



Lucas Dias Condeixa

**Avaliação de objetivos conflitantes e da sensibilidade ao
risco na preparação para um desastre através de
otimização estocástica**

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: Profa. Adriana Leiras
Co-orientador: Prof. Fabrício Oliveira

Rio de Janeiro
Março de 2018



Lucas Dias Condeixa

Avaliação de objetivos conflitantes e da sensibilidade ao risco na preparação para um desastre através de otimização estocástica

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

Profa. Adriana Leiras

Orientador

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

Prof. Irineu de Brito Junior

Centro Estadual de Educação Tecnológica Paulo Souza - Fatec São José dos Campos

Prof. Rafael Martinelli Pinto

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

Prof. Márcio da Silveira Carvalho

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

Rio de Janeiro, 05 de Março de 2018

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

Lucas Dias Condeixa

Graduou-se em Engenharia de Produção pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ em 2015. Durante a graduação trabalhou com consultoria em engenharia de produção e consultoria em logística. Durante o mestrado teve a oportunidade de trabalhar em uma empresa de eficiência energética onde pode implementar um modelo de otimização de *schedulling* de equipamentos de refrigeração.

Ficha Catalográfica

Condeixa, Lucas Dias

Avaliação de objetivos conflitantes e da sensibilidade ao risco na preparação para um desastre através de otimização estocástica / Lucas Dias Condeixa ; orientador: Adriana Leiras ; co-orientador: Fabrício Oliveira. – 2018.

54 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Industrial, 2018.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Industrial – Teses. 2. Trade-offs na logística humanitária. 3. Otimização estocástica. 4. 3E. 5. Aversão ao risco. I. Leiras, Adriana. II. Oliveira, Fabrício. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

CDD: 658.5

À minha mãe pois sem ela o universo seria apenas uma casca de noz.

Agradecimentos

À minha família pela minha formação, educação, apoio, carinho e dedicação, e por estarem sempre ao meu lado me ajudando. À sociedade brasileira por me conferir recursos para viabilizar a minha pesquisa.

À orientadora Adriana Leiras que além de ter me dado a oportunidade de trabalhar com ela, teve sempre a paciência necessária para me mostrar o caminho correto. Acredito de maneira convicta que a ciência precisa de mais mulheres como ela.

Ao orientador Fabrício Oliveira pela disponibilidade em qualquer fuso horário e por dar realidade às minhas ideias de maneira cirúrgica ainda que elas possam ter soado não convencionais.

Ao meu sábio amigo Pierry pois se tornou uma das engrenagens fundamentais do meu aprendizado acadêmico e humano durante o mestrado, mesmo “a depender” do BDE; ao flamenguista Diego que por muitas vezes me lembrou que a vida é mais do que uma fórmula e por me ensinar a como se manter firme; ao meu amigo Leonardo cujo apetite acadêmico sempre se mostrou tão valioso quanto a sua personalidade humilde e cativante; à Simone por ter me ajudado ainda nos momentos mais turbulentos e teve a paciência em me mostrar que não era tão difícil assim; à Ana Carolina por ter me guiado no processo de entrada no mestrado da PUC-Rio; ao Daniel pela constante vontade em auxiliar o próximo e pela contagiante avidez por novos conhecimentos; à Suzana pela calma tibetana e sapiência para tratar de assuntos mundanos e não mundanos; à Ana Delfino que por vezes dividiu seu precioso entendimento de matérias que estudamos juntos e não juntos; à Renata Bianchini por ter me apoiado em muitos momentos inclusive na busca pelo meu primeiro emprego; ao Rodrigo por me mostrar alguns passos para ser um verdadeiro mestre; ao Alan Fontoura por ser um real exemplo de como adquirir conhecimentos independentemente de outras pessoas; ao Andrew por fortalecer em mim a visão da prosperidade ainda que se passe pela tormenta; ao Iuri por me mostrar que ser brilhante pode também significar ser solícito; ao Mateus por me ajudar a trazer uma solução simples ao contrário do que minha natural ignorância poderia indicar; ao Victor pelo carisma incomparável e por todos os bizus que me passou; à Kamila por me mostrar que a força de vontade tem frutos. Enfim a todos os outros colegas que estudaram comigo nesses 2 anos que me ajudaram direta ou indiretamente no processo que culminou neste trabalho sendo verdadeiros professores para mim.

À Elen minha fiel companheira e confidente por se abdicar de mim e até de si mesma nos momentos menos favoráveis e pelo suporte quase que incondicional. Além disso, por ser um exemplo para mim de como ser humano.

Aos muitos funcionários e professores da PUC-Rio por me fornecerem meios que me possibilitaram precioso aprimoramento acadêmico.

Ao CNPq, ao CAPES e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos e pelo ótimo ambiente de estudo sem os quais este trabalho não teria sido possível.

Enfim, a todos pelos quais nutro muito carinho, tudo menos adeus.

Resumo

Condeixa, Lucas Dias; Leiras, Adriana (Orientador); Oliveira, Fabrício (Co-Orientador). **Avaliação de objetivos conflitantes e da sensibilidade ao risco na preparação para um desastre através de otimização estocástica.** Rio de Janeiro, 2018. 54p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O processo decisório na logística humanitária compreende diversos tipos de prioridades que por vezes estão relacionados com situações de vida ou morte. Neste grau de importância, os objetivos a serem perseguidos pelos tomadores de decisão na situação de um desastre e as restrições do problema devem ser estabelecidos para se alinhar com os anseios das vítimas e com as limitações existentes. Este estudo visa analisar de que maneiras as prioridades conflitantes num problema repleto de incertezas como em um desastre podem impactar o resultado do atendimento humanitário no que tange à sua eficiência, efetividade e equidade (3E). A dissertação apresenta o papel de alguns objetivos e restrições conflitantes (*trade-offs*) na tomada de decisão durante a fase de preparação para um desastre. Para tal, modelos de otimização estocástica são propostos utilizando-se dos conceitos de desempenho via 3E e sensibilidade ao risco, através da medida CVaR. Os resultados sugerem que a inclusão da aversão ao risco pode levar a um sistema mais efetivo em média. Outro ponto importante é que o modelo de minimização de custos incluindo o custo da falta forneceu uma resposta com melhor desempenho do que na maximização de equidade ou de cobertura de forma independente. Além disso, a restrição de orçamento (eficiência) quando mal dimensionada pode tornar um problema de maximização de cobertura (efetividade) desnecessariamente ineficiente. Conclui-se que a priorização da maximização conjunta da eficiência e da efetividade com restrição de inequidade e sensibilidade ao risco torna o modelo mais preciso quanto ao atendimento das vítimas do desastre.

Palavras-chaves

Trade-offs na Logística Humanitária; Otimização Estocástica; 3E; Aversão ao Risco.

Abstract

Condeixa, Lucas Dias; Leiras, Adriana (Advisor); Oliveira, Fabrício (Co-Advisor). **Evaluation of conflicting objectives and risk sensitivity in disaster preparedness through stochastic optimization.** Rio de Janeiro, 2015. 54p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The decision-making process in humanitarian logistics comprises several types of priorities that are sometimes related to life or death situations. In this degree of importance, the objectives to be pursued by decision-makers in the event of a disaster as well as the constraints of the problem must be established to align both with the needs of the victims and with the existing limitations. This study aims at analyzing how conflicting priorities in an uncertainty-filled problem such as a disaster can impact the performance of the solution with respect to its efficiency, effectiveness and equity (3E). The dissertation presents the role of some decision-making trade-offs within disaster preparedness phase. For this, stochastic optimization models are proposed using the concept of 3E-performance and risk sensitivity, through the measure CVaR. Results indicate that the inclusion of risk aversion may lead to a more effective system on average. Another important point is that the cost minimization model including the shortage penalty provided a better performing response than in equity or coverage maximization independently. In addition, budget constraint (efficiency) when poorly dimensioned can make a problem of maximizing coverage (effectiveness) unnecessarily inefficient. It is concluded that the prioritization of the joint maximization of efficiency and effectiveness with restriction of inequity and risk sensitivity makes a model more precise as regards the care of the disaster victims.

Keywords

Humanitarian Logistics Trade-offs; Stochastic Optimization; 3E; Risk Aversion.

Sumário

1	Introdução	13
2	Referencial teórico	17
3	Modelagem matemática	24
3.1	Modelagem de risco por CVaR	28
3.2	Extensões do modelo original	30
3.2.1	Modelos seguindo o desempenho-3E	32
3.2.2	Experimentação	33
3.2.2.1	Experimento 1	34
3.2.2.2	Experimento 2	34
3.2.2.3	Experimento 3	35
3.2.2.4	Experimento 4	36
4	Resultados e discussões	37
4.1	Análise de aversão ao risco	37
4.2	<i>Trade-offs</i> entre os 3E	39
5	Considerações finais	47
6	Referências bibliográficas	50

Lista de Figuras

Figura 1 – Análise do AS, DC e aversão ao risco. Fonte: adaptado de Condeixa <i>et al.</i> (2017)	39
Figura 2 – Custo operacional esperado para as instâncias de 1 e 2 nos modelos (3.3a) e (3.3b) em função de w no experimento 3. Fonte: Condeixa <i>et al.</i> (2018).....	43
Figura 3 – Número de faltas esperado para as instâncias de 1 e 2 nos modelos (3.3a) e (3.3b) em função de w no experimento 3. Fonte: Condeixa <i>et al.</i> (2018).....	44
Figura 4 – Valores de falta esperados no experimento 3 para $w = 5, 100, 200, 350, 394$ e 400 . Fonte: Condeixa <i>et al.</i> (2018)	44
Figura 5 – Valor esperado de faltas na minimização de inequidade, experimento 4. Fonte: Condeixa <i>et al.</i> (2018)	45

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Trabalhos divididos entre eficiência, efetividade, equidade e sensibilidade ao risco. Fonte: adaptado de Condeixa <i>et al.</i> (2018).....	21
Tabela 2 – <i>Avoidable shortage</i> (AS) para diversos valores de w . Fonte: Condeixa <i>et al.</i> (2017).....	38
Tabela 3 – Variação do índice de aversão ao risco. Fonte: adaptado de Condeixa <i>et al.</i> (2017).....	39
Tabela 4 – Nível de inequidade entre nós (de 0% a 100%) e eficiência. Fonte: Condeixa <i>et al.</i> (2018).....	40
Tabela 5 – Resultados do experimento 2. Fonte: Condeixa <i>et al.</i> (2018).....	42

Lista de Siglas

LH: logística humanitária

PO: Pesquisa Operacional

TD: Tomador de Decisão

OR/MS: *Operational Research and Management Science*

GCS: Gestão da Cadeia de Suprimentos

EVPI: *Estimated Value of Perfect Information*

VSS: *Value for Stochastic Solution*

FO: Função Objetivo

VaR: *Value-at-Risk*

CVaR: *Conditional-Value-at-Risk*

3E: Eficiência, Efetividade e Equidade

MR: *Mean Risk*

MRVPI: *Mean Risk Value of Perfect Information*

MRVSS: *Mean Risk Value of Stochastic Solution*

AS: *Avoidable Shortage*

1 Introdução

Ao longo do tempo, diversas perspectivas sobre como se preparar e responder a uma situação de calamidade surgiram se orientando pelas práticas humanitárias recorrentes nos desastres ao redor do mundo. De acordo com Atay & Green (2006), o problema do atendimento humanitário deve ser engajado por qualquer disciplina que possa reduzir os danos e controlar as possíveis perdas. Desta forma, a logística humanitária (LH) como área de análise pôde se beneficiar com estudos vindos de vários campos do conhecimento. No que tange a modelagem da estruturação e otimização de processos, a Pesquisa Operacional (PO) fornece ferramentas de decisão valiosas tanto às pessoas afetadas por um desastre quanto ao tomador de decisão (TD). As aplicações da área de OR/MS (*Operational Research and Management Science*) no problema da gestão de operações em desastres tornaram-se numerosas a partir dos anos 2000 (Galindo & Batta, 2013a) indicando a também crescente importância que os problemas de LH vêm assumindo na área.

Em contraste à logística comercial tradicional, a LH tem de se preparar para atendimentos de eventos de baixa previsibilidade. Logo as consequências de um desastre geralmente variam muito em termos de demanda a ser atendida e do fornecimento de materiais (Van Wassenhove, 2006). Desta forma, é aconselhável que um modelo de otimização em LH leve em conta os possíveis cenários a serem enfrentados no caso de um desastre.

