



Guido Maculan

**Modelo de Programação Linear para Alocar Recursos
em Vias e Hospitais em Caso de Desastres**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Industrial da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientadora: Profa. Adriana Leiras
Co-orientador: Prof. Irineu Brito Junior

Rio de Janeiro
Outubro de 2017



Guido Maculan

Modelo de Programação Linear para Alocar Recursos em Vias e Hospitais em Caso de Desastres

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre (opção profissional) pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Profa. Adriana Leiras

Presidente e Orientador

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

Prof. Irineu de Brito Junior

Co-Orientador

CEETEPS

Prof. Hugo Miguel varela Repolho

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

Prof. Orivalde Soares da Silva Junior

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

Prof. Márcio da Silveira Carvalho

Coordenador (a) Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 24 de outubro de 2017.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e da orientadora.

Guido Maculan

Engenheiro Elétrico graduado na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), possui o título de Mestre em Administração pelo Instituto de Pós-Graduação e Pesquisa em Administração (COPPEAD). Tem experiência na gestão de projetos e hoje atua gerenciando e coordenando as áreas de contabilidade, finanças e recursos humanos de uma empresa de TI.

Ficha Catalográfica

Maculan, Guido

Modelo de programação linear para alocar recursos em vias e hospitais em caso de desastres / Guido Maculan; orientadora: Adriana Leiras; co-orientador: Irineu Brito Junior. – 2017.

82 f. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Industrial, 2017.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Industrial – Teses. 2. Logística humanitária. 3. Desastres. 4. Pesquisa operacional. 5. Modelo. 6. Otimização. I. Leiras, Adriana. II. Brito Junior, Irineu. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial. IV. Título.

CDD: 658.5

Dedico esta dissertação aos meus pais.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao meu pai e à minha mãe pelo apoio incondicional, não somente durante a elaboração desta dissertação, mas durante todo o decorrer do mestrado.

Agradeço também aos meus tios Nelson e Anne-Marie, pelo incentivo, interesse e conselhos dados em todo este período de estudos.

Aos meus orientadores, Dra. Adriana Leiras e Dr. Irineu Brito Junior, pelas suas valiosas contribuições e sugestões, sem as quais este trabalho não seria possível.

Aos professores da PUC-Rio, amigos do curso de mestrado e a todos que direta e indiretamente contribuíram com a realização deste trabalho. Em especial ao Pedro Henrique González Silva pela valiosa colaboração no desenvolvimento deste modelo.

Resumo

Maculan, Guido; Leiras, Adriana (Orientadora); Brito Jr, Irineu (Co-orientador). **Modelo de Programação Linear para Alocar Recursos em Vias e Hospitais em Caso de Desastres**. Rio de Janeiro, 2017. 82p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Desastres são eventos que causam destruição da infraestrutura de um local e impactam milhares de pessoas todos os anos, provocando danos materiais e humanos e perdas econômicas significativas. Quando isto acontece, é preciso enviar artigos humanitários para os locais afetados e resgatar os sobreviventes o mais breve possível. Para que a operação de resposta ao desastre aconteça de forma eficiente, é necessário que a rede de transporte esteja operacional e que hospitais tenham capacidade para receber os feridos. Para mitigar o impacto destes eventos, é proposto um modelo de programação linear que busca identificar as vias urbanas e hospitais que necessitam de investimentos para melhor atenderem a população em caso de desastres. O modelo identifica que vias são críticas e, portanto, devem receber investimentos prioritariamente e que hospitais precisam ter sua capacidade aumentada. Para comprovar a aplicação do modelo proposto, foram criados cenários para situações de catástrofes e de desastres relacionados à deslizamento de terra em áreas de risco na cidade do Rio de Janeiro. No primeiro cenário, foi considerada uma situação onde todos os bairros considerados eram afetados ao mesmo tempo. Nos demais, criaram-se cenários mais prováveis de ocorrer, onde apenas um ou alguns bairros eram impactados. Desta maneira os tomadores de decisão passam a contar com uma ferramenta para orientar na alocação de recursos limitados, de maneira criteriosa e de forma preventiva. O benefício direto é um melhor atendimento à população da cidade seja em caso de desastre, como também em situação de não crise.

Palavras-chave

Logística Humanitária; Desastres; Pesquisa Operacional; Modelo; Otimização.

Abstract

Maculan, Guido; Leiras, Adriana (Advisor); Brito Jr, Irineu (Co-advisor). **Linear Programming Model for Allocating Roads and Hospitals in the Event of Disasters**. Rio de Janeiro, 2017. 82p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Disasters are events that cause destruction of the local infrastructure and impact thousands of people every year, causing material and human damages and significant economic losses. When this happens, humanitarian aid is required to be sent to affected locations and rescue survivors as soon as possible. In order for a disaster response operation to happen efficiently, it is necessary that the transport network to be operational and for hospitals to be able to receive the victims. To mitigate the impact of these events, a linear programming model is proposed that seeks to identify the urban roads and hospitals that need investments to better serve the population in case of a disaster. The model identifies which pathways are critical and therefore should receive priority investments and which hospitals need to have their capacity increased. In order to verify the application of the proposed model, scenarios for landslide catastrophes and disasters were created in the city of Rio de Janeiro. On the first case, it was considered a situation where all the districts considered were affected at the same time. On the latter, more likely to occur scenarios were set, where only one or a few areas were impacted. In this way, decision-makers start to rely on a tool to guide the allocation of limited resources, in a careful and preventive way. The direct benefit is a better service to the population of the city in the event of a disaster, but also in a non-crisis situation.

Keywords

Humanitarian Logistics; Disasters; Operational Research; Model; Optimization.

Sumário

1. Introdução	14
1.1. Motivação	14
1.2. Objetivo	15
1.3. Pergunta de Pesquisa	15
1.4. Metodologia de Pesquisa	16
1.5. Organização do Trabalho	17
2. Fundamentação Teórica	18
2.1 Logística humanitária	18
2.2 Desastre versus Catástrofe	20
2.3 Fases de um Desastre ou Catástrofe	21
2.4 Confiabilidade da Rede	23
2.5 Pesquisa Operacional na Logística Humanitária	25
3. Apresentação do Modelo	28
3.1 Apresentação do Modelo	28
3.2 Modelo Matemático	30
3.2.1 Nomenclatura	31
3.2.2 Formulação Matemática	32
3.3 Fator de Sobrevivência (f_i)	34
3.4 Limitações do Modelo	35
4. Exemplo numérico	39
4.1 Contextualização do Problema	39
4.2 Levantamento de Dados	40
4.2.1 População Vulnerável	40
4.2.2 Hospitais Públicos	41
4.2.3 Fluxo de Veículos entre Hospitais e Comunidades	42
4.2.4 Tempo Total para Resgatar os Feridos	43
4.2.5 População Afetada	44
4.3 Apresentação de Resultados	44
4.3.1 População vulnerável	45
4.3.2 Hospitais públicos	46
4.3.3 Fluxo de veículos entre hospitais e comunidades	48
4.3.4 População afetada	50
4.4 Análise de Sensibilidade	52
4.4.1 Variação do Orçamento Total	53
4.4.2 Variação da Capacidade Original da Via	54
4.4.3 Variação da População Vulnerável	54
4.4.4 Variação da Porcentagem do Número de Leitos	55

5. Conclusões e Recomendações	57
5.1 Propostas para Estudos Futuros	59
Referências Bibliográficas	62
Anexo I	65
Anexo II	67
Anexo III	69
Anexo IV	71
Anexo V	73
Anexo VI	75
Anexo VII	77
Anexo VIII	79
Anexo IX	81
Anexo X	83

Lista de figuras

Figura 1 – Diferentes níveis operacionais de resposta a desastres (Vitoriano <i>et al.</i> , 2013)	19
Figura 2 – Fases de operações em caso de desastre (Tomasini e Van Wassenhove, 2009a)	20
Figura 3 – Representação gráfica do modelo	30
Figura 4 – Gráfico de sobrevivência (Edrissi et al, 2015)	35
Figura 5 – Comunidades vulneráveis à deslizamento no RJ (Google Maps)	45
Figura 6 – Hospitais do RJ capacitados para realizar atendimento de emergência (Google Maps)	47
Figura 7 – Vias que receberam investimentos (Google Maps)	49

Lista de tabelas

Tabela 1 – População das comunidades vulneráveis antes e depois do desastre	46
Tabela 2 – Quantidade de leitos dos hospitais públicos	47
Tabela 3 – Custo do aumento da capacidade das vias	49
Tabela 4 – Comunidades totalmente atendidas	50
Tabela 5 – Comunidades não atendidas	50
Tabela 6 – Análise de sensibilidade do orçamento total	53
Tabela 7 – Análise de sensibilidade da Capacidade Original da Via	54
Tabela 8 – Análise de sensibilidade da População Vulnerável	55
Tabela 9 – Análise de sensibilidade da Porcentagem do Aumento do Número de Leitos	56
Tabela 10 – Bairros do Rio de Janeiro com risco de deslizamento (GEORIO, 2011; IBGE, 2011)	65
Tabela 11 – Hospitais públicos do Rio de Janeiro (CNES; DATASUS)	67
Tabela 12 – Volume diário de veículos das principais vias do Rio de Janeiro (CET-RIO)	69
Tabela 13 – Distância entre comunidades e hospitais (Google Distance Matrix)	71
Tabela 14 – Quantidade de pessoas que falecem no início do desastre	73
Tabela 15 – Tempo de viagem e atendimento aos feridos (Google Distance Matrix)	75
Tabela 16 – Número de pessoas mortas por não terem sido socorridas a tempo	77
Tabela 17 – Fluxo de pessoas e custo da melhoria dos arcos	79
Tabela 18 – Número de pessoas mortas por não terem sido socorridas a tempo	81
Tabela 19 – Aumento do número de leitos no hospital	83

Lista de quadros

Quadro 1 – Parâmetros do modelo	40
Quadro 2 – Variáveis do modelo de otimização	45

Lista de siglas

AIMMS	Advanced Interactive Multidimensional Modeling System
CET-RIO	Companhia de Engenharia de Tráfego do Rio de Janeiro
CNES	Cadastro Nacional de Estabelecimentos de Saúde
DATASUS	Departamento de Informática do Sistema Único de Saúde
GEO-RIO	Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro
IFRC	Movimento Internacional da Cruz Vermelha e do Crescente Vermelho
ONG	Organizações não governamentais
ONU	Organização das Nações Unidas

1

Introdução

1.1

Motivação

Nos últimos anos houve um aumento considerável no número de ocorrências de desastres naturais, bem como daqueles causados por ações humanas, que ceifaram milhares de vidas e impactaram milhões de pessoas (Kunz e Reiner, 2012). Desastres são eventos que testam a capacidade das comunidades e nações de proteger efetivamente suas populações e infraestrutura, de reduzir a perda de bens humanos e de propriedade e de se recuperarem rapidamente (Altay e Green, 2006). Podem variar de tipo e intensidade, cada um demandando uma forma específica de resposta, onde diferentes atores trabalham juntos para aliviar o sofrimento humano (Tomasini e Van Wassenhove, 2009). Nas grandes cidades, a degradação ambiental, a rápida urbanização e a marginalização social são alguns dos principais fatores que contribuem para a crescente perda de vidas em decorrência de desastres naturais em muitos dos países em desenvolvimento (McEntire, 1999).

Após a incidência de desastres de grandes proporções, as redes de transporte são danificadas. Estas redes são vitais no auxílio humanitário, pois viabilizam o escoamento de bens humanitários, como água, alimentos, medicamentos e equipamentos (Edrisi et al., 2013). Qualquer falha pode resultar em atraso no auxílio, agravando ainda mais a situação (Edrisi et al., 2015).

A logística humanitária tem atraído muita atenção nos últimos anos e engloba diversas operações que ocorrem em momentos distintos, sempre buscando diminuir a perda de vidas (Kovács e Spens, 2007). Tomasini e Van Wassenhove (2009) a definem como o processo de planejar, implementar e controlar de forma eficiente o custo do fluxo e armazenamento de bens, materiais e informação, desde o ponto de origem até o de consumo, de forma a diminuir o sofrimento das pessoas em situação vulnerável.

A logística humanitária deve equilibrar equidade e eficiência. Entretanto é difícil medir o impacto da destruição causada pelos desastres. Além da demanda e fornecimento serem desconhecidos, as cadeias de suprimentos humanitárias enfrentam altas incertezas relacionadas com os recursos disponíveis. Voluntários com poucas habilidades, alta rotação de pessoal e infraestrutura local precária criam dificuldades adicionais ao gerenciamento das cadeias de suprimento humanitárias. Além destas complicações, há uma competição por financiamento, recursos e pessoal entre as organizações humanitárias e pouquíssima informação confiável disponível (Van Wassenhove *et al.*, 2012).

Na logística humanitária tanto a demanda como a oferta são desconhecidas e dinâmicas. Ela se constitui fundamentalmente por voluntários e centenas de outros atores que possuem diferentes objetivos e motivações. Além de ser sensível à cultura local, as organizações humanitárias devem respeitar as estruturas sociais, mercado e economia local, caso contrário podem desestabilizar a economia do local nos anos seguintes (Van Wassenhove *et al.*, 2012).

1.2

Objetivo

O objetivo desta dissertação é propor um modelo de programação linear que viabilize indicações mais precisas para a alocação de recursos no aumento do fluxo de trânsito em ruas e avenidas entre comunidades vulneráveis a algum tipo de desastre e os hospitais da cidade, bem como na disponibilização de mais leitos nestes hospitais. Estes investimentos ocorrem durante a fase de mitigação à desastres.

Desta forma, quando da ocorrência de um desastre em determinada localidade, a população afetada poderá ser atendida, transportada e hospitalizada rapidamente, diminuindo o sofrimento e reduzindo o número de vítimas. Além disto, em uma situação de não crise, trará também benefícios para a população, ao possibilitar um menor tempo de viagem e uma maior oferta do número de leitos disponíveis.

A principal característica do modelo proposto é apoiar a decisão para alocação de investimentos. Além disto, permite que o tomador de decisão configure os diversos parâmetros com a finalidade de obter a situação desejada. O

resultado possibilita que autoridades competentes possam realizar investimentos de forma criteriosa, considerando a otimização de recursos.

1.3

Pergunta de Pesquisa

Para auxiliar esta investigação exploratória, a pergunta desta pesquisa é: “Como melhorar a resposta a um desastre através de um modelo quantitativo que auxilie na decisão de alocar recursos?”. Outra possível pergunta desta pesquisa é: “Estes investimentos podem elevar a qualidade de vida da população caso não haja um desastre?”.

Para obtenção dessa resposta, é proposto um modelo de programação linear, que orienta onde devem ser realizados investimentos de forma a minimizar a quantidade de pessoas que ficariam sem atendimento hospitalar, caso um desastre ocorra. O modelo estima (1) Hospitais que devem receber melhorias, (2) Vias que devem receber melhorias, (3) Quantidade de pessoas que serão atendidas pelo aumento da oferta de leitos e (4) Quantidade de pessoas que podem ficar sem atendimento. Um exemplo numérico a partir da utilização de dados como (1) Censo de 2010 do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), (2) Quantidade de pessoas morando em áreas de risco, (3) Quantidade de leitos disponíveis em hospitais e (4) Vazão de veículos nas vias. É esperado que este modelo possa ser utilizado por organizações e governo de países em que haja incidência de desastres.

1.4

Metodologia de Pesquisa

Este estudo é de abordagem quantitativa. A partir da análise da literatura acadêmica pertinente ao tema de desastre, logística humanitária e pesquisa operacional, foi proposto um modelo de programação linear derivado do estudo elaborado por Edrisi *et. al.* (2015). Esta hipótese se propõe a verificar se um modelo quantitativo pode ser utilizado para orientar na alocação de recursos em áreas críticas e vulneráveis para diminuir o impacto de desastres. O modelo

proposto é uma simplificação daquele proposto por Edrisi *et al.* (2015), e do método apresentado por Novak e Sullivan (2014).

A revisão da literatura utilizou bases de dados, revistas científicas, livros da área e teve como ponto de partida os artigos de Edrisi *et al.* (2015) e Leiras *et al.* (2014), bem como suas referências bibliográficas. As palavras-chaves utilizadas foram formadas por combinação dos termos: *humanitarian logistics*, *disaster relief*, *operations research*, *operational research* e *disaster management*.

O modelo foi testado a partir de um exemplo numérico. Foram utilizados dados secundários a partir de pesquisa no IBGE, GEO-RIO (Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro), CNES (Cadastro Nacional de Estabelecimentos de Saúde), DATASUS (Departamento de Informática do Sistema Único de Saúde) e CET-RIO (Companhia de Engenharia de Tráfego do Rio de Janeiro). Para utilizar as bases de dados do CNES e DATASUS, foram efetuados contatos telefônicos e visita presencial a profissionais do Hospital Souza Aguiar em fevereiro de 2017. Os dados levantados foram do ano de 2010, por conta do último censo ser deste ano.

1.5

Organização do Trabalho

O trabalho é composto por cinco capítulos, sendo este o capítulo introdutório.

No segundo, é apresentada a revisão de literatura acadêmica relativa ao trabalho proposto.

O terceiro apresenta o modelo desenvolvido em programação linear. Nele é proposta também uma forma para auxiliar a estimativa de alguns dos parâmetros de entrada para o modelo. Na última seção deste são apresentadas as limitações do modelo.

O quarto capítulo contém um exemplo numérico para a validação do modelo, na sequência é feita a análise de sensibilidade para os diversos parâmetros do modelo.

No quinto e último capítulo o trabalho é concluído, encaminhando sugestões de estudos futuros.

2

Fundamentação Teórica

Este capítulo apresenta a revisão de literatura, que começa conceituando logística humanitária e explicando a sua relevância. Na seção 2.2 é conceituado as diferenças entre desastre e catástrofe, já que o modelo proposto é aplicado primeiramente para uma situação de catástrofe e na análise de sensibilidade foram considerados situações de desastre. A seção 2.3 lista as fases de um desastre. A seção 2.4 explica a relevância em se ter uma rede de transportes confiável e como o modelo proposto se diferencia dos artigos em que foi baseado. Na seção 2.5 é mostrada a aplicação da pesquisa operacional na logística humanitária.

