

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
CURSO DE MESTRADO EM GEOTECNIA E TRANSPORTES

**ANÁLISE DA DINÂMICA DA DISTRIBUIÇÃO URBANA
DE MERCADORIAS ANTE UMA SITUAÇÃO DE
VULNERABILIDADE: EXPLORANDO UMA
ABORDAGEM MULTIAGENTE**

DANIELA ANTUNES LESSA

Belo Horizonte
2015

DANIELA ANTUNES LESSA

**ANÁLISE DA DINÂMICA DA DISTRIBUIÇÃO URBANA
DE MERCADORIAS ANTE UMA SITUAÇÃO DE
VULNERABILIDADE: EXPLORANDO UMA
ABORDAGEM MULTIAGENTE**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Geotecnia e Transportes da Universidade Federal de Minas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geotecnia e Transportes.

Área de concentração: Transportes

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Leise Kelli de Oliveira

BELO HORIZONTE

ESCOLA DE ENGENHARIA DA UFMG

2015

L638a

Lessa, Daniela Antunes.

Análise dinâmica da distribuição urbana de mercadorias ante uma situação de vulnerabilidade [Manuscrito]: explorando uma abordagem multiagente / Daniela Antunes Lessa. – 2015.

xiii, 114 f., enc.: il.

Orientadora: Leise Kelli de Oliveira.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices: f.114.

Bibliografia: f.101-113.

1. Transportes - Teses. 2. Logística empresarial - Teses.
3. Distribuição de mercadorias - Teses. 4. Chuvas - Teses. 5. Inundações - Teses. I. Oliveira, Leise Kelli de. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 656(043)



FOLHA DE APROVAÇÃO

**ANÁLISE DA DINÂMICA DA DISTRIBUIÇÃO URBANA DE
MERCADORIAS ANTE UMA SITUAÇÃO DE VULNERABILIDADE:
EXPLORANDO UMA ABORDAGEM MULTIAGENTE**

DANIELA ANTUNES LESSA

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOTECNIA E TRANSPORTES, como requisito para obtenção do grau de Mestre em GEOTECNIA E TRANSPORTES, área de concentração TRANSPORTES.

Aprovada em 26 de agosto de 2015, pela banca constituída pelos membros:

Profa. Leise Kelli de Oliveira - Orientador
ufmg

Profa. Heloisa Maria Barbosa
UFMG

Prof. Paulo Eduardo Maciel de Almeida
CEFET-MG

Belo Horizonte, 26 de agosto de 2015.

AGRADECIMENTOS

À Prof^a. Dr^a Leise Kelli de Oliveira, pela confiança, pela oportunidade cedida de trabalhar ao seu lado desde a graduação, por ser a grande incentivadora na superação de meus limites, pela infinita disponibilidade, por ser meu grande exemplo de determinação e profissionalismo, pelas doces seções de terapia, pela alegria, pela amizade, e, principalmente, por ter me dado como única opção a de ser “empurrada na piscina”. Entre medos, aflições, desesperos e braçadas, eu aprendi a nadar!

Ao Prof. Dr. Leandro Cardoso, pelo grande exemplo de pessoa que é, pela disponibilidade, pelos conselhos voltados à minha dissertação e à minha escolha pela docência, pelas conversas de corredor e pela agilidade e eficiência ao responder os meus e-mails cheios de dúvidas, questionamentos e contestações.

Ao Prof. Dr. Marcelo Franco Porto, pelo acesso ao Laboratório do Nucletrans e a disponibilização dos computadores para a realização das longas simulações.

Aos Professores Heloisa Barbosa e Paulo Almeida por participarem da banca e pelas contribuições que enriqueceram o presente trabalho.

À Kátia, pela disponibilidade e agilidade na resolução de todos os meus problemas. Por cuidar dos meus pontos, da minha bolsa e das minhas matrículas. Pelo carinho, sorrisos e conversas diárias.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão da bolsa durante o período de realização deste mestrado.

Ao Departamento de Engenharia de Transportes e Geotecnia da Escola de Engenharia (UFMG), por me acolher como aluna desde o período da graduação.

Ao Waltair Marques Rodrigues e à Sayonara Lopes, em nome da BHTRANS, pela disponibilização dos dados imprescindíveis ao desenvolvimento do modelo.

Aos alunos de graduação Bruna Calazans e Eduardo Oliveira, por permanecerem sempre ao meu lado ao longo dessa caminhada, pelas noites de sono perdidas destinadas a este estudo e por todos os chocolates que serviram de motivação para enfrentar a “longa” e árdua reta final.

À minha, não apenas colega de mestrado, mas GRANDE AMIGA, Bárbara Ribeiro Alves de Abreu, por ser meu incentivo e incentivada. Andamos juntas nesse caminho difícil e, juntas, conseguimos vencer todos os percalços que se atreveram a aparecer.

Aos meus GRANDES AMIGOS de vida e de engenharia, Elaine, Vivi, Gabi, Bella, Carlos, Danis & Gláucia, Débora, Janaína, Brisa, Helena, Lorena e Lopes.

À minha mãe, minha guia companheira.

Ao meu pai, sempre um porto.

Ao meu irmão, meu anjo protetor.

A todos que, de alguma forma, participaram dessa longa etapa.

Obrigada!

A Deus
Aos meus pais e meu irmão
Aos meus companheiros de vida: meus amigos!

*"Une idée qui n'est pas dangereuse ne mérite pas d'être
appelée une idée."*

*(Uma ideia que não seja desafiadora não merece ser
chamada de ideia)
Oscar Wilde*

RESUMO

O crescente volume da produção, consumo e circulação de bens e serviços em uma região favorece sua expansão econômica, gera um acréscimo significativo na demanda por transporte, que por sua vez, gera impactos negativos de ordem social, econômica e ambiental. Dentro desse contexto, o transporte urbano de mercadorias deve ser um componente importante no planejamento urbano e sua racionalização é essencial não somente para o sucesso da cadeia de suprimentos, mas também para o crescimento econômico sustentável. Surge, dessa forma, uma nova área voltada ao planejamento de transportes conhecida como logística urbana, que para se adequar às características atuais de mercado, deve ser dinâmica e requer agilidade e flexibilidade para lidar com situações críticas e inesperadas, definidas como vulnerabilidade. Este estudo visa, com o suporte da modelagem multiagente, avaliar a dinâmica da distribuição urbana de mercadorias ante a uma situação de vulnerabilidade. As investigações foram fundamentadas nos objetivos e comportamentos individuais dos agentes e os resultados foram apresentados em termos de impactos ambientais e financeiros. Para tanto, buscou-se compreender as três grandes temáticas que envolvem a pesquisa: logística urbana, vulnerabilidade e modelagem multiagente e relacionar estudos já realizados envolvendo a vulnerabilidade, principalmente no que tange às inundações, aos estudos de modelagem, para, então criar um modelo e analisar uma medida de resposta para a distribuição urbana *vis-à-vis* uma situação de vulnerabilidade. Os resultados das simulações possibilitaram verificar a consistência dos fundamentos teóricos adotados e a coerência das rotinas analíticas utilizadas na construção do modelo. Ainda, os resultados mostraram a viabilidade e potencialidade de aplicação dessa modelagem para análise de impactos dos incidentes e de medidas voltadas à sua redução, na perspectiva da logística urbana. Os indicadores analisados permitiram concluir que a divulgação de alertas à população, desde que bem empregada, pode ser uma solução, em situações de incidentes, para a logística urbana. A pesquisa abre, dessa forma, um vasto campo para novos estudos relacionados ao transporte urbano de cargas.

Palavras-chave: Logística Urbana; Distribuição Urbana de Mercadorias; Modelagem Multiagente; Vulnerabilidade; Medidas Mitigadoras; Chuva; Inundação.

ABSTRACT

The increasing volume of production, consumption and movement of goods and services in a region favors its economic expansion, generates a significant increase on the demand for transport, which causes negative impacts on the social, economic and environmental order. Within this context, the urban transport of goods must be an important component on the urban planning, and its rationalization is essential not only to the success of the supply chain, but also to the sustainable economic growth. Thus, arises a new area, focused on the transport planning, known as urban logistics, that, in order to suit the current market features, must be dynamic, requiring agility and flexibility to deal with crucial and unexpected situations, defined as vulnerability. This study aims, through the support of multi-agent modeling, to evaluate the dynamic of the urban distribution of goods in front of a situation of vulnerability. The investigations were founded on the agents' objectives and their individual behaviors and the results were presented in terms of environmental and financial impacts. For this purpose, we sought to comprehend the three big themes that concerns this research: urban logistics, vulnerability and multi-agent modeling and to relate studies that have already been carried out involving the vulnerability, mainly regarding flooding, to the studies of modeling, and then, to create a model and to analyze a response measure to the urban distribution in front of a situation of vulnerability. The simulation results enabled us to verify the consistency of the adopted theoretical foundations and the coherence of the analytical routines used on the model construction. The results still showed the viability and the potentiality of the application of this modeling on the analysis of incidental impacts and measures to decrease them, on the perspective of urban logistics. The analyzed indicators permitted us to conclude that the disclosure of alerts to population, since it is well used, can be the solution in incidental situations, for urban logistic. The research opens, on this way, a wide field to new studies related to load urban transport.

Keywords: City Logistics; Urban Distribution of Goods; Multi-Agent Modeling; Vulnerability; Mitigating Measures; Rain; Flooding.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	IX
LISTA DE TABELAS.....	XIII
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO.....	2
1.2 JUSTIFICATIVA E CONTRIBUIÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA DO ESTUDO.....	3
1.3 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA E DAS HIPÓTESES.....	4
1.4 LIMITAÇÕES DO ESTUDO.....	5
1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	5
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	7
2.1 LOGÍSTICA URBANA.....	7
2.1.1 <i>Logística urbana no contexto do planejamento urbano</i>	10
2.1.2 <i>Agentes envolvidos na logística urbana</i>	11
2.1.3 <i>Desafios da logística urbana</i>	13
2.2 VULNERABILIDADE E LOGÍSTICA URBANA.....	15
2.2.1 <i>Vulnerabilidade da logística urbana</i>	18
2.2.2 <i>Medidas de controle e mitigação</i>	20
2.2.3 <i>Modelos para a avaliação da vulnerabilidade</i>	21
2.3 MODELOS EM LOGÍSTICA URBANA.....	23
2.4 MODELAGEM MULTIAGENTE.....	25
2.5 RESUMO DO CAPÍTULO.....	30
2.5.1 <i>Respondendo a subquestão 1</i>	31
2.5.2 <i>Respondendo a subquestão 2</i>	31
2.5.3 <i>Respondendo a subquestão 3</i>	31
2.5.4 <i>Respondendo a subquestão 4</i>	32
2.5.5 <i>Respondendo a subquestão 5</i>	32
3 METODOLOGIA.....	33
3.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA E A IDENTIFICAÇÃO DOS AGENTES.....	35
3.2 IDENTIFICAÇÃO E DECOMPOSIÇÃO DO SISTEMA.....	37
3.3 ARQUITETURA DO MODELO.....	38
3.3.1 <i>Construção do modelo multiagente no MATSim</i>	39
3.3.2 <i>Funcionamento do modelo</i>	41
3.4 ÁREA DE ESTUDO.....	42
3.5 OBTENÇÃO DOS DADOS.....	44
3.6 DEFINIÇÃO DOS CENÁRIOS E SIMULAÇÃO.....	45
3.7 HIPÓTESES, PARÂMETROS E PREMISSAS DO MODELO.....	47
3.7.1 <i>Modelando uma cidade real</i>	49
3.7.2 <i>Modelando o transporte de passageiros</i>	52
3.7.3 <i>Modelando os veículos de carga e as entregas diárias</i>	52
3.7.4 <i>Tempo simulado e jornada de trabalho</i>	53
3.7.5 <i>Modelando a vulnerabilidade</i>	54
3.7.6 <i>Estimativa de emissão por veículo de carga</i>	57
3.7.7 <i>Limites de velocidade com precipitação</i>	58
3.7.8 <i>Avaliação econômica dos impactos</i>	59
3.8 VERIFICAÇÃO DO MODELO.....	63

