, como também nos limites dos locais que concentram o maior número incidentes dessa região.

No entanto, antes de implementar esta alteração no modelo computacional, foi preciso iden-

tificar os pontos concentradores de incidentes em Belo Horizonte.

Uma das primeiras formulações matemáticas propostas para o problema de localização de concentradores foi apresentada por O'Kelly (1987). O objetivo do modelo desenvolvido era minimizar o custo total de deslocamento entre os concentradores e os pontos a eles alocados, de forma a garantir que cada ponto estivesse ligado a um único concentrador, e o número de concentradores instalados no sistema não ultrapassasse um valor máximo p .

Outra variante para o problema é proposta por O'Kelly (1992) ao introduzir um custo fixo para instalar os pontos concentradores, tornando dessa forma, o número de pontos a ser instalados uma variável de decisão do problema.

Nesta pesquisa foi desenvolvido um modelo de otimização simples, implementado na linguagem de programação AMPL, através do pacote de otimização CPLEX.

A formulação matemática desse modelo foi baseada nas seguintes definições:

$n_{t,r}$: conjunto de chamadas do tipo t registradas em uma região r .

$d_{i,k}$: distância euclidiana entre as chamadas i e k , $i,k \in n_{t,r}$.

d_{max} : distância máxima entre o concentrador e os pontos pertencentes à mesma área.

Também foram definidas as seguintes variáveis de decisão:

y_i : variável binária que indica se o ponto i representa um concentrador (1), ou não (0);

$x_{i,k}$: variável binária que indica se o ponto i está alocado ao concentrador k (1), ou não (0).

O modelo de otimização relativo à identificação dos pontos de concentração das chamadas é apresentado nas Equações 5.8 a 5.14.

$$FO : \min z = \sum_k y_k \quad (5.8)$$

$$x_{i,k} \leq y_k \quad \forall i,k \in n_{t,r} \quad (5.9)$$

$$\sum_k x_{i,k} = 1 \quad \forall i \in n_{t,r} \quad (5.10)$$

$$x_{i,k} * d_{i,k} \leq d_{max} \quad \forall i,k \in n_{t,r} \quad (5.11)$$

$$x_{k,k} - y_k = 0 \quad \forall k \in n_{t,r} \quad (5.12)$$

$$y_i = 0,1 \quad \forall i \in n_{t,r} \quad (5.13)$$

$$x_{i,k} = 0,1 \quad \forall i,k \in n_{t,r} \quad (5.14)$$

De acordo com o modelo apresentado a função objetivo 5.8 busca minimizar o número total de concentradores formados. A restrição 5.9 garante que um ponto só poder ser alocado a concentradores instalados. A restrição 5.10 assegura que todo ponto i deve ser alocado a um único concentrador. A restrição 5.11 define uma distância máxima entre um ponto e o concentrador ao qual está alocado. A restrição 5.12 força a associação de um concentrador à área a que pertence. Por fim, o conjunto de restrições 5.13 e 5.14 assegura que as variáveis de decisão sejam binárias.

O modelo de otimização apresentado foi abastecido com o conjunto de chamadas registradas no município de Belo Horizonte entre janeiro de 2012 e março de 2014, estratificadas por natureza e por região. A distância máxima (d_{max}) considerada entre o ponto em que o incidente foi registrado, e o concentrador da área a que pertence, foi de 2 km.

Ao executar o modelo os concentradores foram listados em ordem crescente do número de chamadas incidentes no local. A partir dessa classificação foram considerados apenas os concentradores que acumulam no mínimo 50% das chamadas de determinada natureza registradas em uma região.

A Tabela 5.8 apresenta uma síntese dos resultados obtidos para as chamadas relacionadas com a ocorrência de inundações.

Conforme indicado o número de concentradores que juntos somam no mínimo 50% das chamadas registradas pode variar segundo a região.

Com base nestes resultados, antes de definir as coordenadas de uma chamada, o modelo de simulação verifica, através de um sorteio, se essa chamada estará, ou não, localizada na área que concentra a maior parte dos incidentes da região. Caso esteja, além de suas coordenadas serem limitadas pela região mapeada, sua localização também deverá estar a uma distância máxima de 2km do ponto concentrador sorteado.

5.1.10 Alocação dos veículos de resgate

A alocação dos veículos no atendimento das chamadas recebidas é feita com base nas seguintes informações:

Tabela 5.8: Concentradores formados para as chamadas do Tipo 2

Região	Concentrador	UTM X	UTM Y	% de chamadas da região localizadas nos concentradores
1	1	601907,55	7790607,07	50,00
2	1	607672,01	7795317,06	50,00
3	1	612161,38	7795039,53	52,94
4	1	615389,74	7799457,95	83,33
4	2	613766,20	7796523,14	
5	1	611545,71	7805828,34	73,33
5	2	614223,10	7805651,77	
6	1	607437,55	7806988,81	72,22
6	2	604328,57	7808960,27	
7	1	610911,58	7803421,41	66,67
7	2	604831,84	7802623,97	
8	1	612274,43	7802556,50	56,25
9	1	603587,90	7799420,63	75,00
9	2	605944,91	7796977,30	

1. *ID*: identificador do veículo.
2. *LAT_BASE*: latitude da base a qual o veículo está associado.
3. *LON_BASE*: longitude da base a qual o veículo está associado.
4. *LAT_CHAMADA*: latitude da chamada que está sendo atendida pelo veículo.
5. *LON_CHAMADA*: longitude da chamada que está sendo atendida pelo veículo.
6. *LIBERACAO*: momento em que o veículo vai estar disponível de acordo com o relógio da simulação.
7. *PROXIMA*: identificador da próxima chamada a ser atendida pelo veículo.

No levantamento do número de recursos disponíveis foram considerados apenas os veículos normalmente empregados nas ocorrências de desastres de natureza hidrológica:

- *ACA*: viatura de auto comando de área, acompanha ocorrências de maior complexidade.
- *UR*: unidade de resgate, realiza o atendimento pré-hospitalar e o transporte de vítimas.
- *AS/ABS*: salvamento, atua em todo tipo de ocorrência, desmoronamento, queda de árvores, acidentes automobilísticos, entre outros.

Com relação à determinação da localização desses veículos foi considerada a média de viaturas registradas por unidade operacional entre 2012 à 2014. A adoção desta simplificação se justifica

pelo fato de que o número e o tipo de viaturas em cada unidade podem oscilar ao longo do tempo de acordo com as necessidades do serviço operacional.

A definição de qual veículo do corpo de bombeiros será alocado para o atendimento de uma chamada se inicia através do cálculo do tempo de resposta de cada recurso registrado no sistema, para tanto, duas situações devem ser analisadas:

1. Veículo Disponível:

Caso o veículo esteja disponível em sua base, ou no local de atendimento da última chamada a ele alocada, seu tempo de resposta será dado por:

$$TR = DE/VM \quad (5.15)$$

Onde,

DE - distância euclidiana entre o veículo e a chamada.

VM - velocidade média do veículo.

2. Veículo em Atendimento:

Caso o veículo esteja indisponível no atendimento de outra chamada, seu tempo de resposta será dado por:

$$TR = (ML - TS) + DE/VM \quad (5.16)$$

Onde,

ML - momento em que o veículo será liberado.

TS - tempo de simulação corrente.

A primeira componente da equação 5.16 representa o tempo de espera por atendimento do incidente.

Ao realizar este cálculo o veículo com menor tempo de resposta, ou seja, com menor previsão de chegada ao local do incidente será alocado à chamada. Caso esse mesmo veículo esteja disponível a chamada será imediatamente atendida, caso contrário, deverá aguardar em uma fila de espera por atendimento.

5.1.11 Antecipação de chamadas em espera

Após finalizar o atendimento de cada chamada o modelo de simulação verifica se existe outra chamada em espera pelo veículo que está sendo utilizado. Caso exista, o veículo se desloca diretamente até o local do incidente. Caso contrário, o veículo pode retornar imediatamente para sua base de origem, ou, antecipar uma chamada em espera que ainda não foi alocada a um veículo.