2.1

Logística humanitária

A logística humanitária pode ser definida como o processo de planejar, implementar e controlar de forma eficiente o fluxo e armazenamento de bens, materiais e informações desde o ponto de origem até o ponto de consumo, buscando reduzir o sofrimento de pessoas em situações vulneráveis. Tal processo engloba uma gama de atividades, incluindo a preparação, planejamento, aquisição, transporte, armazenamento, monitoramento e rastreamento e desembarço aduaneiro (Thomas; Kopczak, 2005).

Devido ao crescimento nas ocorrências e nos impactos de desastres no mundo, sejam estes naturais ou causados por ações humanas, a logística humanitária tem se tornado cada vez mais relevante. Além disso, a incidência destes desastres deve aumentar em mais de cinco vezes ao longo dos próximos cinquenta anos, em decorrência da degradação do meio ambiente, da rápida urbanização e da propagação do HIV/ AIDS no mundo em desenvolvimento (Cozzolino, 2012; Thomas; Kopczak, 2005).

Por conta disto, a demanda global por assistência humanitária continua a crescer. Este crescimento é amplificado pelo aumento da gravidade dos desastres e vulnerabilidades causadas por crises financeiras, subidas contínuas dos preços

de alimentos, escassez de energia e de água, crescimento populacional e urbanização (Christopher; Tatham, 2011). Quando um desastre ocorre, ele abala de forma diferente as regiões afetadas, a localização geográfica, demografia e status sócio econômico, que podem potencializar as suas consequências (Kovács; Spens, 2009). Assim, desastres frequentemente têm maior impacto em países que estão menos preparados econômica e socialmente para lidar com eles (Christopher; Tatham, 2011).

Entre as consequências na infraestrutura local, há a destruição das redes de eletricidade, comunicação e transporte, tais como pontes e aeroportos. Assim, um importante desafio da logística humanitária é determinar gargalos e a usabilidade da infraestrutura que esteja ainda operacional (Kovács; Spens, 2009). O impacto sobre populações afetadas pode ser reduzido ao se gerenciar estas operações de forma eficaz e eficiente (Cozzolino, 2012).

Uma abordagem típica de gerenciamento de um desastre inclui diversos atores, os quais podem atuar em mais de uma fase e executar diferentes papéis dentro da mesma (Van Wassenhove *et al.*, 2012). A resposta a um desastre pode ser de abrangência local, nacional ou internacional (Figura 1). Usualmente a resposta imediata aos desastres vem dos atores locais. Estes são compostos por agências governamentais, ONGs com representação local, Sociedades Nacionais de Cruz Vermelha e Crescente Vermelho com filiais locais, exército, polícia e departamentos de bombeiros e outras agências civis (Vitoriano *et al.*, 2013).

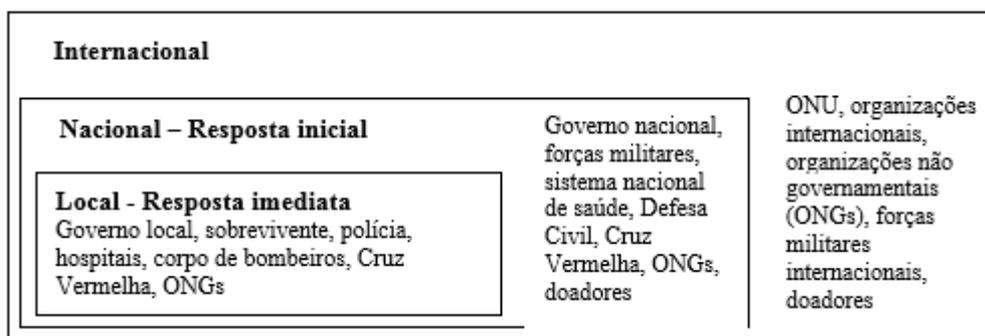


Figura 1: Diferentes níveis operacionais de resposta a desastres (Vitoriano *et al.*, 2013).

As dimensões dos custos envolvidos sugerem que até 80% das despesas de agências humanitárias são referentes a logística. Uma vez que a despesa total anual destas agências é da ordem de US\$ 20 bilhões, o gasto logístico resultante

de algumas é de US\$ 15 bilhões. Tal fato proporciona vastas oportunidades de melhoria de suas logísticas e dos benéficos aos afetados (Thomas; Kopczak, 2005).

O processo de resposta a um desastre precisa captar recursos financeiros de instituições governamentais e públicas e alinhar fornecedores e prestadores logísticos para que a mobilização global de recursos possa ser iniciada. Em geral, a infraestrutura física, como aeroportos, pontes e estradas, está destruída e as organizações humanitárias devem coordenar suas atividades, pois entidades governamentais locais ou federais podem estar severamente afetadas. A capacidade de transporte pode estar extremamente limitada ou até mesmo não mais existir. Nos primeiros 90 a 100 dias após o desastre, as ações além de se concentrar em serem eficazes na ajuda às pessoas, buscam fazê-lo a um custo razoável. A equipe humanitária alocada começa a pesquisar e empreender ações para a aquisição dos mesmos produtos localmente (Thomas; Kopczak, 2005; Van Wassenhove, 2006).

2.2

Desastre versus Catástrofe

Um dos principais aspectos da logística humanitária está relacionada com a natureza do evento, isto é, se trata de um desastre ou de uma catástrofe. Não há consenso geral entre os pesquisadores sobre como definir o termo “desastre” (Holguín-Veras *et al.*, 2012). Segundo o Movimento Internacional da Cruz Vermelha e do Crescente Vermelho (IFRC), desastre é um evento repentino e calamitoso que perturba seriamente o funcionamento de uma comunidade ou sociedade e causa perdas humanas, materiais e econômicas ou ambientais que excedem a capacidade da comunidade ou da sociedade de lidar com seus próprios recursos. Embora muitas vezes sejam causados pela natureza, como ocorreu em 2011 quando um terremoto gerou um tsunami que devastou a região costeira do Japão, os desastres podem ter origem humana, como no ataque terrorista ao World Trade Center em 2001 nos Estados Unidos ou o acidente nuclear de Chernobil em 1986. Em algumas situações, declarar ou não uma emergência como um desastre é uma decisão política, porque tem consequências para o envolvimento de terceiros na intervenção ou no seguro, por exemplo (Vitoriano *et al.*, 2013).

Catástrofes, por outro lado, podem ser definidas como eventos de alta consequência que geram impactos difundidos e incapacitantes, onde a capacidade da sociedade impactada para responder está seriamente comprometida. Eles variam em escala nos casos em que o próprio país afetado pode lidar, para aqueles onde este tem que chamar por assistência externa, regional ou global. Um desastre não catastrófico é aquele em que a população local, as autoridades e as organizações humanitárias podem lidar com as consequências, apesar de baixas significativas e destruição de infraestrutura (Holguín-Veras *et al.*, 2012).

2.3

Fases de um Desastre ou Catástrofe

Os esforços de socorro em catástrofes são caracterizados pela incerteza e complexidade consideráveis, eles precisam ser devidamente gerenciados para identificar e implementar melhores respostas. Assim, o gerenciamento de desastres é um fator chave que impulsiona a execução bem-sucedida dos esforços de socorro e começa com o desenho de processos estratégicos (Tomasini e Van Wassenhove, 2009).

O gerenciamento da resposta a um desastre é um processo composto por várias fases, sendo as principais: (1) mitigação, (2) preparação, (3) resposta e (4) reconstrução. Estas quatro fases constituem o ciclo de gerenciamento de desastre, conforme pode ser visto na Figura 2 (Tomasini e Van Wassenhove, 2009; Cozzolino, 2012).

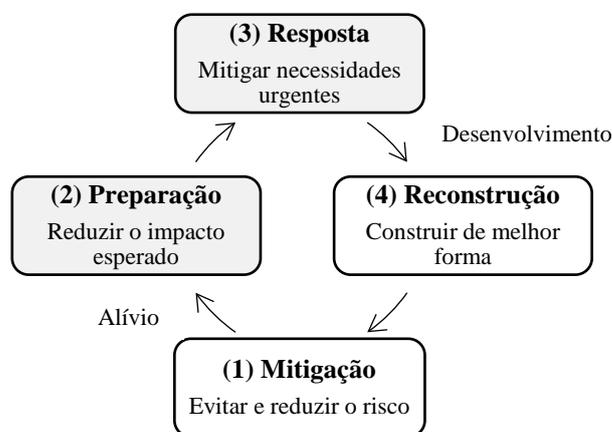


Figura 2: Fases de operações em caso de desastre (Tomasini e

Van Wassenhove, 2009).

(1) Fase de mitigação

A fase de mitigação envolve esforços de longo prazo para evitar a ocorrência de desastres ou para reduzir seus efeitos através de construções de infraestruturas mais resilientes à desastres (Ahmadi *et al.*, 2015). Engloba todas as ações e decisões de médio e longo prazos destinadas a prevenir e mitigar as consequências de um desastre futuro, contanto que este não esteja na iminência de ocorrer. As tarefas típicas desta fase são a identificação de grupos de risco, padrões de vulnerabilidade e seu tratamento, e/ou o desenvolvimento de sistemas de previsão, planos de emergência e a alocação de recursos correspondentes (Vitoriano *et al.*, 2013).

(2) Fase de preparação

A fase de preparação envolve as várias operações que ocorrem durante o período que antecede um desastre. Esta fase incorpora as estratégias que postas em prática permitem a implementação de uma resposta operacional bem-sucedida, bem como decisões sobre a quantidade e localização dos principais centros de distribuição a serem estabelecidos. Esta fase é crucial porque é nela em que os sistemas físicos de projeto de rede, informação e tecnologia de comunicação e bases de colaboração são desenvolvidos. O objetivo desta fase é evitar as consequências possíveis de um desastre e incorpora também os esforços que são efetuados entre a ocorrência de desastres na aprendizagem das experiências passadas para melhor enfrentar novos desafios (Cozzolino, 2012; Ahmadi *et al.*, 2015).

(3) Fase de Resposta

A fase de resposta inclui decisões operacionais com relação a rotas de veículos, equipes e equipamentos, além da distribuição de bens na última milha, nas áreas afetadas após a ocorrência do desastre (Ahmadi *et al.*, 2015). Esta fase é focada em salvar vidas e é caracterizada por curta duração com alta

emergência e incerteza. Geralmente é dividida em uma primeira fase de resposta, dedicada ao resgate e assistência médica urgente de pessoas feridas e afetadas (dependendo do cenário de desastre, pode durar cerca de uma semana a partir do momento do evento de desastre). Esta primeira fase é marcada pela alta incerteza quanto a oferta e a demanda. A incerteza da demanda resulta da falta de informações sobre o impacto do desastre na população afetada. Já a incerteza da oferta tem diferentes fontes, incluindo: destruição de inventários e serviços locais durante o desastre, e dificuldades para acessar a área de desastre devido a bloqueios (Vitoriano *et al.*, 2013).

A segunda fase da resposta é dedicada a estimar e mitigar as necessidades da população afetada que não recebeu auxílio, como abrigo, assistência médica, água e alimento, etc.). Esta etapa da fase de resposta, geralmente envolve a ajuda de organizações de fora da zona afetada e pode durar semanas ou até mesmo meses a partir do desastre, dependendo da natureza e magnitude deste, bem como das circunstâncias econômicas e de desenvolvimento da região afetada (Vitoriano *et al.*, 2013).

(4) Fase de Reconstrução

A fase de reconstrução refere-se a diferentes operações após um desastre. Trata-se de reabilitação e visa abordar o problema a partir de uma perspectiva de longo prazo. É também uma oportunidade para reconstruir as infraestruturas destruídas da melhor forma, de modo que estas se tornem mais resilientes, caso haja um novo desastre. Os efeitos de um desastre podem continuar por um longo período de tempo e têm graves consequências para a população afetada. Além disso, os desastres também podem ter efeitos a longo prazo até na gestão das empresas. Por exemplo, imediatamente após um desastre, as empresas de transporte podem sofrer uma mudança modal da estrada para o trilho que prevalece muito depois da ocorrência do desastre (Kovács e Spens, 2007; Van Wassenhove *et al.*, 2012).

2.4

Confiabilidade da Rede

Em qualquer tipo de desastre, para que seja possível salvar o máximo de vidas, é essencial que os sobreviventes sejam alcançados, ajuda lhes seja oferecida e que a região afetada seja evacuada durante os primeiros dias da ocorrência do desastre. Para que isto seja possível, é imperativo que a infraestrutura de transportes seja confiável, pois ela fornece o acesso crucial às áreas atingidas pelo desastre (Aksu e Ozdamar, 2014). Uma maneira de garantir este acesso é reforçar a rede local de transportes, de forma que ela esteja operacional para o transporte de suprimentos de emergência durante desastres (Holguín-Veras *et al.*, 2014).

Esta rede de transportes é composta por diversas ruas e avenidas, que possuem probabilidade de falha independente umas das outras, caso um desastre ocorra. É necessário, portanto identificar e adaptar as vias consideradas críticas, para que uma rede se torne confiável em tempos de crise. Após a identificação das vias críticas, entidades competentes têm a opção de promover as melhorias necessárias, de forma que a sua probabilidade de falha seja reduzida. Para que isto seja possível, Edrissi *et al.* (2015) propuseram um modelo que busca minimizar o número de mortos ao implementar melhorias nas vias consideradas críticas. Além disto, foi proposto um algoritmo heurístico para auxiliar na resolução de problemas de tamanho real.

Investimentos em vias urbanas para que permaneçam operacionais após o impacto inicial de um desastre não necessariamente irão garantir que as pessoas afetadas serão resgatadas. Edifícios que não possuam estabilidade estrutural suficiente são suscetíveis ao colapso, o que pode acarretar em destroços e impedir o fluxo humanitário as regiões afetadas (Edrissi *et al.*, 2015; Ozdamar *et al.*, 2014). Estes detritos bloqueiam o fluxo de tráfego nas áreas afetadas e devem ser removidos o mais rápido possível, para que os serviços de emergência possam começar a atuar. Os destroços somente serão completamente coletados, reduzidos, transportados, temporariamente armazenados, reciclados e descartados após o término da fase de resposta e estas operações podem levar meses (FEMA, 2007).

Novak e Sullivan (2014) propuseram o desenvolvimento de uma nova medida para avaliar a acessibilidade aos serviços de emergência através de uma rede rodoviária, que quantifica a importância relativa de cada link em uma rede rodoviária em relação à sua contribuição em todo o sistema para a acessibilidade do serviço de emergência. Esta abordagem permite avaliar a acessibilidade da distribuição espacial dos locais de atendimento de emergência, a topologia da rede

rodoviária e as características de engenharia desta rede, tais como tipos de rodovias, capacidades, volumes e velocidades de viagem.

O modelo proposto nesta dissertação se baseia nos trabalhos de Edrissi *et al.* (2015) e Novak e Sullivan (2014). Com relação ao primeiro, foram feitas as seguintes simplificações: (1) considerar o conjunto de vias que conecta cada bairro vulnerável a cada hospital como sendo um único arco e (2) não considerar um componente estocástico de variabilidade de eficiência no resgate dos feridos. Já com relação ao estudo de Novak e Sullivan (2014), foi utilizada a proposta de criar um critério para estabelecer tempo de viagem, estipular um custo para nós origem-destino.

2.5

Pesquisa Operacional na Logística Humanitária

Desastres são eventos onde existe uma certa aleatoriedade, cujo impacto e singularidade dos incidentes causados, exigem soluções dinâmicas, em tempo real, efetivas e econômicas, tornando assim o problema muito adequado para a pesquisa operacional (P.O.) (Altay e Green, 2006). Além disto, muitas vezes durante uma operação humanitária, são tomadas decisões que não são ótimas por excesso de confiança em experiências passadas e em suas próprias habilidades de tomada de decisão, sem auxílio e uso de heurísticas de decisão simples, (Gonçalves, 2011).

A P.O. pode ser descrita como uma abordagem científica para a solução de problemas na gestão de sistemas complexos. Em um ambiente em rápida mudança, é procurado um entendimento que facilite a escolha e a implementação de soluções mais efetivas que, tipicamente, possam envolver interações complexas entre os elementos do sistema, por exemplo, pessoas, materiais e dinheiro (EURO, 2017). Uma outra definição, apresentada de maneira resumida, diz que a P.O. é a disciplina de aplicar métodos analíticos avançados para ajudar a tomar melhores decisões. Ao usar técnicas como a modelagem matemática para analisar situações complexas, a P.O. dá aos executivos o poder de tomar decisões mais efetivas para construir sistemas mais produtivos baseados em dados mais completos, considerando todas as opções disponíveis, obtendo previsões mais confiáveis (Science of Better, 2017).

Em uma operação envolvendo desastres, diversas atividades são realizadas antes, durante e após, objetivando diminuir o seu impacto e consequências. Muitas dessas atividades estão intrinsecamente relacionadas com aplicações tradicionais de P.O. Por exemplo, a localização de abrigos como uma forma de se preparar para evacuações pode ser abordada como um caso especial de análise de localização; e a própria evacuação pode ser melhor analisada através da aplicação de técnicas de transporte. Estatísticas e modelos probabilísticos podem ser aplicados para lidar com incertezas relacionadas a locais e demandas de desastres. Em geral, diversas técnicas de pesquisa operacional podem ser aplicadas às diferentes etapas do gerenciamento de operações de desastre, para fornecer uma abordagem científica no processo de tomada de decisão (Galindo e Batta, 2013).