4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	64
4.1	CENÁRIOS SEM ALERTA	65
4.1.1	<i>Efeito da chuva/inundação nas condições de tráfego</i>	65
4.1.2	<i>Efeito da chuva/inundação nos níveis de emissão de poluentes.....</i>	68
4.1.3	<i>Efeito da chuva/inundação nos custos</i>	72
4.1.4	<i>Efeito da chuva/inundação nas entregas de mercadorias.....</i>	75
4.2	CENÁRIOS COM ALERTA	76
4.2.1	<i>Efeito da chuva/inundação nas condições de tráfego</i>	76
4.2.2	<i>Efeito da chuva/inundação nos níveis de emissão de poluentes.....</i>	81
4.2.3	<i>Efeito da chuva/inundação nos custos</i>	85
4.2.4	<i>Efeito da chuva/inundação nas entregas de mercadorias.....</i>	87
4.4	ANALISANDO A EFICÁCIA DO SISTEMA DE ALERTAS SIMULADO NO MODELO CONSTRUÍDO.....	88
4.4.1	<i>Comparativo entre os impactos nas condições de tráfego para os cenários “Sem Alerta” e “Com Alerta”</i>	88
4.4.2	<i>Comparativo entre impactos nos níveis de emissão de poluentes nos “links atingidos” para os cenários “Sem Alerta” e “Com Alerta”.....</i>	90
4.4.3	<i>Comparativo entre impactos econômicos para os cenários “Sem Alerta” e “Com Alerta”</i>	91
4.4.4	<i>Comparativo entre impactos nas entregas de mercadorias para os cenários “Sem Alerta” e “Com Alerta”.....</i>	94
4.4.5	<i>Principais conclusões do capítulo.....</i>	95
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	99
	REFERÊNCIAS	101
	APÊNDICE A – SUREWAY!.....	114

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Contribuição técnico-científica do estudo.	4
Figura 1.2: Estrutura da dissertação.	6
Figura 2.1: Problemas gerados pelo transporte de cargas (Adaptado de QUISPEL, 2002).	9
Figura 2.2: Visão da estrutura da logística urbana (Adaptado de TANIGUCHI <i>et al.</i> , 2001). ..	11
Figura 2.3: Agentes da logística urbana (Adaptado de TANIGUCHI & THOMPSON, 2003).	12
Figura 2.4: Desafios da logística urbana (Adaptado de EHMKE, 2012).	14
Figura 2.5: Mapa conceitual: atributos do estudo (Adaptado de MARCHAND, 2009).	16
Figura 2.6: Ameaça, vulnerabilidade e risco (Adaptado de ALEXANDER, 2002).	17
Figura 2.7: Componentes que definem o risco (Adaptado de ZONENSEIN, 2007).	18
Figura 2.8: Modelos para estimar danos socioeconômicos de desastres (CANÇADO, 2009). ..	22
Figura 2.9: <i>Framework</i> de modelos (Adaptado de TANIGUCHI <i>et al.</i> , 2001).	25
Figura 2.10: Representação do modelo multiagente (Adaptado de WOOLDRIDGE, 2002). ..	27
Figura 3.1: Etapas do estudo.	34
Figura 3.2: Relação dos comportamentos dos agentes (Adaptado de Taniguchi <i>et al.</i> , 2001). ..	36
Figura 3.3: Desenvolvimento do modelo.	39
Figura 3.4: As etapas da simulação do MATSim (Adaptado de HUGENBUSCH, 2012).	39
Figura 3.5: <i>Framework</i> do modelo multiagente.	41
Figura 3.6: Município de Belo Horizonte (ANTP, 2013).	42
Figura 3.7: Área de estudo (Adaptado de BELO HORIZONTE, 2012).	43
Figura 3.8: Pontos de inundação da Av. Tereza Cristina.	43
Figura 3.9: Localização dos pontos de inundação frequente na Av. Tereza Cristina.	44
Figura 3.10: Análise multisistêmica.	47
Figura 3.11: Parte da rede utilizada pelo estudo.	49
Figura 3.12: Dispersão dos estabelecimentos em Belo Horizonte.	51
Figura 3.13: Divisão modal referencial para o modelo.	52
Figura 3.14: Distribuição das viagens (Adaptado de MINAS GERAIS, 2012).	54
Figura 3.15: Alternativas de saída da Av. Tereza Cristina em situações de inundação.	55
Figura 3.16: Curvas de Precipitação (Adaptado de BELO HORIZONTE, 2009).	56
Figura 3.17: Curvas Referenciais para Macrodrenagem.	56
Figura 3.18: Mancha de inundação – Ribeirão Arrudas: Avenida Tereza Cristina (Adaptado de BELO HORIZONTE, 2009).	57
Figura 3.19: Alteração de rota mediante uma interrupção de um <i>link</i> (Adaptado de GOES, 2014).	60

Figura 4.1: Definições utilizadas no capítulo.....	64
Figura 4.2: Variação da quantidade de viagens de veículos de carga nos “links atingidos” (07h - 09h).	66
Figura 4.3: Variação da velocidade média dos veículos de carga nos “links atingidos” (07h - 09h).....	66
Figura 4.4: Variação do tempo de viagem dos veículos de carga nos “links atingidos” (07h - 09h).....	66
Figura 4.5: Relação entre o tempo de viagem e velocidade média nos “links atingidos”	67
Figura 4.6: Comparação entre as quantidades de viagens dos veículos de carga nos “links atingidos” e “não atingidos” (07h - 09h).....	67
Figura 4.7: Comparação entre as velocidades média dos veículos de carga nos “links atingidos” e nos “não atingidos” (07h - 09h).....	68
Figura 4.8: Comparação entre os tempos de viagem dos veículos de carga nos “links atingidos” e nos “não atingidos” (07h - 09h).....	68
Figura 4.9: Emissões de poluentes dos veículos de carga nos “links atingidos” (07h - 09h). .	69
Figura 4.10: Variação das emissões de poluentes em relação à velocidade.	69
Figura 4.11: Porcentagem dos “links atingidos” que apresentaram reclamações no final do dia.	70
Figura 4.12: Emissão de NO _x com os respectivos números de links com reclamações no final do dia.	70
Figura 4.13: Emissão de MP com os respectivos números de links com reclamações no final do dia.	71
Figura 4.14: Comparação entre as emissões de NO _x dos veículos de carga nos “links atingidos” e os “não atingidos” ao longo do dia simulado.	71
Figura 4.15: Comparação entre as emissões de MP dos veículos de carga nos “links atingidos” e os “não atingidos” ao longo do dia simulado.	72
Figura 4.16: Comparação entre o número de links com reclamações nas áreas afetadas e nas áreas externas aos incidentes.....	72
Figura 4.17: Relação entre a distância percorrida e custo mensal de combustível dos transportadores.	73
Figura 4.18: Relação entre o tempo de viagem e o seu custo mensal para os transportadores.	74
Figura 4.19: Relação entre a emissão total de poluentes e o seu custo mensal.....	75
Figura 4.20: Percentual de atrasos em relação ao número total de entregas nos “links atingidos”.	76
Figura 4.21: Percentual de atrasos em relação ao número total de entregas nos “links não atingidos”.	76
Figura 4.22: Variação da quantidade de viagens de veículos de carga nos “links atingidos” (07h - 09h).	77

Figura 4.23: Variação da velocidade média dos veículos de carga nos “links atingidos” (07h - 09h).....	77
Figura 4.24: Variação do tempo de viagem dos veículos de carga nos “links atingidos” (07h - 09h).....	78
Figura 4.25: Relação entre o tempo de viagem e velocidade média nos “links atingidos” (07h – 09h).....	78
Figura 4.26: Relação entre o tempo e a quantidade de viagens nos “links atingidos” (07h – 09h).	79
Figura 4.27: Comparação entre as quantidades de viagens dos veículos de carga nos “links atingidos” e nos “não atingidos” (07h - 09h).	79
Figura 4.28: Comparação entre as velocidades média dos veículos de carga nos “links atingidos” e nos “não atingidos” (07h - 09h).....	80
Figura 4.29: Comparação entre os tempos de viagem dos veículos de carga nos “links atingidos” e nos “não atingidos” (07h - 09h).....	80
Figura 4.30: Emissões de poluentes dos veículos de carga nos “links atingidos” (07h - 09h). 81	
Figura 4.31: Porcentagem dos “links atingidos” que apresentaram reclamações no final do dia.	82
Figura 4.32: Emissão de NO _x com os respectivos números de links com reclamações no final do dia.	82
Figura 4.33: Emissão de MP com os respectivos números de links com reclamações no final do dia.	83
Figura 4.34: Comparação entre as emissões de NO _x dos veículos de carga nos “links atingidos” e os “não atingidos” ao longo do dia simulado.	84
Figura 4.35: Comparação entre as emissões de MP dos veículos de carga nos “links atingidos” e os “não atingidos” ao longo do dia simulado.	84
Figura 4.36: Comparação entre o número de links com reclamações nas áreas afetadas e nas áreas externas aos incidentes.....	84
Figura 4.37: Relação entre a distância percorrida e custo mensal de combustível dos transportadores.	85
Figura 4.38: Relação entre o tempo de viagem e o seu custo mensal para os transportadores.86	
Figura 4.39: Relação entre a emissão total de poluentes e o seu custo mensal.....	86
Figura 4.40: Percentual de atrasos em relação ao número total de entregas nos “links atingidos”.	87
Figura 4.41: Percentual de atrasos em relação ao número total de entregas nos “links não atingidos”.	87
Figura 4.42: Comparativo entre as quantidades de viagem dos cenários “Sem Alerta” e “Com Alerta”.	88
Figura 4.43: Comparativo entre as velocidades média dos cenários “Sem Alerta” e “Com Alerta”.	89

Figura 4.44: Comparativo entre os tempos de viagem dos cenários “Sem Alerta” e “Com Alerta”	90
Figura 4.45: Comparativo entre as emissões de poluentes e reclamações dos cenários “Sem Alerta” e “Com Alerta”	91
Figura 4.46: Comparativo entre as distâncias e tempos de viagem dos cenários “Sem Alerta” e “Com Alerta”	92
Figura 4.47: Comparativo entre os custos de combustível dos cenários “Sem Alerta” e “Com Alerta”	92
Figura 4.48: Comparativo entre os custos de tempo de viagem dos cenários “Sem Alerta” e “Com Alerta”	93
Figura 4.49: Comparativo entre os custos ambiental dos cenários “Sem Alerta” e “Com Alerta”	93
Figura 4.50: Comparativo entre a quantidade de atrasos diários dos cenários “Sem Alerta” e “Com Alerta” nos “links atingidos”	94
Figura 4.51: Comparativo entre a quantidade de atrasos diários dos cenários “Sem Alerta” e “Com Alerta” nos “links não atingidos”	94
Figura 4.52: Resultados para todos os indicadores nos Cenários “Sem Alerta”	96
Figura 4.53: Resultados para os indicadores nos Cenários “Sem Alerta” (sem “atrasos de entrega” e “reclamações”)	97
Figura 4.54: Resultados para todos os indicadores nos Cenários “Com Alerta”	98
Figura 4.55: Resultados para os indicadores nos Cenários “Com Alerta” (sem “atrasos de entrega” e “reclamações”)	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Técnicas de simulação social (Adaptado de CANÇADO, 2009).....	22
Tabela 2.2: MBA <i>versus</i> MBE (Adaptado de CANÇADO, 2009).	27
Tabela 2.3: Enquadramento dos artigos aos temas tratados.	30
Tabela 3.1: Identificação dos agentes e suas propriedades.	37
Tabela 3.2: Cenários utilizados no modelo.	46
Tabela 3.3: Relação entre os tipos de atividades da Base CMC e os convertidos para o MATSim.	50
Tabela 3.4: Horários de funcionamento dos estabelecimentos.	54
Tabela 3.5: Distância de parada em asfalto rugoso e seco (DOTTA, 2000 <i>apud</i> YABIKU, 2006).	58
Tabela 3.6: Distância de parada em asfalto rugoso e molhado (DOTTA, 2000 <i>apud</i> YABIKU, 2006).....	58
Tabela 3.7: Redução dos limites de velocidade de veículos de passeio em situação de chuva.	59
Tabela 3.8: Redução dos limites de velocidade de veículos de carga e ônibus em situação de chuva.	59
Tabela 3.9: Valores médios de L/km para veículos a diesel (Adaptado de BRASIL, 2011)... ..	61

1 INTRODUÇÃO

As transformações comerciais, impactadas principalmente pelos avanços nas áreas de transportes e de comunicação, representam o principal fator que alimenta o processo de globalização. Os fluxos de bens e serviços, antes limitados pelas distâncias, hoje são uma atividade fundamental no desenvolvimento das cidades, com significativa influência no estilo de vida da população, na manutenção, na competitividade das atividades industriais e comerciais (CORREIA *et al.*, 2010b). Assim, o transporte de cargas representa o núcleo das relações nas áreas urbanas, uma vez que exerce funções concomitantes nas atividades ligadas à produção, distribuição e consumo (DABLANC & RODRIGUE, 2014).