A definição de qual chamada em espera será antecipada é feita com base no incidente com maior tempo de espera por atendimento até o momento corrente da simulação.

5.2 Verificação e validação do modelo computacional

O processo de verificação e validação do modelo de simulação corresponde à sua avaliação quanto à qualidade e veracidade dos resultados obtidos.

Segundo Kleijnen (1995), na prática, os processos de validação e verificação são extremamente importantes, pois, um modelo computacional com erros de implementação pode gerar resultados distorcidos, muitas vezes até mesmo imperceptíveis, e, um modelo não validado pode levar a tomada de decisões errôneas.

Validação

A validação do modelo proposto nesta pesquisa foi realizada durante todas as etapas do projeto de simulação desenvolvido. A definição da lógica de funcionamento do sistema, das simplificações adotadas em sua modelagem, e das medidas de desempenho utilizadas na análise dos resultados, contou com a participação dos agentes diretamente envolvidos no processo, principalmente o CBMMG e a SUDECAP.

Além da colaboração desses especialistas, também foram utilizados na validação do modelo dados históricos do sistema real. Esta etapa de validação se baseou em dois parâmetros de resposta do modelo, o número médio de ocorrências registradas no período analisado, e o tempo médio de resposta dos veículos de resgate a essas ocorrências. As Tabelas 5.9 e 5.10 apresentam a validação feita para os parâmetros descritos.

De acordo com os resultados a diferença entre o número total de ocorrências geradas no modelo de simulação e no sistema real é de 242,5, ou 10,6% do total registrado. Esta discrepância é justificada pelo fato desta variável estar única e diretamente relacionada à probabilidade de que ocorrências sejam geradas. Entretanto, a aproximação deste valor a uma distribuição empírica

Tabela 5.9: Validação do número de ocorrências registradas

Replicação	Nº de Ocorrências			
	Total	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3
1	2570	2216	139	215
2	2530	2166	133	231
3	2458	2113	149	196
4	2476	2147	137	192
5	2545	2203	128	214
6	2529	2173	139	217
7	2558	2226	118	214
8	2503	2154	131	218
9	2515	2202	118	195
10	2501	2177	120	204
Média	2518,50	2177,70	131,20	209,60
Desvio Padrão	35,25	34,77	10,33	12,43
Sistema Real	2276	1845	133	298

Tabela 5.10: Validação do tempo de resposta das ocorrências atendidas

Replicação	Tempo de Resposta (min)				
	Geral	8-10 hrs	10-17 hrs	17-20 hrs	20-8 hrs
1	37,86	39,20	44,77	35,31	34,23
2	37,64	39,35	44,57	35,76	34,02
3	37,66	35,73	44,85	38,35	33,60
4	37,53	40,41	43,36	35,74	34,09
5	36,99	36,74	44,32	36,49	32,84
6	37,93	44,18	43,06	39,25	33,59
7	38,10	39,20	45,05	35,99	34,17
8	38,35	41,28	44,78	37,21	34,15
9	37,02	38,40	41,88	35,68	34,24
10	37,29	35,40	43,13	37,12	33,83
Média	37,64	38,99	43,98	36,69	33,87
Desvio Padrão	0,45	2,65	1,05	1,29	0,44
Sistema Real	35,47	36,30	39,41	36,42	31,73

pela impossibilidade de uma análise estatística mais consistente levou a menor precisão dos dados obtidos.

A Tabela 5.10 apresenta a mesma análise para o tempo médio de resposta das chamadas atendidas, neste caso a diferença entre o valor obtido pelo modelo e o observado no sistema real é de apenas 2,2 minutos, ou 6,1% do tempo de resposta atual.

Verificação

A verificação do modelo computacional desenvolvido foi realizada a partir dos seguintes procedimentos:

1. Implementação modular: neste procedimento o desenvolvimento e a execução de cada módulo da simulação são realizados separadamente. O sistema real simulado foi dividido em três módulos:

(a) Leitura do arquivo de entrada: nesta primeira etapa é feita a leitura dos registros de monitoramento hidrológico, e o cálculo da probabilidade de que as chamadas sejam geradas.

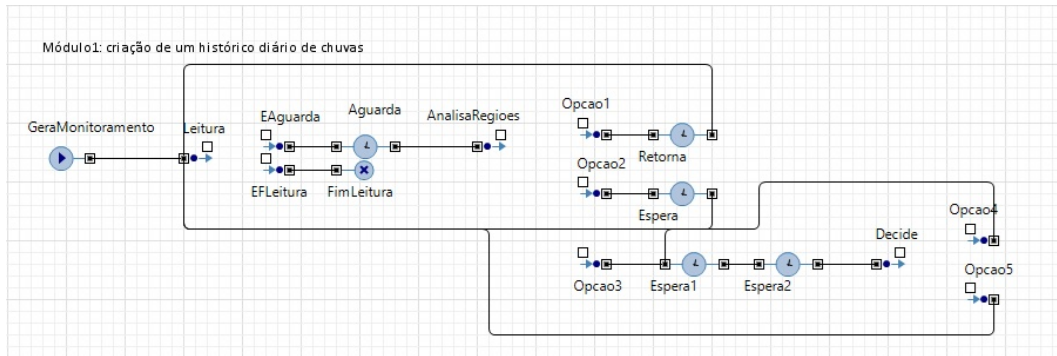


Figura 5.14: Primeiro módulo da simulação

(b) Geração de ocorrências: consiste, basicamente, na definição da natureza e da localização do incidente.

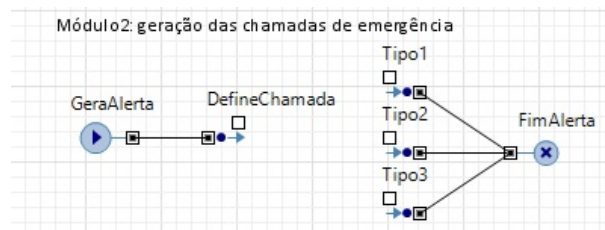


Figura 5.15: Segundo módulo da simulação

(c) Alocação dos veículos do CBMMG: neste módulo cada chamada recebida é vinculada a um veículo do corpo de bombeiros, os processos de deslocamento dos veículos até os locais dos incidentes e de atendimento das ocorrências também compõem este módulo.

De forma a analisar a coerência dos processos envolvidos em cada um desses módulos foram criadas diversas planilhas para armazenar seus principais resultados. No segundo módulo, por exemplo, para cada chamada gerada foram coletadas informações acerca de sua natureza, localização e tempo necessário para seu atendimento. O registro dessas informações permitiu uma análise detalhada do processo como um todo, e a identificação de possíveis erros de programação.