Edrissi *et al.* (2013) apontam que as duas formas de pesquisa que compõem a literatura humanitária se dividem entre reabilitação de vias e estoque de alívio. Entretanto, nenhuma pesquisa tentou integrá-los, sendo assim, os autores desenvolveram um modelo para minimizar as casualidades após a incidência de um grande terremoto e uma heurística para auxiliar na resolução do problema dos múltiplos atores, cada qual com seus próprios recursos e políticas.

Gosling e Geldermann (2014) propuseram um framework que permite aos profissionais da logística humanitária comparar os modelos de P.O. disponíveis. Este framework busca se tornar parte crucial para a logística humanitária, ao orientar seus usuários para um modelo que se encaixa no seu problema particular, dado que existem diversos modelos disponíveis na literatura.

Hoyos *et al.* (2015) realizaram uma revisão da literatura sobre os modelos de P.O. que possuam algum componente estocástico aplicado ao gerenciamento de operações de desastre. A ênfase das pesquisas de programação matemática é voltada principalmente sobre as operações de preparação e de resposta à um desastre, considerando o pré-posicionamento de instalações, alocação de recursos, distribuição de meios de alívio e transporte de acidentados. No entanto, diversos autores sugerem que é necessária maior pesquisa na fase de resposta. Já na fase de mitigação, se observa que a maior parte da pesquisa é desenvolvida com o objetivo de reduzir as incertezas com relação ao risco ou ocorrência do desastre, desenvolvendo modelos para prever o impacto ou que possam explicar de maneira melhor o comportamento destes eventos.

Em um trabalho mais recente, Alem *et al.* (2016) propõem um modelo de otimização de fluxo de rede estocástica de dois estágios, buscando atender características práticas negligenciadas até o momento pela literatura, como a alocação de orçamentos, dimensionamento de frotas de múltiplos tipos de veículos, aquisição e prazos de execução variados. O objetivo deste modelo é o de auxiliar organizações a propiciarem respostas rápidas no alívio de desastres.

Na busca de novas direções para a pesquisa de P.O., o gerenciamento de operações de desastre mostra um tremendo potencial. Os desastres atingiram, e continuarão atingindo comunidades, empresas e economias. O interesse de todos é entender como podemos gerenciá-los efetivamente e eficientemente. Um melhor gerenciamento destas operações melhorará a prontidão, aumentará a velocidade de resposta e aliviará a recuperação (Altay e Green, 2006). Para tal, há diversos aspectos de uma operação de alívio que podem ser beneficiados pelo uso da P.O. Entretanto, aparentemente existem poucos estudos focados na fase de mitigação de desastres para realizar investimentos para tornar mais resilientes as infraestruturas consideradas vitais.

3

Apresentação do Modelo

Este capítulo apresenta o modelo de programação linear proposto, que viabiliza o direcionamento de indicações mais precisas para a alocação de recursos na melhoria do fluxo de trânsito em ruas e avenidas entre comunidades vulneráveis a algum tipo de desastre e os hospitais da cidade, bem como na disponibilização de mais leitos nestes hospitais.

O capítulo está organizado da seguinte forma: na seção 3.2 é apresentado o modelo proposto, na seção 3.3 são mostradas as nomenclaturas e expressões utilizadas, a seção 3.4 contém a descrição do Fator de Sobrevivência (f_i) que foi utilizado no modelo e a seção 3.5 apresenta as limitações do modelo.

3.1

Apresentação do Modelo

O modelo de otimização busca calcular onde e como alocar eficientemente investimentos, a partir de um orçamento disponível para um conjunto selecionado de hospitais e vias urbanas - de forma a minimizar a quantidade de moradores em zonas vulneráveis a desastres súbitos, fiquem sem atendimento, bem como a reduzir o tempo para que estas pessoas cheguem ao destino de socorro mais próximo disponível.

Na ocorrência de um desastre em pelo menos uma das comunidades vulneráveis, ambulâncias são despachadas a partir dos hospitais mais próximos, com leitos disponíveis, para atender aos afetados. No local do acidente, as equipes médicas realizam os atendimentos de primeiros socorros e retornam com os pacientes à sua origem. Quando os hospitais mais próximos não tiverem capacidade para o atendimento, este ficará a cargo dos mais distantes. Caso a capacidade de todos hospitais não seja suficiente, o excedente ficará sem atendimento. Um dos objetivos do modelo é apontar quais hospitais deverão receber investimentos para que aumentem suas quantidades de leitos, uma vez que um planejamento eficaz da capacidade hospitalar pode aumentar

significativamente a capacidade e a eficácia do tratamento para pacientes emergenciais com lesões resultantes do impacto de desastres súbitos (Yi et al, 2010).

É possível parametrizar que um determinado número de pessoas morrerá durante a ocorrência do desastre. Este número pode ser diferente para cada comunidade afetada em função do grau de risco. No decorrer do tempo, parte das pessoas feridas também poderá vir a falecer se houver demora no seu atendimento.

O tempo de viagem de ida e volta entre os hospitais e as comunidades, pode ser diferente, uma vez que a rota utilizada não necessariamente será a mesma. Há a possibilidade de incluir no modelo um fator por conta da densidade do trânsito ao aumentar o tempo de viagem. O segundo e último objetivo do modelo é indicar quais ruas e avenidas devem receber investimentos permitindo um maior fluxo de veículos e desta forma, diminuir o tempo de viagem, possibilitando um atendimento mais eficiente.

O modelo proposto pode ser representado por um grafo bipartido direcionado disjuntos, permitindo criar cenários de desastres, envolvendo as comunidades afetadas, vias para deslocamento e hospitais. As opções disponíveis para otimização incluem as seguintes informações:

1. Conjunto de bairros afetados;
2. Conjunto de hospitais disponíveis para atendimento;
3. Tempo de atendimento no local do desastre;
4. Tempo de viagem entre hospitais e bairros;
5. Número de vítimas que perdem a vida no início do desastre;
6. Peso para priorizar o atendimento aos afetados, através de ajustes nos parâmetros;
7. Fluxo de pessoas entre cada hospital e comunidade.

A Figura 3 representa as n comunidades onde há risco de desastres súbitos e os m hospitais que estão capacitados para atendimentos complexos de emergência. Nota-se que para cada par de nós existem dois arcos, um de i para j e outro de j para i , indicando a possibilidade de diferentes caminhos em cada trecho.

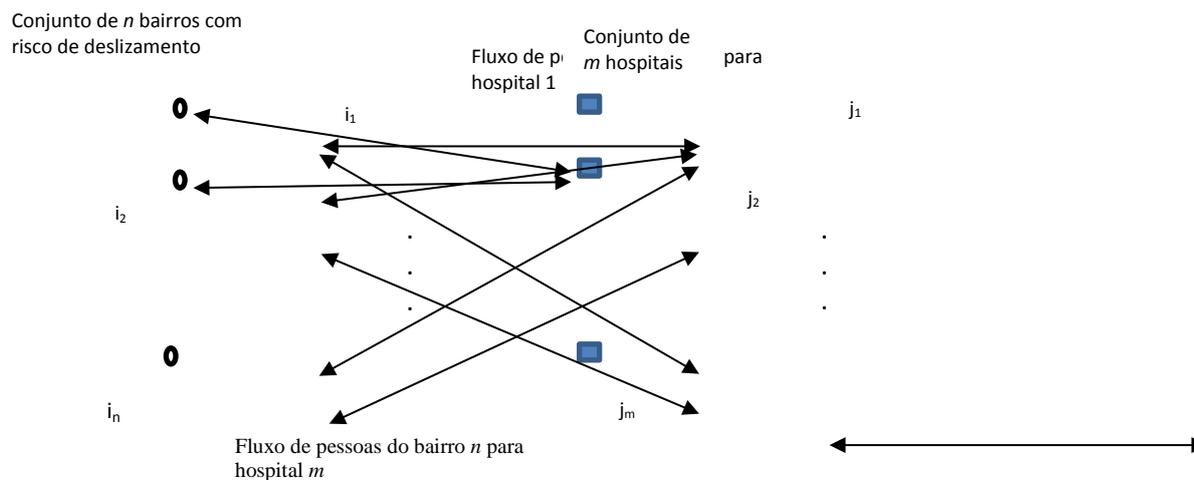


Figura 3: Representação gráfica do modelo.

Como já explicado, o modelo proposto aponta onde deve ocorrer o aumento de capacidade de leitos hospitalares e da quantidade de veículos que trafegam em uma via, de forma a melhor atender a população da cidade. No entanto, só haverá necessidade de aprimorar o fluxo de veículos, se existirem leitos suficiente, no hospital de destino. Caso não haja, não haverá fluxo pela via, e, portanto, não haverá necessidade de investimentos nela. É assumido que o trânsito ficará exclusivo para fluxo de veículos das organizações humanitárias, nas vias que conectam as regiões afetadas aos hospitais.

Se houver restrição orçamentária, o modelo poderá disponibilizar uma solução onde só haverá investimentos em apenas hospitais ou vias. Em ambos os casos, isto acontece, quando o limite de gastos com hospitais e vias forem atingidos, conforme mostram as restrições (7) e (8), ou caso não haja demanda para tal.

3.2

Modelo Matemático

A seção 3.2.1 apresenta a lista de conjuntos, parâmetros e variáveis utilizadas no modelo de otimização, a 3.2.2 a função objetivo e as restrições que o compõe.

3.2.1

Nomenclatura

Nesta seção são apresentados os conjuntos, parâmetros e variáveis utilizados no modelo.

Conjuntos:

- R Conjunto de todos bairros (comunidades) i em que vivem pessoas em situação vulnerável
- H Conjunto de todos os hospitais j

Parâmetros:

- b Orçamento total para alocar recursos em hospitais e vias urbanas, em moeda corrente
- k_{ij} Custo para aumentar o fluxo de pessoas (veículos) do arco (i,j) , entre o bairro i e o hospital j
- cap_{ij} Capacidade original da via entre a comunidade i e o hospital j . É a vazão máxima de veículos por minuto
- c_j Custo por unidade de leito no hospital j
- q_j Número de leitos (Capacidade) disponíveis no hospital j
- p_j Porcentagem do aumento máximo do número de leitos do hospital j
- p'_{ij} Porcentagem do aumento do fluxo de pessoas da comunidade i para o hospital j
- d_i Número de habitantes em situação vulnerável no bairro (comunidade) i
- a_i Número de pessoas vivendo em situação vulnerável que falecem logo após o início do desastre
- f_i Número de pessoas que sobreviveram ao início do desastre, mas que falecem por não terem sido resgatadas a tempo

Variáveis:

- X_{ij} Fluxo de pessoas da comunidade i para o hospital j
 X'_{ij} Aumento do fluxo de pessoas (veículos) do arco (i,j) entre a comunidade i e o hospital j
 F_i Fluxo de pessoas da comunidade i que não foram atendidas
 L_j Aumento do número de leitos no hospital j

3.2.2

Formulação Matemática

A função objetivo utilizada e as restrições consideradas são apresentadas abaixo.

Função objetivo:

$$\text{Min} \left[\sum_{i \in R} F_i \right] \quad \forall i \in R \quad (1)$$

A restrição (1) procurar minimizar a quantidade de pessoas ($\sum F_i$) que não puderam ser atendidas nos hospitais por falta de capacidade, já considerando o aumento da oferta de leitos.

Sujeito a:

$$\left(\sum_{(i,j) \in R} k_{ij} * X'_{ij} \right) + \left(\sum_{j \in H} c_j * L_j \right) \leq b \quad (2)$$

A restrição 2 garante que os custos de melhoria estejam dentro do orçamento disponível (b). A primeira parcela da restrição representa os investimentos realizados nas ruas e avenidas (X'_{ij}), de forma a permitir um maior fluxo de veículos em suas vias, onde (k_{ij}) representa o custo para implementar esta

melhoria. A segunda parcela representa os investimentos na oferta de leitos nos hospitais (L_j), onde (c_j) representa o custo de adicionar um leito no hospital j . Pode ser que não haja orçamento suficiente para investir em todos os hospitais e vias urbanas.

$$\sum_{i \in R} X_{ij} - L_j \leq q_j, \quad \forall j \in H \quad (3)$$

A restrição (3) garante que a capacidade original do hospital (q_j) mais o aumento no número de leitos (L_j), seja suficiente para atender a demanda de cada comunidade i , ou seja, a soma do fluxo de pessoas (X_{ij}) de cada comunidade i que são levadas ao hospital j .

$$X_{ij} - X'_{ij} \leq cap_{ij}, \quad \forall (i, j) \in R \quad (4)$$

A restrição (4) estipula que o fluxo de veículos por uma via (X_{ij}) será sempre menor ou igual a capacidade original dela (cap_{ij}), mais o aumento da sua capacidade (X'_{ij}). No entanto, só vai haver fluxo (X_{ij}), se o hospital de destino j tiver capacidade disponível (q_j). Se não houver leitos disponíveis, o fluxo na via será nulo.

$$\left(\sum_{j \in H} X_{ij} \right) + F_i = (d_i - a_i - f_i), \quad \forall i \in R \quad (5)$$

A restrição (5) determina que o fluxo total de pessoas (X_{ij}) de cada comunidade i para os hospitais j e o fluxo das pessoas que não foram atendidas (F_i) por falta de disponibilidade de leitos, deverá ser igual a população original (d_i), excluindo as vítimas que falecem no impacto inicial do desastre (a_i) e as que sobreviveram ao impacto inicial, mas não resistem esperar pelo resgate (f_i) por conta de seus ferimentos. O cálculo do parâmetro (f_i) será apresentado na seção 3.3.

$$L_j \leq q_j * p_j, \quad \forall j \in H \quad (6)$$

A restrição (6) garante que o aumento do número de leitos de um hospital (L_j) não possa crescer indefinidamente. Este aumento deve estar limitado a um valor pré-determinado, que é uma porcentagem (p_j) da capacidade original do hospital (q_j).

$$X'_{ij} \leq cap_{ij} * p'_{ij}, \quad \forall (i,j) \in R \quad (7)$$

A restrição (7) garante que o aumento do fluxo de pessoas (X'_{ij}) não possa crescer indefinidamente. Este aumento deve estar limitado a um valor pré-determinado, que é uma porcentagem (p'_{ij}) da capacidade original da via entre a comunidade i e o hospital j (cap_{ij}).

$$L_j \geq 0, \quad \forall j \in H \quad (8)$$

$$X'_{ij} \geq 0, \quad \forall (i,j) \in R \quad (9)$$

$$X_{ij} \geq 0, \quad \forall (i,j) \in R \quad (10)$$

$$F_i \geq 0, \quad \forall (i,j) \in R \quad (11)$$

As restrições de (8) à (11) são inequações que garantem a não negatividade das variáveis.

3.3

Fator de Sobrevivência (f_i)

O modelo proposto utiliza o Fator de Sobrevivência (f_i), que busca estimar o número de pessoas que sobreviveriam ao impacto inicial do desastre e poderiam vir a falecer em decorrência da demora no seu atendimento. As pessoas que sobreviveram ao início do desastre súbito, necessitam de cuidados médicos, e quanto mais tempo demorar para que elas o recebam, maior será o número de novas vítimas fatais. Este conceito se baseia no artigo do Edrissi *et al* (2015)

(Figura 4), onde a população sobrevivente começa a falecer com o passar do tempo, enquanto não receber atendimento.

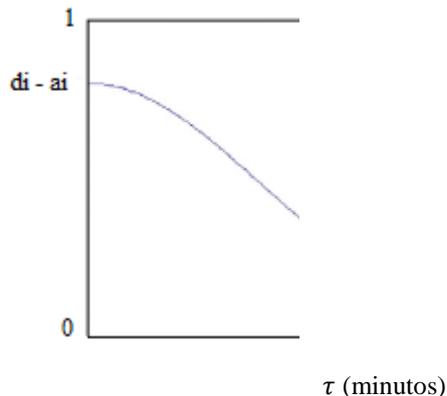


Figura 4: Gráfico de sobrevivência (Edrissi et al., 2015).

O parâmetro (f_i) calcula o número de vítimas que não são atendidas a tempo, é utilizado na restrição (5), tem as seguintes entradas:

Entradas:

1. Tempo médio de viagem entre cada hospital e bairro (t_{1ij});
2. Tempo médio de atendimento dos feridos no local (t'_{ij});
3. Tempo médio de viagem entre cada bairro e hospital (t_{2ij});
4. Pessoas em situação vulnerável por bairro (d_i);
5. Parcela da população vulnerável que falece logo no início do desastre (a_i).

O tempo de viagem entre o hospital j e a comunidade i afetada pelo desastre, bem como o atendimento ao afetado no local do desastre (t'_{ij}) e pode variar dependendo de como a vítima foi afetada pelo desastre. Os feridos podem precisar de resgate de escombros ou apenas de remoção. À medida que o tempo passa e a população não recebe atendimento, o número de óbitos aumenta.

No início do desastre, a população sobrevivente ao impacto inicial do desastre ($d_i - a_i$), diminui com o tempo, conforme apresentado na Figura 4. Isto significa dizer que a população sobrevivente tem um período limitado de sobrevivida, e se não forem ajudadas a tempo, a quantidade de vítimas fatais irá aumentar (Edrissi *et al*, 2015).

3.4

Limitações do Modelo

O modelo proposto possibilita a otimização da alocação de recursos que devem ser empregados na disponibilização de mais leitos hospitalares ou no aumento do fluxo de trânsito entre os locais de risco e os hospitais disponíveis para atendimento. Como um modelo é uma abstração da realidade, simplificações foram introduzidas de forma a atingir o objetivo inicial. A principal delas considera que o orçamento disponível para realizar estes aumentos não pode ser utilizado para beneficiar as condições de vida das populações que moram em regiões vulneráveis a desastres súbitos.

Outra limitação é relativa a população afetada sobrevivente, sobre a qual se faz necessário realizar uma triagem de acordo com a gravidade de seus ferimentos, ou seja, quando ocorre um desastre não necessariamente todas as pessoas da região afetada irão precisar do mesmo tipo de auxílio. Há aqueles que não foram afetados, os que não se feriram, os que se encontram desabrigados. Para estes últimos, se faz necessário, além de abrigo, o envio de bens de primeira necessidade. Além disto, as pessoas feridas podem precisar de diferentes tratamentos.