As decisões na LH podem ser realizadas em quatro fases, estas sendo a mitigação, o preparo, a resposta e a recuperação (Altay & Green, 2006). Algumas decisões a serem tomadas com relação à cadeia de suprimentos de emergência para atendimento das necessidades das vítimas antes de um desastre ocorrer – nas fases de mitigação ou preparação – são as localizações de instalações, quantidade de estoque a ser pré-posicionado e definições de capacidade de atendimento em geral. Já no ambiente após a ocorrência do desastre – resposta ou recuperação – estão a quantidade a ser transportada para cada nó de demanda, os níveis de

estoque remanescentes, fluxos de evacuação, demanda não atendida e outras decisões relacionadas ao tempo de atendimento. Considerando-se então o desastre como um divisor no processo de atendimento às vítimas, as decisões a serem tomadas podem ser consideradas num contexto pré-desastre ou pós-desastre. Acompanhando esta decisão em dois estágios e a dependência da estocasticidade, é natural que modelos de otimização estocástica em dois estágios sejam propostos na LH (Grass & Fischer, 2016). Além disso, estes modelos podem ser complementados através de uma modelagem que evite resultados extremos, evitando assim grandes perdas, através da aversão ao risco como visto em Noyan (2012).

Seguindo-se a orientação às circunstâncias do desastre considerado – como tufões, enchentes, guerras, tsunamis ou fome generalizada – as decisões a serem tomadas assumem particularidades. Em consequência, muitos modelos com diferentes instâncias foram propostos a depender dos principais objetivos e restrições em cada contexto. Essa variedade de modelos faz crer que não há um padrão de modelos quantitativos nem tanto uma norma de qualidade para o desempenho da solução humanitária. Todavia, um modelo matemático padronizado de LH possível de ser ajustado a diversas realidades de preparação para um desastre é de interesse geral. Este pode direcionar a disponibilização do material ou serviço de socorro na quantidade requerida, no instante em que é necessário e de forma mais confiável para as pessoas atingidas por um desastre. O reconhecimento de um bom resultado em LH é de vital importância na resposta humanitária e, portanto, a análise dos fatores comuns de desempenho e de como os objetivos podem ser conflitantes entre si torna este trabalho relevante.

Uma forma de se avaliar o desempenho de um modelo de LH na tomada destas decisões leva em conta o resultado em termos de tempo de atendimento, proporção da demanda atendida, condições dos serviços ou produtos entregues, entre outros. Alguns autores, como Tzeng *et al.* (2007), Huang *et al.* (2012), Rezaei-Malek *et al.* (2016b) e Gutjahr & Nolz (2016) classificaram a adequação dos resultados com o que se espera de uma resposta humanitária em três vertentes: eficiência, efetividade e equidade (3E). Este conceito de desempenho via 3E é explorado neste trabalho como uma forma de permear o conceito de bom desempenho nos diferentes trabalhos revisados. O entendimento do sucesso

operacional pelo TD vai ao encontro da priorização de cada um dos 3E. Por exemplo, se um modelo de LH proposto tiver como foco apenas um dos 3E, a viabilidade ou a relevância deste modelo pode ser comprometida. Muitos modelos na literatura propõem uma melhor solução para problemas derivados de um desastre sem avaliar o impacto nas diferentes vertentes de desempenho. Considerando este *gap*, o presente trabalho pretende ajudar a esclarecer através da análise dos conflitos (ou *trade-offs*) oriundos das diferentes prioridades dos modelos de preparação para o desastre. Ressaltar os detalhes de se trabalhar com os *trade-offs* relativos à efetividade, eficiência e equidade não é uma ideia completamente nova, como pode ser visto em Golany & Tamir (1995). No entanto, a contribuição deste trabalho reside na implementação de uma análise dos 3E em decisões típicas da LH através da otimização estocástica com sensibilidade ao risco.

As contribuições deste trabalho podem ser divididas em duas vertentes, cada uma seguindo um dos estudos propostos por Condeixa *et al.* (2017) e Condeixa *et al.* (2018). Condeixa *et al.* (2017) ilustram a qualidade da solução em um problema de LH conferida a uma modelagem estocástica de dois estágios com aversão ao risco. Para tal, uma nova medida de qualidade da solução é proposta levando em consideração as faltas possíveis de serem evitadas (ou *Avoidable Shortage*, em inglês). Através desta, é possível desenhar uma fronteira eficiente entre o custo operacional esperado e o perfil de aversão ao risco do TD. Vários valores de penalidade pelo não atendimento à demanda são utilizados para se entender o papel que o custo da falta de cobertura tem no problema. Esta medida possui a vantagem de medir a qualidade da solução em um modelo de otimização estocástica de dois estágios com sensibilidade ao risco sem ser influenciada pelo peso da aversão ao risco.

A segunda vertente confronta o papel dos 3E como diretivas e limites da resposta humanitária. Quatro experimentos são propostos para avaliação de alguns *trade-offs* que podem ocorrer nos modelos de otimização na LH. O primeiro experimento maximiza conjuntamente a eficiência e a efetividade com restrições de equidade; o segundo experimento confronta a efetividade (através da maximização da cobertura) e a eficiência (através da minimização dos custos) em diferentes limitações de orçamento; o terceiro experimento utiliza-se de diferentes instâncias de restrições de inequidade e do peso da aversão ao risco para se

minimizar os custos (eficiência); e o quarto experimento minimiza a equidade isoladamente para entender melhor o papel da mesma na solução humanitária. Os experimentos foram dimensionados para abordar de uma forma mais abrangente o papel dos atributos 3E e como estes podem ser conflitantes entre si.

A seguinte pergunta de pesquisa orienta as análises propostas: considerando-se a definição de desempenho-3E, como cada um dos atributos-3E e a sensibilidade ao risco, quando priorizados, influenciam no resultado da preparação para desastres?

O trabalho está estruturado da seguinte forma, o Capítulo 2 apresenta as principais referências para embasar o estudo sobre a agregação de risco na LH e sobre os *trade-offs* recorrentes na fase de preparação para um desastre. O Capítulo 3 demonstra a modelagem matemática proposta a partir de Condeixa *et al.* (2017, 2018). O Capítulo 4 discute os principais resultados vindos da execução dos modelos. O Capítulo 5 apresenta as principais conclusões e propostas de trabalhos futuros.

2 Referencial teórico

Face às dificuldades em se tratar as particularidades da preparação e resposta a um desastre, a modelagem quantitativa se mostra uma ferramenta comum ao se tomar decisões logísticas em um contexto humanitário (Hoyos *et al.*, 2014). Inicialmente os estudos em LH se utilizam de princípios basilares da gestão da cadeia de suprimentos (GCS) comercial (Altay & Green, 2006) e isto faz com que diretrizes na LH assumam características próprias do mundo empresarial. Vitoriano *et al.* (2011) defendem que os princípios da GCS são úteis à prática humanitária contanto que as respostas na LH foquem em objetivos além da lucratividade.

Muitos modelos de otimização foram propostos para auxiliar o processo decisório na LH, como onde localizar depósitos e qual a quantidade de material se deve pré-posicionar em cada um (Salmerón & Apte, 2010), qual frota utilizar para se distribuir o material de apoio (Balcik *et al.*, 2008), quais rotas devem ser adotadas para evacuação de pessoas atingidas por um desastre (Nolz *et al.*, 2011) ou como alocar remédios para atendimento de pessoas feridas em uma situação de calamidade (Beheshtifar & Alimoahmmadi, 2015).

Um bom planejamento é essencial para a resposta ao desastre e o sucesso de uma operação humanitária depende fortemente de como os possíveis cenários encontrados estão de acordo com o ambiente pós-desastre. Muitos modelos matemáticos são propostos em literatura, Hoyos *et al.* (2014) discriminam quatro destes que podem ser tidos como principais: localização de instalações, alocação de recursos, distribuição de assistência e transporte de vítimas.

Barbasoglu & Arda (2004) apresentam um modelo estocástico de dois estágios de rede logística visando à resposta a terremotos com múltiplos produtos e multi-modal com oito cenários de terremoto e nove cenários de impacto. Para estimar a qualidade da solução encontrada, os autores utilizam-se das medidas de *Estimated Value of Perfect Information* (EVPI) e *Value for Stochastic Solution* (VSS). Mete & Zambinsky (2010) propõem um modelo em que no primeiro

estágio são decididas as localizações e a quantidade de medicamentos a ser estocada. No segundo estágio a quantidade a ser transportada dos depósitos aos hospitais em cada cenário de desastre é determinada e a função objetivo (FO) conta com custos de transporte e penalidade pelo não atendimento. Rawls & Turnquist (2010) apresentam uma formulação matemática que compreende a minimização de custos de abertura de depósitos de acordo com o tamanho dos mesmos, da aquisição de produtos na fase que precede o desastre, dos custos esperados de transporte, de estoque pós-desastre e de não atendimento da demanda. Rawls & Turnquist (2012) expandem o modelo em Rawls & Turnquist (2010) para propor uma otimização dinâmica com $\alpha\%$ de certeza que a demanda irá ser atendida pela solução alcançada.

As decisões de primeiro estágio (antes da incerteza se revelar) influenciam as possibilidades de decisão de segundo estágio (pós-incerteza) de forma que as decisões de segundo estágio são correções das decisões de primeiro estágio. Por este motivo o problema como modelado em dois estágios também pode ser chamado de problema recursivo (Birge & Louveaux, 2011). Uma fragilidade da otimização estocástica é que esta depende da precisão dos cenários gerados e como estes representam a realidade. Além disso, a otimização proposta segue o valor esperado, sendo indiferente aos cenários mais catastróficos de baixa probabilidade (cauda).

Uma forma proposta no campo de LH para evitar grandes perdas em cenários de maior calamidade é através de uma modelagem avessa ao risco considerando a variabilidade dos dados. Respostas sensíveis ao risco podem ser alcançadas através de medidas amplamente discutidas na área de PO e aplicadas na LH como *Semideviation*, *Value-at-Risk* (VaR), *Conditional-Value-at-Risk* (CVaR) e *Minimax* (Alem *et al.*, 2016). Particularmente, CVaR é uma medida com certa preferência na área de otimização, pois apresenta vantagens tais quais linearidade, convexidade, dominância estocástica, monotonicidade de primeira e segunda ordem e homogeneidade positiva (Rockafellar & Uryasev, 2000). Embora a aversão ao risco proponha evitar os resultados dos piores cenários, esta pode causar uma redução da eficiência ou da efetividade da resposta em média, como é vista na fronteira de eficiência proposta em Markowitz (1952).

Nolz *et al.* (2011) propõem uma programação multi-objetivo que otimiza conjuntamente uma medida de risco, a cobertura da solução e o tempo de resposta.

O risco tratado no estudo se refere à possível danificação das rotas de apoio logístico a enchentes ou terremotos. Noyan (2012) utiliza-se do CVaR para propor uma modelagem de problema recursivo de risco médio (*Mean Risk Recourse Problem*). Neste trabalho também há a proposição da extensão das medidas de EVPI e VSS para agregar a gestão do risco, formando-se então o MRVPI e o MRVSS onde as letras “MR” representam o risco médio (*Mean Risk*). Zolfaghari & Peyghaleh (2015) minimizam, entre outros, o custo esperado de reconstrução após um terremoto que excede um determinado limite preestabelecido. Alem *et al.* (2016) utilizam três medidas de risco em uma modelagem estocástica de dois estágios para atendimento de vítimas de enchentes e deslizamentos. Os autores propõem 17 instâncias testadas com cada uma das medidas de risco, onde a medida CVaR alcança os melhores resultados em termos de custos no segundo estágio e cobertura da demanda. Outros trabalhos também lidam com a questão do risco na LH, como visto em Hong *et al.* (2014), Chapman & Mitchell (2016), Paul & Macdonald (2016) e S. Hu *et al.* (2016). Desta forma, a medida de risco a ser usada nos modelos propostos é o CVaR, assim como proposto nos trabalhos de Noyan (2012) e Alem *et al.* (2016).

Os resultados encontrados no modelo proposto em Condeixa *et al.* (2017) utilizam-se das medidas de qualidade da solução em um modelo de otimização estocástica de dois estágios com sensibilidade ao risco propostas em Noyan (2012). Como uma forma de extensão do trabalho anterior, a medida das faltas possíveis de serem evitadas – *Avoidable Shortage* (AS) – é proposta em Condeixa *et al.* (2017).

A agregação da sensibilidade ao risco na resposta humanitária, no entanto, faz com que haja uma maior necessidade em se reservar recursos para tornar a solução mais alheia às piores condições de um desastre. Uma boa ilustração deste efeito vem com os resultados apresentados em S. Hu *et al.* (2016), em que para se obter uma redução das penalidades referentes ao risco em 97,5% aumenta-se a necessidade de recursos financeiros em 233%. Este, então, é o primeiro trade-off de desempenho a se tratar no presente trabalho: à medida que se protege do risco, se diminui a eficiência da operação.