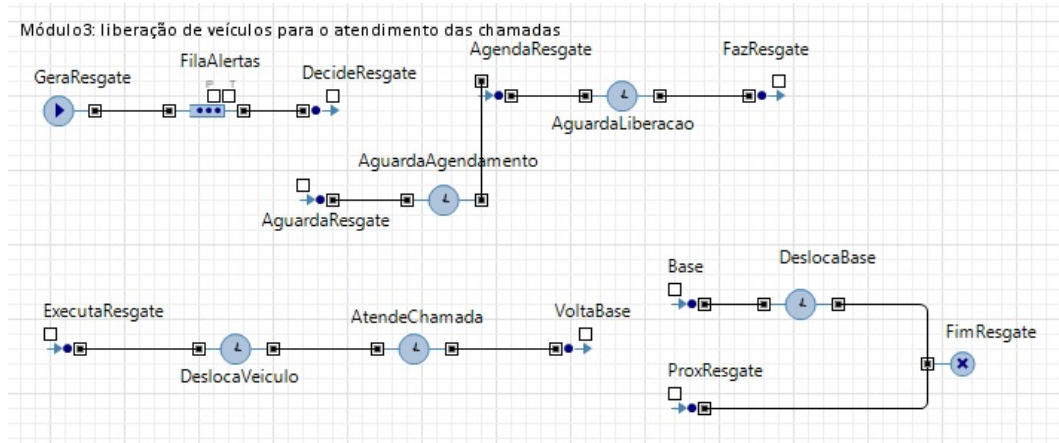


Figura 5.16: Terceiro módulo da simulação

2. Valores Constantes: a verificação do modelo computacional também foi realizada através da substituição das distribuições probabilísticas, definidas na análise dos dados de entrada, por valores médios e constantes ao longo da simulação. Essa substituição simplifica a comparação entre os resultados do modelo e os resultados esperados, obtidos através de cálculos manuais simples.
3. Animação Gráfica: a ferramenta *GIS Space*, mencionada anteriormente, possibilitou o acompanhamento da simulação, e a verificação da adequação lógica dos processos simulados com a realidade do sistema, principalmente no que se diz respeito ao deslocamento dos veículos e ao atendimento das chamadas. Apesar de possibilitar a visualização da dinâmica do sistema simulado, a verificação do modelo por animação gráfica demanda alguns cuidados. De acordo com Kleijnen (1995), é muito comum que as análises sejam feitas durante um curto período simulação, desconsiderando problemas que possam ocorrer tardiamente. Dessa forma, é interessante que a verificação consista de uma combinação das técnicas apresentadas, e que não se baseie em apenas um resultado.

A partir das análises feitas e da percepção dos principais envolvidos na área acerca das respostas obtidas pela simulação, o modelo pôde ser verificado e validado.

5.3 Definição do número de replicações e *warm-up*

Após a validação e verificação do modelo desenvolvido foram definidos os parâmetros para a execução da simulação, número de replicações e o tempo de aquecimento do sistema.

Definição do *Warm-Up*

Sistemas como o serviço de atendimento das ocorrências recebidas pelo corpo de bombeiros são considerados não terminais. Nesse caso não se tem certeza, *a priori*, de quanto tempo a simulação deve durar, sabe-se apenas que ela deve ser executada de modo que os dados de saída sejam obrigatoriamente coletados durante o estado de regime permanente.

O regime permanente de um sistema corresponde ao período durante o qual suas condições iniciais não influenciam mais no seu comportamento, apresentando, portanto, menor variabilidade das variáveis de resposta fornecidas pelo modelo. O momento da transição de um sistema em regime transiente para o regime permanente é definido através do cálculo de seu *warm-up*, ou período de aquecimento. Durante esse período as estatísticas coletadas acerca do comportamento do sistema simulado devem ser desconsideradas, pois, representam informações pouco conclusivas e que podem afetar negativamente na análise final dos resultados.

O primeiro passo para a definição do *warm-up* consiste na escolha de uma medida de desempenho adequada para avaliação do sistema. Com base nos objetivos da simulação, o tempo médio de resposta as chamadas recebidas pelo CBMMG foi a medida de desempenho escolhida nesta pesquisa.

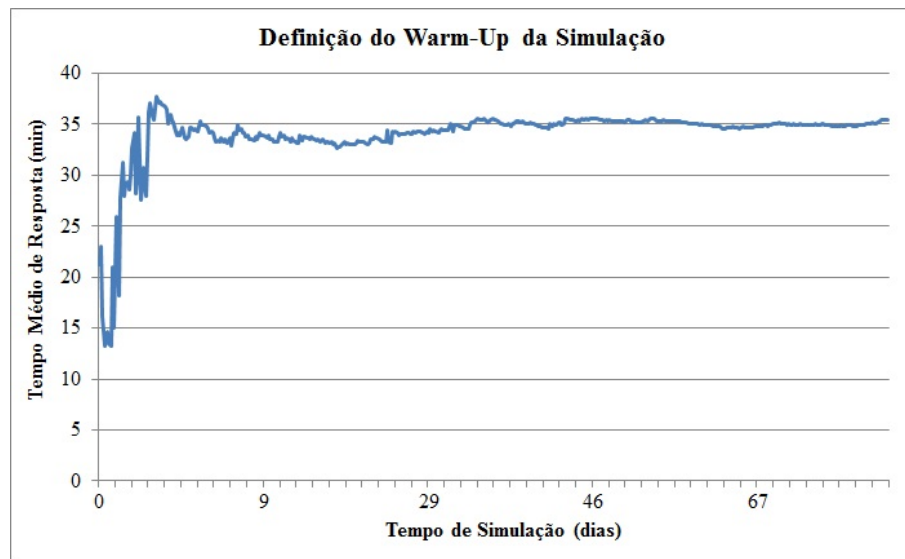


Figura 5.17: Definição do tempo de aquecimento da simulação

Conforme apresentado na Figura 5.17 no 30^o dia o tempo de resposta as chamadas recebidas converge para um valor médio. Além disso, a partir deste momento a variável de desempenho do sistema começa a se estabilizar, permitindo uma análise mais consistente dos resultados obtidos. O exposto revela, portanto, que o tempo necessário para o aquecimento do sistema, ou, o

warm-up da simulação é de 30 dias.

Determinação do Número de Replicações

Como os dados de entrada que abasteceram o modelo foram aleatórios, a cada rodada de simulação são gerados resultados também aleatórios. Consequentemente, o resultado de uma única replicação do modelo pouco infere acerca do seu real funcionamento. Em termos estatísticos, uma rodada de simulação nos fornece uma amostra com uma única observação do sistema. Seria muito imprudente confiar, ou ainda, tomar importantes decisões baseadas apenas neste valor (Kelton et al., 2002).

O número de replicações a serem simuladas, de forma a solucionar este problema, foi estabelecido com base nos níveis de confiança e precisão desejáveis para a medida de desempenho avaliada.

Quando falamos em confiança estatística, estamos nos referindo ao intervalo de confiança, ou seja, um intervalo de valores que contém a média da população com uma certa probabilidade. Quanto maior o valor desta probabilidade, maior a confiança estatística de que a média da população encontra-se dentro do intervalo construído. Já quando falamos em precisão, estamos nos referindo ao tamanho do intervalo, pois de nada adianta uma alta confiança estatística se o tamanho do intervalo é tão grande que nada podemos concluir sobre a média da população (Chwif and Medina, 2006).

Ainda segundo os autores, o intervalo de confiança de uma medida de desempenho x é construído a partir da Equação 5.17:

$$\mu \pm t_{n-1, \alpha/2} \times \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (5.17)$$

Onde,

μ é a média dos valores observados de x

σ é o desvio padrão dos valores observados de x

n é o número de observações feitas da variável x

$t_{n-1, \alpha/2}$ é o $(1 - \alpha/2)$ percentil da distribuição t de Student com $n-1$ graus de liberdade

e, $t_{n-1, \alpha/2} \times \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ representa a precisão, ou a metade do tamanho do intervalo de confiança.

Inicialmente os dados referentes ao tempo médio de resposta, apresentados na Tabela 5.11

foram coletados de uma amostra-piloto contendo 10 replicações.

Tabela 5.11: Intervalo de confiança para o tempo de resposta as chamadas geradas

Replicação	Tempo de Resposta (min)
	Geral
1	37,90
2	37,52
3	37,49
4	37,67
5	37,56
6	37,81
7	37,97
8	36,62
9	37,02
10	36,80
Média (μ)	37,44
Desvio Padrão (σ)	0,47
T-Student	2,26
Tamanho da Amostra (n)	10
Precisão	0,33
Intervalo de Confiança	[37,10;37,77]

Como o intervalo encontrado para 95% de confiança apresenta ótima precisão, a simulação de 10 replicações se mostrou satisfatória na representação da aleatoriedade intrínseca ao problema, sem a necessidade de análises mais detalhadas.

5.4 Planejamento dos experimentos

Após definir os parâmetros de entrada do modelo, é preciso definir diferentes cenários a serem simulados, que não repliquem apenas os dados históricos, pois é "certo" que a história nunca se repete exatamente da mesma forma (Kleijnen, 1995).