As vítimas fatais de um desastre precisam ser remanejadas para local adequado, seja isto por conta do respeito à própria vítima e aos seus familiares, bem como para a preservação do entorno do acidente evitando contaminações.

Com relação aos hospitais, deve ser considerado que nem todos estarão sempre preparados para atender os feridos. Pode haver falta de equipamentos, de suprimentos, profissionais ou condições para realizar algum tipo de atendimento emergencial ou específico. Deve ser considerado também que nem sempre um hospital capacitado para atender uma situação de crise estará apto para tal, pois no momento requerido pode estar passando por algum problema de força maior, como por exemplo falta de luz.

O modelo considera que as ambulâncias sempre partem do hospital que irá realizar o atendimento, o que é uma simplificação, pois na realidade podem partir de outros pontos. Além disso, não foi considerado o tempo necessário para revisar

e preparar as ambulâncias para o próximo atendimento, tal como sua higienização, suprimentos e equipes médicas.

É perfeitamente possível que durante o resgate haja um novo desastre, o que pode aumentar ainda mais o número de afetados. Neste caso, existe a possibilidade de que não apenas a população da comunidade afetada se torne vítima deste novo desastre, como também as equipes de resgate envolvidas. Se isto ocorrer, a criação de um ponto de apoio não apenas para pessoas, mas também para suprimentos humanitários pode ser necessária.

Outro aspecto é que de nada adianta a disponibilidade de ambulâncias e capacidade nos hospitais, se as equipes de resgate não conseguirem chegar até os feridos. As ruas podem estar intransponíveis por conta de escombros. Neste caso, precisaria ser considerado o emprego de maquinário especializado para desobstruir as vias antes que o resgate possa atender aos feridos, o que certamente aumentaria o tempo decorrido para o atendimento. Além disto, não necessariamente estas ruas estarão totalmente disponíveis para o fluxo de veículos humanitários. Em alguns casos, o emprego de helicópteros pode viabilizar o resgate inicial das vítimas.

Por último, a rota entre os possíveis locais de acidente e os hospitais foi selecionada pelo caminho mais curto entre eles. Esta premissa nem sempre será aquela com o menor tempo de viagem. Além disto, uma rota como esta pode ser composta por um conjunto de ruas e avenidas, que podem ser compartilhadas por rotas entre outras comunidade e hospitais. Neste caso, estas ruas e avenidas tendem a se tornar gargalos, por conta disto, os investimentos nas rotas deveriam ser considerados de forma individual e não agregada. Em uma situação de crise também podem ser necessárias mudanças de rotas por conta de manutenções, passeatas, trânsito intenso, ou incluir alternativas de caminho de acordo com o trânsito em determinados dias e horários.

4

Exemplo numérico

Este capítulo apresenta o exemplo numérico aplicado ao modelo proposto na seção 3.2, bem como os resultados obtidos. O capítulo está dividido em quatro seções: na seção 4.1 é apresentado o exemplo e cenário proposto para testar o modelo, a seção 4.2 explica como os dados foram levantados, na seção 4.3 são apresentados os resultados obtidos e na seção 4.4 é feita a análise de sensibilidade.

4.1

Contextualização do Problema

Na cidade do Rio de Janeiro, milhares de pessoas moram perto de encostas, sob risco constante de deslizamentos de terra, de acordo com estudo realizado pela GEO-RIO (GEORIO, 2011). Estas encostas se situam ao longo de 43 bairros, como pode ser observado no Anexo I. Quando em uma destas localidades incide um desastre, ambulâncias serão despachadas dos hospitais públicos mais próximos para o local afetado. Neste estudo, foram selecionados os 42 hospitais públicos que estão preparados para realizarem atendimentos emergenciais, de acordo com o CNES (2010), a lista destes hospitais está contida no Anexo II.

O exemplo numérico considerou a pior situação – uma catástrofe – que é aquela em que as 43 comunidades com propensão a deslizamento de terra fossem impactadas ao mesmo tempo. Evidentemente que a probabilidade de um evento como este ocorrer é muito baixa. No entanto, prevê quantas pessoas ficariam sem atendimento por falta de vagas nos hospitais no caso de uma catástrofe desta proporção. Além disto, serve como um direcionamento para onde os investimentos poderiam ser empregados, considerando que não há como prever onde irá ocorrer um deslizamento de terra. É premissa deste exemplo que nenhuma comunidade tenha prioridade para o atendimento. Na seção de análise de sensibilidade, serão feitos cenários onde nem todas as comunidades serão afetadas simultaneamente.

4.2

Levantamento de Dados

O quadro a seguir apresenta os dados obtidos e os anexos em que nos quais podem ser encontrados maiores mais detalhes. Foram utilizados dados do ano de 2010 para que houvesse uma padronização, já que o último censo realizado pelo IBGE foi neste ano.

Quadro 1: Parâmetros do modelo.

#	Parâmetro	Descrição	Anexo
1	População vulnerável	Pelo censo de 2010 do IBGE, foi possível levantar a área total de cada bairro e sua população. A partir dos dados da GEO-RIO foi levantada a área cujas edificações estão em alto risco a deslizamento.	I
2	Hospitais públicos		
2.1	Identificação dos Hospitais	Lista dos hospitais públicos da cidade do Rio de Janeiro, que realizam atendimento de emergência, bem como a quantidade de leitos hospitalares	II
2.2	Custo de novo leito	Custo para incluir novos leitos em cada hospital	X
3	Fluxo de veículos entre hospitais e comunidades		
3.3	Fluxo de pessoas	Fluxo de veículos entre cada comunidade i e cada hospital j	III
3.2	Distância e custo	Distância entre comunidade i e hospital j e custo para melhor estes arcos	IV
4	Tempo total para resgatar os feridos	Tempo de viagem de ida e volta entre cada hospital j e comunidade i e o tempo para atendimento aos feridos	VI
5	População afetada		
5.1	População que falece no início do desastre	Parcela da população vulnerável de cada comunidade i que falece após o início do desastre	V
5.2	Número de pessoas que falecem por não terem sido resgatadas a tempo	A partir da quantidade de pessoas que vive em área de risco e de quantas falecem após o início do desastre, foi calculado a parcela da população que falece por não receber atendimento a tempo.	VII

As seções 4.2.1 a 4.2.5 detalham como cada parâmetro foi obtido.

4.2.1

População Vulnerável

A partir de um estudo da GEO-RIO (2011), foram identificadas: as comunidades que são vulneráveis a riscos de deslizamento de terra, a quantidade

de edificações e a porcentagem da área destes bairros que está sob risco. Pelo último censo do IBGE (2010) foram obtidas a população e área total destes locais.

A partir destes primeiros dados foi calculada a porcentagem da população que mora em área de risco. Em cada uma destas comunidades foi definido um ponto de referência para viabilizar o cálculo do tempo de viagem entre estas e os hospitais. Para tal, foram assumidos a latitude e longitude do centroide de cada bairro, utilizando o Google Earth, apesar de não necessariamente as zonas de risco estarem localizadas nos centros. Este critério foi tomado devido a dificuldade em se obter as coordenadas de algumas das regiões vulneráveis. Estes dados podem ser observados no Anexo I.

4.2.2

Hospitais Públicos

A partir de consulta ao Cadastro Nacional de Estabelecimentos de Saúde (CNES) e a base de dados do DATASUS, foi possível obter a lista dos hospitais públicos da cidade do Rio de Janeiro, aptos a realizar atendimentos de emergência, bem como suas respectivas quantidades de leitos disponíveis em 2010. As coordenadas geográficas foram obtidas através do Google Earth. A lista de todas estas localidades pode ser visualizada no Anexo II. Deve-se notar que a quantidade de leitos de cada hospital pode mudar a cada mês. Além disto, para alguns destes hospitais não foi possível obter sua oferta de leitos em 2010, por não estarem constando na base de dados, apesar destes estabelecimentos estarem operacionais. Foram então utilizados os dados da data subsequente mais próxima disponível.

Para o custo de melhoria dos hospitais públicos (c_j), foi utilizado o estudo feito por Lemos Sá *et al.* (2015), que busca criar um método mais apurado para estimar custos de leitos em UTIs de hospitais públicos. Para incluir um leito hospitalar deve-se considerar custos com equipamentos, e materiais médicos e profissionais de saúde. Para tal, foi estipulado que cada leito custa R\$ 100.000,00. Isto porque o custo aproximado de equipamentos para monitoração de oxigênio, ressuscitação manual do tipo balão auto inflável, ventilação pulmonar, camas hospitalares, entre outros (Lemos Sá *et al.*, 2015) representa cerca de 90% deste valor. Os demais custos são: materiais médicos, embalagens para proteção de

materiais cirúrgicos, energia elétrica utilizada nos equipamentos e custos com médicos, enfermeiros e técnicos em enfermagem (Lemos Sá *et al.*, 2015). Estes dados podem ser constatados no Anexo X.

A porcentagem de melhoria nos hospitais (p_j) foi estipulada como sendo de 35% em cada hospital j , entretanto, pode ser definido valores diferentes para hospital j . Em 2010 a cidade tinha 6.320.446 habitantes e 23.409 leitos hospitalares. Segundo a AHSEB (2014) e SINMEDMS (2013), é recomendável que se tenha entre 3 a 5 leitos por cada 1.000 habitantes. Em 2010, o Rio de Janeiro tinha 3,7 leitos, desta forma, para chegar a 5 necessita-se de um acréscimo de 1,3 leitos/mil habitantes, o que levaria a um aumento de 35%. Deve ser notado que a quantidade de leitos hospitalares é usada para indicar a disponibilidade de serviços de internação. Não existe uma norma global para a quantidade de leitos hospitalares em relação à população total (*World Health Statistics*, 2014). Na seção de análise de sensibilidade serão feitos cenários para este parâmetro.

4.2.3

Fluxo de Veículos entre Hospitais e Comunidades

Entre cada comunidade i e hospital j , existe um arco que os conecta (cap_{ij}). A vazão de cada arco foi estipulada como sendo de 32 veículos por minuto. Este valor foi obtido a partir da média do volume diário de veículos das principais vias do Rio de Janeiro (CET-RIO, 2016), conforme mostra o Anexo III. Existem no caso proposto 1.806 arcos conectando as 43 comunidades i e os 42 hospitais j , onde cada um recebeu o mesmo valor de 32 veículos/min. Na seção de análise de sensibilidade, considera cenários onde o valor deste parâmetro é variado.

Para estipular o custo para aumentar o fluxo dos arcos entre cada comunidade i e hospital j (k_{ij}), foi obtido o valor de R\$ 15.400,00 por km, para conservação de uma via simples (DNIT, 2010). Assim, o custo de investimento em cada arco (i, j) foi obtido ao se multiplicar o valor R\$ 15.400,00 pela sua distância. Melhorar um arco (i, j), significa que a sua vazão de veículos por minuto será aumentada, o que se traduz em menor tempo de viagem entre a região afetada i e o hospital j . No Anexo IV é possível verificar as distâncias de cada arco, assim como o custo das suas melhorias.

4.2.4

Tempo Total para Resgatar os Feridos

A partir do aplicativo *Distance Matrix* API da Google, foi obtida a distância e tempo de viagem entre cada região afetada i e cada hospital j . Para cada arco, foi levantado o tempo com e sem ‘trânsito nos horários de 08, 12 e 18 horas. Pode se observar que cada caminho é composto por uma ou mais ruas, avenidas, viadutos, entre outros. Todos os tempos foram obtidos a partir de série histórica do Google. Em decorrência da grande quantidade de medidas obtidas, o Anexo VI apresenta uma lista parcial dos tempos de viagem destes trajetos.

Deve ser observado que o modelo admite que os tempos de viagem de ida e volta podem ser diferentes. Tal fato se deve a vários fatores, destacando-se a diferença de percursos, distâncias, horários e intensidade do trânsito.

Neste contexto, os tempos de viagem de ida (t_{1ij}) e volta (t_{2ij}) foram obtidos considerando condições de tráfego bom e intenso, em diferentes horários, resultando em pouca ou nenhuma diferença entre eles. Para o tempo de ida (t_{1ij}) – do hospital j para a comunidade i – somente em 10% dos casos é que houve diferença entre os tempos. Em 19,4% das médias foi de 1 minuto e em 60,7% foi de 2 minutos. Desta forma, foi considerado apenas o cenário pessimista obtido no horário de 18 horas.

Para o tempo de volta (t_{2ij}) – da comunidade i para o hospital j – somente em 16% dos casos é que houve diferença entre os tempos. A máxima foi de 5 minutos e representa 1,5% dos casos, em 60,7% das vezes foi de 1 minuto e 26,6% foi de 2 minutos. Desta forma, para esta situação também foi considerado apenas o cenário pessimista das 18 horas.

O tempo de resgate aos feridos (t'_{ij}) foi arbitrado como sendo um valor médio de 2 horas e foi considerado entre a chegada e partida da ambulância e mais a remoção dos afetados.

Com os dados dos tempos das viagens de ida e volta e o tempo de atendimento no local foi possível calcular o tempo total para resgatar os feridos e levá-los a um hospital público. Estes dados podem ser observados no Anexo VI.

4.2.5

População Afetada

Uma parcela da população vulnerável (di) de cada região afetada pelo desastre falece logo após o seu início (ai). Foi arbitrado que 2,0% desta população falece após o impacto inicial do desastre. Estes dados podem ser observados no Anexo V.

Parte da população que sobreviveu ao impacto poderá falecer por conta da gravidade de seus ferimentos se não for atendida a tempo (fi). Para calcular esta quantidade de pessoas, utiliza-se os parâmetros levantados, para então calcular o número de pessoas que falecem por conta do tempo para serem resgatadas (fi). Estes dados podem ser observados no Anexo VII.

O orçamento total disponível para realizar melhorias nos hospitais públicos e nos arcos foi arbitrado em R\$ 60.000.000,00. Na seção 4.4 será feita a análise de sensibilidade para este parâmetro.

4.3

Apresentação de Resultados

Para a modelagem do problema foi utilizado o software AIMMS - *Advanced Interactive Multidimensional Modeling System*, versão acadêmica 4.16.1.345 de 64 bits (AIMMS, 2016).

O modelo possui um total de 9.329 restrições, 5.588 variáveis, das quais 1.890 são inteiras, 18.527 não zeros e o solver utilizado foi o CPLEX 12.6.3.

No quadro a seguir resume as variáveis do modelo proposto e seus anexos. As seções 4.3.1 a 4.3.3 detalham os resultados obtidos em cada variável.

Outras 1.737 em decorrência da gravidade de seus ferimentos, não resistem esperar pelo resgate (f_i), o que representa uma nova perda de 2,3% de d_i . Deve-se notar que o resgate nas diferentes comunidades não se dá de maneira uniforme. Isto decorre principalmente das diferentes condições em que cada comunidade está inserida, tais como a distância e a disponibilidade de leitos nos hospitais mais próximos.

Tabela 1: População das comunidades vulneráveis antes e depois do desastre.

#	Comunidade (i)	População vulnerável (d_i)	Pessoas que falecem no início do desastre (a_i)	% da população vulnerável (a_i/d_i)	População que sobrevive início desastre ($d_i - a_i$)	Pessoas que não resistem esperar por atendimento (f_i)	% da população vulnerável (f_i/d_i)	População sobrevivente ($d_i - a_i - f_i$)
		Anexo I	Anexo V	Anexo V	Anexo V	Anexo VII	Anexo VII	Anexo VII
	População Total	75.015	1.499	2,0%	73.516	1.737	2,4%	71.779

4.3.2

Hospitais públicos

Das 71.779 pessoas que resistiram ao impacto inicial do desastre e aguardam resgate ($d_i - a_i - f_i$), somente uma parcela destas conseguirá ser atendida em um dos 42 hospitais, por conta da baixa disponibilidade de leitos. A Figura 6 mostra como estes hospitais estão distribuídos pela cidade (*Google Maps*). É interessante observar que os hospitais estão mais distribuídos pela cidade, ao passo que os bairros aparecem mais concentrados. Observa-se ainda que alguns hospitais estão consideravelmente distantes de todos os bairros, sendo os três que mais se destacam: (1) Hospital Estadual Pedro II em Santa Cruz, (2) Hospital Rocha Faria em Campo Grande e (3) Hospital Estadual Eduardo Rabello em Senador Vasconcellos. Estes hospitais só receberão fluxo de pacientes, caso os mais próximos aos locais de acidentes não comportem receber mais vítimas.

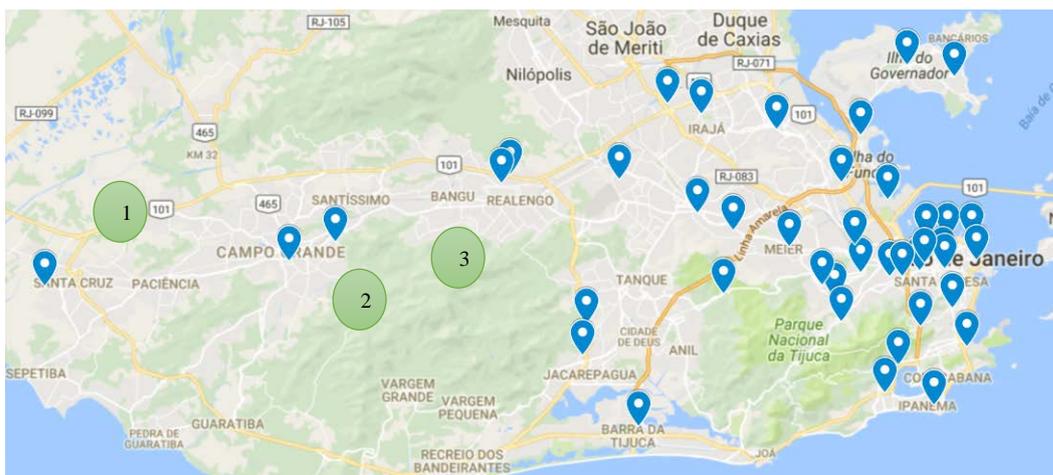


Figura 6: Hospitais do RJ capacitados para realizar atendimento de emergência (Google Maps).