Desempenho em um problema estocástico de LH pode ser definido analisando-se o resultado esperado no determinado contexto, tendo em vista recursos e condições de atendimento, ao que a solução humanitária está

submetida. Uma forma de se definir desempenho na prestação de serviços é através dos conceitos dos 3E, como propostos em Huang *et al.* (2012). O conceito de desempenho pela avaliação dos 3E (desempenho-3E) apesar de ser utilizado por alguns trabalhos na literatura de LH (Tzeng *et al.*, 2007; Huang *et al.*, 2012; Rezaei-Malek *et al.*, 2016b) não é sistematicamente definido. Nos estudos revisados, cada um dos atributos 3E pode ser compreendido por uma medida operacional diferente.

Savas (1978) apresenta uma discussão sobre como a equidade pode ser tratada na distribuição espacial de serviços públicos. O autor também traz definições sobre a equidade, eficiência e efetividade que serão adotadas por este trabalho assim como orientado em Condeixa *et al.* (2018). Seguindo este estudo, é importante que os objetivos e restrições referentes aos 3E encontrados na literatura de LH sejam devidamente classificados para tornar a discussão mais abrangente.

A eficiência na LH é diretamente tratada através dos respectivos custos (Tzeng *et al.*, 2007; Balcik & Beamon, 2008; Rawls & Turnquist, 2010,2012; Vitoriano *et al.*, 2011; Lodree *et al.*, 2012; Davis *et al.*, 2013; Galindo & Batta, 2013b; Barzinpour & Esmaeili, 2014; Mohammadi *et al.*, 2016; Chapman & Mitchell, 2016) e indiretamente como uso de materiais, como depósitos, e meios, como maiores frotas (Rawls & Turnquist, 2010; Renemmo *et al.*, 2014; Garrido *et al.*, 2015; Alem *et al.*, 2016). A efetividade ou eficácia na LH corresponde ao atendimento das expectativas da população afetada pelo desastre na hora do recebimento de um produto ou no recebimento de um serviço de auxílio como transporte para hospitais ou abrigos. Geralmente, os critérios de efetividade rondam objetivos como os revistos por Gutjahr e Nolz (2016): nível de cobertura, tempo de resposta, distância percorrida, segurança e acessibilidade. O conceito de efetividade aparece nos modelos de otimização em LH como o objetivo ou como uma restrição. Finalmente equidade pode se apresentar em problemas de LH como equitabilidade ou balanço. O primeiro se refere ao atendimento considerando-se os nós de atendimento indistinguíveis enquanto o segundo se refere a respeitar as diferenças das necessidades de forma que a resposta se ajuste a estas (Karsu & Morton, 2015). A equidade pode ser definida de muitas formas através de indicadores ou funções e de uma forma geral é relacionada à justiça no atendimento, exemplos de algumas medidas podem ser vistos em Marsh &

Schilling (1994). Adota-se no presente trabalho o conceito de inequidade, ou falta de equidade, como a disparidade entre os níveis de serviço no atendimento entre os nós de demanda.

Algumas ilustrações de como a equidade pode ser abordada em problemas na LH podem ser vistos em Tzeng *et al.* (2007), Davis *et al.* (2013), McCoy *et al.* (2014) e Orgut *et al.* (2015). A Tabela 1 mostra quais diferentes atributos entre os 3E como objetivo da otimização ou como restrição e as abordagens de aversão ao risco são encontrados em literatura.

Tabela 1 – Trabalhos divididos entre eficiência, efetividade, equidade e sensibilidade ao risco. Fonte: adaptado de Condeixa *et al.* (2018)

Referência	Tipo de Desastre	Equidade na FO	Eficiência na FO	Efetividade na FO	Restrição de Equidade	Restrição de Efetividade	Restrição de Eficiência	Sensibilidade ao Risco
Ahmadi <i>et al.</i> (2015)	Terremoto		X	X			X	
Alem <i>et al.</i> (2016)	Não definido		X	X		X		X
Balcik <i>et al.</i> (2008)	Não definido		X	X	X			
Barzinpour and Esmaeili (2014)	Não definido		X	X				
Bozorgi-amiri <i>et al.</i> (2013)	Não definido	X	X	X				X
Chapman and Mitchell (2016)	Não definido		X	X				X
Davis <i>et al.</i> (2013)	Furacão		X				X	
Döyen <i>et al.</i> (2012)	Terremoto		X	X				
Galindo and Batta (2013)	Furacão		X			X	X	
Garrido <i>et al.</i> (2015)	Enchentes		X				X	
Hong <i>et al.</i> (2014)	Não definido		X	X				X
S. Hu <i>et al.</i> (2015)	Enchentes		X	X				X
S. Hu <i>et al.</i> (2016)	Terremoto		X	X	X			X
C. L. Hu <i>et al.</i> (2016)	Terremoto	X		X		X		X
Huang <i>et al.</i> (2012)	Não definido	X	X	X				
Huang <i>et al.</i> (2015)	Terremoto	X		X				
Lin <i>et al.</i> (2011)	Terremoto	X	X	X			X	
Lodree <i>et al.</i> (2012)	Furacão		X	X			X	
Rezaei-malek <i>et al.</i> (2016a)	Terremoto		X	X	X	X	X	X
Rezaei-malek <i>et al.</i> (2016b)	Terremoto	X	X	X			X	
Manopiniwes and Irohara (2016)	Não definido	X	X				X	
Mete and Zabinsky (2010)	Terremoto		X	X			X	
Mohammadi <i>et al.</i> (2016)	Terremoto	X	X	X		X		
Orgut <i>et al.</i> (2015)	Fome			X	X			
Pacheco and Batta (2015)	Não definido		X	X		X		
Pérez-rodríguez (2015)	Não definido		X	X				
Ransikarbum and Mason (2016)	Não definido	X	X	X		X		
Rawls and Turnquist (2010)	Furacão		X	X				

Rawls and Turnquist (2012)	Furacão		X	X				X
Salmerón and Apte (2010)	Furacão			X		X		
Tofighi <i>et al.</i> (2016)	Terremoto	X	X	X				
Turkeš <i>et al.</i> (2017)	Furacão			X		X		
Tzeng <i>et al.</i> (2007)	Terremoto	X	X	X				
Vitoriano <i>et al.</i> (2011)	Não definido	X	X	X				
Zolfaghari and Peyghaleh (2015)	Terremoto		X		X	X	X	X

Naturalmente, a otimização de dois ou três dos 3E pode levar o TD a certos conflitos entre os objetivos. Além disso, a restrição do nível mínimo de qualquer um dos 3E pode levar a um impacto não desejado no resultado final. Alguns exemplos são encontrados em literatura como os apresentados por Mandell (1991) e Golany & Tamir (1995), que avaliaram a fronteira ótima entre a equidade e a eficiência na distribuição do serviço público. Este trade-off entre equidade (também designado como justiça) e eficiência (em suas várias vertentes como custos, capital a ser utilizado, pessoas etc.) é também abordado por trabalhos na LH como Zolfaghari & (2015), Orgut *et al.* (2015) e C. L. Hu *et al.* (2016).

Zolfaghari & Peyghaleh (2015) mostraram que a restrição de equidade faz com que o orçamento reservado para mitigação dos efeitos de um terremoto é alocado em estruturas de pequenos distritos com maior vulnerabilidade. Em comparação entre a instância sem restrição de equidade e com restrição de equidade, os gastos com mitigação tem um potencial de 35% no segundo caso. Orgut *et al.* (2015) mostraram que, pela limitação na capacidade de alguns nós no recebimento de comida de um órgão central, uma equidade perfeita – mesmo nível de serviço percentual para todos baseado nas diferentes demandas – leva a um aumento considerável na quantidade de comida não distribuída e consequente desperdício. C. L. Hu *et al.* (2016) apresentaram a fronteira de Pareto entre o maxmin da taxa de satisfação e a função de utilidade da assistência em um terremoto, para que um atinja o valor máximo, o outro tem de ser zerado.

Outro trade-off que é amplamente abordado em literatura de LH, mas também na GCS, é entre a eficiência de uma operação – custos em geral – e efetividade. Rawls & Turnquist (2010) relataram que para alcançar uma redução nas faltas esperadas de 3%, há um aumento da ordem de 30% nos custos de pré-posicionamento e de transporte. Mete & Zabinsky (2010) ilustraram este *trade-off* nas possíveis decisões operacionais de estoque de medicamentos onde o segundo estoque mais caro entre as opções é selecionado pela sua proximidade aos

hospitais mais centrais, beneficiando assim o tempo de atendimento. Outra forma de ter este confronto entre eficiência e efetividade surge em situações em que o orçamento é limitado. Por exemplo, Salmeron & Apte (2010) mostraram como na ocasião de um terremoto a população de remanescentes, a população afetada diretamente e a população em transferência recebem um maior nível de serviço quando o orçamento aumenta de 10 até 100 milhões de dólares.

3 Modelagem matemática

Neste capítulo são apresentados os modelos a serem utilizados para o estudo dos *trade-offs* existentes no problema de pré-posicionamento, localização e alocação de produtos. As diferentes abordagens são apresentadas a partir dos modelos propostos em Condeixa *et al.* (2017, 2018). Todos utilizam a modelagem estocástica de dois estágios sendo as decisões de primeiro estágio relativas ao pré-desastre e de segundo estágio as de pós-desastre.

Os conjuntos, parâmetros e variáveis a serem utilizados neste trabalho são então designados abaixo.

Conjuntos	
I	Candidatos a centros de distribuição ($i \in I$)
K	Produtos a serem distribuídos ($k \in K$)
J	Pontos de demanda ($j \in J$)
C	Cenários ($c \in C$)

Parâmetros Determinísticos (unidade)	
g_i	Custo de instalação e operação dos centros de distribuição (\$)
e_k	Quantidade de produtos pré-posicionáveis
l_{ik}	Capacidade de estoque
qd_{\max}	Número máximo de centros de distribuição que podem ser abertos
qd_{\min}	Número mínimo de centros de distribuição que podem ser abertos
a_{ij}	Matriz binária de cobertura, assume 0 se a distância do ponto da demanda é mais que a distância máxima de atendimento do centro de distribuição e 1 caso contrário
fw_k	Fator de conversão de massa por unidade (Kg/un.)

fv_k	Fator de conversão de volume por unidade ($m^3/un.$)
M	Número grande
β	Peso referente à aversão ao risco, entre 0 e 1
$1 - \alpha$	Probabilidade cumulativa que define o limite para a definição dos piores cenários

Parâmetros Estocásticos (unidade)

p^c	Custo unitário de transporte em cada cenário (\$)
ct_{ij}^c	Custo unitário de transporte em cada cenário (\$)
w_{jk}^c	Custo da falta (\$)
dn_{ik}^c	Quantidade de doações recebida pelo centro de distribuição em cada cenário, caso seja aberto
d_{jk}^c	Demanda
cp_{ij}^c	Capacidade em peso da rota de distribuição (kg)
cv_{ij}^c	Capacidade em volume da rota de distribuição (m^3)
$dmin_{jk}^c$	Demanda mínima a ser atendida
cot_k^c	Limite de compra contratual após desastre

Decisões de Primeiro Estágio (unidade)

X_i	Binário igual a 1 se o centro de distribuição é aberto em i , 0 caso contrário
S_{ik}	Quantidade de produtos pré-posicionada em cada centro de distribuição

Decisões de Segundo Estágio (unidade)

T_{ijk}^c	Quantidade de produtos transportadas do centro de distribuição para os pontos de demanda
F_{jk}^c	Falta
CO_{ik}^c	Quantidade de produtos adquirida pós-desastre
$CO_AUX_k^c$	Variável auxiliar de compra
η	<i>Value-at-Risk</i> (VaR)

Y_{ijk}^c

Varável auxiliar que assume valores de custo acima do VaR

O modelo básico a ser tratado, baseado em de Brito *et al.* (2013) é apresentado abaixo.