Para Taniguchi & Heijden (2000), o crescente volume da produção, consumo e circulação de mercadorias e serviços em uma região favorece sua expansão econômica, gera um acréscimo significativo na demanda por transporte, que por sua vez, gera impactos negativos de ordem social, econômica e ambiental. Dessa forma, o transporte urbano de cargas deve ser um componente importante no planejamento urbano e sua racionalização é essencial não somente para o sucesso da cadeia de suprimentos, mas também para o crescimento econômico sustentável (TANIGUCHI & HEIJDEN, 2000; LINDHOLM & BEHRENDTS, 2012; DABLANC & RODRIGUE, 2014)

Surge, então, uma nova área voltada ao planejamento de transportes conhecida como logística urbana, tendo suas primeiras aplicações realizadas predominantemente no Japão e na Europa Ocidental (DABLANC & RODRIGUE, 2014). Rodrigue *et al.* (2013) a definem como os meios sobre os quais a distribuição de mercadorias pode ocorrer em áreas urbanas, bem como as estratégias para se melhorar a eficiência dos processos, de forma a reduzir o congestionamento e as externalidades ambientais. Porém, é importante ressaltar que ainda hoje, mesmo sendo de grande importância, essa área ainda se encontra limitada dentro do planejamento urbano, que volta sua atenção principalmente ao transporte de passageiros (LINDHOLM & BEHRENDTS, 2012).

A logística urbana possui grandes desafios representados pelas características atuais dos mercados (TANIGUCHI *et al.*, 2001). Assim, a distribuição urbana de mercadorias deve ser dinâmica e requer agilidade e flexibilidade para lidar com situações críticas e inesperadas, definidas como vulnerabilidades (CHAMBERS, 1989; PELLING, 2003).

Essas situações podem ser representadas por ameaças externas (i.e., chuvas, inundações, manifestações, obras e intervenções urbanas) ou pelas próprias características intrínsecas a ela (i.e., falta de infraestrutura adequada para carga e descarga, assim como a dificuldade de se evitar e absorver tais ameaças) (SILVESTRINI, 2013).

Dessa forma, a análise dos impactos de incidentes na distribuição de cargas é de fundamental importância para o planejamento e avaliação local, regional e global do risco e para a definição de medidas a serem tomadas pelos agentes envolvidos nesse sistema, a fim de solucionar e reduzir os problemas gerados, tornando o processo mais eficiente econômica, social e ambientalmente (CANÇADO, 2009). Leitão (2009) afirma que esse cenário propiciou o surgimento de sistemas de controle distribuídos e inteligentes, provendo a adaptabilidade e a agilidade requerida pela logística urbana.

Nesse contexto, o conceito de agentes apresenta-se como promissor no que diz respeito ao tratamento autônomo de situações de vulnerabilidade da distribuição urbana de mercadorias (DMONTIER, 2014). As análises baseadas em agentes são adequadas para o gerenciamento dos processos inseridos na logística urbana e foram utilizadas no presente trabalho para o estudo do comportamento dos agentes em situações de vulnerabilidade.

1.1 Objetivos do trabalho

O presente estudo buscou, com o suporte de um modelo construído a partir da base viária de Belo Horizonte (MG), avaliar a dinâmica da distribuição urbana de mercadorias ante a uma situação de vulnerabilidade. As investigações foram fundamentadas nos objetivos e comportamentos individuais dos agentes e os resultados, apresentados na perspectiva dos impactos ambientais e financeiros. Para se responder ao objetivo geral, definiram-se os seguintes objetivos específicos:

- Compreender as três grandes temáticas que envolvem a pesquisa: logística urbana, vulnerabilidade e modelagem multiagente;
- Relacionar estudos já realizados envolvendo a vulnerabilidade, principalmente no que tange às inundações, aos estudos de modelagem;
- Desenvolver um modelo multiagente que represente minimamente uma situação de incidente, causada por diferentes níveis de precipitação;
- Analisar os impactos desses incidentes no âmbito da logística urbana na perspectiva econômica e ambiental;

- Analisar o sistema de divulgação de alerta como uma resposta da logística urbana *vis-à-vis* uma situação de vulnerabilidade.

1.2 Justificativa e contribuição técnico-científica do estudo

Nos últimos anos, muitos estudos têm sido realizados no que se refere aos níveis de tráfego e seus impactos nas grandes cidades. Estes se concentram, essencialmente, na análise do transporte público e dos veículos motorizados particulares com uma preocupação relativamente pequena com o transporte urbano de cargas (BROWNE *et al.*, 2005). Segundo van Kolck (2010), houve um grande aumento de publicações dentro do campo da logística urbana, principalmente no que tange à modelagem matemática, afirmação reforçada por Wolpert & Reuter (2012) e Oliveira *et al.* (2013).

Os primeiros esforços dentro da modelagem matemática se deram na estimação de fretes, seguido da roteirização e cálculos de impactos. Ultimamente, diferentes políticas têm sido comparadas e estudadas por meio de modelos computacionais que permitem criar diversos cenários. Devido à grande complexidade da logística urbana, alguns modelos multiagente, antes aplicados principalmente às áreas da biologia, hoje têm sido desenvolvidos no âmbito de estudos voltados à logística de transportes, ainda que timidamente (TANIGUCHI *et al.*, 2012). Porém, alguns autores afirmam que as aplicações de agentes nessa área de pesquisa possuem baixo grau de maturidade, isto é, os modelos identificados estão distantes de serem utilizados operacionalmente (DMONTIER, 2014).

Segundo Wisetjindawat *et al.* (2013), embora a problemática da modelagem correlacionada à da vulnerabilidade da logística urbana seja importante, poucos estudos são encontrados na literatura. Em complemento, segundo o *survey* realizado por Davidsson *et al.* (2005) e Arango *et al.* (2012), a dinâmica da vulnerabilidade urbana ainda não foi avaliada a partir de uma modelagem multiagente.

Portanto, o presente estudo pretende contribuir nessa lacuna da literatura que tange a análise da dinâmica da vulnerabilidade da logística urbana, a partir de uma modelagem multiagente (Figura 1.1).

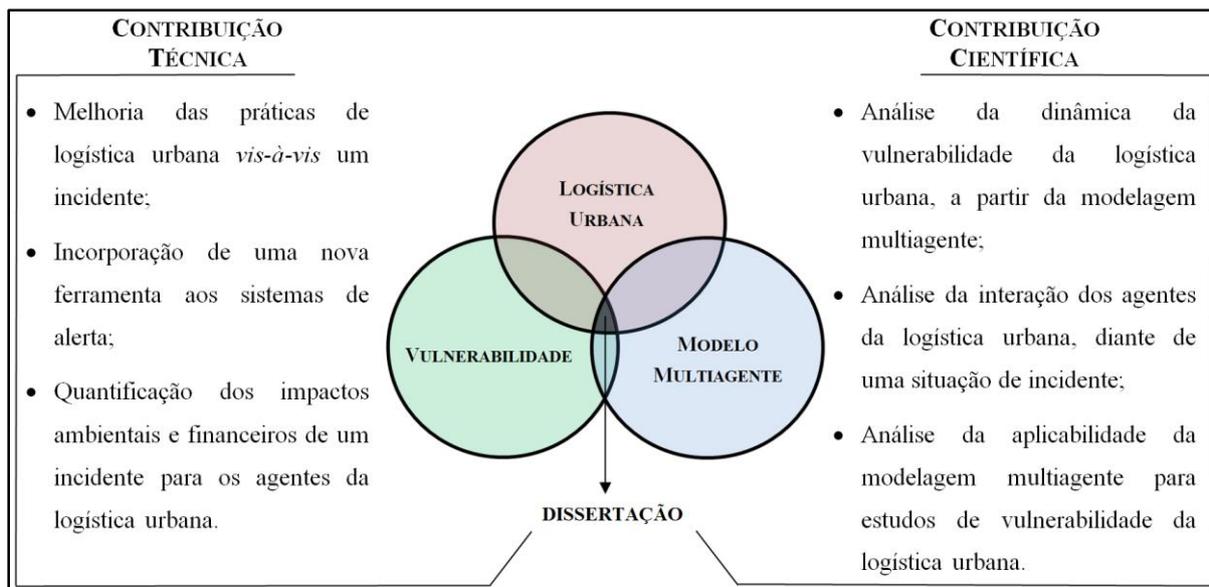


Figura 1.1: Contribuição técnico-científica do estudo.

1.3 Formulação do problema e das hipóteses

O principal questionamento do estudo é “**qual é a resposta da logística urbana ante a uma situação de vulnerabilidade?**”. Para responder à problemática principal, foram formuladas cinco questões que guiarão o desenvolvimento do trabalho:

- 1) Quais modelos, dentro da logística urbana, definem o contorno da problemática inicial?
- 2) Quais são os fatores críticos dentro da vulnerabilidade e como os estudos envolvendo esse tema contribuem para a logística urbana?
- 3) Qual modelo, dentro da logística urbana, contribui para o presente estudo?
- 4) Qual a resposta (medida) mais adequada do poder público ante um incidente?
- 5) Como os cenários propostos impactam o estudo da dinâmica da logística urbana?

As respostas a essas perguntas serviram de hipóteses e orientaram o planejamento e execução do presente estudo. Para responder a primeira questão os principais modelos aplicados em logística urbana foram discutidos, a fim de investigar, dentro do campo geral da pesquisa, as opções e aplicações de modelos e, justificar a escolha do modelo multiagente como o que mais se enquadra nos objetivos do projeto. A segunda questão ajudou na definição e avaliação da vulnerabilidade e de seus fatores críticos relacionados à logística urbana.

Com a terceira questão, um modelo multiagente foi desenvolvido de forma combinada com um sistema de Problemas de Roteirização Dinâmica de Veículos (ou *Dynamic Vehicle Routing*

Problem, DVRP)¹ e de simulação de tráfego. Esse modelo, baseado no comportamento dos vários agentes envolvidos na distribuição urbana de mercadorias, permitiu a análise de cenários e o cálculo dos impactos econômicos e ambientais de um incidente, respondendo, dessa forma, as perguntas quatro e cinco.

1.4 Limitações do Estudo

O presente trabalho apresenta algumas limitações atreladas ao caráter da pesquisa e aos dados utilizados para o desenvolvimento do modelo. Como dito na seção 1.2, os temas abordados no presente estudo foram pouco explorados individualmente e quando tratados em conjunto, preenchem uma lacuna importante da literatura (Figura 1.1). Dessa forma, o trabalho é considerado como exploratório, uma vez que tem por finalidade proporcionar uma visão ampla do assunto².

O argumento dado anteriormente, isoladamente, já evidencia uma limitação do estudo. Porém, ainda são destacados alguns outros fatores que têm influência direta nos limites da modelagem. O primeiro deles está associado à validação do modelo. Por não ser o principal objetivo do presente estudo e pelo tempo disponível para o desenvolvimento do mesmo, foram feitas verificações manuais em determinados *links*³ da rede. Para um estudo mais preciso é sugerida a inserção de um algoritmo de calibração. Finalmente, destaca-se que foram utilizados, para a construção da rede viária, dados secundários, e, portanto, não se pode ter domínio e certezas quanto às suas inferências e às metodologias aplicadas para suas coletas e análises.