5.4.1 Cenário inicial

O primeiro experimento realizado tem como objetivo estimar o tempo médio de resposta do cenário atual de operação, utilizando os dados de entrada já descritos. A Tabela 5.12 apresenta os valores mínimo, médio e máximo obtidos para esta variável em cada replicação.

De acordo com os resultados apresentados o tempo mínimo de resposta as chamadas geradas é de cerca de 0,55 minutos. Este valor é justificado pela ocorrência de incidentes próximos das bases de operação do corpo de bombeiros, resultando em um tempo de deslocamento muito

Tabela 5.12: Tempo de resposta no cenário atual

Tempo de Resposta (min)			
Replicação	Mínimo	Médio	Máximo
1	0,29	37,90	200,79
2	0,91	37,52	202,56
3	0,69	37,49	235,79
4	0,45	37,67	225,20
5	0,59	37,56	205,28
6	0,79	37,81	267,23
7	0,15	37,97	237,39
8	0,67	36,62	188,62
9	0,13	37,02	224,24
10	0,79	36,80	204,59
Média	0,55	37,44	219,17
Desvio Padrão	0,28	0,47	23,41

pequeno. Além disso, o tempo necessário para o preparo das equipes antes de sair da base de operação, estimado em 1 minuto, não foi considerado no tempo de resposta apresentado.

Ainda de acordo com os resultados o tempo máximo de resposta as chamadas geradas é de aproximadamente 220 minutos. Neste caso, o alto valor pode ser justificado pela ocorrência de incidentes distantes das bases de operação, baixa velocidade assumida pelos veículos de resgate, e/ou tempo de espera dessas chamadas pela disponibilidade de um veículo do corpo de bombeiros.

O tempo médio de resposta obtido foi de 37,44 minutos, a Equação 5.18 apresenta o intervalo de confiança para este valor, calculado a partir das seguintes definições:

$$\mu = 37,44, \text{ média dos valores observados de } x$$

$$\sigma = 0,47, \text{ desvio padrão dos valores observados de } x$$

$$n = 10, \text{ número de observações feitas da variável } x$$

$$t_{9,0,025} = 2,26, \text{ distribuição } t \text{ de Student com 9 graus de liberdade e 95\% de confiança.}$$

$$e, h = 0,33, \text{ precisão, ou, metade do tamanho do intervalo de confiança.}$$

$$IC = [37,10; 37,77] \quad (5.18)$$

Com relação à distribuição dos tempos de resposta, o histograma apresentado na Figura 5.18 indica que a maior parte dos valores observados (48,3%) está entre 15 e 45 minutos. Tempos de resposta muito baixos ou altos possuem menor frequência de ocorrência.

A Figura 5.19 apresenta a utilização desses veículos segundo a base operacional onde estão instalados.

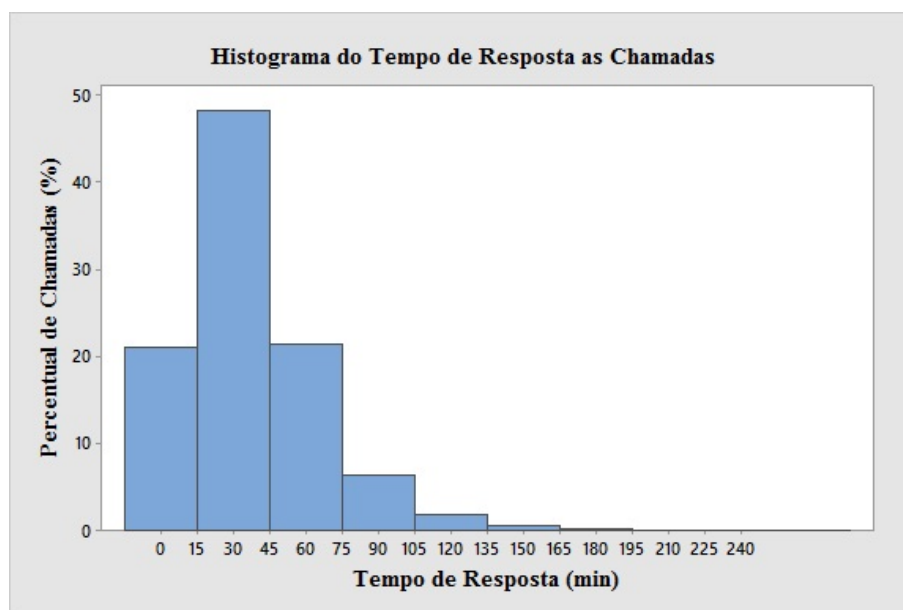


Figura 5.18: Histograma do tempo de resposta atual simulado

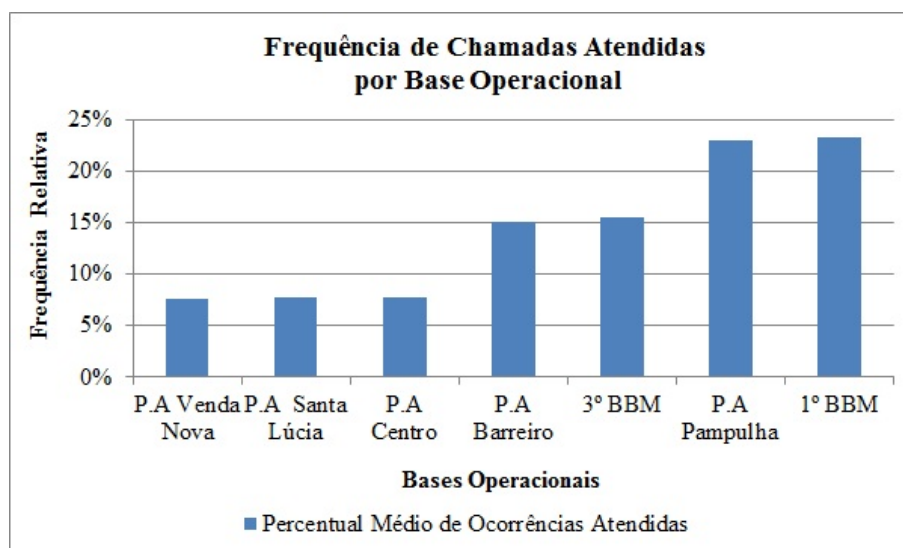


Figura 5.19: Distribuição do atendimento das chamadas por base operacional

De acordo com o histograma, juntos, o Posto de Atendimento localizado na Região da Pampulha e a sede do Primeiro Batalhão de Bombeiro Militar atendem em média quase 50% das ocorrências registradas no município.

5.4.2 Cenários

Os outros cenários simulados foram definidos de forma a representar alguns padrões de precipitação observados na capital mineira, no que se refere à intensidade das chuvas em suas principais bacias hidrográficas. A simulação desses cenários permite a análise do comportamento do sistema frente ao aumento da demanda pelos serviços de atendimento simulados, o que pode ser

útil para auxiliar o processo de tomada de decisão.

Os cenários analisados foram baseados no histórico dos registros de monitoramento hidrológico do município, fornecido pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Tabela 5.13: Precipitação média acumulada em Belo Horizonte entre 1961 e 2013

Precipitação (mm)	Período Chuvoso					
	Janeiro	Fevereiro	Março	Outubro	Novembro	Dezembro
Média Histórica	334	131	158	118	259	440
Máximo Histórico	630	205	265	275	404	720
Média Observada	313	44	129	85	209	319
% Média Histórica	7%	195%	23%	39%	24%	38%
% Máximo Histórico	101%	364%	106%	224%	93%	126%

O primeiro cenário busca avaliar o comportamento do sistema frente a um aumento moderado da demanda pelos serviços de atendimento do corpo de bombeiros, regida, basicamente, pelo volume de precipitação registrado no município. A representação deste cenário no modelo de simulação foi feita multiplicando-se os registros de monitoramento hidrológico observados por um fator de correção calculado através da Equação 5.19:

$$FC_i = MediaHistorica_i / MediaObservada_i \quad (5.19)$$

Onde,

FC_i é o fator de correção do mês i .