Modelo (1)

$$\min \left\{ \sum_i g_i X_i + p^c \left[\sum_i \sum_j \left(ct_{ij}^c \sum_k T_{ijk}^c \right) + \sum_j \sum_k w_{jk}^c F_{jk}^c \right] \right\} \quad (1)$$

Subject to:

$$\sum_i S_{ik} \leq e_k \quad \forall k \in K \quad (2)$$

$$l_{ik} X_i \geq S_{ik} \quad \forall i \in I, k \in K \quad (3)$$

$$\sum_i X_i \leq qd_{\max} \quad \forall i \in I \quad (4)$$

$$\sum_i X_i \geq qd_{\min} \quad \forall i \in I \quad (5)$$

$$\sum_i X_i a_{ij} \geq 1 \quad \forall j \in J \quad (6)$$

$$\sum_j T_{ijk}^c \leq S_{ik} + dn_{ik}^c + CO_{ik}^c \quad \forall i \in I, k \in K, c \in C \quad (7)$$

$$F_{jk}^c = d_{jk}^c - \sum_i T_{ijk}^c \quad \forall j \in J, k \in K, c \in C \quad (8)$$

$$l_{ik} X_i \geq \sum_j T_{ijk}^c \quad \forall i \in I, k \in K, c \in C \quad (9)$$

$$\sum_k T_{ijk}^c fw_k \leq cp_{ij}^c \quad \forall i \in I, j \in J, c \in C \quad (10)$$

$$\sum_k T_{ijk}^c fv_k \leq cv_{ik}^c \quad \forall i \in I, j \in J, c \in C \quad (11)$$

$$\sum_i T_{ijk}^c \geq dmin_{jk}^c \quad \forall j \in J, k \in K, c \in C \quad (12)$$

$$M(1 - CO_AUX_k^c) \geq \sum_j d_{jk}^c - \sum_i S_{ik} - \sum_i dn_{ik}^c \quad \forall k \in K, c \in C \quad (13)$$

$$M CO_AUX_k^c \geq \sum_i S_{ik} + \sum_i dn_{ik}^c - \sum_j d_{jk}^c \quad \forall k \in K, c \in C \quad (14)$$

$$CO_{ik}^c \leq M(1 - CO_AUX_k^c) \quad \forall i \in I, k \in K, c \in C \quad (15)$$

$$\text{cot}_k^c X_i \geq \text{CO}_{ik}^c \quad \forall i \in I, k \in K, c \in C \quad (16)$$

$$\text{cot}_k^c \geq \sum_i \text{CO}_{ik}^c \quad \forall k \in K, c \in C \quad (17)$$

$$\sum_i \text{CO}_{ik}^c \leq \sum_j d_{jk}^c - \sum_i S_{ik} - \sum_i \text{dn}_{ik}^c + \text{CO_AUX}_k^c M \quad \forall k \in K, c \in C \quad (18)$$

$$S_{ik}, T_{ijk}^c, F_{jk}^c, \text{CO}_{ik}^c \geq 0 \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, c \in C \quad (19)$$

$$X_i, \text{CO_AUX}_k^c \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, k \in K, c \in C \quad (20)$$

A função objetivo é representada em (1), onde o custo de abertura de depósitos é apresentado no primeiro termo e os custos esperados do transporte e da falta são mostrados nos segundo e terceiro termos, respectivamente. A Restrição (2) limita a quantidade de produtos que pode ser pré-posicionada de acordo com o disponível. A Restrição (3) faz com que o modelo somente possa pré-posicionar produtos se o depósito for aberto. Restrições (4)–(5) limitam os números mínimo e máximo de depósitos que podem ser aberto. Restrição (6) garante que todos os nós tenham cobertura de pelo menos um depósito aberto. Restrição (7) limita o transporte às quantidades pré-posicionadas adicionadas às doações e material adquirido após o desastre. A Restrição (8) traz o balanço entre demanda, transporte e falta. Restrição (9) limita o transporte à abertura do depósito. As Restrições (10)–(11) representam os limites de capacidade das vias de distribuição. Restrição (12) estabelece o mínimo de atendimento em cada nó. Restrições (13)–(14) estabelecem que a variável auxiliar CO_AUX_k^c estará ativa apenas quando houver falta de oferta, ou seja, quando o número de doações somado à quantidade pré-posicionável for inferior à demanda. Nas restrições (16)–(17) a quantidade a ser adquirida está limitada por um contrato com fornecedores e apenas é possível para os depósitos abertos. A Restrição (18) estabelece que a aquisição, quando houver, tem de ser menor ou igual do que o déficit de oferta.

O custo referente à compra não é considerado neste problema uma vez que a disponibilidade dos recursos não incorre em um custo direto para o tomador de decisão. Um estudo mais aprofundado sobre o real custo do material adquirido é deixado para estudos futuros. Restrições (19)–(20) se referem ao espaço viável para as variáveis.

3.1 Modelagem de risco por CVaR

Como dito anteriormente, a modelagem de aversão ao risco pode ser feita através da medida CVaR, assim como definida em Rockafellar & Uryasev (2000), entre outros motivos para tal, pode-se destacar a sua aplicabilidade em problemas de otimização no contexto de LH. Desta forma, Condeixa *et al.* (2017) apresentam a definição matemática de CVaR como abaixo.

$$\text{CVaR}_\alpha(f(x,s)) = \inf \left\{ \eta + \frac{1}{1-\alpha} E_{c \in C} [f(x,c) - \eta]^+ \right\}, \quad (21)$$

onde $f(x,s)$ é o valor do custo em cada cenário s para a decisão de primeiro estágio x e η representa o VaR quando a função é minimizada. Este é o pior custo dos melhores cenários cuja probabilidade acumulada soma α . A diferença estritamente positiva calculada por $[f(x,s) - \eta]^+$ é dividida por $(1 - \alpha)$ para se modularizar a probabilidade dos piores cenários, seguindo o conceito de probabilidade condicional (Rockafellar & Uryasev, 2000). Desta forma, a função objetivo com aversão a riscos se designa pela Restrição (22).

Modelo (2)

$$\min \left\{ \sum_i g_i X_i + (1 - \beta) p^c \left[\sum_i \sum_j \left(ct_{ij}^c \sum_k T_{ijk}^c \right) + \sum_j \sum_k w_{jk}^c F_{jk}^c \right] + \beta \left(\eta + \frac{(\sum_c p^c \cdot \sum_i \sum_j \sum_k Y_{j,k,c})}{1 - \alpha} \right) \right\} \quad (22)$$

Restrições (2)–(20)

Adicionam-se às restrições (2) – (20) as seguintes inequações:

$$\sum_i \sum_j \sum_k Y_{j,k,c} \geq (\sum_i \sum_j (ct_{ij}^c \sum_k T_{ijk}^c) + \sum_j \sum_k w_{jk}^c F_{jk}^c) - \eta \quad \forall c \in C \quad (23)$$

$$Y_{j,k,c} \geq 0 \quad \forall j \in J, k \in K, c \in C \quad (24)$$

As inequações (23)–(24) definem tanto o VaR (η) quanto a variável auxiliar $Y_{j,k,c}$, que computa os valores de custo acima do VaR.

Em Condeixa *et al.* (2017), os autores propõem o *Mean Risk Value of Perfect Information* (MRVPI), o *Mean Risk Value of Stochastic Solution* (MRVSS) e o *Avoidable Shortage* (AS) como medidas para acessar a qualidade nas soluções estocásticas sob risco. Estas são as únicas medidas de qualidade na solução estocástica de dois estágios com sensibilidade ao risco propostas na literatura de LH. As duas primeiras medidas são originalmente concebidas por Noyan (2012) e servem como uma adaptação das tradicionais medidas EVPI e VSS (Birge & Louveaux, 2011). A terceira medida é proposta em Condeixa *et al.* (2017) e serve para acessar a qualidade da solução humanitária do pré-posicionamento e distribuição de produtos. Esta é mensurada da seguinte forma,

$$AS = \sum_c \left(p_c \sum_j \sum_k F_{jk}^c \right) - \sum_k \sum_c \left(p_c \max \left(\sum_j d_{jk}^c - \left(\sum_i dn_{ik}^c + e_k + cot_k^c \right), 0 \right) \right) \quad (25)$$

onde é retirado do número de faltas esperado, i.e. $\sum_c (p_c (\sum_j \sum_k f_{jk}^c))$, o número de faltas que é impossível evitar, ou seja, o quanto a demanda supera a oferta em média, i.e. $\sum_k \sum_c (p_c (\max(\sum_j d_{jk}^c - (\sum_i dn_{ik}^c + e_k + cot_k^c), 0)))$.

O Modelo 2 segue a lógica de se contrapor as preferências de aversão ao risco às decisões de localização (X_i), alocação (S_{ik}) e distribuição (T_{ijk}^c) e respectivos custos, como descritos pela FO (22). Desta forma, os resultados encontrados no modelo podem ser variados de acordo com o parâmetro de aversão ao risco (β) adotado.

3.2 Extensões do modelo original

Algumas modificações no Modelo (2) podem contribuir para o enriquecimento do estudo de caso no que tange a flexibilidade de decisão e a interpretabilidade dos diferentes efeitos dos *trade-offs*. Algumas mudanças são implementadas para o desenvolvimento de um novo modelo, a fim de se estudar os resultados sob a ótica do desempenho-3E. Estas são:

- i) Quatro possibilidades de tamanhos de depósito serão tratadas para abertura em cada centro de distribuição i variando as capacidades entre 100% e 25% das originais;
- ii) Retira-se o número mínimo de depósitos a serem abertos para se estudar o efeito da falta de efetividade (cobertura);
- iii) Retiram-se as restrições de estoque mínimo para efeitos de flexibilidade no modelo;
- iv) Como a qualidade de multiproduto no Modelo (2) não contribui em Condeixa *et al.* (2017) para nenhuma análise direta dos efeitos da resposta, o novo modelo conta apenas com um produto considerado de alta prioridade (p.ex. água);

Espera-se que o Modelo (3) ilustre de uma forma mais ampla os efeitos advindos dos *trade-offs* na etapa de preparação de um desastre. Em termos de modelagem, o conjunto K no novo modelo compreende os tipos de depósito a serem abertos e não mais os tipos de produto. Assim, as variáveis e parâmetros no Modelo (2) dependentes dos tipos de produtos passam a não ter mais o índice k e todas as variáveis e parâmetros dependentes do centro de distribuição passam a ter o índice k que agora representa o tipo de depósito. Uma nova variável DNK_{ik}^c é criada para designar a quantidade de doação alocada em cada tipo k de depósito e duas novas restrições são feitas. De acordo com as alterações propostas, a estrutura inicial do problema (1)–(20) é então reescrita abaixo.

Modelo (3)

$$\min \left\{ \sum_k \sum_i g_{ik} X_{ik} + (1 - \beta) p^c \left[\sum_i \sum_j \left(ct_{ij}^c \sum_k T_{ijk}^c \right) + \sum_j wF_j^c \right] + \beta \left(\eta + \frac{(\sum_c p^c \cdot \sum_i \sum_j \sum_k Y_j^c)}{1 - \alpha} \right) \right\} \quad (26)$$

$$\sum_i S_{ik} \leq e \quad \forall k \in K, i \in I \quad (27)$$

$$l_{ik} X_{ik} \geq S_{ik} \quad \forall i \in I, k \in K \quad (28)$$

$$\sum_i \sum_k X_{ik} a_{ij} \geq 1 \quad j \in J \quad (29)$$

$$\sum_i \sum_k X_{ik} \leq qd_{\max} \quad (30)$$

$$\sum_j Y_j^c \geq (\sum_i \sum_j (ct_{ij}^c \sum_k T_{ijk}^c) + \sum_j (wF_j^c)) - \eta \quad \forall c \in C \quad (31)$$

$$\sum_j T_{ijk}^c \leq S_{ik} + DNK_{ik}^c + CO_{ik}^c \quad \forall i \in I, k \in K, c \in C \quad (32)$$

$$F_j^c = d_j^c - \sum_i \sum_k T_{ijk}^c \quad \forall j \in J, c \in C \quad (33)$$

$$l_{ik} X_{ik} \geq \sum_j T_{ijk}^c \quad \forall i \in I, k \in K, c \in C \quad (34)$$

$$T_{ijk}^c fw \leq cp_{ij}^c \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, c \in C \quad (35)$$

$$T_{ijk}^c fv \leq cv_{ij}^c \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, c \in C \quad (36)$$

$$M(1 - CO_AUX_k^c) \geq \sum_j d_j^c - \sum_i S_{ik} - \sum_i dn_i^c \quad \forall k \in K, c \in C \quad (37)$$

$$M CO_AUX_k^c \geq \sum_i S_{ik} + \sum_i dn_i^c - \sum_j d_j^c \quad \forall k \in K, c \in C \quad (38)$$

$$CO_{ik}^c \leq M(1 - CO_AUX_k^c) \quad \forall i \in I, k \in K, c \in C \quad (39)$$

$$\cot^c X_{ik} \geq CO_{ik}^c \quad \forall i \in I, k \in K, c \in C \quad (40)$$

$$\cot^c \geq \sum_i \sum_k CO_{ik}^c \quad \forall k \in K, c \in C \quad (41)$$

$$\sum_i CO_{ik}^c \leq \sum_j d_j^c - \sum_i S_{ik} - \sum_i dn_i^c + CO_AUX_k^c M \quad \forall k \in K, c \in C \quad (42)$$

$$\sum_k DNK_{ik}^c \leq dn_i^c \quad \forall i \in I, c \in C \quad (43)$$

$$DNK_{ik}^c \leq dn_i^c X_{ik} \quad \forall i \in I, c \in C \quad (44)$$

$$S_{ik}, T_{ijk}^c, F_j^c, CO_{ik}^c, DNK_{ik}^c \geq 0 \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, c \in C \quad (45)$$

$$X_{ik}, CO_AUX_k^c \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, k \in K, c \in C \quad (46)$$

As funções objetivo são tratadas na sessão seguinte, sendo estas as restrições a serem tratadas pelos modelos (3.1)–(3.4).