1.5 Estrutura da dissertação

Para apresentar os resultados deste estudo, esta dissertação foi estruturada e desenvolvida ao longo de cinco capítulos, conforme é descrito e ilustrado (Figura 1.2) a seguir.

¹ Os DVRP permitem lidar com incidentes durante a operação e, assim, requerem um tempo de resposta quase imediato para realizar intervenções durante a realização de uma rota. Para isto, frequentemente fazem uso de heurísticas para obtenção de soluções satisfatórias com um tempo computacional razoável (DMONTIER, 2014).

² Definição de Pesquisa Exploratória dada por Gil (2006).

³ Os *links* representam caminhos entre dois nós, que são representados por pontos e que contém as coordenadas da rede viária. Cada *link* possui um nó de origem e um de destino, além de informações que o caracteriza, como comprimento, velocidade de fluxo livre, capacidade, número de faixas, entre outras.

No Capítulo 1, representado por esta Introdução, apresenta-se o contexto em que se insere o problema proposto, seus objetivos, justificativa, contribuição técnico-científica, a problematização e a formulação de hipóteses do trabalho.

No Capítulo 2 tem-se o referencial teórico com o objetivo de apresentar as definições e os trabalhos relacionados à logística urbana, vulnerabilidade e modelagem multiagente, conceitos fundamentais para o entendimento do presente estudo.

No Capítulo 3, a metodologia de pesquisa foi detalhada, os pressupostos para a construção da pesquisa especificados e o desenvolvimento do modelo aprofundado.

No Capítulo 4, os resultados obtidos com a modelagem multiagente, desenvolvida no estudo, foram apresentados, analisados e discutidos.

Finalmente, no Capítulo 5 foram expostas as considerações finais do projeto, assim como, apontadas as sugestões a serem implementadas em futuros trabalhos.

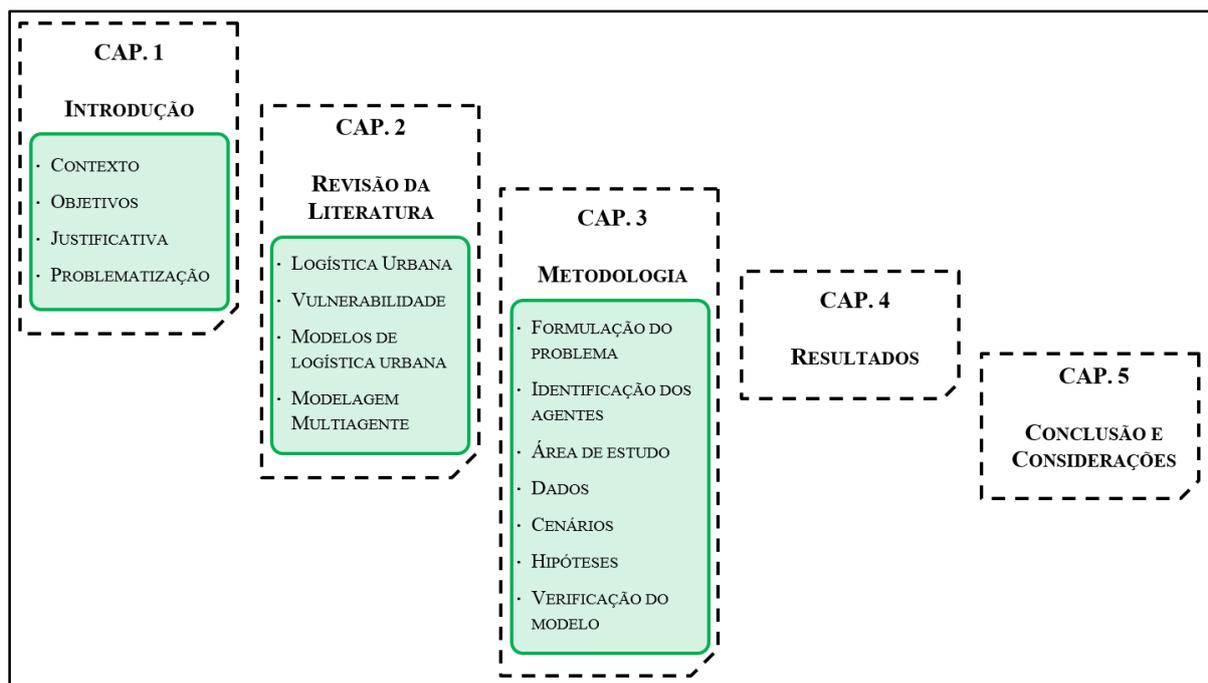


Figura 1.2: Estrutura da dissertação.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A revisão da literatura deste trabalho buscou abordar a importância dos temas, como a logística urbana, análise da vulnerabilidade e modelagem matemática na problemática analisada, incluindo modelos multiagentes, para o estado da arte e da prática.

2.1 Logística urbana

O aumento do volume de bens produzidos e consumidos, bem como a ampliação da demanda por serviços em uma região, favorecem sua expansão econômica e geram um aumento significativo da demanda por transporte (CARVALHO, 1998). Esse aumento, segundo Correia *et al.* (2010b), é consequência das transformações comerciais e dos avanços nas áreas de transporte e de comunicação. Taniguchi *et al.* (2001) também afirmam que os fluxos comerciais de mercadorias e serviços, antes limitados pelas distâncias, hoje são atividades fundamentais no desenvolvimento das cidades, com significativa influência no estilo de vida da população, na manutenção, na competitividade das atividades industriais e comerciais.

Czerniak *et al.* (2000) ressaltam que a distribuição urbana de cargas não é um fim em si mesmo, mas reflexo de um processo econômico global, nacional e local. Ogden (1992) define a movimentação de cargas como o movimento de “coisas” (distinguindo de pessoas) em áreas urbanas, incluindo movimentos de “coisas” para/de dentro da área ou através da área, realizado por todos os modos. Dablanc (2007), por sua vez, afirma que a distribuição urbana de cargas é um conjunto de fluxos constantes entrando, atravessando e deixando áreas urbanas. Para a Organização para Cooperação Econômica e Desenvolvimento (OECD, 2003), o transporte urbano de carga é a entrega de bens (não apenas para os varejistas, mas também para as indústrias) nos centros urbanos, incluído o fluxo reverso de produtos.

Browne *et al.* (2007) afirmam que a distribuição urbana de cargas exerce uma função vital para o desenvolvimento das cidades. Anderson *et al.* (2005) citam algumas razões que atestam a importância dos estudos voltados ao tema, como:

- Manutenção do estilo de vida existente nos centros urbanos;
- Influência no preço dos produtos consumidos pela população;
- Influência direta na economia;
- Manutenção das atividades e da competitividade dos setores industriais e comerciais;
- Impactos ambientais.

Taniguchi *et al.* (2001) têm o mesmo pensamento e acrescentam que o transporte tem tido alguns problemas desafiadores, como por exemplo, o aumento dos congestionamentos, impactos negativos de ordem social, econômica e ambiental. Dentro desse contexto, a OECD (2003) enfatiza que alguns governantes se apoiam no princípio que “carga não vota, enquanto passageiros votam”. Dessa forma, o transporte de passageiros tem maior atenção e prioridade nas políticas públicas e na distribuição de recursos financeiros.

No entanto, Crainic *et al.* (2004) destacam que esse cenário tende a mudar, uma vez que o número de veículos está aumentando de forma rápida e como consequência, o congestionamento e os níveis de poluição crescem também em um ritmo acelerado. Ainda, observa-se o aumento da consciência pública em relação aos temas que impactam a qualidade de vida da cidade e, conseqüentemente, as autoridades começam a tomar conhecimento e providências quanto ao assunto (CORREIA *et al.*, 2010b). O aumento da importância dada às questões ambientais e sociais nas últimas décadas adiciona uma nova dimensão aos problemas das cidades quanto à expansão do tráfego nos centros urbanos (VAN KOLCK, 2010).

Segundo Taniguchi & Thompson (2003), a preocupação com o transporte de cargas tem aumentado tanto no setor industrial quanto no planejamento urbano. Para Dablanc (2007) e Crainic *et al.* (2009), o transporte de carga não apresenta participação muito expressiva no fluxo de veículos nos centros urbanos, variando de 10 a 30%. Em Belo Horizonte (MG), de acordo com o Departamento Nacional de Trânsito (BRASIL, 2015), a fim de garantir a demanda do mercado, uma frota de aproximadamente 153 mil veículos de carga circula entre as principais vias de Belo Horizonte, representando 2,3% do fluxo total de veículos na cidade (OLIVEIRA, 2014a). Apesar dessa baixa representatividade, eles são os principais responsáveis pelos distúrbios relacionados ao transporte urbano (TANIGUCHI *et al.*, 2001; OLIVEIRA, 2014a; OLIVEIRA *et al.*, 2014b), como citado abaixo e apresentado na Figura 2.1:

- Emissões de poluentes (i.e., óxido de nitrogênio - NO_x; monóxido de carbono CO e, materiais particulados - MP), e ruídos, prejudiciais ao meio ambiente e à saúde;
- Aumento do consumo de recursos não renováveis;
- Deterioração da infraestrutura urbana;
- Aumento dos custos associados à ineficiência dos sistemas logísticos de distribuição urbana de mercadorias.

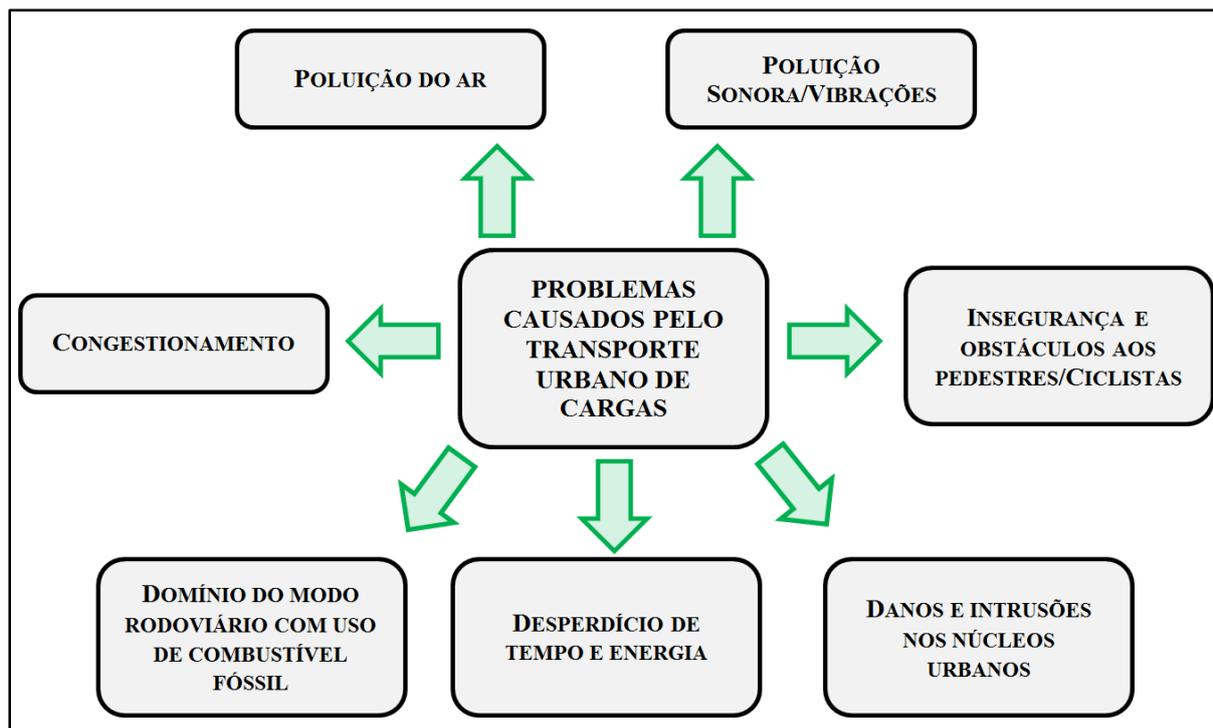


Figura 2.1: Problemas gerados pelo transporte de cargas (Adaptado de QUISPEL, 2002).