Como pode ser observado na Tabela 2, o total de leitos nos hospitais públicos do Rio de Janeiro em 2010 era de 9.421, o que seria suficiente para atender apenas a 13% da população sobrevivente ($d_i - a_i - f_i$). Entretanto, nem toda a capacidade destes hospitais estaria disponível, uma vez que, parte dela está comprometida com pacientes não correlatos ao desastre. Devido à imprevisibilidade da ocorrência deste tipo de evento, não é possível a priori remanejar pacientes entre unidades.

Tabela 2: Quantidade de leitos dos hospitais públicos.

#	Hospital (j)	Número de leitos	Leitos disponíveis (q_j)	Aumento número de leitos (L_j)	Nova capacidade de leitos ($q_j + L_j$)	Custo por hospital
		Anexo II	Anexo II	Anexo X	Anexo X	Anexo X
	Total de leitos	9.421	1.607	543	2.150	R\$ 54.300.000

O aumento da oferta de leitos para todos os hospitais ficou em torno de 35% da sua capacidade disponível (q_j), que era de 1.607. O orçamento proposto para este cenário foi de R\$ 60.000.000,00 (b), que é suficiente para aumentar a capacidade de todos os hospitais, orçada em R\$ 54.300.000,00 ($c_j * q_j$), conforme pode ser observado na Tabela 2. Este valor foi obtido ao multiplicar o aumento do número de leitos de cada hospital (L_j) pelo custo de 1 unidade de leito (c_j), avaliado em R\$ 100.000,00. A nova capacidade, de 2.150 ($q_j + L_j$), representa um incremento de 25% sobre a quantidade de leitos original (q_j), e corresponde a 3,0% da população sobrevivente. Este aumento na capacidade de leitos pode

parecer pequeno. No entanto, a probabilidade de ocorrência de um evento simultâneo nos 43 bairros vulneráveis a deslizamento de terra, é extremamente baixa. Deste modo, em uma situação real, haveria uma demanda muito menor por leitos.

4.3.3

Fluxo de veículos entre hospitais e comunidades

Cada uma das 43 comunidades vulneráveis está conectada a cada um dos 42 hospitais, através de 1.806 arcos.

Quando se fala na melhoria do fluxo de veículos (X'_{ij}) em uma via, isto significa aumentar a quantidade de veículos por minuto que por ali trafegam. Este incremento não necessariamente se traduz através do incremento do número de faixas, mas também pela remoção de buracos, sinalização mais eficiente, mudança de sentido de ruas, desentupimento de bueiros, entre outros.

No caso em questão, a melhoria nas vias (X'_{ij}) somente se deu entre 1 comunidade e 3 hospitais, conforme pode ser visto na Figura 7 (*Google Maps*). Os pontos em vermelho representam hospitais e os em azul, as comunidades vulneráveis. As rotas que receberam melhorias são:

- Rota 1 – Santa Casa da Misericórdia do RJ e o bairro de Vila Isabel;
- Rota 2 - Hospital São Francisco na Providencia de Deus e o bairro de Vila Isabel;
- Rota 3 - Hospital Adventista Silvestre e o bairro de Vila Isabel.

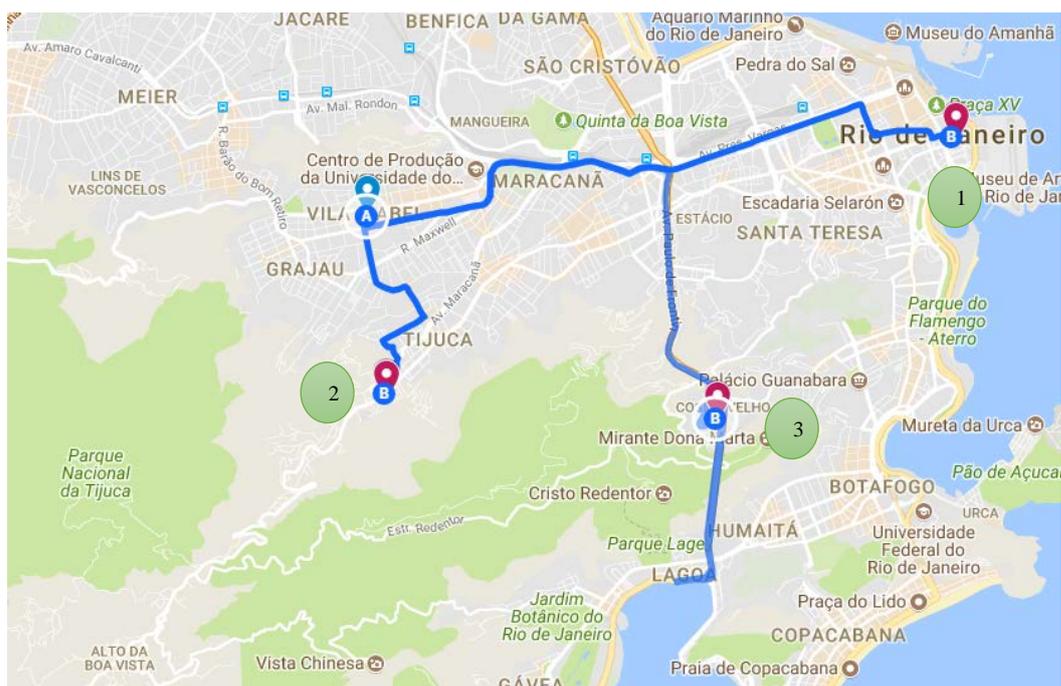


Figura 7: Vias que receberam investimentos (Google Maps).

No total, apenas 3 vias receberam melhorias a um custo combinado de R\$ 5.622.540. O custo (k_{ij}) de cada via foi estimado ao multiplicar o aumento do fluxo (X'_{ij}), pela distância do arco em quilômetros e pelo custo de restauração da via orçado em R\$ 15.400,00/km.

A Tabela 3 resume as principais características destas rotas. Para as demais regiões afetadas, não houve necessidade de investimentos nas vias, pois a capacidade atual é suficiente para atender a disponibilidade de leitos. Caso houvesse uma maior oferta de leitos, poderia haver a necessidade de realizar investimentos em mais vias.

Tabela 3: Custo do aumento da capacidade das vias.

Rota	Santa Casa da Misericórdia do RJ	H. São Francisco na Providencia de Deus	H. Adventista Silvestre	Custo Total
Vila Isabel	R\$ 777.700,00	R\$ 877.800,00	R\$ 3.967.040,00	R\$ 5.622.540,00

4.3.4

População afetada

Das comunidades afetadas, apenas 35 tiveram fluxo de pessoas (X_{ij}) para os hospitais, conforme pode ser visto no Anexo VIII. Pela Tabela 4, pode ser observado que 7 comunidades foram quase que totalmente atendidas.

Tabela 4: Comunidades totalmente atendidas.

#	Comunidade (i)	População sobrevivente ($d_i - a_i - f_i$)	População atendida	Porcentagem atendida
1	Freguesia (Jacarepaguá)	33	30	90,9%
2	Inhaúma	30	27	90,0%
3	Jacarepaguá	23	21	91,3%
4	Laranjeiras	327	314	96,0%
5	Madureira	54	50	92,6%
6	Santo Cristo	15	14	93,3%
7	Tanque	21	19	90,5%

No outro extremo, tem-se 8 comunidades onde não houve atendimento em um primeiro momento, vide Tabela 5. Isto se deve primariamente à falta de leitos.

Tabela 5: Comunidades não atendidas.

#	Comunidade (i)	População sobrevivente ($d_i - a_i - f_i$)
1	Botafogo	254
2	Complexo do Alemão	11627
3	Copacabana	1936
4	Cosme Velho	136
5	Olaria	599
6	Piedade	55
7	Tijuca	7214
8	Tomas Coelho	593

A quantidade de pessoas que não puderam ser atendidas ($\sum F_i$) foi de 69.629, que é o valor que a função objetivo procura minimizar. Estas pessoas representam cerca de 92% da população original (d_i) e 97% da população à espera de socorro ($d_i - a_i - f_i$).

Em uma situação de crise extrema, pode haver indisponibilidade dos serviços de emergência – como ambulâncias e leitos hospitalares – porque estas

infraestruturas, não estão dimensionadas para situação agravadas, como a ocorrência de 43 desastres concomitantes.

Além disto, nem toda a população afetada irá carecer do mesmo tipo de tratamento. Muitas delas podem ter sofrido apenas ferimentos leves, e, portanto, não necessitam de internação. Daqueles que precisam, alguns podem ser liberados após algumas horas em observação nos hospitais, enquanto apenas uma parcela dos sobreviventes precisaria permanecer internado por um longo período. Outro aspecto diz respeito aos pacientes que já estavam em tratamento por assuntos não correlatos ao desastre. Parte destas pessoas pode estar em processo de liberação, o que disponibilizaria vagas para as vítimas que aguardam leito em algum hospital.

É importante que o universo das pessoas que não foram atendidas em um primeiro momento ($\sum F_i$), não seja encarado como óbitos ou que elas não receberão nenhum tipo de socorro, pois estas, diferentemente da parcela que não resistiu esperar pelo atendimento (f_i), as $\sum F_i$ conseguirão ser atendidas, mesmo que não seja da forma ideal. Como ocorre em países propensos a desastre de largas proporções, pontos de apoio são disponibilizados para atender as vítimas, de forma que não haja a dependência unicamente de hospitais para tratar os feridos. Portanto, as 69.629 vítimas de maneira nenhuma devem ser encaradas como casualidades, a priori.

Em um cenário mais provável, onde apenas uma parcela de d_i requer cuidado, ou seja, apenas 1 ou poucas comunidades foram afetadas por um desastre, pode ser que haja soluções mais eficazes que apenas aumentar a quantidade de leitos dos hospitais. Por exemplo, pode-se estudar a construção de novos hospitais de média a alta capacidade, de forma a melhor distribuir a carga de pacientes, ou combinar esta solução com o aumento da capacidade dos existentes.

4.4

Análise de Sensibilidade

Nesta seção é apresentada a análise de sensibilidade que objetiva verificar como mudanças nos parâmetros afeta o resultado modelado. Serão feitas variações para os seguintes parâmetros:

1. Orçamento total (b) – Foi estipulado como sendo R\$ 60.000.000,00 inicialmente, onde todas as 43 comunidades eram impactadas ao mesmo tempo. Esta análise busca verificar como os investimentos em hospitais e vias serão distribuídos, bem como identificar se há variações significativas na quantidade de pessoas atendidas, quando há mudança no orçamento. Para tanto, foram realizados cenários com incrementos e decréscimos de R\$ 5.000.000,00 em relação ao valor inicial.
2. Capacidade original da via (cap_{ij}) – A capacidade original foi estipulada como sendo de 32 veículos por minuto. A análise de sensibilidade para esta situação busca verificar o comportamento do modelo quando a capacidade do arco varia em 5 unidades abaixo e acima do valor original.
3. Número de habitantes em situação vulnerável no bairro (d_i) – A situação proposta considerava todos os 43 bairros. A análise de sensibilidade para este parâmetro considera cenários onde: (1) Apenas a comunidade mais populosa; (2) Todas as comunidades com menos de 1.000 habitantes em situação vulnerável e (3) Duas comunidades com cerca de 1.000 habitantes.
4. Porcentagem do aumento do número de leitos disponíveis (p_j) – A quantidade total de leitos inicial era de 1.607 leitos distribuídos entre 42 hospitais. A porcentagem de aumento do número de leitos foi estipulada em 35%. Uma análise é realizada para este parâmetro, foram criados cenários, aumentando sucessivamente a oferta inicial de leitos em 5,0%, para investigar como o modelo se comporta. Devido à escassez de leitos, não foram cogitados decréscimos.

Não foi feita análise de sensibilidade para os parâmetros de custos para aumentar o número de leitos e fluxo de veículos nas vias, pois ao variar o orçamento total se está variando estes custos. O mesmo ocorre para a população que falece no início do desastre, quando se varia o número de habitantes em situação vulnerável.

4.4.1

Varição do Orçamento Total

Na Tabela 6, são mostradas as variações realizadas no orçamento. No cenário original, foram criados 543 leitos adicionais e 5 vias receberam investimentos. Foram atendidas 2.150 pessoas, enquanto 69.629 não puderam ser levadas aos hospitais em um primeiro momento. O custo dos leitos ficou em R\$54.300.000,00 e das vias em R\$ 5.622.540,00. A quantidade inicial de leitos era de 1.607, o fluxo de veículos era de 32, para cada caso e a quantidade de comunidades afetadas foi de 43.

Tabela 6: Análise de sensibilidade do orçamento total.

#	Orçamento	População Atendida	População não atendida	Diferença para cenário original	Aumento do número de leitos	Investimento em hospitais	Investimento nas vias
1	R\$ 25.000.000,00	1.857	69.922	293	250	R\$25.000.000,00	R\$ 0,00
2	R\$ 30.000.000,00	1.907	69.872	243	300	R\$30.000.000,00	R\$ 0,00
3	R\$ 35.000.000,00	1.957	69.822	193	350	R\$35.000.000,00	R\$ 0,00
4	R\$ 40.000.000,00	2.007	69.772	143	400	R\$40.000.000,00	R\$ 0,00
5	R\$ 45.000.000,00	2.057	69.722	93	450	R\$45.000.000,00	R\$ 0,00
6	R\$ 50.000.000,00	2.107	69.672	43	500	R\$50.000.000,00	R\$ 0,00
7	R\$ 55.000.000,00	2.150	69.629	0	543	R\$54.300.000,00	R\$614.460,00
8	R\$ 65.000.000,00	2.150	69.629	0	543	R\$54.300.000,00	R\$10.595.200,00
9	R\$ 70.000.000,00	2.150	69.629	0	543	R\$54.300.000,00	R\$15.282.960,00

Na Tabela 6, é possível perceber que até R\$ 50.000.000,00 de orçamento o investimento foi aplicado somente nos hospitais, daí em diante, também nas vias devido a limitação do crescimento de leitos. No entanto, somente a partir de R\$ 55.000.000,00 de investimentos é que foi possível atender a mesma quantidade de pessoas do cenário original. Em orçamentos inferiores a este, não é possível a criação de 543 novos leitos.

A priori não seriam necessários investimentos em vias uma vez que a vazão de 32 veículos por minuto, em 1.806 arcos é suficiente para viabilizar o transporte das vítimas, ocupando desta forma todos os leitos disponíveis.

4.4.2

Varição da Capacidade Original da Via

A Tabela 7 reproduz a variação da capacidade das vias, em 5 unidades em relação à capacidade de 32 veículos por minuto no cenário original. O orçamento disponível para cada caso foi de R\$ 60.000.000,00, a quantidade de leitos inicial era de 1.607 e de comunidades afetadas de 43.

Tabela 7: Análise de sensibilidade da Capacidade Original da Via.

#	Capacidade da via	Aumento do número de leitos	Investimento nas vias	Quantidade de vias melhoradas	Aumento da vazão da via (quantidade de vias)
1	6	543	R\$5.573.260	13	2 (13)
2	11	543	R\$5.667.200	13	5 (13)
3	16	543	R\$5.664.120	7	7 (6), 2 (1)
4	21	543	R\$5.544.000	6	10 (3), 7 (3)
5	26	543	R\$5.545.540	7	12 (3), 10 (1), 3 (1), 2 (2)
6	36	543	R\$5.565.560	4	17 (2), 10 (1), 3 (1)
7	41	543	R\$5.661.040	2	20 (1), 12 (1)
8	46	543	R\$5.653.340	5	13 (1), 9 (1), 6 (1), 3 (1), 2 (1)

Observa-se pela Tabela 7 que os investimentos nos hospitais resultaram todos em 543 novos leitos, que é o incremento máximo possível. O custo de melhoria nas vias foi semelhante em todos os cenários, o que muda de um cenário para o outro é a quantidade de vias que receberam investimentos. A ligeira variação nos investimentos nas vias é decorrente da diferença do comprimento de cada uma e do aumento da vazão do arco.

Desta forma, modificar a vazão das vias não teve influência significativa no resultado do modelo. Isto é decorrente da quantidade de leitos ser o principal gargalo para a melhoria no atendimento à população, e por haver uma grande quantidade de vias para escoar a população até os hospitais.

4.4.3

Varição da População Vulnerável

A Tabela 8 registra três cenários variando quantidade de comunidades afetadas para demonstrar como o modelo se comporta nestes casos. O orçamento disponível para cada um foi de R\$ 60.000.000,00 e o fluxo de veículos foi de 32 por minuto.

Tabela 8: Análise de sensibilidade da População Vulnerável.

#	Comunidade	População vulnerável	População Atendida	População não atendida	Aumento do número de leitos	Investimento em hospitais	Investimento nas vias
1	Rocinha	17.865	1.519	16.343	115	R\$11.500.000,00	R\$48.442.240,00
2	Bairros com menos de 1.000 habitantes	7.453	2.150	5.303	543	R\$54.300.000,00	R\$5.616.380,00
3	Mangueira e Penha Circular	2.264	2.101	163	494	R\$49.400.000,00	R\$10.233.300,00

No primeiro cenário houve um investimento maior em vias do que em hospitais. Isto aconteceu porque neste caso só existem 42 vias para transportar as vítimas aos hospitais. Com o saldo do orçamento, o modelo criou mais leitos nos hospitais. Nota-se que alguns hospitais ficaram com capacidade ociosa, pois era possível enviar mais pessoas, uma vez que o limite da vazão das vias foi atingido.

O segundo cenário considera todas as comunidades que possuem menos 1.000 habitantes em situação de risco, totalizando 15. Neste caso, como existem 630 caminhos possíveis entre os hospitais e estes bairros, a falta de leitos é a maior restrição, desta forma, o modelo priorizou investimentos nos hospitais ao invés das vias.