Algumas premissas e limitações dos Modelos (2) e (3), como apresentado em Condeixa *et al.* (2017) e Condeixa *et al.* (2018) são:

- Seguindo diretrizes humanitárias de atendimento, há um número mínimo de depósitos a serem abertos para manter um nível mínimo de serviço;
- Apenas um número limitado de produtos que pode ser pré-posicionado;
- Consideram-se as localizações candidatas para estabelecimento de um depósito seguras o suficiente para resistirem às enchentes de qualquer dimensão que se tem registrado;
- A descontinuidade de vias de acesso é representada pelos diferentes custos de transporte de acordo com os cenários estabelecidos;
- Todos os itens doados e pré-posicionados estão prontos para distribuição às localidades afetadas pelo desastre logo após o mesmo;
- Os estoques são renovados periodicamente para que não haja problemas de perecimento de nenhum material;
- O modelo é representado em um período único de reação ao desastre;
- O problema de distribuição de produtos não é abordado no presente trabalho;
- A priorização na distribuição não é um problema representado no modelo; e
- Considera-se que os nove cenários representam de forma satisfatória as possíveis consequências do desastre analisado.

3.2.1 Modelos seguindo o desempenho-3E

Como demonstrado em Huang *et al.* (2012), a resposta de um problema de LH pode ser tratado sob a ótica da eficiência, eficácia e equidade (3E) como definidos anteriormente. Quatro novos modelos são propostos no intuito de se analisar os diferentes *trade-offs* entre os 3E, estes se utilizam das seguintes funções e inequações.

$$\min \left\{ \sum_c p^c \left(\sum_j F_j^c \right) \right\} \quad (47)$$

$$\min \left\{ \max_{\substack{j,j' \in J \\ c \in C}} \left\{ \frac{F_j^c}{d_j^c} - \frac{F_{j'}^c}{d_{j'}^c} \right\} \right\} \quad (48)$$

$$\min \{ \text{PCovMax} \} \quad (49)$$

$$\text{PCovMax} \geq \frac{F_j^c}{d_j^c} - \frac{F_{j'}^c}{d_{j'}^c} \quad \forall j \in J, j' \in J, c \in C \quad (50)$$

$$\sum_i \sum_k g_{ik} X_{ik} + \sum_i \sum_j \left(ct_{ij}^c \sum_k T_{ijk}^c \right) \leq b_effic \quad (51)$$

$$\sum_c p^c \left(\sum_j F_j^c \right) \leq b_effec \quad (52)$$

$$\frac{F_j^c}{d_j^c} - \frac{F_{j'}^c}{d_{j'}^c} \leq b_equit \quad \forall j \in J, j' \in J, c \in C \quad (53)$$

A FO (47) se refere ao mínimo número de faltas esperado e, em outras palavras, à máxima cobertura ou nível de serviço. A FO (48) traz o objetivo relativo à máxima equidade seguindo o conceito de justiça Rawlsiana (Karsu & Morton, 2015). Como (48) não é linear, a linearização desta é obtida através da FO (49) aliada à Restrição (50). A Restrição (51) estabelece um máximo para o nível de eficiência, definido por b_effic , e serve para se simular situações em que há um orçamento limitado antes do desastre. Restrição (52) estabelece um máximo de faltas a se ocorrer, definido por b_effec , após o desastre ocorrer. Restrição (53) define um limite superior, definido por b_equit , de desigualdade no nível de atendimento entre os nós.

Cada experimento apresentado na seção posterior utiliza-se de algumas das FOs (26), (47) ou (49) e das Restrições (51) e (53) para analisar os 3E.

3.2.2 Experimentação

Cada experimento aqui apresentado é introduzido e detalhado no trabalho de Condeixa *et al.* (2018). O Modelo (3) é adaptado para se tratar os possíveis *trade-offs* através da mudança das FOs e das restrições utilizadas. Estas podem ser divididas entre restrições estruturais, (27) – (46), que são aplicadas a todos os

modelos, ou restrições dedicadas, (47) – (53), que se referem exclusivamente a um dos 3E.

3.2.2.1 Experimento 1

O primeiro experimento visa abordar o quanto a eficiência e a efetividade do resultado podem ser comprometidas pela pré-determinação de um nível de equidade. A FO do Modelo (2) é utilizada na condição de neutralidade ao risco ($\beta=0$) com um custo de falta empiricamente escolhido, $w = 4$.

Alguns autores debatem como a equidade impacta o resultado de operações logísticas em termos de eficiência e eficácia, como é o caso do trabalho de Bertsimas *et al.* (2011). No contexto da LH, trabalhos prévios servem como exemplos de como incorporar a equidade à solução e quais resoluções podem se tirar a partir daí, como é o caso em Tzeng *et al.* (2007), Vitoriano *et al.* (2011), Davis *et al.* (2013), Zolfaghari & Peyghaleh (2015), e outros.

Modelo (3.1): Otimização conjunta de eficiência e efetividade com restrições de equidade

FO: (26)

Restrições: (27) – (46), (53)

3.2.2.2 Experimento 2

Como discutido anteriormente, restrições de orçamento podem ser bem latentes no caso da resposta nas primeiras 72h após uma calamidade. Uma questão a se abordar é como o TD deveria se comportar no momento da definição do orçamento necessário para a etapa de preparação para um desastre. Nesta linha de pensamento, o experimento 2 serve como um guia do *trade-off* entre a eficiência e a efetividade. Apesar dessa discussão estar presente em trabalhos tanto nas áreas de gestão de operações quanto na de otimização de operações logísticas, uma abordagem na LH traz nuances diferentes às anteriores uma vez que trata de vidas humanas.

Este experimento tem como base comparar a resposta ao desastre em termos de cobertura (efetividade) e de gastos estimados (eficiência) na situação de orçamento limitado, os dois modelos propostos utilizam a restrição (48). Neste

experimento os valores de β e w mantêm-se os mesmos em comparação ao último experimento.

Modelo (3.2a): Otimização conjunta de eficiência e efetividade com restrições de eficiência

FO: (26)

Restrições: (27) – (46), (51)

Modelo (3.2b): Otimização da efetividade com restrições de eficiência

FO: (44)

Restrições: (27) – (46), (51)

3.2.2.3 Experimento 3

Este pode ser considerado o principal experimento do atual trabalho onde as questões de risco, equidade, eficiência e efetividade são debatidas conjuntamente. A principal discussão residente neste ensaio é o da análise da efetividade (em termos da falta esperada) em função da penalidade pela falta em modelos com diferentes abordagens de aversão ao risco e de equidade.

Este experimento se assemelha ao proposto em Zolfaghari & Peyghaleh (2015), onde equidade e disponibilidade de orçamento são analisados individualmente e conjuntamente. Neste trabalho, no lugar de uma restrição de eficiência, adotam-se instâncias com e sem a política de aversão ao risco. Desta forma compara-se o efeito conjunto de equidade e risco em um modelo de otimização da eficiência e efetividade.

Como padrão de análise, adota-se uma alta aversão ao risco ($\beta=0.99$) para que o efeito da inclusão do CVaR seja sensível à qualquer mudança do custo da falta (w). No entanto, nada impede que no futuro outros trabalhos façam uma análise de sensibilidade no parâmetro de risco.

Modelo (3.3a): Otimização conjunta de eficiência e efetividade com sensibilidade ao risco

Instância 1: $\beta=0$

Instância 2: $\beta=0.99$

FO: (26)

Restrições: (27) – (46)

Modelo (3.3b): Otimização conjunta de eficiência e efetividade com sensibilidade ao risco e restrições de equidade

Instância 1: $\beta=0$

Instância 2: $\beta=0.99$

FO: (26)

Restrições: (27) – (46), (53)

3.2.2.4 Experimento 4

Em alguns exemplos da assistência humanitária como distribuição de doação de comida para os mais necessitados ou decisão de reparação de danos, a equidade pode ser um fator chave para o TD. Desta forma, o experimento 4 pretende analisar os efeitos da minimização da inequidade.

Modelo (3.4): Otimização da equidade

FO: (49)

Restrições: (27) – (47), (50)

4 Resultados e discussões

Neste capítulo se apresentam os principais *insights* tirados dos artigos de Condeixa *et al.* (2017) através da otimização sob risco e Condeixa *et al.* (2018) com a análise dos quatro experimentos propostos. O caso analisado se refere às opções de preparação para o atendimento de pessoas na ocasião de uma enchente ou alagamento na mesorregião do Vale do Paraíba localizada no estado de São Paulo, no Brasil. A região de análise compreende 34 municípios com possibilidades históricas de alagamento e 5 possibilidades de depósito que se justificam pela disponibilidade operacional da Defesa Civil e pelo baixo histórico de acidentes. Mais detalhes sobre o caso podem ser encontrados em de Brito *et al.* (2014), onde o mesmo foi proposto originalmente. O estudo de caso se refere à distribuição de múltiplos produtos como garrafas de água, cestas básicas, colchões, etc. nas primeiras 72h após o desastre, período mais crítico para o primeiro atendimento às vítimas.

4.1 Análise de aversão ao risco

Como descrito em Condeixa *et al.* (2017), o dimensionamento da penalidade pela falta influencia diretamente a qualidade da resposta provida pelo modelo. A Tabela 2 mostra a resposta do Modelo (1) numa situação neutra a risco ($\beta=0$). A primeira coluna desta tabela mostra seis valores diferentes para a penalidade pelo não atendimento da demanda, como definido previamente pelos autores. O primeiro valor faz referência a uma penalidade fixa de 100, os outros cinco são baseados numa penalidade calculada a partir de 72h de privação seguindo a função exponencial proposta em Holguín-Veras *et al.* (2016), denominada *Deprivation Cost* (DC). Em seguida são apontados os valores de EVPI, VSS, Custos Operacionais, valor do problema recursivo (RP), faltas possíveis de serem evitadas (AS) e o número de depósitos abertos.

Tabela 2 – *Avoidable shortage* (AS) para diversos valores de w . Fonte: Condeixa *et al.* (2017)

	EVPI (%)	VSS (%)	Custo Operacional	RP	AS	Depósitos Abertos
W = 100	8.47	0.04	98,911	791,580	1,068	2
W = 1%DC	0.65	0.25	98,911	126,066	1,068	2
W = 10%DC	5.07	0.09	98,911	370,469	1,068	2
W = 50%DC	8.23	7.09	159,532	1,354,206	462	3
W = 70%DC	8.12	8.66	220,647	1,357,366	230	4
W = 100%DC	5.84	12.20	281,970	2,502,630	0	5

É perceptível que o valor de VSS aumenta a medida que o custo de privação aumenta, ou seja, quanto maior a penalidade pela falta maior o valor da modelagem estocástica. Além disso, quanto maior o custo da penalidade, menor o número de faltas permitido, esta relação é esperada devido à FO do Modelo (1), que leva em consideração o custo da falta.

Já na Tabela 3, o risco é considerado para diversos valores de β na situação em que $w = 10\%DC$. Percebe-se que ao se aumentar a aversão ao risco, o número de depósitos abertos aumenta e o número de faltas (representado na coluna “*Avoidable Shortage*”) diminui. Esta troca entre custo operacional e número de faltas ocorre, pois quando a aversão ao risco aumenta, os custos esperados nos piores cenários são diminuídos e conseqüentemente o número de faltas. Portanto, este comportamento do modelo faz com que as faltas nos piores cenários sejam também controladas o que diminui o número de faltas esperado e conseqüentemente o AS.