Os veículos de cargas produzem um volume considerável de poluição em áreas urbanas. Segundo o relatório da *European Commission* (1998), o deslocamento motorizado de mercadorias contribui em 40% com a poluição do ar e sonora das grandes cidades. Além disso, acidentes envolvendo veículos de carga produzem um trauma considerável para a comunidade (TANIGUCHI *et al.*, 2001). Lima Júnior (2003) corrobora com a questão anterior e considera o fator social, representado pelo incômodo, por razões psicológicas, causado aos motoristas pela presença dos caminhões nas vias urbanas.

Aliado a esses fatores, encontra-se o processo de crescimento desordenado que as cidades vêm sofrendo. A urbanização é uma tendência mundial devido ao crescimento da economia e ao aumento da expectativa da qualidade de vida (TANIGUCHI & THOMPSON, 2003). Todavia, segundo Carvalho (1998), Taniguchi *et al.* (2001), Taniguchi & Thompson (2003), Oliveira (2013) e Dablanc & Rodrigue (2014), a urbanização tem acontecido de maneira rápida, desordenada e sem um planejamento adequado, deteriorando as condições de vida, mobilidade e meio ambiente nas cidades. Taniguchi & Thompson (2003) ainda acrescentam que a urbanização demanda mais mercadorias para serem transportadas dentro de áreas densamente povoadas, causando, dessa forma, impactos negativos no meio.

2.1.1 Logística urbana no contexto do planejamento urbano

Taniguchi & Heijden (2000), Anderson *et al.* (2005), Browne (2007), Benjelloun & Crainic (2009) e Oliveira (2014a) salientam que as questões que envolvem o transporte urbano de cargas são muito importantes para um desenvolvimento sustentável de uma cidade e, portanto, devem ser um componente essencial no planejamento urbano. Porém, antes de se entender a logística urbana, é interessante compreender a logística voltada aos negócios e como esta contribuiu para o desenvolvimento dos conceitos e medidas voltadas para o objeto de estudo.

Historicamente, conceitos de logística militar têm sido aplicados nos negócios das grandes empresas (NOVAES, 2001; TANIGUCHI & THOMPSON, 2003). A logística empresarial é definida por Ballou (1997) como o processo de planejamento, implementação e controle da eficiência; da relação de custo benefício; da produção de bens, desde o armazenamento de matéria-prima até os produtos acabados e das informações relacionadas desde o ponto de início até o ponto de consumo, em conformidade com as exigências do cliente. Ainda, de acordo com Taniguchi & Thompson (2003), a logística empresarial contribui para o estabelecimento de um sistema logístico eficiente.

Porém, concomitantemente a todas as inovações e benefícios proporcionados por esse sistema, existe o aumento da demanda por transportes e as consequências já mencionadas (TANIGUCHI & THOMPSON, 2003). Dessa forma, Taniguchi & Heijden (2000) reforçam que a racionalização do planejamento é necessária não somente para o sucesso da cadeia de suprimentos, mas também para o crescimento econômico sustentável. Ainda, deve-se contar com a ação conjunta que inclua fabricantes, operadores, varejistas e autoridades locais, como um meio para se evitar as consequências indesejadas deste processo. Surge, então, o conceito de logística urbana.

A logística urbana pode ser considerada uma metodologia integrada para a distribuição urbana de cargas, pois promove métodos inovadores que reduzem o custo econômico, social e ambiental dessas operações (TANIGUCHI & THOMPSON, 2003). Ainda, Taniguchi *et al.* (2001) apontam que a logística urbana se evidencia como um instrumento fundamental para a otimização das atividades atreladas à distribuição de mercadorias em centros urbanos, realizadas por entidades públicas ou privadas, considerando fatores como o tráfego, congestionamento e consumo de energia.

Taniguchi *et al.* (2001) definem iniciativas essenciais a serem tomadas pela referida área, como a implementação de sistemas avançados de informação e de transporte cooperativos de cargas; implantação de terminais logísticos; promoção de uso compartilhado de veículos de cargas; criação de áreas de acesso controlado; o incentivo com subsídios do setor público e o planejamento do transporte de cargas considerando o uso e ocupação do solo. Nesse contexto, Taniguchi *et al.* (2001) também apresentam uma visão geral de uma estrutura da logística urbana, baseada em oito valores sociais sustentados por três pilares: sustentabilidade, mobilidade e qualidade de vida (Figura 2.2).

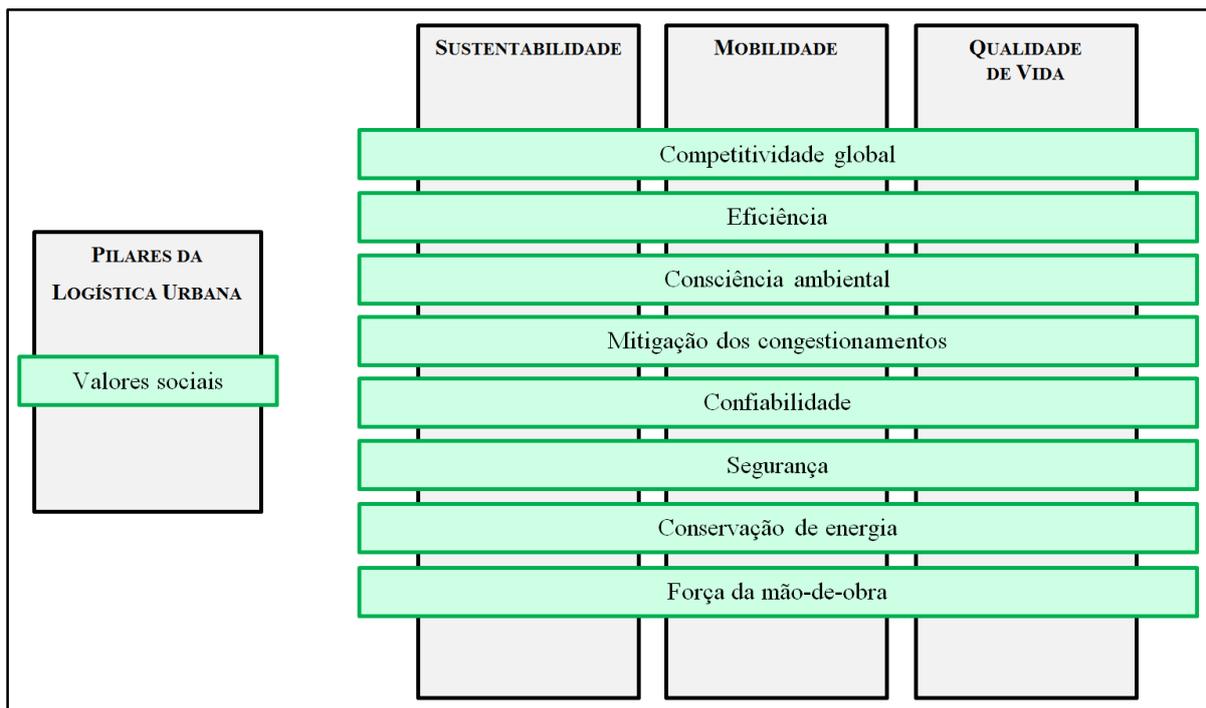


Figura 2.2: Visão da estrutura da logística urbana (Adaptado de TANIGUCHI *et al.*, 2001).

A movimentação de carga, como mencionado anteriormente, envolve um grande número de participantes, cada um com necessidades e aspirações distintas (DUTRA, 2004). A logística urbana, por sua vez, incentiva a colaboração entre esses agentes (TANIGUCHI *et al.*, 2001). Tais agentes e seus respectivos interesses e objetivos são tratados mais detalhadamente na próxima seção.

2.1.2 Agentes envolvidos na logística urbana

Taniguchi *et al.* (2001) definem quatro grupos agentes envolvidos na distribuição urbana de cargas: (1) carregadores (2) transportadores (3) residentes e (4) poder público (Figura 2.3). Podem-se incluir, ainda, os varejistas nessa estrutura, por ser um grupo importante dentro da estrutura econômica urbana. Cada um desses grupos têm os seus próprios objetivos e, por isso,

se comportam de maneira diferente diante de cada situação. Noortman (1984) e Ogden (1992) destacam a importância de compreender esse contexto, uma vez que um dos problemas da distribuição de cargas é determinar o equilíbrio aceitável entre esses interesses conflitantes. Portanto, os modelos que descrevem o sistema de transporte de cargas, assim como os estudos e pesquisas realizadas na área devem reconhecer e considerar tais fatores (TANIGUCHI & THOMPSON, 2003).

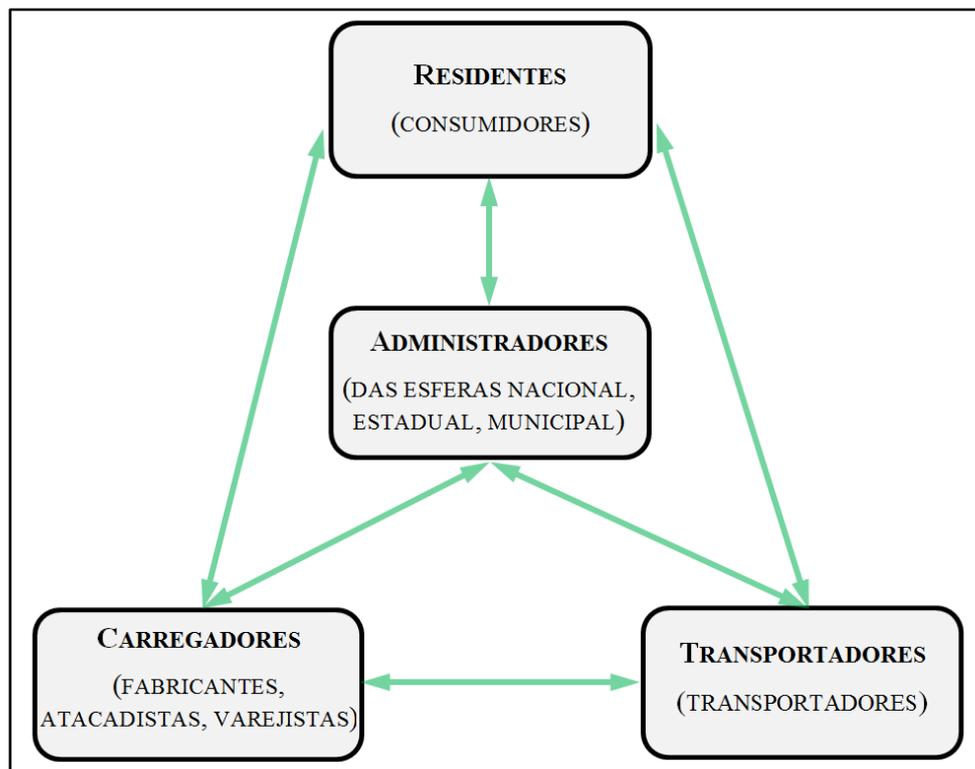


Figura 2.3: Agentes da logística urbana (Adaptado de TANIGUCHI & THOMPSON, 2003).

Segundo Taniguchi & Thompson (2003), os carregadores são os clientes dos transportadores, que são responsáveis por receber as cargas destes e por entregá-las ao consumidor. Os carregadores geralmente tendem a maximizar o nível de seus serviços, que inclui os custos, o tempo de carga e descarga, assim como a confiabilidade do transporte e das informações transmitidas. Existem dois tipos de confiabilidade do transporte: (a) a entrega sem nenhum dano à mercadoria, (b) entregas sem nenhum atraso, respeitando janela de tempo designada pelos clientes (TANIGUCHI *et al.*, 2001).

Por sua vez, os transportadores têm como objetivo minimizar os custos associados à coleta e à entrega das mercadorias aos consumidores, para maximizar seus lucros. Porém, o mercado exige o atendimento de um alto nível de serviço com um baixo custo. Tal pressão é associada a um fator prejudicado pelos congestionamentos dos grandes centros urbanos: a janela de tempo

determinada pelos próprios clientes. Esses fatores acarretam a perda de eficiência e ganhos do transportador (TANIGUCHI *et al.*, 2001). Os residentes são as pessoas que moram, trabalham ou consomem dentro dos centros urbanos. Esses agentes normalmente não toleram grandes veículos em ruas locais e têm como objetivo minimizar os congestionamentos, refletidos nos níveis de emissão de poluentes (TANIGUCHI *et al.*, 2001).