No entanto, o modelo para otimizar o atendimento à população aplicou cerca de 20% do orçamento em melhorias de vias e o restante no aumento da quantidade de leitos. Neste cenário não houve a dominância total de um dos dois parâmetros.

4.4.4

Varição da Porcentagem do Número de Leitos

A Tabela 9 exibe quatro cenários obtidos pela variação da porcentagem do aumento do número de leitos. O orçamento disponível foi de R\$ 60.000.000,00, a quantidade original de 1.607 leitos, o fluxo de veículos foi de 32 por minuto e a quantidade de comunidades afetadas foi de 43.

Tabela 9: Análise de sensibilidade da Porcentagem do Aumento do Número de Leitos.

#	Porcentagem de aumento de leitos	População atendida	População não atendida	Diferença para cenário original	Aumento do número de leitos	Investimento em hospitais	Investimento nas vias
1	36,0%	2.167	69.612	17	560	R\$56.000.000,00	R\$3.831.520,00
2	38,0%	2.196	69.583	46	589	R\$58.900.000,00	R\$974.820,00
3	40,0%	2.207	69.572	57	600	R\$60.000.000,00	R\$ 0,00
4	42,0%	2.207	69.572	57	600	R\$60.000.000,00	R\$ 0,00

A porcentagem de melhoria dos hospitais foi estipulada inicialmente em 35%. Ao variá-la progressivamente em 5% sucessivamente, percebe-se que o modelo continua a priorizar a criação de leitos a investimentos em vias. Este comportamento é esperado, uma vez que a quantidade de leitos continua sendo baixa frente ao número de vítimas, já o número de arcos é suficiente.

A partir do terceiro cenário, o modelo realizou somente investimentos nos hospitais. Isto ocorreu porque o orçamento de R\$ 60.000.000,00 é insuficiente para a melhora todos os hospitais, de outra forma, teriam sido criados mais 26 leitos e o restante do orçamento seria destinado para vias. Se considerado um cenário onde houvesse uma/ poucas comunidades, a falta de leitos poderia não ser a única restrição, acarretando assim o maior equilíbrio entre os investimentos em hospitais e vias.

Conclusões e Recomendações

Praticamente, toda grande metrópole possui um trânsito intenso em suas principais vias. Isso se traduz em congestionamentos, o que dificulta a locomoção através da cidade. Quando um desastre ocorre, o local do acidente pode ficar intransponível, mas o restante da cidade continua a funcionar. Isto significa que se já havia congestionamento em uma situação normal, durante a ocorrência de um desastre, a situação se agravará com vias interrompidas, desviadas e sobrecarregadas por conta do aumento do fluxo de veículos humanitários.

Para que não haja demora no atendimento às vítimas, e considerando que desastres naturais ou aqueles causados por ações humanas são virtualmente imprevisíveis, deve ser criado um método para priorizar os investimentos antes da ocorrência de desastres nas regiões onde existam pessoas morando em situação vulnerável. Isto possibilita que autoridades competentes aloquem recursos de forma consciente e até mesmo proativamente, ao invés de o fazerem de forma reativa, após a ocorrência de um desastre. A premissa básica proposta consiste em executar obras de melhorias em infraestruturas, pois é mais barato do que reconstruí-las após um desastre, portanto a utilização deste modelo fica associada às fases de mitigação e reconstrução. A primeira por conta da preparação para um evento futuro e a segunda, para a reconstrução de maneira mais resiliente.

O modelo proposto permite que sejam alocados recursos em hospitais e vias públicas. Em grandes centros urbanos, podem ocorrer concentração de leitos hospitalares em algumas partes da cidade, enquanto em outras com população com baixo poder aquisitivo há uma oferta menor. Também pode ocorrer que existam poucos leitos para atender a população de forma adequada naquela cidade, neste caso, em uma situação de crise isto se torna ainda mais crítico. Para tal, o modelo possibilita a indicação de investimentos em hospitais obedecendo critérios que podem ser parametrizados de acordo com as necessidades em questão.

Para validar a relevância deste modelo, foi considerada uma situação onde as 43 comunidades vulneráveis da cidade do Rio de Janeiro eram impactadas ao

mesmo tempo, o que se caracteriza como uma situação de catástrofe. A partir daí, foi feita a análise de sensibilidade considerando-se diferentes situações de desastres, nas quais se variou o orçamento total disponível, a capacidade original das vias, a quantidade de localidades afetadas e a porcentagem de melhoria dos hospitais. Isto possibilitou a verificação do comportamento do modelo, que em princípio não prioriza como os investimentos devem ser alocados, mas busca detectar onde há maior restrição ao fluxo de pessoas. No caso onde todas as comunidades são afetadas ao mesmo tempo, o modelo prioriza aos hospitais, pois há pouca quantidade de leitos, quando comparada com as vias. Por outro lado, em uma situação oposta à anterior onde haja apenas uma comunidade afetada, é priorizado o investimento nas vias sobre os leitos, porque a restrição neste caso é a quantidade de vias.

Desta maneira, para possibilitar que organizações humanitárias cheguem ao local afetado, as ruas no entorno devem estar operacionais e assim como as ruas que conectam aos hospitais, devem estar livres de trânsito, para que o atendimento as vítimas ocorra o mais rápido possível. Para tal, talvez seja necessário que a vazão de vias críticas seja aumentada, o que se traduz em um menor tempo de viagem, ou que recebam investimentos para que não fiquem intransponíveis em situações caóticas como em uma grande chuva.

A alocação criteriosa de recursos financeiros possibilita em uma situação de não crise, benefícios a toda a população. Os investimentos em ruas propiciam menores tempos de viagem, o que se traduz em mais conforto para os motoristas, passageiros e redução de custos para as empresas, como por exemplo, combustível e horas extras. Outro benefício é o aumento do número de leitos, pois diversos grandes hospitais encontram-se com quase toda sua capacidade ocupada. Um incremento na oferta de leitos beneficia não só a população da cidade, mas como de municípios vizinhos, cujos cidadãos muitas vezes preferem ser atendidos em hospitais de renome e mais capacitados.

Como observação final, deve ser evidenciado que existem diversos estudos similares ao proposto neste trabalho. São modelos que podem ser determinísticos ou estocásticos, podendo atuar tanto nas fases de resposta como de mitigação. No entanto, não foi identificado na literatura não existir um modelo similar ao que foi apresentado nesta dissertação, no que tange investimentos em vias e hospitais.

5.1

Propostas para Estudos Futuros

Algumas simplificações que foram assumidas neste modelo podem afetar o processo de tomada de decisão na hora de alocar investimentos, as que mais se destacam são:

- Expandir o conceito de grafo bipartido direcionado para grafo direcionado completo. Com isto seria possível mapear a rota real entre uma localidade afetada e os hospitais que serão responsáveis pelo atendimento. Desta forma, seria possível verificar se existem ruas e avenidas, entre outras, que podem ser compartilhadas em mais de uma rota. Sendo este o caso, poderiam ser feitos investimentos em apenas uma parte delas, tornando mais eficiente a alocação de recursos;
- Considerar que nem todas as ambulâncias que partem do hospital irão realizar atendimentos, como também suas quantidades são limitadas. Além disto, pode ser considerado no modelo o processo de preparação da ambulância e da sua equipe para um novo atendimento. Pode haver situações onde parte da equipe das ambulâncias não está em condições de realizar um novo atendimento, por exemplo trabalharam muitas horas e, portanto, devem ser substituídas;
- Estabelecer a possibilidade de criação de pontos de apoio, na eventualidade da capacidade disponível dos hospitais não ser suficiente para atender a totalidade dos feridos, ou de não haver caminho disponível entre a localidade afetada e parte dos hospitais. Considerar o transporte das pessoas que não estão feridas, como por exemplos, pessoas que estão apenas desalojadas.
- Considerar as incertezas na tomada de decisão, tornando o modelo estocástico.
- Considerar as diferentes especializações dos hospitais.

Referências Bibliográficas

AHMADI, M.; SEIFI, A.; TOOTOONI, B. A humanitarian logistics model for disaster relief operation considering network failure and standard relief time: A case study on San Francisco district. **Transportation Research Part E**, v. 75, p. 145-163, 2015.

AIMMS. A One-Hour Tutorial for Beginners. 2016. Disponível em: https://download.aimms.com/aimms/download/manuals/AIMMS_tutorial_beginners.pdf. Acesso em: 03 de Janeiro de 2016.

AKSU, D.T.; OZDAMAR, L. A mathematical model for post-disaster road restoration: Enabling accessibility and evacuation. **Transportation Research Part E**, v. 61, p. 56-67, 2014.

ALEM, D.; CLARK, A.; MORENO, A. Stochastic network models for logistics planning in disaster relief. **European Journal of Operational Research**, v. 255, n. 1, p. 187-206, 2016.

ALTAY, N.; GREEN III, W.G. OR/MS research in disaster operations management. **European Journal of Operational Research**, v. 175, p. 475-493, 2006.

AHSEB. Associação de Hospitais e Serviços de Saúde do Estado da Bahia. Disponível em: <http://www.ahseb.com.br/segundo-oms-ideal-e-ter-de-3-a-5-leitos-para-cada-mil-habitantes-no-brasil-indice-medio-e-de-24/>. Acessado em: 03 de Maio de 2017.

CET-RIO - volume diário de veículos das principais vias do município do rio de janeiro (2016). Acessado em: 19 de março de 2017.

CNES. Cadastro Nacional de Estabelecimentos de Saúde (2010). Disponível em: <http://cnes.datasus.gov.br/>. Acesso em: 03 de Março de 2017.

CHRISTOPHER, M.; TATHAM, P. Humanitarian Logistics: Meeting the Challenge of Preparing for and Responding to Disasters. Kogan Page, 2011.

COZZOLINO, A. Humanitarian logistics and supply chain management. In: Humanitarian Logistics. **Springer Berlin Heidelberg**, 2012. p. 5-16.

DATASUS, Departamento de Informática do Sistema Único de Saúde. Disponível em: <http://sistemas.saude.rj.gov.br/tabnet/deftohtm.exe?sihsus/intern.def>. Acesso em: 03 de março de 2017.

DEFESA CIVIL. Matriz de Atividades e Responsabilidades. 2013. Disponível em: http://www.petropolis.rj.gov.br/dfc/phocadownload/plano_de_contingencia/desliz

[amentos_inundacoes/matriz_de_responsabilidades.pdf](#). Acesso em: 17 de maio de 2017.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2010). Disponível em: <http://www.dnit.gov.br/custos-e-pagamentos/custo-medio-gerencial>. Acessado em: 14 de abril de 2016.

EDRISSI, A.; POORZAHEDY, H.; NASSIRI, H.; NOURINEJAD, M. A multi-agent optimization formulation of earthquake disaster prevention and management. **European Journal of Operational Research**, v. 229, p. 261-275, 2013.

EDRISSI, A.; NOURINEJAD, M.; ROORDA, M. J. Transportation network reliability in emergency response. **Transportation Research Part E**, v. 80, p. 56-73, 2015.

EURO. The Association of European Operational Research Societies. Disponível em: <https://www.euro-online.org/web/pages/301/or-and-euro>. Acessado em: 09 de Agosto de 2017.

FEMA. Federal Emergency Management Agency. Disponível em: <https://search.usa.gov/search?utf8=%E2%9C%93&affiliate=fema&query=disaster+life+cycle&commit=GO>. Acessado em: 09 de Agosto de 2017.

GALINDO, G.; BATTÀ, R. Review of recent developments in OR/MS research in disaster operations management. **European Journal of Operational Research**, v. 230, p. 201-211, 2013.

GEO-RIO. Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro (2011). Disponível em: <http://www.rio.rj.gov.br/web/smo/exibeconteudo?article-id=1438413>. Acessado em: 27 de novembro de 2016.

GEO-RIO. Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro (2011). Inventário de Risco – Estimativa de Edificações em Áreas de Alto e Médio Risco.pdf. Acessado em: 27 de novembro de 2016.

GONÇALVES, P. Balancing provision of relief and recovery with capacity building in humanitarian operations. **Operations Management Research**, v. 4, n. 1-2, p. 39-50, 2011.

GOOGLE MAPS DISTANCE MATRIX. Disponível em: <https://developers.google.com/maps/documentation/javascript/distancematrix?hl=pt-br>. Acessado em: 11 de março de 2017.

GOOGLE EARTH PRO. Disponível em: <https://www.google.com/earth/download/gep/agree.html>. Acessado em: 10 de janeiro de 2017.

GOOGLE MAPS. Disponível em: <https://www.google.com.br/maps>. Acessado em: 17 de maio de 2017.

GÖSLING, H.; GELDERMANN, J. A framework to compare OR models for humanitarian logistics. **Procedia Engineering**, v. 78, p. 22-28, 2014.

HOLGUÍN-VERAS, J.; JALLER, M.; VAN WASSENHOVE, L; PÉREZ, N.; WACHTENDORF, T. On the unique features of post-disaster humanitarian logistics. **Journal of Operations Management**, v. 30, n. 7, p. 494-506, 2012.

HOLGUÍN-VERAS, J.; TANIGUCHIB, E.; JALLER, M.; AROS-VERA, F.; FERREIRA, F.; THOMPSON, R.G. The Tohoku disasters: Chief lessons concerning the post disaster humanitarian logistics response and policy implications. **Transportation research part A: policy and practice**, v. 69, p. 86-104, 2014.

HOYOS, M.Q.C.; MORALES, R.S.; AKHAVAN-TABATABAEI, R. OR models with stochastic components in disaster operations management: A literature survey. **Computers & Industrial Engineering**, v. 82, p. 183-197, 2015.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2010). Disponível em: <http://censo2010.ibge.gov.br/>. Acesso em: 06 de fevereiro de 2017.

IFRC. International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies. Disponível em: <http://www.ifrc.org/en/what-we-do/disaster-management/about-disasters/what-is-a-disaster/>. Acessado em: 09 de Agosto de 2017.

KOVÁCS, G.; SPENS, K.M. Humanitarian logistics in disaster relief operations. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, v. 37, p. 99-114, 2007.

KOVÁCS, G.; SPENS, K. Identifying challenges in humanitarian logistics. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, v. 39, n. 6, p. 506-528, 2009.

KUNZ, N.; REINER, G. A meta-analysis of humanitarian logistics research. **Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management**, v. 2, p. 116-147, 2012.

LEIRAS, A.; DE BRITO JR, I.; PERES, E.Q.; BERTAZZO, T.R.; YOSHIKAZI, H.T.Y. Literature review of humanitarian logistics research: trends and challenges. **Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management**, v. 4, n. 1, p. 95-130, 2014.

LEMOS SÁ, C.A.; ROCHA, J.S.; ALMEIDA, S.F. Análise de Custo-Leito de UTI Hospitalar. **Simpósio Internacional de Gestão de Projetos, Inovação e sustentabilidade**, 2015.

MCENTIRE, D.A. Issues in disaster relief: progress, perpetual problems and prospective solutions. **Disaster Prevention and Management: An International Journal**, v. 8, n. 5, p. 351-361, 1999.

NOVAK, D.C.; SULLIVAN, J.L. A link-focused methodology for evaluating accessibility to emergency services. **Decision Support Systems**, v. 57, p. 309-319, 2014.

ÖZDAMAR, L.; AKSU, D.T.; ERGÜNEŞ, B. Coordinating debris cleanup operations in post disaster road networks. **Socio-Economic Planning Sciences**, v. 48, n. 4, p. 249-262, 2014.

SCIENCE OF BETTER. Operations Research: The Science of Better. Disponível em: <http://www.scienceofbetter.org/what/index.htm>. Acessado em: 09 de Agosto de 2017.

SINMEDMS. Sindicato dos Médicos de Mato Grosso do Sul. Disponível em: <http://www.sinmedms.org.br/noticia/leit-os-no-brasil- ficam-abaixo-do-recomendado-pela-oms>. Acessado em: 01 de maio de 2016.

THOMAS, A.S.; KOPCZAK, L.R. From logistics to supply chain management: the path forward in the humanitarian sector. **Fritz Institute**, 2005.

TOMASINI, R.C.M.; VAN WASSENHOVE, L.N. From Preparedness to Partnerships: Case Study Research on Humanitarian Logistics. **International Transactions in Operational Research**, v. 16, p. 549-559, 2009.

VAN WASSENHOVE, L.N.; PEDRAZA MARTINEZ, A.J. Using OR to adapt supply chain management best practices to humanitarian logistics. **International Transactions in Operational Research**, v. 19, n. 1-2, p. 307-322, 2012.

VITORIANO, B.; DE JUAN, J.M.; RUAN, D. Decision aid models for disaster management and emergencies. **Springer Science & Business Media**, 2013.

WORLD HEALTH STATISTICS. World Health Statistics 2014 Indicator compendium. Disponível em: http://www.who.int/gho/publications/world_health_statistics/whs2014_indicatorcompendium.pdf. Acessado em: 23 de julho de 2016.

YI, P.; GEORGE, S.K.; PAUL, J.A.; LIN, L. Hospital capacity planning for disaster emergency management. **Socio-Economic Planning Sciences**, v. 44, p. 151-160, 2010.

Anexo I

1. Tabela da população vulnerável:

Os dados desta tabela são utilizados em todas as expressões do modelo.