Um gráfico mais completo se encontra na Figura 1 onde a falta possível de ser evitada é confrontada com o valor da falta (w) e com o parâmetro de aversão ao risco (β). O gráfico superior traz a minimização de custos indiferente ao risco (RP) enquanto o gráfico inferior traz o mesmo com sensibilidade ao risco (MRRP). Os quadros na Figura 1 representam o nível de falta como uma superfície planejada, quanto mais escuro maior o índice de faltas. O que se percebe é que com uma maior aversão ao risco no modelo MRRP, o AS se torna mais sensível ao aumento do custo da falta de forma que esta diminui para valores menores de w . Isto significa que, em um ambiente com aversão ao risco, a chance de se incorrer na falta é menor ainda que o custo da falta denominado seja baixo.

Tabela 3 – Variação do índice de aversão ao risco. Fonte: adaptado de Condeixa *et al.* (2017)

β	Custo operacional	Avoidable Shortage	Depósitos Abertos
0	98,911	1,068	2
0.01	98,911	1,068	2
0.1	98,911	1,068	2
0.2	98,911	1,068	2
0.3	98,911	1,068	2
0.4	159,532	462	3
0.5	159,532	462	3
0.6	159,532	462	3
0.7	159,532	462	3
0.8	159,532	462	3
0.9	159,532	462	3

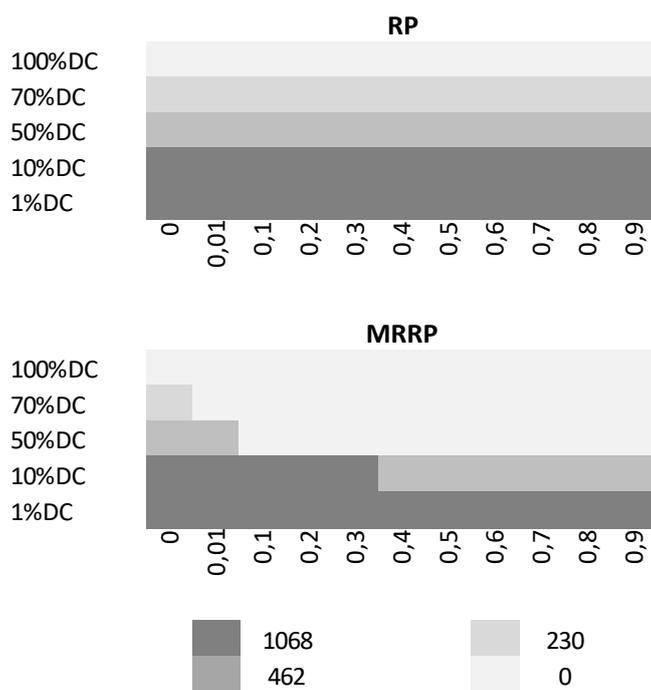


Figura 1 – Análise do AS, DC e aversão ao risco. Fonte: adaptado de Condeixa *et al.* (2017)

4.2 Trade-offs entre os 3E

Há um longo tempo, a equidade tem se mostrado como contraponto da eficiência ou da efetividade na prestação de um serviço (Mandell, 1991; Golany & Tamir, 1995). Apesar de ser um objetivo cuja importância é amplamente reconhecida, os TD na LH podem procurar atender o maior número de pessoas

possível ao menor custo sem necessariamente recorrer a uma resposta igualitária. Isto pode ocorrer porque em situações com recursos escassos, p.ex. em países com um baixo PIB, o ganho de equidade pode significar deixar de atender pessoas carentes. Além disso, como o conceito de justiça pode ser aplicado por diferentes interpretações, a reivindicação de injustiça de um nó não atendido (ou atendido de maneira escassa) pode ser defendida como justiça pelos nós mais bem atendidos.

Os principais resultados do experimento 1 a serem defendidos neste contexto é que a busca pela equidade pode causar um impacto irrisório na eficiência ou efetividade da LH. Ao contrário dos trabalhos de Orgut *et al.* (2015) e Zolfaghari e Peyghaleh (2015), os resultados deste experimento mostram que os pontos de demanda podem ser atendidos de maneira igual com uma perda de menos de 1% na eficiência e na efetividade da solução. Esta igualdade no atendimento vem quando a diferença de atendimento relativo entre o nó melhor atendido e o pior se torna 0%, como pode ser visto pelo nível de inequidade apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Nível de inequidade entre nós (de 0% a 100%) e eficiência. Fonte: Condeixa *et al.* (2018)

b_equit	Custo operacional	<i>Avoidable Shortage</i>
0%	43.248	5.623
5%	43.231	5.612
10%	43.211	5.612
15%	43.191	5.612
20%	43.171	5.612
25%	43.151	5.612
30%	43.131	5.612
35%	43.111	5.612
40%	43.092	5.612
45%	43.072	5.612
50%	43.053	5.612
55%	43.034	5.612
60%	43.020	5.612
65%	43.008	5.612
70%	42.996	5.612
75%	42.984	5.612
80%	42.974	5.612
85%	42.969	5.612
90%	42.963	5.612
95%	42.958	5.612
100%	42.952	5.612

Obviamente esta relação entre equidade e os demais atributos depende das restrições do problema como a capacidade de atendimento. No entanto, ao contrário do que se pode parecer intuitivo, a equidade pode ser um alvo pouco oneroso para a população ou para o TD.

Os resultados do experimento 2 demonstram como as restrições de orçamento na fase de preparação para o desastre podem afetar a qualidade da solução final. Esta análise demonstra algumas nuances em se otimizar a efetividade somente, sem considerar a eficiência ou equidade na função objetivo, assim como é proposto em Salmerón & Apte (2010), Orgut *et al.* (2015) e Turkes *et al.* (2017). Na Tabela 5, os valores esperados de custo operacional (EOC) e falta (ES) são discriminados de acordo com o orçamento disponível, ou predeterminado, nos modelos (3.2a) e (3.2b) onde são otimizados, respectivamente, o nível de cobertura e os custos. A terceira coluna traz a diferença percentual entre os dois resultados para cada faixa do orçamento.

O problema passa a ser viável a partir de um orçamento entre \$10.000 e \$20.000 e o número de faltas esperado reduz-se gradualmente com o crescimento do orçamento e dos custos operacionais. Quando o orçamento se encontra mais restrito do que \$70.000, a redução das faltas mantém uma média de 25% a cada \$10.000 de aumento no orçamento. Com um orçamento maior do que \$80.000 percebe-se um decréscimo marginal (menor do que 1%) nas faltas esperadas. A diferença entre a maximização da cobertura e a minimização de custos em termos de ES chega a ser de 16.7% para um aumento no EOC de 21.9%. A partir do momento em que o orçamento aumenta esta diferença entre ES diminui, ao contrário da diferença entre EOCs. Com um orçamento de 130.000, o custo operacional de uma solução de máxima cobertura – Modelo (3.2b) – é quase o dobro do que seria no modelo de minimização de custos para uma diferença de menos de 1% de redução no número de faltas esperado. O senso de custo-benefício nesta situação se mostra bastante limitado. Outro problema na maximização de cobertura é o de que com o aumento do orçamento pode haver uma solução que tenha um maior EOC sem reduzir o ES, como visto quando o orçamento aumenta de \$120.000 para \$130.000 ou de \$140.000 para \$150.000. Isto ocorre porque o Modelo (3.2b) gera múltiplas soluções para o mesmo

atendimento e assim, pela falta de um controle restrito de eficiência, há um gasto maior sem se comprovar o ganho na efetividade.

Tabela 5 – Resultados do experimento 2. Fonte: Condeixa *et al.* (2018)

Orçamento	Cobertura Máxima		Min Custo		Δ	
	EOC	ES	EOC	ES	EOC	ES
0	-	-	-	-	-	-
10,000	-	-	-	-	-	-
20,000	19,270	26,933	19,257	26,933	0.1%	0.0%
30,000	25,262	19,147	23,111	19,457	9.3%	-1.6%
40,000	29,773	13,764	29,667	13,764	0.4%	0.0%
50,000	32,696	10,476	32,581	10,476	0.4%	0.0%
60,000	34,786	8,406	34,359	8,406	1.2%	0.0%
70,000	42,526	6,514	34,896	7,824	21.9%	-16.7%
80,000	42,942	6,074	39,697	6,618	8.2%	-8.2%
90,000	43,364	5,647	42,917	5,647	1.0%	0.0%
100,000	50,719	5,596	42,952	5,612	18.1%	-0.3%
110,000	55,846	5,581	42,952	5,612	30.0%	-0.5%
120,000	67,849	5,566	42,952	5,612	58.0%	-0.8%
130,000	85,429	5,566	42,952	5,612	98.9%	-0.8%
140,000	92,848	5,551	42,952	5,612	116.2%	-1.1%
150,000	96,835	5,551	42,952	5,612	125.4%	-1.1%

Os gastos operacionais na minimização de custo seguem o mesmo padrão depois dos \$90.000. Isto quer dizer que não há um gasto maior mesmo que haja orçamento disponível, comportamento que não se confere na solução de mínima falta. Para se alcançar o número mínimo de faltas, a solução do Modelo (3.2b) utiliza quase o máximo de orçamento disponível em cenários com um maior nível de demanda. Isto quer dizer que orientado a um cenário de maiores danos, a maximização da cobertura pode chegar a um resultado desnecessariamente ineficiente.

Após os resultados dos dois primeiros experimentos, pode-se chegar a um entendimento inicial de como engajar tanto a eficiência quanto a equidade em um

problema de LH sem comprometer muito a efetividade da solução. O experimento 3 ajuda no aprofundamento da discussão sobre a fragilidade do modelo de minimização de custos por conta da definição de w . A Figura 2 e Figura 3 apresentam o EOC e ES nos modelos (3.3a) e (3.3b) nas duas instâncias para valores de w entre 0 e 4, enquanto a Figura 2 mostra o comportamento dos mesmos para valores de custo da falta de maior magnitude. A Figura 3 ainda traz os valores de minimização das faltas (Min Faltas) quando o orçamento disponível é o mesmo do maior orçamento utilizado entre os quatro modelos utilizados.

Nas duas primeiras figuras percebe-se que o Modelo (3.3b), com restrição à inequidade, tanto na instância 1, com aversão ao risco, quanto na instância 2, sem aversão ao risco, atinge um maior nível de efetividade na solução. A partir do custo da falta $w = 1$, os modelos com restrição de equidade conseguem atingir o nível mínimo de faltas esperado, ao contrário do modelo com minimização do custo e sem restrição de equidade. Este chega próximo ao nível mínimo de faltas possível pelo mesmo orçamento somente quando o custo da falta triplica.

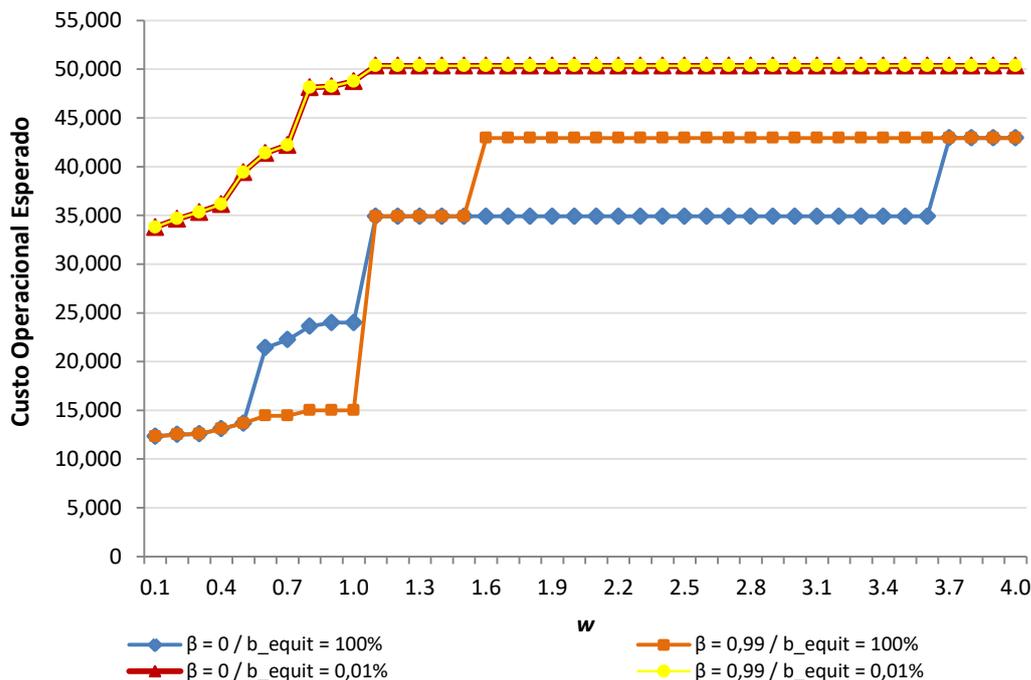


Figura 2 – Custo operacional esperado para as instâncias de 1 e 2 nos modelos (3.3a) e (3.3b) em função de w no experimento 3. Fonte: Condeixa *et al.* (2018)