Por fim, o poder público tem como objetivo aumentar o desenvolvimento econômico da cidade assim como o número de oportunidades de emprego. Além disso, eles visam a redução dos congestionamentos, à melhoria ambiental e o aumento da segurança viária nas cidades. Eles devem ser neutros e desempenhar o importante papel de resolver conflitos envolvendo os outros grupos de agentes da distribuição urbana de mercadorias. Finalmente, os administradores devem coordenar e facilitar as medidas e iniciativas da logística urbana.

2.1.3 Desafios da logística urbana

Para Taniguchi *et al.* (2001), as tendências em curso para urbanização são um objeto de grande destaque do século XXI, uma vez que o desenvolvimento dos centros urbanos atrai facilidades e oportunidades de emprego, educação e atividades culturais e esportivas. Em 1950, menos de 30% da população mundial morava em zonas urbanizadas. Segundo o *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD, 2001), em 1975, o nível de urbanização no mundo desenvolvido era 70% e, em 2000, passava de 75%. Segundo a *United Nations Population Fund* (UNFPA, 2007), em 2008, pela primeira vez, a população urbana superou a rural. Em 2030, o mesmo relatório estima que cinco bilhões (90% da população) de pessoas estejam morando em áreas urbanas. Para o desenvolvimento dessas zonas urbanas é necessário um eficiente e sustentável sistema de transporte urbano de mercadorias, de forma a garantir a atratividade, o poder econômico e a qualidade de vida da região (EHMKE, 2012).

Além da tendência de urbanização mundial, as atuais práticas de produção e distribuição, baseadas em baixos estoques e entregas com janelas de horários, assim como o crescimento explosivo do comércio eletrônico, que gera volumes significativos de entregas domiciliares, faz com que o número de veículos de cargas aumente em um ritmo constante (BENJELLOUN & CRAINIC, 2009; DABLANC & RODRIGUE, 2014).

Desse modo, a logística urbana está exposta a uma variedade de desafios resultantes da evolução dos mercados, como por exemplo, o aumento da competição, o sistema *just-in-time*,

a exigência de altos níveis de prestação de serviços a baixo custo, a determinação de janelas de horários, assim como o aumento dos impactos negativos gerados às cidades pelo transporte urbano de cargas (TANIGUCHI *et al.*, 2001). Ehmke (2012) afirma que tais desafios expandem as exigências ambientais, de novas tecnologias e de evolução das complexas cadeias de suprimento.

As condições atuais e futuras são encaradas como o aumento da importância dos custos e do desempenho da logística, resultando, por exemplo, em prazos de entregas mais curtos, maior confiabilidade no cronograma, flexibilidade nas entregas, informações dinâmicas, a que acarreta no aumento do consumo, fechando, dessa forma, o ciclo desse sistema (Figura 2.4).

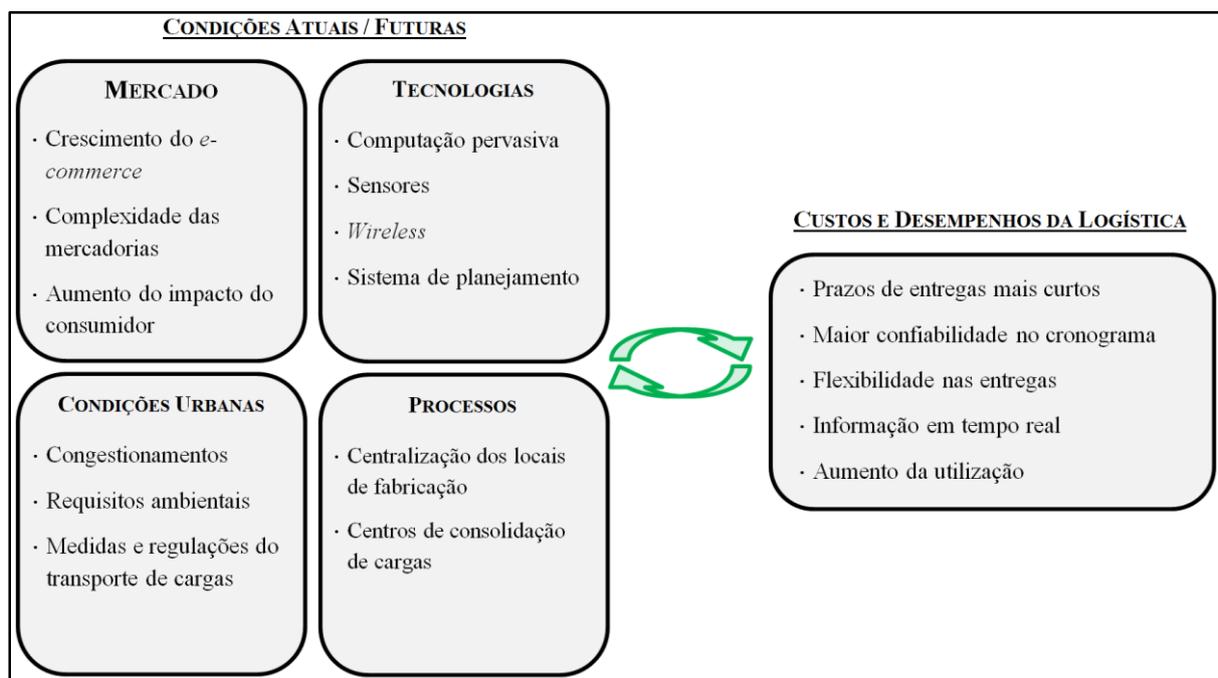


Figura 2.4: Desafios da logística urbana (Adaptado de EHMKE, 2012).

Para Prata & Arruda (2007), outro desafio da logística urbana é o gerenciamento dos diversos interesses envolvidos na distribuição de mercadorias, de modo a maximizar a satisfação da coletividade. Taniguchi *et al.* (2001), por outro lado, argumentam que, apesar desses conflitos existentes, a logística urbana incentiva a colaboração entre as principais partes interessadas dentro de uma economia de mercado, além de promover o desenvolvimento e a aplicação de modelos para prever os efeitos das medidas e iniciativas citadas no item 2.1.1. Dentro desse contexto, Taniguchi *et al.* (2001) afirmam que nos últimos anos houve um grande esforço voltado para o desenvolvimento de métodos de modelagem no âmbito da logística urbana, tema discutido posteriormente.

2.2 Vulnerabilidade e logística urbana

Para Green (2003), vulnerabilidade é um termo utilizado de várias maneiras, que pode ser entendido como uma característica do que é impactado, uma ameaça gerada pelo impacto ou uma interação entre os dois. Ainda, o autor comenta que vulnerabilidade é um termo raramente definido especificadamente, sendo que a definição mais comum é a de “facilmente danificado”. Cançado (2009) reforça essa ideia afirmando que existem múltiplos conceitos para vulnerabilidade. Marchand (2009), por sua vez, complementa as afirmações acima, atestando que a vulnerabilidade passa por várias disciplinas, incluindo ciências técnicas, ambientais e sociais, e, portanto, só pode ser entendida em uma forma verdadeiramente interdisciplinar. Isso explica a dificuldade em formular uma ampla teoria em situações de planejamento de transporte.

Para as várias definições e descrições de vulnerabilidade existem três elementos em comum: exposição, sensibilidade e resiliência⁴. Porém, uma definição mais precisa é necessária, uma vez que se trata de uma condição que é, ou deveria ser, o ponto de partida para qualquer pesquisa e/ou tomada de decisão (GREEN, 2003; MARCHAND, 2009). No sentido mais amplo, vulnerabilidade refere-se às características de indivíduos, sociedades, ecossistemas, sistemas tecnológicos, assim como de qualquer outra unidade social ou ecológica (DOW, 1992). Para a delimitação da área de estudo de vulnerabilidade abordada no presente trabalho, um mapa conceitual foi desenvolvido e está apresentado na Figura 2.5.

A partir da observação da Figura 2.5, a vulnerabilidade pode ser usada em quase todos os contextos. Neste estudo, o conceito do termo foi utilizado apenas para a distribuição urbana de mercadorias quando afetada por incidentes urbanos, como congestionamento, manifestações e inundações, sendo o último, o foco principal deste estudo. Para Marchand (2009), outros eventos ou outras fontes de vulnerabilidade podem ser relevantes dependendo do contexto do estudo.

⁴ Para uma definição mais detalhada sobre os três elementos citados, ver Marchand (2009).

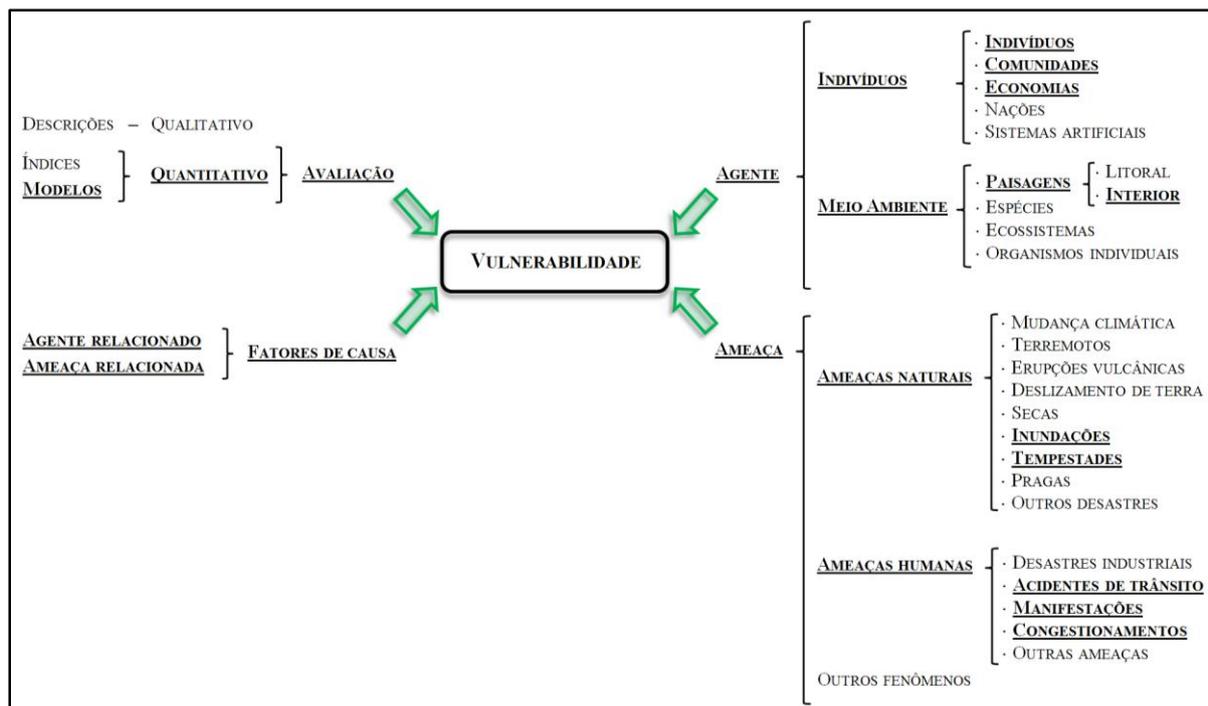


Figura 2.5: Mapa conceitual: atributos do estudo (Adaptado de MARCHAND, 2009).

No que tange a conceituação do termo “vulnerabilidade”, de acordo com a EMA (*Emergency Management Australia*, 2002), em um contexto de avaliação de perdas, refere-se à susceptibilidade à perda do que é exposto a uma ameaça, assim como à sua capacidade para se recuperar do impacto gerado. Para Chambers (1989, p.1), a definição é semelhante e, “refere-se à exposição a contingências e estresse, somada à dificuldade em lidar com eles. A vulnerabilidade, portanto, tem dois lados: um lado externo dos riscos, choques e estresse ao qual um indivíduo ou uma comunidade está sujeita; e um lado interno que é a indefensibilidade, ou seja, a falta de meios para fazer face à ameaça sem perdas importantes”. Ainda, de forma similar, para Pelling (2003) a vulnerabilidade é a exposição ao risco de incidentes, somada à falta de habilidade em se evitar ou absorver suas consequências.