Tabela 10: Bairros do Rio de Janeiro com risco de deslizamento (GEORIO, 2011; IBGE, 2011)

	Comunidade (i)	Edificações alto risco	Área total (ha)	Latitude	Longitude	População total do bairro	População vulnerável (d _i)
1	Andaraí	703	10,77	-22,92609	-43,24871	39.365	3.130
2	Botafogo	150	5,47	-22,95113	-43,18095	82.890	264
3	Brás de pina	75	4,85	-22,83324	-43,30222	59.222	54
4	Catumbi	115	13,02	-22,91990	-43,19773	12.556	919
5	Complexo do Alemão	2.510	55,75	-22,85935	-43,27549	69.143	12.089
6	Copacabana	265	9,66	-22,97003	-43,18687	146.392	2.013
7	Cosme velho	130	2,80	-22,94119	-43,20247	7.178	142
8	Engenho da Rainha	75	6,97	-22,86520	-43,29404	26.659	200
9	Engenho novo	810	11,60	-22,90286	-43,26842	42.172	2.221
10	Estácio	315	12,21	-22,91753	-43,20500	17.189	463
11	Freguesia (Jacarepaguá)	40	4,50	-22,93498	-43,33606	70.511	33
12	Gamboa	260	10,22	-22,89330	-43,19083	13.108	451
13	Grajau	145	6,36	-22,92381	-43,25903	38.671	261
14	Inhaúma	10	4,39	-22,87345	-43,28179	45.698	30
15	Ipanema	40	6,49	-22,98481	-43,19861	42.743	80
16	Itanhaga	340	7,27	-22,98671	-43,30552	38.415	212
17	Jacarepaguá	71	6,70	-22,96826	-43,39071	157.326	23
18	Laranjeiras	105	4,51	-22,93319	-43,18473	45.554	327
19	Leme	140	3,46	-22,96072	-43,16888	14.799	639
20	Lins de Vasconcelos	1.810	15,88	-22,91289	-43,28456	37.487	6.069
21	Madureira	58	1,22	-22,87256	-43,33636	50.106	54
22	Mangueira	445	13,95	-22,90548	-43,23409	17.835	1.198
23	Olaria	275	1,14	-22,84865	-43,26678	57.514	644
24	Penha	70	4,77	-22,83086	-43,26982	78.678	177
25	Penha Circular	885	1,35	-22,83416	-43,28535	47.816	1.235
26	Piedade	55	4,84	-22,89166	-43,31075	43.378	59
27	Pilares	545	17,92	-22,88145	-43,29349	27.250	1.393
28	Praça seca	1.475	3,82	-22,89699	-43,35169	64.147	2.944
29	Rio Comprido	1.670	5,76	-22,92524	-43,20534	43.764	2.657
30	Rocinha	1.675	86,50	-22,98791	-43,24800	69.356	18.574

31	Sampaio	95	3,51	-22,89931	-43,26090	10.895	121
32	Santa Teresa	200	1,44	-22,91913	-43,19078	40.926	206
33	Santo Cristo	20	0,91	-22,89960	-43,20156	12.330	15
34	São Cristóvão	265	9,30	-22,89825	-43,21890	26.510	145
35	Tanque	25	8,33	-22,91803	-43,36103	37.856	21
36	Tijuca	2.180	1,83	-22,93259	-43,24104	163.805	7.501
37	Tomas Coelho	240	1,47	-22,86837	-43,30443	22.676	638
38	Vaz Lobo	330	9,30	-22,85751	-43,32935	15.167	1.160
39	Vicente de Carvalho	120	32,52	-22,85584	-43,31578	24.964	594
40	Vidigal	620	2,09	-22,99391	-43,23584	12.797	788
41	Vila Cosmos	190	9,96	-22,85378	-43,30355	18.274	309
42	Vila Isabel	560	20,87	-22,91661	-43,25022	86.018	4.957
43	Vila Valqueire	10	0,55	-22,88798	-43,36344	32.279	5

Anexo II

1. Tabela de hospitais públicos:

Os dados desta tabela são utilizados em todas as expressões do modelo.

Tabela 11: Hospitais públicos do Rio de Janeiro (CNES; DATASUS).

#	Hospital (j)	Comunidade (i)	Latitude	Longitude	Número de leitos	Leitos disponíveis
1	H. do Andaraí	Andaraí	-22.927550	-43.252369	359	36
2	H. Geral de Bonsucesso	Bonsucesso	-22.867220	-43.248512	476	48
3	H. Fed. Cardoso Fontes	Freguesia (Jacarepaguá)	-22.925436	-43.315609	255	26
4	H. Fed. da Lagoa	Jardim Botânico	-22.962929	-43.215974	255	26
5	H. Fed. dos Servidores do Estado	Saúde	-22.896637	-43.188183	439	44
6	H. Mun. Francisco da Silva Telles	Irajá	-22.830584	-43.328129	67	34
7	H. Mun. Álvaro Ramos	Jacarepaguá	-22.940979	-43.393394	66	33
8	H. da Piedade	Piedade	-22.891807	-43.309738	152	38
9	H. Raphael de Paula Souza	Jacarepaguá	-22.955485	-43.393373	97	49
10	H. Central da Polícia Militar	Estácio de Sá	-22.912258	-43.203651	241	60
11	H. Mun. Souza Aguiar	Centro	-22.908966	-43.190544	426	43
12	H. Mun. Miguel Couto	Gávea	-22.977714	-43.223740	426	43
13	H. Mun. Salgado Filho	Meier	-22.900792	-43.278000	343	34
14	H. Mun. Paulino Werneck	Ilha do governador	-22.810810	-43.184283	49	25
15	H. Mun. Rocha Maia	Botafogo	-22.953306	-43.176881	38	19
16	H. Municipal Lourenço Jorge	Barra da tijuca	-22.994976	-43.364329	283	28
17	H. Mun. Ronaldo Gazolla	Acari	-22.825244	-43.347474	276	28
18	Casa de Saúde Nossa Senhora das Graças	Realengo	-22.862252	-43.435590	222	56
19	H. Universitário Pedro Ernesto	Vila Isabel	-22.914402	-43.237303	507	51
20	H. Nossa Senhora das Dores	Cascadura	-22.882612	-43.330017	234	59
21	Maternidade Escola da UFRJ	Laranjeiras	-22.933017	-43.185189	103	26
22	H. Universitário Clementino Fraga Filho	Cidade Universitária	-22.842076	-43.237189	430	43
23	H. Universitário Gaffree e Guinle	Tijuca	-22.916314	-43.220882	209	52
24	H. Est. Carlos Chagas	Marechal Hermes	-22.865573	-43.373953	177	44
25	H. Est. Getúlio Vargas	Penha circular	-22.838900	-43.285247	266	27
26	H. Est. Pedro II	Santa cruz	-22.912953	-43.687408	342	34
27	H. Est. Albert Schweitzer	Realengo	-22.866134	-43.442234	224	56
28	H. Mun. Rocha Faria	Campo grande	-22.908313	-43.562653	246	62
29	H. Mun. Evandro Freire	Portuguesa	-22.804730	-43.210803	103	26
30	H. Est. Anchieta	Caju	-22.875920	-43.222223	63	32
31	H. de Ipanema	Ipanema	-22.983923	-43.195801	146	37
32	H. Est. Eduardo Rabello	Senador Vasconcellos	-22.897839	-43.536086	128	32
33	H. Central do Iaserj	Centro	-22.912527	-43.189400	156	39
34	H. de Geriat e Geront	Mangueira	-22.900396	-43.240372	67	34

35	H. do Arsenal de Marinha RJ	Centro	-22.899293	-43.176967	40	20
36	H. São Vicente de Paulo	Tijuca	-22.916501	-43.213840	147	37
37	H. da Gamboa	Santo cristo	-22.905453	-43.191219	75	38
38	H. Clínica Grajau	Grajau	-22.920891	-43.259184	70	35
39	Santa Casa da Misericórdia do RJ	Castelo	-22.907831	-43.171270	695	70
40	H. São Francisco na Providencia de Deus	Tijuca	-22.939900	-43.248242	350	35
41	H. Adventista Silvestre	Cosme velho	-22.942587	-43.203467	158	40
42	H. Escola São Francisco de Assis	Cidade nova	-22.909071	-43.201390	15	8

Anexo III

1. Tabela reduzida com o volume diário de veículos das principais vias do RJ:

Por esta tabela ser muito grande, estão sendo apresentados apenas as 102 primeiras vias do Rio de Janeiro que possuem trânsito intenso, de um total de 175 vias. A média foi de 32 veículos/por minuto. Estes dados são utilizados como parâmetro de entrada para o modelo.

Tabela 12: Volume diário de veículos das principais vias do Rio de Janeiro (CET-RIO).

	Endereço	Volume diário de veículos		Endereço	Volume diário de veículos
1	Elevado Paulo de Frontin	73.271	52	Av. Nelson Cardoso altura da Estr. do Tindiba	37.928
2	Auto Estr. Lagoa Barra	68.409	53	Av. Nossa Senhora de Copacabana	21.780
3	Av. Amaro Cavalcânti	36.883	54	Av. Osvaldo Aranha	101.862
4	Av. Areia Branca próx. ao nº 1.628	20.401	55	Av. Padre Guilherme Decaminada	27.281
5	Av. Areia Branca próx. ao nº 178	19.487	56	Av. Pasteur	22.385
6	Av. Atlântica próx. ao nº 3.056	61.854	57	Av. Pastor Martin Luther King Junior	26.887
7	Av Atlântica	62.601	58	Av. Pastor Martin Luther King Junior	16.025
8	Av Atlântica	58.962	59	Av. Pastor Martin Luther King Junior	35.102
9	Av. Borges de Medeiros	65.042	60	Av. Paulo de Frontin	34.960
10	Av. Brasil Km 4,2	209.028	61	Av. Pres. Vargas próx. ao Campo de Santana	104.632
11	Av. Brasil Km 18,8	160.327	62	Av. Pres. Vargas próx. a Av. Passos	89.818
12	Av. Brasil, Km 28,0	138.222	63	Av. Presidente Castelo Branco (Radial Oeste)	134.421
13	Av. Brasil, Km 30,4	101.956	64	Av. Rui Barbosa próx. ao Inst. Fernandes Figueira	21.774
14	Av. Brasil, Km 40	88.464	65	Av. Salvador Allende próx ao portão 3 do Rio Centro	65.297
15	Av. Brasil, Km 45	80.760	66	Av. Santa Cruz próx. ao nº 8.264	42.369
16	Av. das Américas próx. ao nº 3.979	154.359	67	Av. Santa Cruz próx. ao Nº 9.047	39.990
17	Av. das Américas próx. ao nº 9.650	96.759	68	Av. Venceslau Brás altura da Av. Pasteur	73.787
18	Av. das Américas próx. ao nº 11.391	95.829	69	Av. Vieira Souto próx. ao nº 460	47.896
19	Av. das Américas próx. ao nº 14.041	96.711	70	Av. Vieira Souto próx. ao nº 158	49.925
20	Av. das Américas próx. ao nº 19.000	72.672	71	Boulevard 28 de Setembro	39.642
21	Av. Delfim Moreira próx ao nº 820	41.664	72	Estr. Adhemar Bebiano próx. ao nº 3.960	18.887
22	Av. Delfim Moreira próx. ao nº 426	40.804	73	Estr. Adhemar Bebiano altura da Av. Dom Hélder Câmara	37.970
23	Av. Dom Hélder Câmara próx. ao nº 6.742	47.195	74	Estr. Benvindo de Novaes próx. a Rua Caminho do Fontela	20.944
24	Av. Dom Hélder Câmara altura da Estr. Ademar Bebiano	35.481	75	Estr. da Água Grande altura da Rua Hannibal Porto	44.679
25	Av. Dom Hélder Câmara	55.421	76	Estr. da Barra da Tijuca e R. Dom Rosalvo	46.625
26	Av. Dom João VI próx. ao nº 28.700	33.818	77	Estr. da Cachorrota próx. ao nº 371	26.408

27	Av. Dom João VI próx. ao nº 29.501	47.633	78	Estr. da Cachamorra próx. ao nº 716	27.593
28	Av. Dom João VI próx. ao nº 37.200	27.238	79	Estr. da Pedra próx. ao BRT Curral Falso	27.594
29	Av. dos Democráticos altura da Av. do Itaoca	30.418	80	Estr. da Pedra próx. ao BRT Santa Veridiana	24.521
30	Av. dos Italianos altura da Estr. do Sapê	36.917	81	Estr. da Pedra próx. ao BRT Pingo D'Água	25.344
31	Av. Duque de Caxias próx. ao nº 160	22.601	82	Estr. da Posse próx. ao nº 1.168	26.159
32	Av. Duque de Caxias próx. ao nº 2.160	26.505	83	Estr. das Canárias próx. ao nº 318	25.910
33	Av. Edson Passos	21.294	84	Estr. de Furnas próx. ao nº 1.275	18.478
34	Av. Ernâni Cardoso	43.923	85	Estr. do Cabuçu próx. ao nº 1.975	22.240
35	Av. Genaro de Carvalho próx. ao nº 2.332	20.356	86	Estr. do Cabuçu próx. ao nº 615	20.739
36	Av. Geremário Dantas próx. ao nº 1.052	60.687	87	Estr. do Cacuia próx. ao nº 581	32.768
37	Av. Gláucio Gil próx. Av. Hermes de Lima	24.454	88	Estr. do Cafundá próx. ao nº 2.125	39.458
38	Av. Heitor Beltrão próx. a Rua Marquês de Valença	23.651	89	Estr. do Campinho próx. ao nº 1.409	33.736
39	Av. Infante Dom Henrique próx. ao Km 1	46.226	90	Estr. do Engenho D'Água próx. a Rua Soldado Luis Gonzaga	20.817
40	Av. Infante Dom Henrique próx. ao Km 2,7	69.365	91	Estr. do Galeão próx. ao nº 646	25.545
41	Av. Lúcio Costa próx. ao Km 6,5	31.882	92	Estr. do Magarça próx. ao nº 1.781	20.403
42	Av. Lúcio Costa, próx. ao Km 9,6	27.157	93	Estr. do Mato Alto próx. ao nº 3.482	35.437
43	Av. Lúcio Costa, próx. ao Km 12,7	27.865	94	Estr. do Mato Alto próx. ao nº 5.025	29.503
44	Av. Lúcio Costa próx. ao nº 2.940	54.690	95	Estr. do Mendanha próx. ao nº 2.056	45.456
45	Av. Maestro Paulo e Silva próx. ao nº 400	30.034	96	Estr. do Mendanha próx. ao nº 1.299	44.446
46	Av. Maracanã próx. ao nº 970	37.060	97	Estr. do Monteiro próx. ao nº 420	48.298
47	Av. Marechal Rondon próx. ao nº 2.857	47.984	98	Estr. do Monteiro próx. ao nº 1.346	37.126
48	Av. Menezes Cortes próx. ao Hospital Cardoso Fontes	47.350	99	Estr. do Portela altura da Av. dos Italianos	31.667
49	Av. Meriti altura Av. Vicente de Carvalho	34.978	100	Estr. do Pré próx. ao nº 1.079	24.231
50	Av. Monsenhor Félix próx. a Rua Turiana	29.307	101	Estr. do Rio Grande próx. ao nº 4.306	16.636
51	Av. Monsenhor Félix altura da Estr. do Colégio	65.951	102	Estr. do Rio Grande próx. ao nº 3.463	18.346

Anexo IV

1. Tabela reduzida com o custo de melhoria os arcos entre a comunidade i e o hospital j:

Os dados desta tabela foram obtidos utilizados na restrição (4) e utilizados na restrição (6). Por esta tabela ser muito grande, são apresentados apenas os dados da primeira comunidade. Estes dados são utilizados como parâmetro de entrada para o modelo. O custo foi obtido ao multiplicar a distância por 15.400,00 km (DNIT; 2010).

Tabela 13: Distância entre comunidades e hospitais (Google Distance Matrix).

#	Comunidade (i)	Hospital (j)	Distância (Km)	Custo (R\$)
1	Andaraí	Casa de Saúde Nossa Senhora das Graças	37,2	R\$ 572.880,00
2	Andaraí	H. Adventista Silvestre	11,8	R\$ 181.720,00
3	Andaraí	H. Central da Policia Militar	6,4	R\$ 98.560,00
4	Andaraí	H. Central do Iaserj	7,8	R\$ 120.120,00
5	Andaraí	H. Clinica Grajau	2,4	R\$ 36.960,00
6	Andaraí	H. da Gamboa	7,3	R\$ 112.420,00
7	Andaraí	H. da Piedade	9,5	R\$ 146.300,00
8	Andaraí	H. de Geriat e Geront	4,8	R\$ 73.920,00
9	Andaraí	H. de Ipanema	15,8	R\$ 243.320,00
10	Andaraí	H. do Andaraí	1,9	R\$ 29.260,00
11	Andaraí	H. do Arsenal de Marinha RJ	9,1	R\$ 140.140,00
12	Andaraí	H. Escola São Francisco de Assis	6,2	R\$ 95.480,00
13	Andaraí	H. Est. Albert Schweitzer	38,6	R\$ 594.440,00
14	Andaraí	H. Est. Anchieta	16	R\$ 246.400,00
15	Andaraí	H. Est. Carlos Chagas	17,5	R\$ 269.500,00
16	Andaraí	H. Est. Eduardo Rabello	51,5	R\$ 793.100,00
17	Andaraí	H. Est. Getúlio Vargas	10,5	R\$ 161.700,00
18	Andaraí	H. Est. Pedro II	65,9	R\$ 1.014.860,00
19	Andaraí	H. Fed. Cardoso Fontes	10,6	R\$ 163.240,00
20	Andaraí	H. Fed. da Lagoa	12,7	R\$ 195.580,00
21	Andaraí	H. Fed. dos Servidores do Estado	9,8	R\$ 150.920,00
22	Andaraí	H. Geral de Bonsucesso	9,3	R\$ 143.220,00
23	Andaraí	H. Mun. Álvaro Ramos	22,2	R\$ 341.880,00
24	Andaraí	H. Mun. Evandro Freire	20,3	R\$ 312.620,00
25	Andaraí	H. Mun. Francisco da Silva Telles	16,5	R\$ 254.100,00
26	Andaraí	H. Mun. Miguel Couto	14,5	R\$ 223.300,00
27	Andaraí	H. Mun. Paulino Werneck	23,3	R\$ 358.820,00
28	Andaraí	H. Mun. Rocha Faria	55,1	R\$ 848.540,00
29	Andaraí	H. Mun. Rocha Maia	13,4	R\$ 206.360,00

30	Andaraí	H. Mun. Ronaldo Gazolla	18,1	R\$ 278.740,00
31	Andaraí	H. Mun. Salgado Filho	6,8	R\$ 104.720,00
32	Andaraí	H. Mun. Souza Aguiar	8,6	R\$ 132.440,00
33	Andaraí	H. Municipal Lourenco Jorge	26,5	R\$ 408.100,00
34	Andaraí	H. Nossa Senhora das Dores	13,3	R\$ 204.820,00
35	Andaraí	H. Raphael de Paula Souza	30,4	R\$ 468.160,00
36	Andaraí	H. São Francisco na Providencia de Deus	2,5	R\$ 38.500,00
37	Andaraí	H. São Vicente de Paulo	5,4	R\$ 83.160,00
38	Andaraí	H. Universitário Clementino Fraga Filho	15,7	R\$ 241.780,00
39	Andaraí	H. Universitário Gaffree e Guinle	4,2	R\$ 64.680,00
40	Andaraí	H. Universitário Pedro Ernesto	2,7	R\$ 41.580,00
41	Andaraí	Maternidade Escola da UFRJ	9,8	R\$ 150.920,00
42	Andaraí	Santa Casa da Misericórdia do RJ	10,2	R\$ 157.080,00

Anexo V

Tabela para estipular o número de pessoas que falecem no início do desastre, para cada comunidade i:

Estes dados são utilizados como parâmetro de entrada para o modelo.