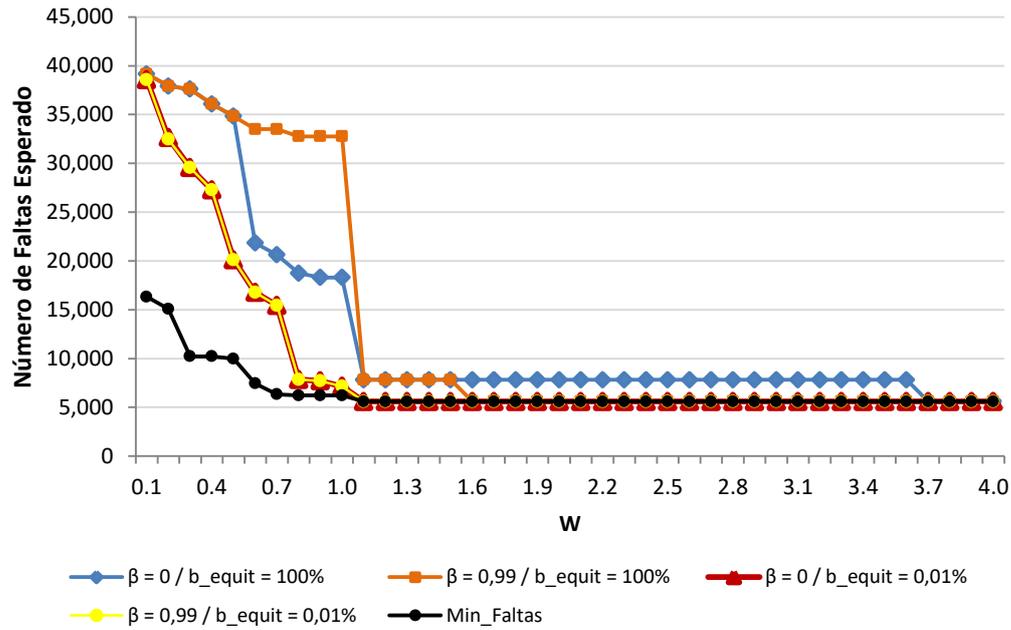


Figura 3 – Número de faltas esperado para as instâncias de 1 e 2 nos modelos (3.3a) e (3.3b) em função de w no experimento 3. Fonte: Condeixa *et al.* (2018)

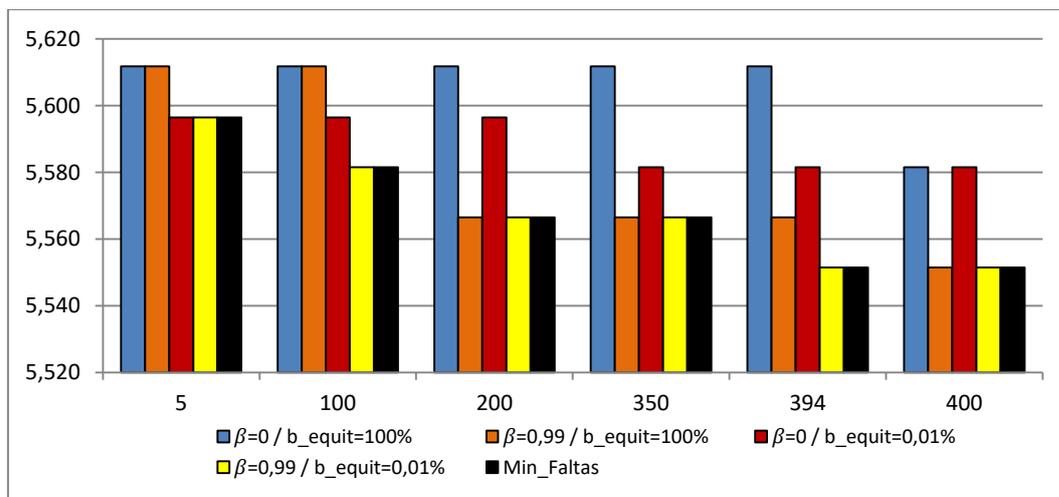


Figura 4 – Valores de falta esperados no experimento 3 para $w = 5, 100, 200, 350, 394$ e 400. Fonte: Condeixa *et al.* (2018)

Para maiores valores de w , o modelo com restrição de equidade mantém o nível de efetividade no mínimo de faltas apenas na instância em que há aversão ao risco. O nível de faltas no modelo de minimização de custos sem controle de equidade e neutro a risco está sempre maior ou igual aos demais. Pode-se então salientar que um modelo com um limite para inequidade ou aversão ao risco melhora a efetividade da solução, sendo tão melhor se os dois estiverem presentes.

Finalmente, no intuito de se esclarecer extensivamente o papel da equidade na solução, o modelo 3.4 resolve o problema proposto minimizando a inequidade entre os nós de demanda. A Figura 5 mostra os valores de ES para vários orçamentos disponíveis entre \$20.000 (onde a solução passa a ser viável, como visto anteriormente) e \$500.000 variando de \$10.000 em \$10.000. O gráfico também traz pela linha tracejada o número mínimo esperado de faltas para o orçamento disponível no mesmo intervalo.

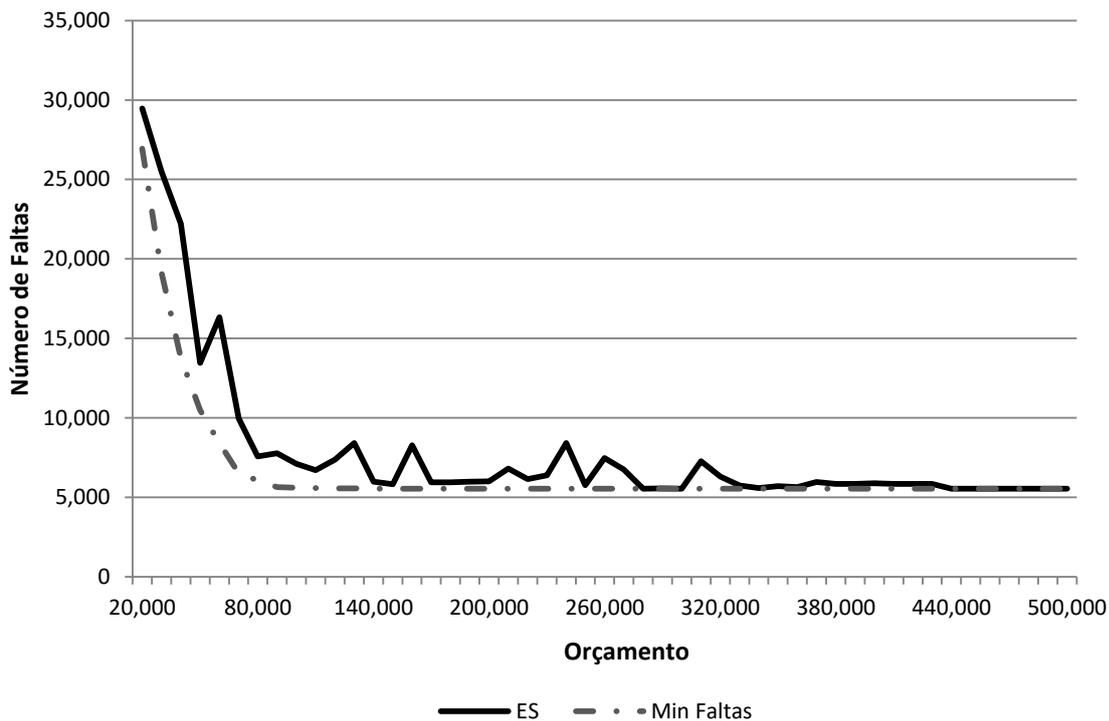


Figura 5 – Valor esperado de faltas na minimização de inequidade, experimento 4. Fonte: Condeixa *et al.* (2018)

Apesar da minimização da inequidade trazer um valor satisfatório para as faltas esperadas quando o orçamento atinge um valor alto, o decréscimo de faltas não é monotônico. Isto quer dizer que para um aumento de orçamento, relaxando a restrição, a efetividade na resposta pode aumentar ou diminuir o que não é um comportamento desejado pelo TD. Isto ocorre por conta das múltiplas soluções com o mesmo valor de equidade, ou seja, a solução proposta pelo modelo pode alcançar uma resposta ineficaz mesmo tendo o orçamento para manter um nível melhor de efetividade sem comprometer a equidade ótima. Este tipo de comportamento divergente também ocorre em outros trabalhos que confrontam

efetividade ou eficiência e equidade, como Zolfaghari & Peyghaleh (2015) e Rezaei-Malek (2016b). Este pode se mostrar um indicativo de que o estabelecimento da equidade em uma solução ótima na LH pode ser mais eficiente e efetivo quando aplicado se através de uma restrição.

5 Considerações finais

O presente trabalho se propõe a esclarecer, através de modelos de otimização, como a busca pela eficiência, efetividade, equidade (3E) e aversão ao risco na LH impacta o resultado de acordo com as prioridades estabelecidas pelo TD. O desempenho dos modelos propostos é determinado através do conceito de desempenho-3E, seguindo a orientação de Condeixa *et al.* (2018). Os objetivos e restrições referentes a cada um dos 3E com ou sem controle de risco são analisados através de modelos com o foco de estabelecer alguns possíveis conflitos (*trade-offs*) entre dois ou mais atributos do desempenho humanitário.

Dentre os possíveis *trade-offs* existentes da otimização ou restrição dos 3E os mais discutidos neste trabalho, em Condeixa *et al.* (2017) e Condeixa *et al.* (2018) foram através da minimização da inequidade, da minimização da falta esperada ou da minimização dos custos contando com o custo da falta.

Em Condeixa *et al.* (2017), o risco da solução em termos de eficiência e efetividade é medido através do CVaR e os resultados operacionais em cada cenário são confrontados entre a otimização com aversão ao risco e a otimização neutra ao risco. A qualidade do modelo com aversão ao risco é explicitada através do MRVSS, MRVPI e AS, onde se infere que uma maior aversão ao risco aumenta o valor da modelagem estocástica de dois estágios controlando-se o nível de faltas que podem ser evitadas. Pode-se concluir que perfis mais avessos à tomada de riscos tanto financeiros quanto de não atendimento à demanda garantem um menor nível de faltas na média.

Somando-se a este trabalho, Condeixa *et al.* (2018) propõem quatro experimentos para confrontar outros *trade-offs* típicos na fase de preparação da LH. Os principais *insights* derivados destes trabalhos, e consequentemente contribuição dos mesmos, são:

- A definição da aversão ao risco e o controle da inequidade podem auxiliar consistentemente a efetividade da solução de um problema de minimização

de custo na LH. Isto pode ser visto tanto pelo decréscimo no AS quando há o aumento de β em Condeixa et al. (2017) e pela aplicação da restrição do nível de inequidade em 0,01%, como visto no experimento 3 em Condeixa et al. (2018);

- A restrição de orçamento (eficiência) pode tornar um problema de maximização de cobertura (efetividade) desnecessariamente ineficiente, como indicado pelos resultados do experimento 2 (Tabela 5);
- A equidade da solução na LH pode ser alcançada sem um sacrifício significativo da eficiência ou efetividade da solução ótima, de acordo com o experimento 1, há um incremento marginal nos custos operacionais esperados (0,7%) e no número de faltas esperado (0,2%);
- Apesar da possibilidade da equidade se apresentar como uma restrição pouco onerosa à resposta final, a minimização da inequidade sem um controle de eficiência ou efetividade podem tornar a solução humanitária divergente em relação ao ótimo de eficiência ou efetividade.

Através dos experimentos propostos, este trabalho apresenta uma visão conjuntural dos conflitos existentes na LH auxiliando trabalhos acadêmicos e decisões na prática humanitária a ter um guia dos efeitos diversos da otimização ou restrição dos 3E com sensibilidade ao risco.

Desta forma, respondemos à pergunta de pesquisa apresentando as diversas relações e *trade-offs* entre os atributos-3E e a sensibilidade ao risco de forma que a priorização dentro da preparação para desastres pode ser mais bem compreendida. Trabalhos futuros podem abordar diferentes técnicas de otimização multiobjetivo como aquelas levantadas em Gutjahr *et al.* (2016). Outra extensão seria através da modelagem robusta como visto em Ben-Tal *et al.* (2011) seguindo a mesma orientação de desempenho-3E. Seguindo esta mesma orientação uma revisão sistemática da literatura com o intuito de classificar os trabalhos em LH sob a óptica da desempenho-3E poderia se mostrar valiosa para a proposição de uma avaliação padronizada da qualidade na solução humanitária. Outra possibilidade de extensão seria através da utilização da mesma metodologia de avaliação de *trade-offs* e risco em diferentes casos na LH ou em diferentes instâncias do mesmo problema. Futuramente um *framework* com os principais passos da avaliação dos 3E de um modelo de otimização na LH pode se mostrar

útil para praticantes e teóricos na área. Finalmente novas medidas de risco poderiam enriquecer as conclusões do presente trabalho.