Alexander (2002) define vulnerabilidade como a susceptibilidade de pessoas e comunidade aos danos associados a determinado nível de perigo: uma ameaça, com dada probabilidade de se manifestar em um local, em determinado momento, de uma maneira particular e com certa magnitude. Segundo Marchand (2009), a ameaça é um fenômeno externo, assim, “a ameaça é o gatilho que expõe a vulnerabilidade” (CANÇADO, 2009, p.41). Chardon (1999, p. 1), simplificadamente, considera que “vulnerabilidade é a probabilidade de sofrer danos”. Wisner *et al.* (2004) definem como as características ou as situações em que se encontra uma pessoa

ou um grupo de pessoas e que influenciam em sua capacidade de antecipar, lidar, resistir e de se recuperar do impacto de uma ameaça natural associada a um desastre.

Apesar de Schreiner (2013) afirmar não ser uma tarefa fácil definir desastres, Leaning (2008) citado por Schreiner (2013) propõe um conceito generalizado de que desastres são fenômenos complexos que geram consequências para as populações humanas, existindo um acordo geral sobre as características que tornam um evento em um desastre: imposição de uma perturbação intensa em um meio, cujo tratamento não é realizado por meio da implantação dos recursos ordinários. Assim, desastres são eventos que necessitam de ajuda externa.

O risco, por sua vez, é definido por EMA (2002) como a chance de acontecer algo que terá um impacto adverso sobre uma comunidade ou empresa ou objetivos individuais. Na gestão do risco de emergência, o termo é usado para descrever a probabilidade da ocorrência de consequências resultantes da interação de incidentes e da vulnerabilidade do que é exposto (EMA, 1998). O risco surge, então, como consequência da interação entre a natureza e as características do evento natural (ameaça) e aquelas da população exposta, ou seja, sua vulnerabilidade (GREEN *et al.*, 2000 *apud* CANÇADO, 2009) (Equação (2.1) e Figura 2.6):

$$\text{Risco} = \text{Vulnerabilidade} \times \text{Ameaça}. \quad (2.1)$$

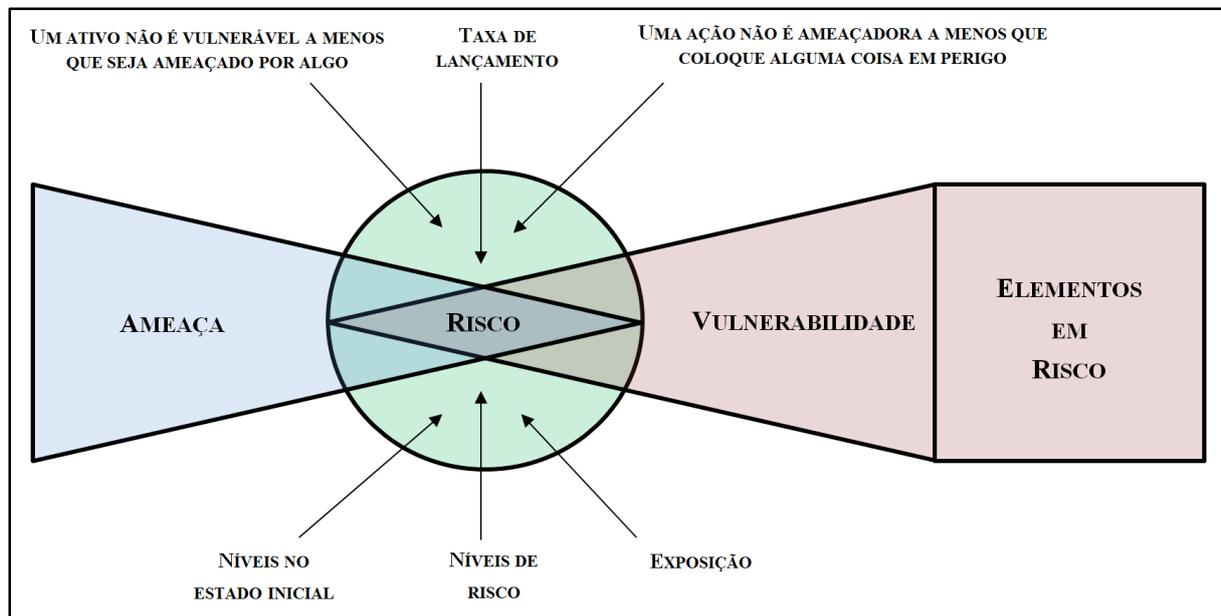


Figura 2.6: Ameaça, vulnerabilidade e risco (Adaptado de ALEXANDER, 2002).

Complementarmente, a Figura 2.7 apresenta a definição de Kron & Thumerer (2002) *apud* Nagen (2008). Para eles, o risco é o fator resultante do produto entre ameaça, exposição e vulnerabilidade. Considerando a ameaça um evento natural e a sua probabilidade de atingir uma

determinada região, a exposição refere-se à quantidade de bens que podem ser afetados e a vulnerabilidade associa-se ao nível de resistência (ZONENSEIN, 2007).

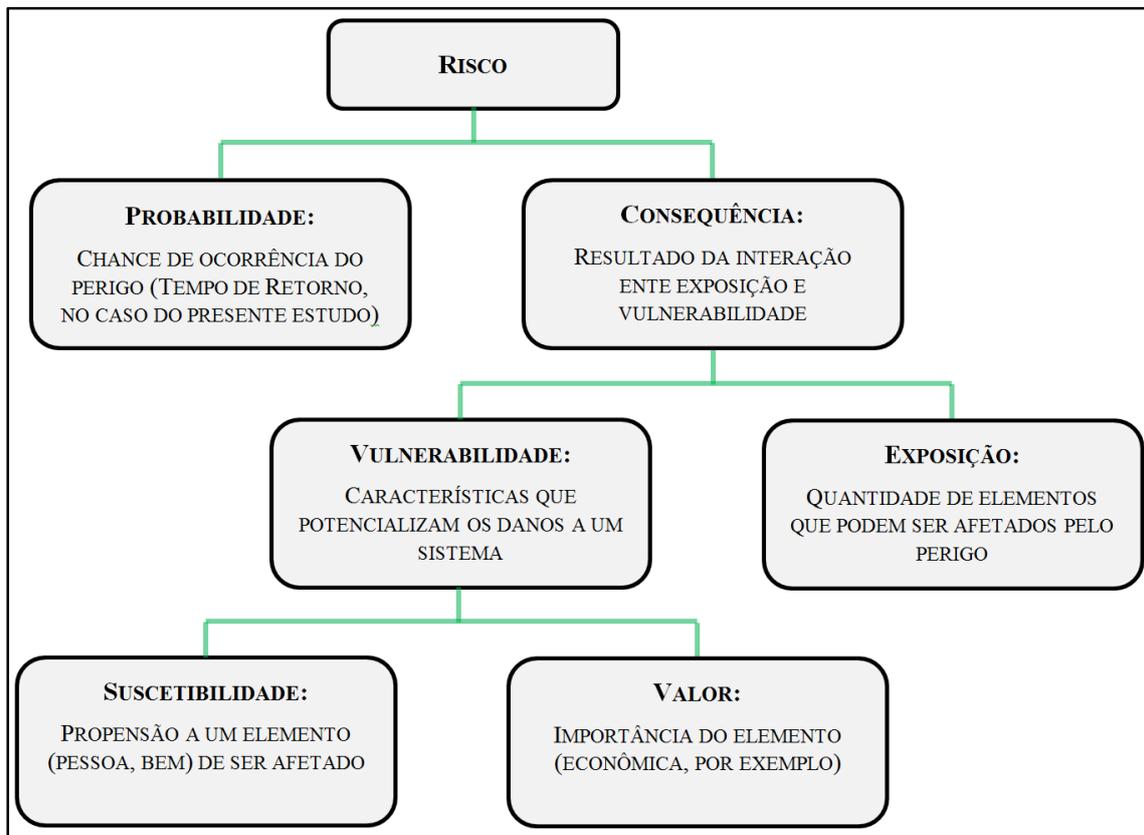


Figura 2.7: Componentes que definem o risco (Adaptado de ZONENSEIN, 2007).

2.2.1 Vulnerabilidade da logística urbana

Segundo Cançado (2009, p.53):

A economia urbana se configura como uma rede de atividades conectadas (os nós) por entre os quais circulam mercadorias, pessoas, informações, serviços e dinheiro. Para se manter em funcionamento, cada atividade produtiva necessita de insumos (matérias-primas, trabalho, energia elétrica, etc.). Em contrapartida, ela fornece bens e serviços. Do processo de produção e consumo, surgem também resíduos, poluição e lixo urbano. Os fluxos circulam pelas conexões (ou links) da rede (e.g.: rede viária, rede elétrica, telecomunicações e rede de saneamento). Os indivíduos e famílias também são nós nesta rede, e não apenas enquanto consumidores [...].

Nesse contexto, a distribuição urbana de mercadorias está sujeita a uma série de incidentes ou ameaças, que podem ser definidos como sendo um acontecimento não desejado ou não programado. Segundo Brasil (1999), eles podem ser resultados de eventos adversos, naturais ou provocados pelo homem, causando danos humanos, materiais e ambientais e consequentes prejuízos econômicos e sociais.

Um incidente expõe o sistema de distribuição urbana de mercadorias à vulnerabilidade. De acordo com a literatura, poucos estudos que tratam esse tema e, em grande parte, são direcionados aos desastres naturais (FERREIRA, 2010; SILVESTRINI, 2013). Porém, no que tange a cidade, podem ser considerados como incidentes os constantes congestionamentos, a falta de infraestrutura adequada para carga e descarga, as inundações, as manifestações, as obras e intervenções urbanas e outros fatores que elevam o tempo de viagem e que contrariam o conceito de otimização associado à logística urbana (SILVESTRINI, 2013).

Neste contexto, a vulnerabilidade está associada a um impacto potencial que atua sobre um sistema em consequência de uma ou mais propriedades que ele possui (SILVESTRINI, 2013), como as características do fluxo de veículos, incluindo o congestionamento das vias de tráfego, aumento da densidade de tráfego, diminuição da velocidade média e aumento no tempo de viagem (HOSSAIN & DAVIES, 2004; OLIVEIRA *et al.*, 2013). Assim, uma ameaça, mesmo que atinja uma pequena área, pode ter um grande poder de destruição e propagação de danos (CANÇADO, 2009). Segundo Parker *et al.* (1987), três características principais determinam o grau de perturbação de uma rede (vulnerabilidade): a dependência, a capacidade de transferência e a susceptibilidade, como representada pela Equação (2.2:

$$V = f(D, T, S), \quad (2.2)$$

em que:

V = Vulnerabilidade urbana à perturbação por inundação;

D = Dependência;

T = Capacidade de transferência;

S = Susceptibilidade.

De forma resumida, a dependência se manifesta em uma análise da rede. Ela representa a dependência da cidade ou região em relação a uma via. Quanto maior a dependência, maior o grau de perturbação da rede. A capacidade de transferência também é uma característica das conexões da rede e representa a quantidade e a capacidade das ligações alternativas, assim como a sua capacidade ociosa. Por fim, a susceptibilidade indica em que extensão a área inundada afetará o restante da região, envolvendo os dois outros aspectos considerados na equação. O importante não é o tamanho do dano, mas o impacto no funcionamento normal das atividades da rede (PARKER *et al.*, 1987).

2.2.2 Medidas de controle e mitigação

Algumas medidas de controle e mitigação de danos provocados por incidentes podem ser adotadas (BONATTI, 2011). No que diz respeito às inundações, Yevjevich (1994) separa as possíveis medidas em estruturais e não estruturais. As medidas estruturais consistem na adoção de modificações na estrutura da bacia hidrográfica e do rio, influenciando nas características do escoamento. As medidas não estruturais são tomadas para mudar os impactos e as consequências de uma inundação, sem mudar as características físicas e morfológicas da bacia e do rio. Entre elas, se destacam a previsão, os alertas e a criação de planos de contingência (YEVJEVICH, 1994).