$MediaHistorica_i$ é o volume médio de precipitação acumulada no mês i entre 1961 e 2013.

$MediaObservada_i$ é o volume médio de precipitação acumulada no mês i entre 2012 e 2014.

O segundo cenário simulado busca avaliar o comportamento do sistema frente a um aumento significativo da demanda pelos serviços de atendimento, multiplicando-se os registros de monitoramento hidrológico observados por um fator de correção calculado através da Equação 5.20:

$$FC_i = MaximoHistorico_i / MediaObservada_i \quad (5.20)$$

Onde,

$MaximoHistorico_i$ é o máximo de precipitação acumulada no mês i entre 1961 e 2013.

Os resultados e principais análises dos cenários apresentados estão detalhados no Capítulo 6.

Capítulo 6

Análise dos Resultados

Na análise dos resultados obtidos, os cenários apresentados no Capítulo 5 foram comparados, inicialmente, segundo o número total de ocorrências simuladas. Como a demanda pelo serviço de atendimento as chamadas de natureza hidrológica está diretamente relacionada com o índice de precipitação acumulada no município, é de se esperar que o aumento deste índice resulte em um maior número de incidentes registrados. Esta constatação pode ser confirmada através da Tabela 6.1.

Tabela 6.1: Comparativo do número total de ocorrências simuladas

Replicação	Nº de Ocorrências		
	Inicial	Cenário1	Cenário2
1	2570	2668	3405
2	2530	2812	3466
3	2458	2709	3341
4	2476	2739	3365
5	2545	2754	3371
6	2529	2761	3394
7	2558	2746	3367
8	2503	2839	3516
9	2515	2685	3469
10	2501	2717	3404
Máximo	2570,00	2839,00	3516,00
Mínimo	2458,00	2668,00	3341,00
Média	2518,50	2743,00	3409,80
Desvio Padrão	35,25	52,99	56,10

De acordo com os resultados apresentados no primeiro cenário observa-se um aumento moderado de 8,9% do total de chamadas registradas, já no segundo cenário o aumento é mais significativo, neste caso a demanda pelos serviços de atendimento sobe para 35,4%.

Os cenários também foram comparados segundo o tempo médio de resposta as chamadas e o tempo médio de espera por atendimento, os resultados estão apresentados nas Tabelas 6.2 e 6.3, respectivamente.

Tabela 6.2: Comparativo do tempo de resposta as chamadas simuladas

Replicação	Tempo de Resposta (min)								
	Mínimo			Médio			Máximo		
	Cenário Inicial	Cenário 1	Cenário 2	Cenário Inicial	Cenário 1	Cenário 2	Cenário Inicial	Cenário 1	Cenário 2
1	0,29	0,59	0,32	37,90	36,99	37,33	200,79	207,96	239,38
2	0,91	0,10	0,55	37,52	36,32	37,42	202,56	219,68	250,34
3	0,69	0,71	0,37	37,49	37,89	38,01	235,79	230,43	226,40
4	0,45	0,47	0,71	37,67	37,12	38,69	225,20	190,39	222,30
5	0,59	0,23	0,35	37,56	37,99	37,80	205,28	222,20	198,08
6	0,79	0,23	0,37	37,81	37,06	37,29	267,23	187,75	227,93
7	0,15	0,88	0,15	37,97	37,00	37,47	237,39	198,10	209,16
8	0,67	0,44	0,12	36,62	37,23	37,97	188,62	193,85	206,68
9	0,13	0,62	0,25	37,02	37,47	38,15	224,24	255,40	210,49
10	0,79	0,64	0,37	36,80	38,22	37,59	204,59	204,81	268,82
Média	0,55	0,49	0,35	37,44	37,33	37,77	219,17	211,06	225,96
Desvio Padrão	0,28	0,24	0,17	0,47	0,57	0,44	23,41	21,14	21,86

Tabela 6.3: Comparativo do tempo de espera por atendimento

Replicação	Tempo de Espera (min)								
	Mínimo			Médio			Máximo		
	Cenário Inicial	Cenário 1	Cenário 2	Cenário Inicial	Cenário 1	Cenário 2	Cenário Inicial	Cenário 1	Cenário 2
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,17	0,00	5,04	72,09
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,29	0,00	81,11	97,47
3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,17	0,57	0,00	90,49	141,70
4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,60	0,00	22,25	126,31
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,18	0,00	55,15	79,63
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,11	5,65	57,88	60,73
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00	0,00	63,20
8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,35	0,00	6,49	117,61
9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,20	0,00	44,01	83,81
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,22	0,00	62,20	72,10
Máximo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,17	0,60	5,65	90,49	141,70
Mínimo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00	0,00	60,73
Média	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,28	0,57	42,46	91,47
Desvio Padrão	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,18	1,79	32,48	28,19

Os resultados indicam que os tempos médios de resposta e espera não variam muito com um

aumento, moderado ou significativo, da demanda, isto se deve ao fato de que na prática os veículos considerados nesta pesquisa (ACA, UR, AS/ABS) atendam também outros tipos de chamada, como por exemplo, os acidentes automobilísticos. A ocorrência desses tipos de chamadas não foi simulada no modelo desenvolvido, pois, o interesse deste trabalho é observar o comportamento do sistema de atendimento do CBMMG apenas quando submetido aos fenômenos de natureza hidrológica. Desta forma, o problema simplificado considera que as viaturas estejam disponíveis "full time", ou seja, totalmente dedicadas ao atendimento das chamadas simuladas, o que reduz, obviamente, a possibilidade de congestionamento do sistema.

Apesar dos valores médios destas variáveis permanecerem praticamente constantes com o aumento da demanda, é possível observar, a partir da última coluna da Tabela 6.3, a maior dispersão dos tempos de espera por atendimento para os cenários 1 e 2. No segundo cenário, por exemplo, o tempo máximo de espera registrado nas 10 replicações simuladas é de cerca duas horas e meia, 2407% do máximo registrado no cenário inicial. A maior dispersão desses dados indica, portanto, um aumento na frequência de valores extremos dos tempos de espera por atendimento, situação crítica se consideramos a natureza do problema.

Os cenários apresentados foram novamente simulados a partir de uma redistribuição das bases operacionais do corpo de bombeiros, a fim de analisar o comportamento do sistema quando submetido a uma diferente configuração. A redistribuição dessas bases consiste no deslocamento temporário das mesmas para os pontos definidos como concentradores de incidentes caso seja registrado um volume significativo de precipitação. A Tabela 6.4 indica a localização exata e o número de viaturas associadas a cada um desses pontos.

Tabela 6.4: Pontos que mais concentram incidentes de natureza hidrológica em Belo Horizonte

Concentrador	Nº de Viaturas	Latitude	Longitude	Bairro	Região
1	2	-19,9322	-43,9369	Savassi	Centro Sul
2	2	-19,9354	-43,9317	Savassi	Centro Sul
3	2	-19,9363	-43,9714	Nova Granada	Oeste
4	1	-19,9105	-43,9185	Horto	Leste
5	1	-19,9110	-43,9072	Pompéia	Leste
6	1	-19,9381	-43,9752	Nova Suíça	Oeste
7	1	-19,8522	-43,9529	Jaraguá	Pampulha
8	1	-19,9901	-44,0077	Araguaia	Barreiro
9	1	-19,8831	-43,9451	Santa Cruz	Nordeste
10	1	-19,8886	-43,9226	Cidade Nova	Nordeste

A Figura 6.1 ilustra o raio de atuação desses pontos concentradores nos bairros de Belo Horizonte.