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: Logistics and Transportation Review*, v. 75, p. 145–163, 2015.

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, W. G. **Interfaces with Other Disciplines OR / MS research in disaster operations management.** *European Journal of Operational Research*, v. 175, n. December 2004, p. 475–493, 2006.

BALCIK, B.; BEAMON, B. M. **Facility location in humanitarian relief.** *International Journal of Logistics Research and Applications : A Leading Journal of Supply Chain Management*, n. February 2013, p. 37–41, 2008.

BALCIK, B.; BEAMON, B. M.; SMILOWITZ, K. **Last Mile Distribution in Humanitarian Relief Last Mile Distribution.** *Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations*, v. 12, n. 2, p. 51–63, 2008.

BARBAROSOGLU, G.; ARDA, Y. **A Two-Stage Stochastic Programming Framework for Transportation Planning in Disaster Response.** *Journal of the Operational Research Society*, v. 55, n. 1, p. 43–53, 2004.

BARZINPOUR, F.; ESMAEILI, V. **A multi-objective relief chain location distribution model for urban disaster management.** *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 70, p. 1291–1302, 2014.

BEHESHTIFAR, S.; ALIMOAHMADI, A. **A multiobjective optimization approach for location-allocation of clinics.** *International Transactions in Operational Research*, v. 22, n. 2, p. 313–328, 2015.

BEN-TAL, A. *et al.* **Robust optimization for emergency logistics planning : Risk mitigation in humanitarian relief supply chains.** *Transportation Research Part B*, v. 45, n. 8, p. 1177–1189, 2011.

BERTSIMAS, D. *et al.* **The Price of Fairness.** *Operations Research*, v. 59, n. 1, p. 17–31, 2011.

BIRGE, J. R.; LOUVEAUX, F. **Introduction to Stochastic Programming.** 2. ed. New York: Springer Series in Operations Research and Financial Engineering, 2011.

BOZORGI-AMIRI, A.; JABALAMELI, M. S.; AL-E-HASHEM, S. M. J. M. **A multi-objective robust stochastic programming model for disaster relief logistics under uncertainty.** *OR Spektrum*, v. 35, p. 905–933, 2013.

- CHAPMAN, A. G.; MITCHELL, J. E. **A fair division approach to humanitarian logistics inspired by conditional value-at-risk.** *Annals of Operations Research*, p. 1–19, 2016.
- C. L. HU; LIU, X.; HUA, Y. K. **A bi-objective robust model for emergency resource allocation under uncertainty.** *International Journal of Production Research*, v. 54, n. 24, p. 7421–7438, 2016.
- CONDEIXA, L. D. *et al.* **Disaster relief supply pre-positioning optimization: A risk analysis via shortage mitigation.** *International Journal of Disaster Risk Reduction*, v. 25, n. September, p. 238–247, 2017.
- CONDEIXA, L. D.; LEIRAS, A.; OLIVEIRA, F. **Effectiveness, efficiency and equity competing goals in a humanitarian logistics situation,** RIO DE JANEIRO: PUC-RIO-CTC-DEI, 2018, 24p. Relatório Técnico.
- DAVIS, L. B. *et al.* **Inventory planning and coordination in disaster relief efforts.** *International Journal of Production Economics*, v. 141, n. 2, p. 561–573, 2013.
- DE BRITO, I.; LEIRAS, A.; YOSHIKAZI, H. T. Y. **Stochastic optimization applied to the prepositioning of disaster relief supply decisions in Brazil.** POMS meeting annals 2014
- DÖYEN, A.; ARAS, N.; BARBAROSO, G. **A two-echelon stochastic facility location model for humanitarian relief logistics.** *Optimization Letters*, v. 6, n. 6, p. 1123–1145, 2012.
- GALINDO, G.; BATTÀ, R. **Review of recent developments in OR / MS research in disaster operations management.** *European Journal of Operational Research*, v. 230, n. 2, p. 201–211, 2013a.
- GALINDO, G.; BATTÀ, R. **Prepositioning of supplies in preparation for a hurricane under potential destruction of prepositioned supplies.** *Socio-Economic Planning Sciences*, v. 47, n. 1, p. 20–37, 2013b.
- GARRIDO, R. A.; LAMAS, P.; PINO, F. J. **A stochastic programming approach for floods emergency logistics.** *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, v. 75, p. 18–31, 2015.
- GOLANY, B.; TAMIR, E. **Evaluating Efficiency-Effectiveness-Equality Trade-Offs : A Data Envelopment Analysis Approach.** *Management Science*, v. 41, n. 7, p. 1171–1184, 1995.
- GRASS, E.; FISCHER, K. **Surveys in Operations Research and Management Science Two-stage stochastic programming in disaster management: A literature survey.** *Surveys in Operations Research and Management Science*, 2016.
- GUTJAHR, W. J.; NOLZ, P. C. **Multicriteria optimization in humanitarian aid.** *European Journal of Operational Research*, v. 252, n. 2, p. 351–366, 2016.
- HOLGUÍN-VERAS, J. *et al.* **Econometric estimation of deprivation cost functions: A contingent valuation experiment.** *Journal of Operations Management*, p. 1–13, 2016.
- HONG, X. *et al.* **Stochastic Network Design for Disaster Preparedness.** *IIE Transactions*, v. 47, n. 4, p. 329–357, 2014.

HOYOS, M. C.; MORALES, R. S.; AKHAVAN-TABATABAEI, R. **OR Models with Stochastic Components in Disaster Operations Management: A Literature Survey**. Computers and Industrial Engineering, 2014.

HUANG, K. *et al.* **Modeling multiple humanitarian objectives in emergency response to large-scale disasters**. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, v. 75, p. 1–17, 2015.

HUANG, M.; SMILOWITZ, K.; BALCIK, B. **Models for relief routing: Equity, efficiency and efficacy**. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, v. 48, n. 1, p. 2–18, 2012.

KARSU, O.; MORTON, A. **Inequity averse optimisation in operational research**. European Journal of Operational Research, 2015.

LIN, Y. H. *et al.* **A logistics model for emergency supply of critical items in the aftermath of a disaster**. Socio-Economic Planning Sciences, v. 45, n. 4, p. 132–145, 2011.

LODREE, E. J.; BALLARD, K. N.; SONG, C. H. **Pre-positioning hurricane supplies in a commercial supply chain**. Socio-Economic Planning Sciences, v. 46, n. 4, p. 291–305, 2012.

MANDELL, M. B. **Modelling Effectiveness-Equity Trade-Offs in Public Service Delivery Systems**. Management Science, v. 37, n. 4, p. 467–482, 1991.

MARKOWITZ, H. **Portfolio Selection**. The Journal of Finance, v. 7, n. 1, p. 77–91, 1952.

MARSH, M.; SCHILLING, D. **Equity Measurement in Facility Location Analysis: A Review and Framework**. European Journal of Operational Research, v. 74, n. 1, p. 1–17, 1994.

MCCOY, J. H.; LEE, H. L. **Using fairness models to improve equity in health delivery fleet management**. Production and Operations Management, v. 23, n. 6, p. 965–977, 2014.

METE, H. O.; ZABINSKY, Z. B. **Stochastic optimization of medical supply location and distribution in disaster management**. International Journal of Production Economics, v. 126, n. 1, p. 76–84, 2010.

MOHAMMADI, R.; GHOMI, S. M. T. F.; JOLAI, F. **Pre-positioning emergency supplies for earthquake response: A new multi-objective particle swarm optimization algorithm**. Applied Mathematical Modelling, v. 40, n. 9–10, p. 5183–5199, 2016.

NOLZ, P. C.; SEMET, F.; DOERNER, K. F. **Risk approaches for delivering disaster relief supplies**. OR Spektrum, v. 33, p. 543–569, 2011.

NOYAN, N. **Risk-averse two-stage stochastic programming with an application to disaster management**. Computers and Operation Research, v. 39, n. 3, p. 541–559, 2012.

ORGUT, I. S. *et al.* **Modeling for the Equitable and Effective Distribution of Donated Food under Capacity Constraints**. IISE Transactions, v. August, 2015.

PACHECO, G. G.; BATTI, R. **Forecast-driven model for prepositioning supplies in preparation for a foreseen hurricane**. Journal of the Operational Research Society, p. 1–16, 2015.

PAUL, J. A.; MACDONALD, L. **Location and capacity allocations decisions to mitigate the impacts of unexpected disasters**. *European Journal of Operational Research*, v. 251, n. 1, p. 252–263, 2016.

PÉREZ-RODRÍGUEZ, N. **Inventory-Allocation Distribution Models for Postdisaster Humanitarian Logistics with Explicit Consideration of Deprivation Costs**. *Transportation Science*, p. 1261–1285, 2015.

RANSIKARBUM, K.; MASON, S. J. **Goal programming-based post-disaster decision making for integrated relief distribution and early-stage network restoration**. *International Journal of Production Economics*, v. 182, p. 324–341, 2016.

RAWLS, C. G.; TURNQUIST, M. A. **Pre-positioning of emergency supplies for disaster response**. *Transportation Research Part B*, v. 44, n. 4, p. 521–534, 2010.

RAWLS, C. G.; TURNQUIST, M. A. **Socio-Economic Planning Sciences Pre-positioning and dynamic delivery planning for short-term response following a natural disaster**. *Socio-Economic Planning Sciences*, v. 46, n. 1, p. 46–54, 2012.

RENEMMO, S. J. *et al.* **A three-stage stochastic facility routing model for disaster response planning**. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, v. 62, p. 116–135, 2014.

REZAEI-MALEK, M. *et al.* **An interactive approach for designing a robust disaster relief logistics network with perishable commodities**. *Computers and Industrial Engineering*, v. 94, p. 201–215, 2016a.

REZAEI-MALEK, M.; TAVAKKOLI-MOGHADDAM, R.; CHEIKHROUHOU, N. **An approximation approach to a trade-off among efficiency, efficacy, and balance for relief pre-positioning in disaster management**. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, v. 93, p. 485–509, 2016b.

ROCKAFELLAR, R. T.; URYASEV, S. **Optimization of conditional value-at-risk**. *Journal of Risk*, v. 2, n. 3, p. 21–41, 2000.

SALMERÓN, J.; APTE, A. **Stochastic Optimization for Natural Disaster Asset Prepositioning**. *Production and Operations Management*, v. 19, n. 5, p. 561–574, 2010.

SAVAS, E. S. **On Equity in Providing Public Services**. *Management Science*, v. 24, n. 8, p. 800–808, 1978.

STEIN, J. J. **Medical preparedness for disaster**. *California medicine*, v. 90, n. 5, p. 353–5, 1959.

S. HU; HAN, C.; MENG, L. **A scenario planning approach for propositioning rescue centers for urban waterlog disasters**. *Computers and Industrial Engineering*, v. 87, p. 425–435, 2015.

S. HU; HAN, C.; MENG, L. **Stochastic optimization for investment in facilities in emergency prevention**. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, v. 89, p. 14–31, 2016.

TOFIGHI, S.; TORABI, S. A.; MANSOURI, S. A. **Humanitarian logistics network design under mixed uncertainty**. *European Journal of Operational*

Research, v. 250, n. 1, p. 239–250, 2016.

TURKEŠ, R.; CUERVO, D. P.; SÖRENSEN, K. **Pre-positioning of emergency supplies: does putting a price on human life help to save lives?** *Annals of Operations Research*, 2017.

TZENG, G.; CHENG, H.-J.; HUANG, T. D. **Multi-objective optimal planning for designing relief delivery systems.** *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, v. 43, p. 673–686, 2007.

VAN WASSENHOVE, L. N. **Humanitarian aid logistics: supply chain management in high gear.** *Journal of the Operational Research Society*, v. 57, p. 475–489, 2006.

VITORIANO, B. *et al.* **A multi-criteria optimization model for humanitarian aid distribution.** *Journal of Global Optimization*, v. 51, p. 189–208, 2011.

ZOLFAGHARI, M. R.; PEYGHALEH, E. **Implementation of Equity in Resource Allocation for Regional Earthquake Risk Mitigation Using Two-Stage Stochastic Programming.** *Risk Analysis*, v. 35, n. 3, p. 434–458, 2015.