Tabela 14: Quantidade de pessoas que falecem no início do desastre.

#	Comunidade (i)	População vulnerável (d_i)	Pessoas que falecem no início do desastre (a_i)	% da população vulnerável (a_i/d_i)	População que sobrevive início desastre ($d_i - a_i$)
	População Total	75.015	1.499	2,0%	73.516
1	Andaraí	3.130	63	2,0%	3.067
2	Botafogo	264	5	1,9%	259
3	Brás de pina	54	1	1,9%	53
4	Catumbi	919	18	2,0%	901
5	Complexo do Alemão	12.089	242	2,0%	11.847
6	Copacabana	2.013	40	2,0%	1.973
7	Cosme velho	142	3	2,1%	139
8	Engenho da Rainha	200	4	2,0%	196
9	Engenho novo	2.221	44	2,0%	2.177
10	Estácio	463	9	1,9%	454
11	Freguesia (Jacarepaguá)	33	1	3,0%	32
12	Gamboa	451	9	2,0%	442
13	Grajau	261	5	1,9%	256
14	Inhaúma	30	1	3,3%	29
15	Ipanema	80	2	2,5%	78
16	Itanhaga	212	4	1,9%	208
17	Jacarepaguá	23	0	0,0%	23
18	Laranjeiras	327	7	2,1%	320
19	Leme	639	13	2,0%	626
20	Lins de Vasconcelos	6.069	121	2,0%	5.948
21	Madureira	54	1	1,9%	53
22	Mangueira	1.198	24	2,0%	1.174
23	Olaria	644	13	2,0%	631
24	Penha	177	4	2,3%	173
25	Penha Circular	1.235	25	2,0%	1.210
26	Piedade	59	1	1,7%	58
27	Pilares	1.393	28	2,0%	1.365
28	Praça seca	2.944	59	2,0%	2.885
29	Rio Comprido	2.657	53	2,0%	2.604
30	Rocinha	18.574	371	2,0%	18.203
31	Sampaio	121	2	1,7%	119

32	Santa Teresa	206	4	1,9%	202
33	Santo Cristo	15	0	0,0%	15
34	São Cristóvão	145	3	2,1%	142
35	Tanque	21	0	0,0%	21
36	Tijuca	7.501	150	2,0%	7.351
37	Tomas Coelho	638	13	2,0%	625
38	Vaz Lobo	1.160	23	2,0%	1.137
39	Vicente de Carvalho	594	12	2,0%	582
40	Vidigal	788	16	2,0%	772
41	Vila Cosmos	309	6	1,9%	303
42	Vila Isabel	4.957	99	2,0%	4.858
43	Vila Valqueire	5	0	0,0%	5

Anexo VI

Tabela para estipular os tempos de viagem entre a comunidade i e o hospital j, além do tempo para atendimento aos feridos:

Tabela 15: Tempo de viagem e atendimento aos feridos (Google Distance Matrix).

#	Comunidade (i)	Hospital (j)	Tempo de viagem (ida e volta)	Tempo de atendimento	Tempo total
1	Andaraí	Casa de Saúde Nossa Senhora das Graças	94	120	154
2	Andaraí	H. Adventista Silvestre	66	120	126
3	Andaraí	H. Central da Polícia Militar	32	120	92
4	Andaraí	H. Central do Iaserj	36	120	96
5	Andaraí	H. Clínica Grajau	14	120	74
6	Andaraí	H. da Gamboa	30	120	90
7	Andaraí	H. da Piedade	48	120	108
8	Andaraí	H. de Geriat e Geront	30	120	90
9	Andaraí	H. de Ipanema	54	120	114
10	Andaraí	H. do Andaraí	14	120	74
11	Andaraí	H. do Arsenal de Marinha RJ	40	120	100
12	Andaraí	H. Escola São Francisco de Assis	26	120	86
13	Andaraí	H. Est. Albert Schweitzer	98	120	158
14	Andaraí	H. Est. Anchieta	66	120	126
15	Andaraí	H. Est. Carlos Chagas	76	120	136
16	Andaraí	H. Est. Eduardo Rabello	134	120	194
17	Andaraí	H. Est. Getúlio Vargas	40	120	100
18	Andaraí	H. Est. Pedro II	144	120	204
19	Andaraí	H. Fed. Cardoso Fontes	38	120	98
20	Andaraí	H. Fed. da Lagoa	46	120	106
21	Andaraí	H. Fed. dos Servidores do Estado	46	120	106
22	Andaraí	H. Geral de Bonsucesso	50	120	110
23	Andaraí	H. Mun. Álvaro Ramos	100	120	160
24	Andaraí	H. Mun. Evandro Freire	56	120	116
25	Andaraí	H. Mun. Francisco da Silva Telles	70	120	130
26	Andaraí	H. Mun. Miguel Couto	48	120	108
27	Andaraí	H. Mun. Paulino Werneck	72	120	132
28	Andaraí	H. Mun. Rocha Faria	146	120	206
29	Andaraí	H. Mun. Rocha Maia	52	120	112
30	Andaraí	H. Mun. Ronaldo Gazolla	70	120	130
31	Andaraí	H. Mun. Salgado Filho	40	120	100
32	Andaraí	H. Mun. Souza Aguiar	42	120	102
33	Andaraí	H. Municipal Lourenço Jorge	74	120	134
34	Andaraí	H. Nossa Senhora das Dores	62	120	122
35	Andaraí	H. Raphael de Paula Souza	104	120	164
36	Andaraí	H. São Francisco na Providência de Deus	14	120	74

37	Andaraí	H. São Vicente de Paulo	28	120	88
38	Andaraí	H. Universitário Clementino Fraga Filho	46	120	106
39	Andaraí	H. Universitário Gaffree e Guinle	26	120	86
40	Andaraí	H. Universitário Pedro Ernesto	20	120	80
41	Andaraí	Maternidade Escola da UFRJ	36	120	96
42	Andaraí	Santa Casa da Misericórdia do RJ	52	120	112

Anexo VII

Tabela com o número de pessoas que falecem por que não foram socorridas à tempo e população remanescente:

Os dados desta tabela foram obtidos a partir da restrição (2) e utilizados na restrição (6).

Tabela 16: Número de pessoas mortas por não terem sido socorridas a tempo.

#	Comunidade (i)	População vulnerável (d_i)	População que sobrevive início desastre ($d_i - a_i$)	Pessoas que não resistem esperar por atendimento (f_i)	% da população vulnerável ($f_i / (d_i - a_i)$)	População sobrevivente ($d_i - a_i - f_i$)
	População total	75.015	73.516	1.737	2,4%	71.779
1	Andaraí	3.130	3.067	57	1,9%	3.010
2	Botafogo	264	259	5	1,9%	254
3	Brás de pina	54	53	3	5,7%	50
4	Catumbi	919	901	17	1,9%	884
5	Complexo do Alemão	12.089	11.847	220	1,9%	11.627
6	Copacabana	2.013	1.973	37	1,9%	1.936
7	Cosme velho	142	139	3	2,2%	136
8	Engenho da Rainha	200	196	10	5,1%	186
9	Engenho novo	2.221	2.177	41	1,9%	2.136
10	Estácio	463	454	9	2,0%	445
11	Freguesia (Jacarepaguá)	33	32	2	6,3%	30
12	Gamboa	451	442	23	5,2%	419
13	Grajau	261	256	5	2,0%	251
14	Inhaúma	30	29	2	6,9%	27
15	Ipanema	80	78	2	2,6%	76
16	Itanhaga	212	208	4	1,9%	204
17	Jacarepaguá	23	23	2	8,7%	21
18	Laranjeiras	327	320	6	1,9%	314
19	Leme	639	626	12	1,9%	614
20	Lins de Vasconcelos	6.069	5.948	111	1,9%	5.837
21	Madureira	54	53	3	5,7%	50
22	Mangueira	1.198	1.174	59	5,0%	1.115
23	Olaria	644	631	32	5,1%	599
24	Penha	177	173	9	5,2%	164
25	Penha Circular	1.235	1.210	61	5,0%	1.149
26	Piedade	59	58	3	5,2%	55
27	Pilares	1.393	1.365	69	5,1%	1.296
28	Praça seca	2.944	2.885	145	5,0%	2.740
29	Rio Comprido	2.657	2.604	49	1,9%	2.555

30	Rocinha	18.574	18.203	338	1,9%	17.865
31	Sampaio	121	119	3	2,5%	116
32	Santa Teresa	206	202	4	2,0%	198
33	Santo Cristo	15	15	1	6,7%	14
34	São Cristóvão	145	142	8	5,6%	134
35	Tanque	21	21	2	9,5%	19
36	Tijuca	7.501	7.351	137	1,9%	7.214
37	Tomas Coelho	638	625	32	5,1%	593
38	Vaz Lobo	1.160	1.137	58	5,1%	1.079
39	Vicente de Carvalho	594	582	30	5,2%	552
40	Vidigal	788	772	15	1,9%	757
41	Vila Cosmos	309	303	16	5,3%	287
42	Vila Isabel	4.957	4.858	91	1,9%	4.767
43	Vila Valqueire	5	5	1	20,0%	4

Anexo VIII

Tabela com o Fluxo de pessoas da comunidade i para o hospital j:

Este fluxo representa a capacidade original e as melhorias que a via recebeu.

Deve ser notado que a capacidade original de 7 veículos por minuto.

Tabela 17: Fluxo de pessoas e custo da melhoria dos arcos.

	Comunidade (i)	Fluxo de pessoas (X_{ij})	Aumento da capacidade da via (X'_{ij})	Hospital (j)	Custo
	Fluxo total	2.150	36		R\$ 5.622.540
1	Andaraí	32			
2	Brás de Pina	1			
3	Catumbi	32			
4	Engenho da Rainha	64			
5	Engenho Novo	37			
6	Estácio	394			
7	Freguesia (Jacarepaguá)	30			
8	Gamboa	130			
9	Grajaú	43			
10	Inhaúma	27			
11	Ipanema	59			
12	Itanhaga	64			
13	Jacarepaguá	21			
14	Laranjeiras	314			
15	Leme	116			
16	Lins de Vasconcelos	47			
17	Madureira	50			
18	Mangueira	20			
19	Penha	3			
20	Penha Circular	127			
21	Pilares	32			
22	Praça Seca	51			
23	Rio Comprido	102			
24	Rocinha	61			
25	Sampaio	2			
26	Santa Teresa	96			
27	Santo Cristo	14			
28	São Cristóvão	17			
29	Tanque	19			
30	Vaz Lobo	14			
31	Vicente de Carvalho	13			
32	Vidigal	15			

33	Vila cosmos	64			
34.1	Vila Isabel	35	5	Santa asa da misericordia do rj	R\$ 777.700
34.2	Vila Isabel	35	15	H. Sao francisco na providencia de deus	R\$ 877.800
34.3	Vila Isabel	35	16	H. Adventista silvestre	R\$ 3.967.040
35	Vila Valqueire	4			

Anexo IX

Tabela com o Fluxo de pessoas que não conseguiram atendimento por falta de capacidade nos hospitais:

Tabela 18: Número de pessoas mortas por não terem sido socorridas a tempo.

#	Comunidade (i)	Fluxo de pessoas não atendidas (F _i)	Porcentagem da população original (d _i)
	Total	69.629	92,8%
1	Andaraí	2.978	98,9%
2	Botafogo	254	100,0%
3	Brás de pina	49	98,0%
4	Catumbi	852	96,4%
5	Complexo do Alemão	11.627	100,0%
6	Copacabana	1.936	100,0%
7	Cosme velho	136	100,0%
8	Engenho da Rainha	122	65,6%
9	Engenho novo	2.099	98,3%
10	Estácio	51	11,5%
11	Freguesia (Jacarepaguá)	0	0,0%
12	Gamboa	289	69,0%
13	Grajau	208	82,9%
14	Inhaúma	0	0,0%
15	Ipanema	17	22,4%
16	Itanhaga	140	68,6%
17	Jacarepaguá	0	0,0%
18	Laranjeiras	0	0,0%
19	Leme	498	81,1%
20	Lins de Vasconcelos	5.790	99,2%
21	Madureira	0	0,0%
22	Mangueira	1.095	98,2%
23	Olaria	599	100,0%
24	Penha	161	98,2%
25	Penha Circular	1.022	88,9%
26	Piedade	55	100,0%
27	Pilares	1.264	97,5%
28	Praça seca	2.689	98,1%
29	Rio Comprido	2.453	96,0%
30	Rocinha	17.804	99,7%
31	Sampaio	114	98,3%
32	Santa Teresa	102	51,5%
33	Santo Cristo	0	0,0%
34	São Cristóvão	117	87,3%

35	Tanque	0	0,0%
36	Tijuca	7.214	100,0%
37	Tomas Coelho	593	100,0%
38	Vaz Lobo	1.065	98,7%
39	Vicente de Carvalho	539	97,6%
40	Vidigal	742	98,0%
41	Vila Cosmos	223	77,7%
42	Vila Isabel	4.732	99,3%
43	Vila Valqueire	2.978	0,0%

Anexo X

Tabela com o aumento do número de leitos no hospital e custo total por hospital:

Tabela 19: Aumento do número de leitos no hospital.

#	Hospital (j)	Aumento número de leitos (L_j)	Nova capacidade de leitos ($L_j + q_j$)	Custo por leito (c_j)
	Total de leitos	543	2.150	R\$ 54.300.000
1	H.do Andaraí	12	48	R\$1.200.000,00
2	H. Geral de Bonsucesso	16	64	R\$1.600.000,00
3	H. Fed. Cardoso Fontes	9	35	R\$900.000,00
4	H. Fed. da Lagoa	9	35	R\$900.000,00
5	H. Fed. dos Servidores do Estado	15	59	R\$1.500.000,00
6	H. Mun. Francisco da Silva Telles	11	45	R\$1.100.000,00
7	H. Mun. Álvaro Ramos	11	44	R\$1.100.000,00
8	H. da Piedade	13	51	R\$1.300.000,00
9	H. Raphael de Paula Souza	17	66	R\$1.700.000,00
10	H. Central da Polícia Militar	21	81	R\$2.100.000,00
11	H. Mun. Souza Aguiar	15	58	R\$1.500.000,00
12	H. Mun. Miguel Couto	15	58	R\$1.500.000,00
13	H. Mun. Salgado Filho	11	45	R\$1.100.000,00
14	H. Mun. Paulino Werneck	8	33	R\$800.000,00
15	H. Mun. Rocha Maia	6	25	R\$600.000,00
16	H. Municipal Lourenco Jorge	9	37	R\$900.000,00
17	H. Mun. Ronaldo Gazolla	9	37	R\$900.000,00
18	Casa de Saúde Nossa Senhora das Graças	19	75	R\$1.900.000,00
19	H. Universitário Pedro Ernesto	17	68	R\$1.700.000,00
20	H. Nossa Senhora das Dores	20	79	R\$2.000.000,00
21	Maternidade Escola da UFRJ	9	35	R\$900.000,00
22	H. Universitário Clementino Fraga Filho	15	58	R\$1.500.000,00
23	H. Universitário Gaffree e Guinle	18	70	R\$1.800.000,00
24	H. Est. Carlos Chagas	15	59	R\$1.500.000,00
25	H. Est. Getúlio Vargas	9	36	R\$900.000,00
26	H. Est. Pedro II	11	45	R\$1.100.000,00
27	H. Est. Albert Schweitzer	19	75	R\$1.900.000,00
28	H. Mun. Rocha Faria	21	83	R\$2.100.000,00
29	H. Mun. Evandro Freire	9	35	R\$900.000,00
30	H. Est. Anchieta	11	43	R\$1.100.000,00
31	H. de Ipanema	12	49	R\$1.200.000,00
32	H. Est. Eduardo Rabello	11	43	R\$1.100.000,00
33	H. Central do IASERJ	13	52	R\$1.300.000,00
34	H. de Geriat e Geront	11	45	R\$1.100.000,00
35	H. do Arsenal de Marinha RJ	7	27	R\$700.000,00

36	H. São Vicente de Paulo	12	49	R\$1.200.000,00
37	H. da Gamboa	13	51	R\$1.300.000,00
38	H. Clínica Grajau	12	47	R\$1.200.000,00
39	Santa Casa da Misericórdia do RJ	24	94	R\$2.400.000,00
40	H. São Francisco na Providencia de Deus	12	47	R\$1.200.000,00
41	H. Adventista Silvestre	14	54	R\$1.400.000,00
42	H. Escola São Francisco de Assis	2	10	R\$200.000,00