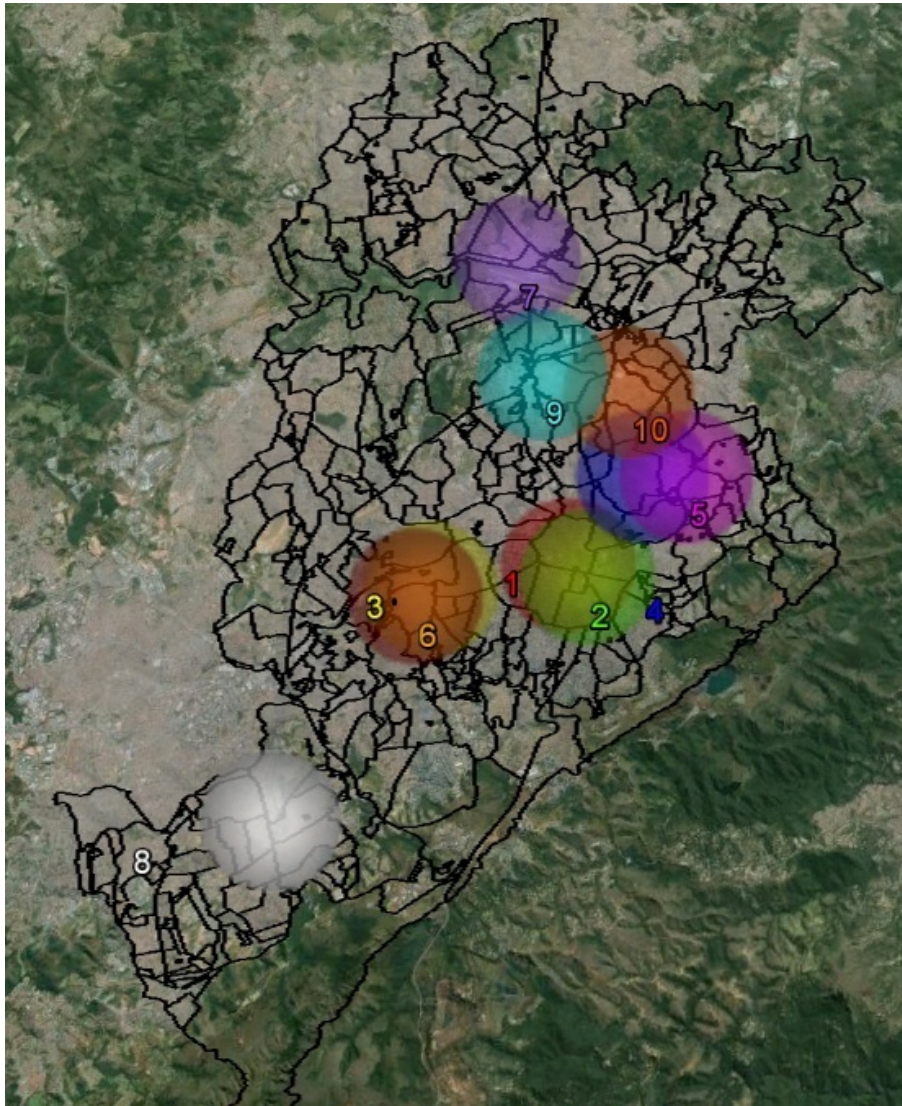


Figura 6.1: Áreas concentradoras de incidentes em Belo Horizonte

É de se esperar que esta redistribuição das bases operacionais reduza o valor médio do tempo de resposta as chamadas registradas, variável de desempenho composta por duas componentes: tempo médio de deslocamento dos veículos, e de espera por atendimento, sendo a primeira diretamente relacionada com a localização das bases operacionais e a segunda com o nível de congestionamento do sistema. Desta forma, a análise dos resultados obtidos com a simulação do modelo de redistribuição das bases operacionais se baseou em um comparativo do tempo médio de deslocamento das viaturas nas duas versões do modelo.

De acordo com a Figura 6.5, independente do cenário analisado, a redistribuição das bases operacionais permite uma redução do tempo médio de deslocamento das viaturas até o local dos incidentes registrados. Os histogramas indicados nas Figuras 6.2, 6.3, 6.4, também comprovam que a distribuição dos tempos de deslocamento das viaturas apresentam tendências a valores

Tabela 6.5: Comparativo do tempo médio de deslocamento das viaturas

Replicação	Tempo Médio de Deslocamento (min)					
	Cenário Inicial		Cenário 1		Cenário 2	
	Configuração Atual	Configuração Proposta	Configuração Atual	Configuração Proposta	Configuração Atual	Configuração Proposta
1	36,88	30,06	38,67	30,58	37,18	31,63
2	38,17	30,48	38,18	30,76	36,32	31,68
3	37,98	30,59	37,54	30,94	37,76	31,01
4	38,02	31,21	36,85	30,69	38,18	31,01
5	37,95	30,78	36,98	30,22	37,35	31,62
6	37,48	30,00	37,65	31,28	36,67	29,57
7	38,16	30,73	38,37	31,04	36,68	30,85
8	38,38	30,51	38,01	31,12	36,97	31,79
9	37,01	31,11	36,60	30,81	37,26	31,31
10	37,74	30,37	37,95	30,71	37,33	30,58
Média	37,78	30,59	37,68	30,81	37,17	31,10
	Ganho	19,04%	Ganho	18,22%	Ganho	16,32%

menores àqueles encontrados na configuração atual de operação do sistema simulado.

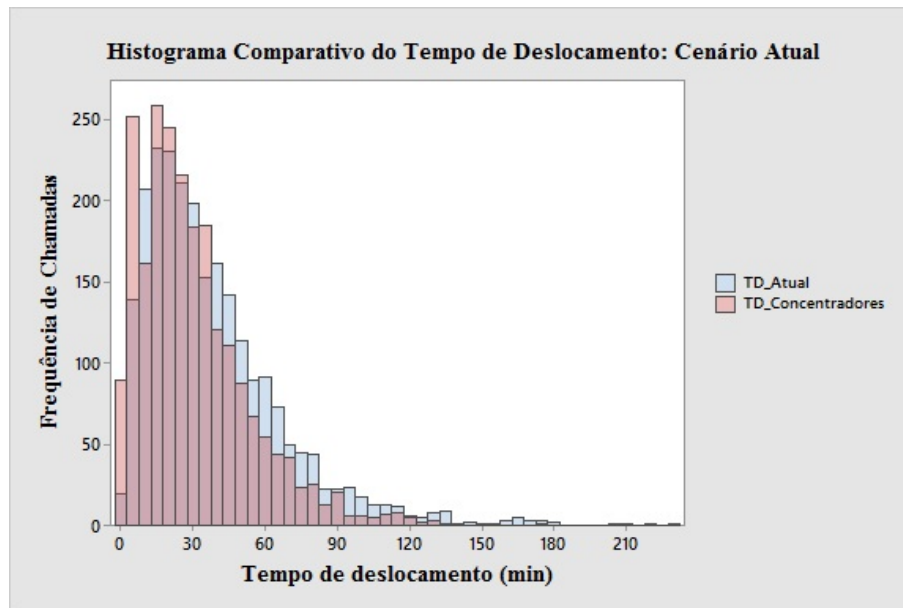


Figura 6.2: Comparativo do tempo médio de deslocamento das viaturas - Cenário Atual

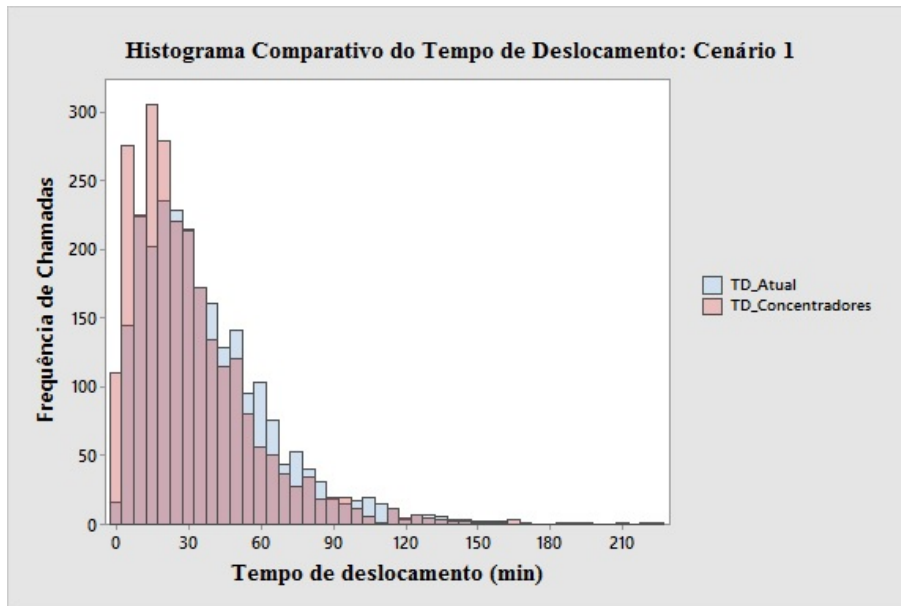


Figura 6.3: Comparativo do tempo médio de deslocamento das viaturas - Cenário 1

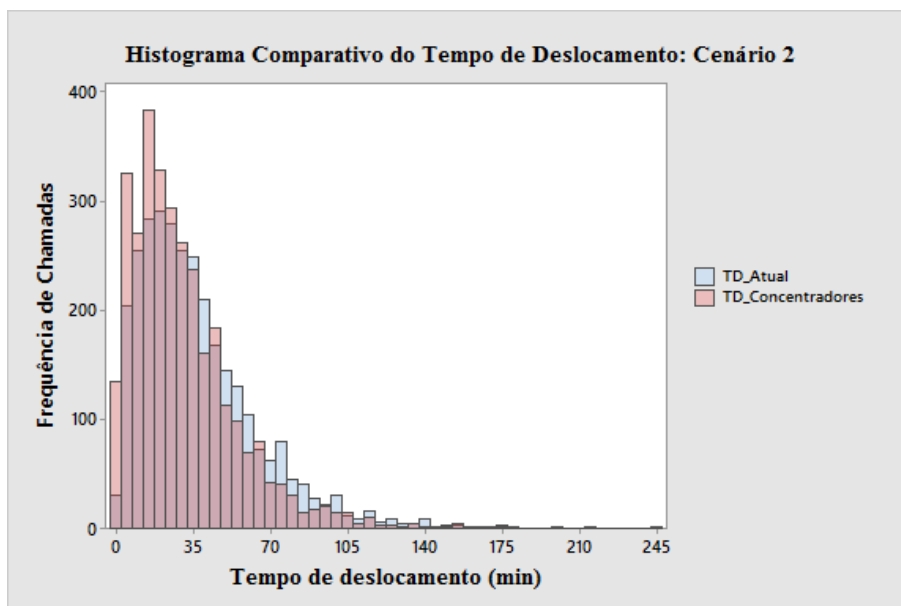


Figura 6.4: Comparativo do tempo médio de deslocamento das viaturas - Cenário 2

Capítulo 7

Considerações finais

Diante de um quadro global de urbanização desordenada e mudanças climáticas abruptas, urge a necessidade de abordar diferentes métodos e técnicas que auxiliem a gestão de operações em desastres naturais. O atendimento prestado pelo corpo de bombeiros nestas ocasiões geralmente é feito sob circunstâncias de escassez dos recursos de resgate, forçando muitas vezes a adoção de procedimentos não padronizados para reduzir ao máximo o impacto causado à população e à infraestrutura do local afetado. A singularidade e as incertezas quanto à natureza, dimensão, e impacto desses eventos dificultam sua modelagem analítica. Entretanto, tais características não impossibilitam a modelagem destes sistemas por outras técnicas que possam captar o dinamismo e a aleatoriedade intrínsecos ao problema, como por exemplo, as técnicas de simulação.

A evidência de uma lacuna ainda pouco explorada pela sociedade acadêmica brasileira serviu de motivação para esta pesquisa que apresenta o desenvolvimento de um modelo híbrido de simulação para análise dos serviço de atendimento as chamadas de natureza hidrológica prestado pelo corpo de bombeiros em Belo Horizonte.

A combinação da simulação baseada em agentes e a eventos discretos apresentou algumas contribuições na modelagem deste tipo de problema, dentre elas a capacidade de representar, simultaneamente, os fenômenos emergentes da interação entre as entidades do sistema, e os processos aos quais estão sujeitas.

A partir do modelo desenvolvido alguns cenários foram simulados de forma a identificar o comportamento do modelo segundo diferentes padrões de precipitação e demanda dos serviços de atendimento, e diferentes distribuições das bases operacionais do corpo de bombeiros. Os resultados obtidos nos experimentos foram avaliados com base nas principais variáveis de interesse do problema, tempo médio de espera e resposta as chamadas registradas, que por sua vez fornecem

uma boa estimativa do desempenho global do sistema.

Devido a consideração de que as viaturas do corpo de bombeiros atendem apenas os incidentes relacionados à ocorrência de fenômenos hidrológicos, os valores médios desses variáveis de interesse permaneceram praticamente constantes para os diferentes padrões de precipitação. Entretanto, ao simular esses mesmos cenários a partir da redistribuição das bases operacionais do corpo de bombeiros para os pontos definidos como concentradores de incidentes, foram identificados possíveis ganhos nos tempos médios de resposta as ocorrências registradas, principalmente no que diz respeito ao tempo médio de deslocamento das viaturas, componente da variável relacionada com a localização dessas bases. De acordo com os resultados obtidos o tempo médio de deslocamento dos veículos com a redistribuição das bases apresentou uma redução que varia entre 16 a 19% do obtido com a configuração atual do sistema de atendimento prestado.

O desenvolvimento de uma ferramenta como a proposta nesta pesquisa possibilita o aumento da resiliência dos municípios mais expostos, e potencializa a articulação institucional entre os principais envolvidos na gestão de risco de desastres naturais. A captação de uma enorme quantidade de dados de monitoramento hidrológico, sua relação com registros de chamadas de emergência, e sua transformação em informação pode proporcionar melhor eficiência dos serviços de emergência prestados pelo corpo de bombeiros.

A melhoria da precisão das variáveis e dos parâmetros de entrada do problema, e consequentemente dos resultados obtidos, pode ser alcançada através de maior acompanhamento dos índices de precipitação nos períodos chuvosos e das chamadas recebidas pelo CBMMG. O fornecimento destas informações à pesquisa foi limitado dada a recente implementação e utilização dos equipamentos de monitoramento hidrológico, e do sistema automatizado de Registro de Eventos de Defesa Social (REDS).

Outra sugestão para melhoria do modelo desenvolvido, seria a utilização da API do Google Maps para estimar os tempos de deslocamento dos veículos de resgate na malha urbana. A implementação da API em linguagem de programação PYTHON é apresentada no Anexo A. A avaliação da vantagem de utilização desta API foi verificada através do desenvolvimento de uma nova versão do modelo de simulação. Nesta versão, sempre que o veículo de resgate necessita se deslocar de A para B, sejam estes, locais de incidentes ou bases operacionais, o modelo registra suas coordenadas em um arquivo texto, e executa a API do Google Maps, para que, a partir das informações registradas, sejam calculados e retornados a distância e a duração do deslocamento de um ponto a outro no GIS *space*. Apesar dos ganhos com a precisão destas variáveis, o tempo

computacional gasto na execução desta versão inviabilizou a simulação dos cenários apresentados.

Referências Bibliográficas

- Altay, N. and Green III, W. G. (2006). Or/ms research in disaster operations management. *European Journal of Operational Research*, 175(1):475–493.
- Anagnostou, A., Nouman, A., and Taylor, S. J. (2013). Distributed hybrid agent-based discrete event emergency medical services simulation. In *Winter Simulation Conference*, pages 1625–1636.
- Bankes, S. (1993). Exploratory modeling for policy analysis. *Operations Research*, 41(3):435–449.
- Bonabeau, E. (2002). Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 99(Suppl 3):7280–7287.
- Brown, G. G. and Vassiliou, A. L. (1993). Optimizing disaster relief: real-time operational and tactical decision support. *Naval Research Logistics*, 40(1):1–23.
- CEDEC (2013). Defesa civil estadual de minas gerais. Disponível em: <http://www.defesacivil.mg.gov.br/>.
- CENAD (2012). Anuário brasileiro de desastres naturais. Disponível em: <http://www.defesacivil.mg.gov.br/>.
- Chang, S. E. and Nojima, N. (2001). Measuring post-disaster transportation system performance: the 1995 kobe earthquake in comparative perspective. *Transportation research part A: policy and practice*, 35(6):475–494.
- Chwif, L. and Medina, A. C. (2006). *Modelagem e simulação de eventos discretos*. Afonso C. Medina.
- Dai, J., Wang, S., and Yang, X. (1994). Computerized support systems for emergency decision making. *Annals of Operations Research*, 51(7):313–325.

- de Freitas Filho, P. J. (2001). *Introdução à modelagem e simulação de sistemas: com aplicações em Arena*. Visual Books.
- EMDAT (2013). The international disaster database. *Disponível em: <http://www.emdat.be/>*.
- Esogbue, A. O. (1996). Fuzzy sets modeling and optimization for disaster control systems planning. *Fuzzy sets and Systems*, 81(1):169–183.
- Estadão (2010). Grupo estado. *Disponível em: <http://www.estadao.com.br/>*.
- Falasca, M., Zobel, C. W., and Fetter, G. M. (2009). An optimization model for humanitarian relief volunteer management. In *Proceedings of the 6th International ISCRAM Conference, Gothenburg, Sweden*. Prentice Hall.
- G1 (2012). Globo comunicação e participações. *Disponível em: <http://g1.globo.com/>*.
- Guha-Sapir, D., Hoyois, P., and R, B. (2013). Annual disaster statistical review 2012: The numbers and trends. *Disponível em: <http://www.cred.be>*.
- Heath, S. K., Buss, A., Brailsford, S. C., and Macal, C. M. (2011). Cross-paradigm simulation modeling: challenges and successes. In *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pages 2788–2802. Winter Simulation Conference.
- Henderson, S., Biller, B., Hsieh, M., Shortle, J., Tew, J., Barton, R., and Brailsford, S. C. (2007). Advances and challenges in healthcare simulation modeling. In *Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference*, pages 1436–1448. Winter Simulation Conference.
- Hernandez, J. Z. and Serrano, J. M. (2001). Knowledge based models for emergency management systems. *Expert Systems with Applications*, 20(2):173–186.
- HojeEmDia (2008). Grupo rede record. *Disponível em: <http://www.hojeemdia.com.br/>*.
- Kelton, W. D. and Law, A. M. (2000). *Simulation modeling and analysis*. McGraw Hill Boston, MA.
- Kelton, W. D., Sadowski, R. P., and Sadowski, D. A. (2002). *Simulation with ARENA*, volume 3. McGraw-Hill New York.
- Kleijnen, J. P. (1995). Verification and validation of simulation models. *European Journal of Operational Research*, 82(1):145–162.

- Lowery, J. C. (1996). Introduction to simulation in health care. In *Proceedings of the 28th conference on Winter simulation*, pages 78–84. IEEE Computer Society.
- Macal, C. M. and North, M. J. (2005). Tutorial on agent-based modeling and simulation. In *Proceedings of the 37th conference on Winter simulation*, pages 2–15. Winter Simulation Conference.
- Manuelzão (2003). Projeto manuelzão. *Disponível em: <http://www.manuelzao.ufmg.br/>*.
- Millar, H., Joseph, A., Mobolurin, A., et al. (2002). Using formal ms/or modeling to support disaster recovery planning. *European Journal of Operational Research*, 141(3):679–688.
- North, M. J. and Macal, C. M. (2007). *Managing business complexity: discovering strategic solutions with agent-based modeling and simulation*. Oxford University Press.
- O’kelly, M. E. (1987). A quadratic integer program for the location of interacting hub facilities. *European Journal of Operational Research*, 32(3):393–404.
- O’Kelly, M. E. (1992). Hub facility location with fixed costs. *Papers in Regional Science*, 71(3):293–306.
- Özdamar, L., Ekinçi, E., and Küçükyazıcı, B. (2004). Emergency logistics planning in natural disasters. *Annals of operations research*, 129(1-4):217–245.
- Parunak, H. V. D., Savit, R., and Riolo, R. L. (1998). Agent-based modeling vs. equation-based modeling: A case study and users’ guide. In *Multi-agent systems and agent-based simulation*, pages 10–25. Springer.
- PBH (2013). Prefeitura de belo horizonte. *Disponível em: <http://portalpbh.pbh.gov.br/pbh/>*.
- Pidd, M., De Silva, F., and Eglese, R. (1996). A simulation model for emergency evacuation. *European Journal of Operational Research*, 90(3):413–419.
- R7 (2011). Grupo rede record. *Disponível em: <http://www.r7.com/>*.
- Robinson, S. (2006). Conceptual modeling for simulation: issues and research requirements. In *Proceedings of the 38th conference on Winter simulation*, pages 792–800. Winter Simulation Conference.

- Robinson, S. (2008). Conceptual modelling for simulation part i: definition and requirements. *Journal of the Operational Research Society*, 59(3):278–290.
- Rolland, E., Patterson, R. A., Ward, K., and Dodin, B. (2010). Decision support for disaster management. *Operations Management Research*, 3(1-2):68–79.
- Sargent, R. G. (2005). Verification and validation of simulation models. In *Proceedings of the 37th conference on Winter simulation*, pages 130–143. Winter Simulation Conference.
- Shannon, R. E. (1998). Introduction to the art and science of simulation. In *Simulation Conference Proceedings, 1998. Winter*, volume 1, pages 7–14. IEEE.
- Sherali, H. D., Carter, T. B., and Hobeika, A. G. (1991). A location-allocation model and algorithm for evacuation planning under hurricane/flood conditions. *Transportation Research Part B: Methodological*, 25(6):439–452.
- Silva, P. M. S. and Pinto, L. R. (2010). Emergency medical systems analysis by simulation and optimization. In *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pages 2422–2432. Winter Simulation Conference.
- Simpson, N. and Hancock, P. (2009). Fifty years of operational research and emergency response. *Journal of the Operational Research Society*, pages S126–S139.
- Standridge, C. R. (1999). A tutorial on simulation in health care: applications issues. In *Proceedings of the 31st conference on Winter simulation: Simulation—a bridge to the future—Volume 1*, pages 49–55. ACM.
- Tamura, H., Yamamoto, K., Tomiyama, S., and Hatono, I. (2000). Modeling and analysis of decision making problem for mitigating natural disaster risks. *European Journal of Operational Research*, 122(2):461–468.
- Wex, F., Schryen, G., Feuerriegel, S., and Neumann, D. (2014). Emergency response in natural disaster management: Allocation and scheduling of rescue units. *European Journal of Operational Research*, 235(3):697–708.

Apêndice A

Implementação da API do Google Maps

Apresentação do código em linguagem PYTHON:

```
import urllib.request, urllib.parse
import sys,os
import time

from xml.dom.minidom import parse

os.chdir("C:/Python33")
f = open ("links.txt", "r")
line = f.readline()
while len(line) > 0:
    res = open("resultado.txt", "a")
    sock = parse(urllib.request.urlopen(line))
    dur = sock.getElementsByTagName('duration')[0].childNodes[1].firstChild.nodeValue
    dis = sock.getElementsByTagName('distance')[0].childNodes[1].firstChild.nodeValue
    res.write(dur + ";"")
    line = f.readline()
res.close()
f.close()
```