Segundo Alexander (2002), o processo de alerta envolve medidas técnicas e sociais e requer um conhecimento adequado das ameaças iminentes, assim como dos meios de divulgação de informações e de instruções. A partir do momento em que uma previsão científica de um risco iminente é recebida, os órgãos responsáveis têm que decidir se haverá a divulgação de um alerta. A coleta de dados confiáveis, sua transmissão, recepção e armazenamento, assim como os sistemas de análise de dados, são necessários para a implementação de um sistema de alerta eficiente (FELDMAN, 1994).

Ainda, de acordo com Feldman (1994), a previsão de inundação é relativamente precisa e deve ser realizada com antecedência suficiente para que os alertas sejam bem divulgados à população, por veículos de comunicação pública, como rádio, televisão, internet (BONATTI, 2011). Além disso, aplicativos colaborativos, que fornecem informações em tempo real⁵, podem ser instrumentos eficientes na emissão de alertas. Segundo Nascimento (2011), o plano de contingência é um instrumento gerencial adotado pela administração pública com o objetivo principal de redução dos impactos aos habitantes e às pessoas em trânsito nas áreas atingidas, reiterando que tais medidas farão parte das análises do presente estudo.

⁵ Aplicativo em desenvolvimento com o apoio do Ministério da Educação (SUREWAY!). Para mais detalhes, vide Apêndice A.

2.2.3 Modelos para a avaliação da vulnerabilidade

Para Delor & Hubert (2000), o desafio da pesquisa científica é a criação de maneiras para se analisar e discutir a vulnerabilidade implícita na vida das pessoas, o que significa dar atenção às condições reais e cotidianas da vida dos indivíduos, para discriminar as forças e fraquezas que definem sua vulnerabilidade ante um evento adverso.

De acordo com Bogardi (2006), o desenvolvimento de sistemas de indicadores de risco de desastres e vulnerabilidade deve ser priorizado, uma vez que se tornam elementos facilitadores essenciais para os tomadores de decisão avaliarem os possíveis impactos de desastre. Nesse contexto, surgem modelos que procuram representar e compreender as atitudes comportamentais que caracterizam os indivíduos e grupos sociais (CANÇADO, 2009), além de analisarem os impactos sociais de incidentes e a eficácia de medidas destinadas a reduzir a vulnerabilidade (MARCHAND, 2009).

Segundo Marchand (2009), para muitos, a vulnerabilidade não pode ser modelada por ser considerada muito complexa para ser captada por modelos e *frameworks*. Porém, de acordo com o mesmo autor, ainda que exista a dificuldade e a lacuna de modelos quantitativos de vulnerabilidade, é possível modelá-la por meio de uma abordagem integrada e interdisciplinar, considerando os três elementos citados anteriormente: exposição, sensibilidade e resiliência.

No que tange os modelos para a avaliação de danos (Figura 2.8), Cançado (2009) buscou métodos de estimativas relativamente frequentes na literatura internacional, ainda incipientes no Brasil. Segundo a autora, destacam-se, tradicionalmente, dois tipos principais de modelos analíticos utilizados para estimativas dos custos econômicos de um desastre: microeconômicos e macroeconômicos⁶.

Ainda para Cançado (2009), tais metodologias tradicionais têm limitações e os estudos apontam para o uso da simulação e da análise de rede como método de pesquisa socioeconômica. A simulação é a exploração de um modelo da realidade, sendo a etapa particular de um processo de modelagem, enquanto a análise de rede pode ser utilizada quando se discutem relações entre entidades e agentes e de como estes se inserem em um sistema de relações.

⁶ Para uma definição mais detalhadas sobre os dois modelos citados, ver Cançado (2009).

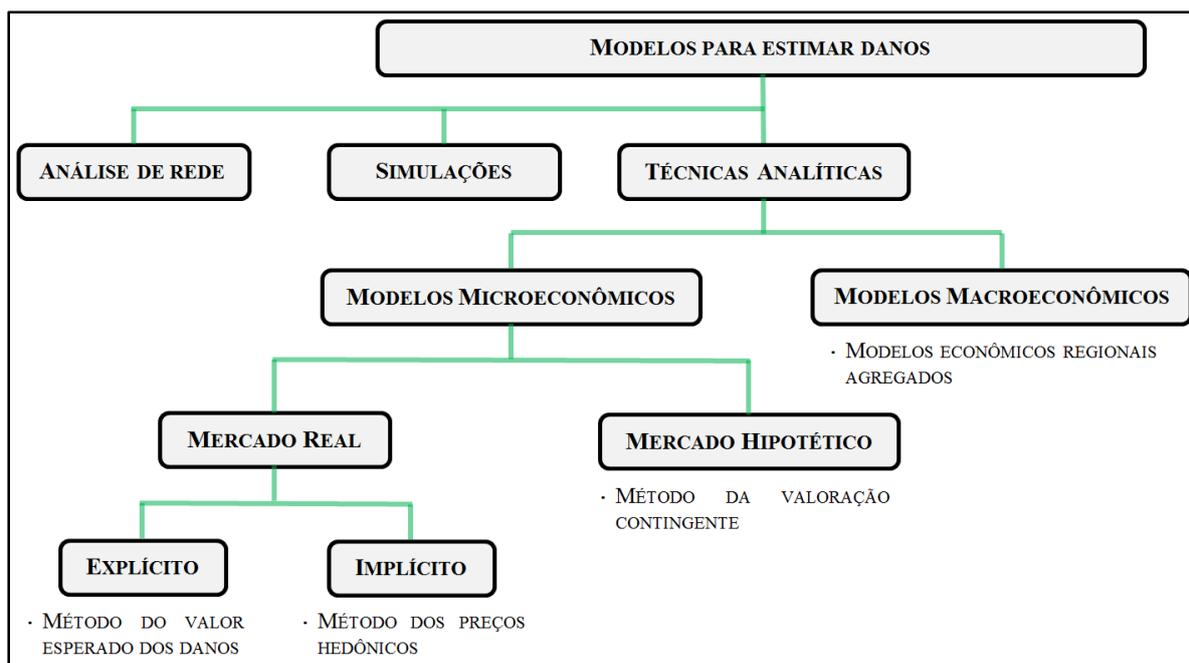


Figura 2.8: Modelos para estimar danos socioeconômicos de desastres (CANÇADO, 2009).

Dentre os métodos econômicos, os modelos estudados por Cançado (2009) são os Métodos dos Preços Hedônicos, Método da Valoração Contingente e Métodos do Valor Esperado dos Danos. Quanto aos modelos comportamentais, Cançado (2009) sugeriu o estudo de algumas técnicas de simulação social (Tabela 2.1) como o Sistema Dinâmico, Microsimulação, Modelo de Fila, Simulação Multinível, Célula Autônoma, Modelo de Aprendizado⁷ e Modelo Multiagente.

Tabela 2.1: Técnicas de simulação social (Adaptado de CANÇADO, 2009).

TÉCNICA	COMUNICAÇÃO ENTRE AGENTES	COMPLEXIDADE DOS AGENTES	NÚMERO DE AGENTES
SISTEMA DINÂMICO	Não	Baixa	1
MICROSSIMULAÇÃO	Não	Alta	Muitos
MODELO DE FILA	Não	Baixa	Muitos
SIMULAÇÃO MULTINÍVEL	Talvez	Baixa	Muitos
CELULAR AUTÔMATA	Sim	Baixa	Muitos
MODELO DE APRENDIZADO	Talvez	Alta	Alguns
MODELAGEM MULTIAGENTE	Sim	Alta	Muitos

Nota-se que a referida autora destacou que as simulações e análise de rede possuem especificidades e representam uma abordagem ainda raramente explorada na análise do impacto das inundações.

⁷ Para uma definição mais detalhadas sobre os modelos citados, ver Cançado (2009).

2.3 Modelos em logística urbana

Para van Kolck (2010), a logística urbana é um campo de pesquisa que tem apresentado um rápido crescimento, o que implica no aumento das investigações do tráfego de mercadorias no interior dos grandes centros urbanos com perspectivas social, ambiental e econômica. Esse campo de estudo é bastante heterogêneo, passando por técnicas de modelagem de tráfego até algoritmos de modelos e *surveys* para suporte ao desenvolvimento de medidas públicas. Os esforços voltados à área são divididos em: 1) medidas públicas orientadas e pesquisas quantitativas; 2) pesquisas empíricas e 3) pesquisas em modelagem / simulação (VLEUGEL, 2004).

Holguín-Veras & Patil (2008) afirmam que apesar das contribuições significativas para a economia, os deslocamentos das cargas geram consideráveis externalidades que também precisam ser analisadas previamente. A previsão do fluxo de mercadorias e das atividades relacionadas ao transporte de cargas é essencial para a identificação de suas características, assim como para a compreensão das questões e problemas ligados ao tema, como, por exemplo, congestionamentos e atrasos, impactos ao meio ambiente, consumo de energia e os custos da logística (TANIGUCHI & TAMAGAWA, 2005).

As principais problemáticas do transporte de *commodities* podem ser analisadas sob diversos pontos de vista e escalas: planejamento urbano; sistema de transportes; infraestrutura; confiabilidade das diversas cadeias logísticas; crescimento do tráfego local; congestionamento; economia nos grandes centros urbanos; impactos ambientais; local ideal para centros de distribuição urbana; diminuição das emissões de gases do efeito estufa; efeitos da expansão urbana e mudanças no comportamento do consumidor (GONZALEZ-FELIU & ROUTHIER, 2012). Nesse contexto, várias modelagens têm sido aplicadas a problemas práticos para avaliar as medidas voltadas à logística urbana (TANIGUCHI *et al.*, 2012).

O desenvolvimento de modelos para o transporte de cargas é importante para o planejamento urbano, uma vez que criam oportunidades de desenvolvimento de inovações voltadas à melhoria da qualidade de vida em áreas urbanas e possibilitam estimar e avaliar os impactos gerados pelas diversas iniciativas e medidas voltadas à logística urbana antes de implantá-las (TANIGUCHI *et al.*, 2001).

A prática de modelagem usual para a demanda de frete é o chamado modelo quatro etapas, que inclui geração e atração, distribuição (i.e., fluxo do tráfego de mercadorias entre a origem e o

destino), divisão modal e alocação de tráfego, com a definição das rotas (ORTÚZAR & WILLUMSEN, 2011). Porém, para Taniguchi & Tamagawa (2005), os modelos tradicionais existentes, mesmo sendo largamente empregados, são geralmente pouco adequados, uma vez que eles não incorporam todas as características do transporte de cargas. Assim, as técnicas tradicionais de modelagem acabam por focar em uma única dimensão do problema, apresentando conseqüentemente um olhar parcial dessa questão complexa e multidimensional.

Holguín-Veras & Patil (2008) reforçam essa ideia e afirmam que o objetivo de se desenvolver as técnicas de modelagem voltadas ao frete ainda enfrenta outras dificuldades. Uma das mais relevantes é a complexidade da tomada de decisões, que depende do interesse dos vários agentes envolvidos, e das operações, características que tornam único esse sistema de transporte. Van Kolck (2010) acrescenta que outro grande problema, que demanda muito esforço, é a coleta de dados para a verificação e o aumento da confiabilidade do modelo.

Para se entender as principais abordagens de modelagem na área, Gonzalez-Feliu & Routhier (2012) destacam a importância de conhecer os diferentes aspectos tratados nos estudos do transporte urbano de mercadorias. A criação de modelos consiste em reduzir o objeto estudado, de forma a entender os mecanismos envolvidos. Assim, é fundamental a identificação clara desse objeto, que inclui definição do escopo, contexto de aplicação do modelo e seus objetivos. A partir dessas definições, é possível, assim, determinar as variáveis fundamentais na construção do modelo (GONZALEZ-FELIU & ROUTHIER, 2012).

Segundo Taniguchi *et al.* (2001), existem três categorias de modelos necessários para a previsão de efeitos das iniciativas de logística urbana (1) Modelos de oferta; (2) Modelos de estimativa de demandas e (3) Modelos de impactos. Holguín-Veras & Patil (2008) complementam que o “processo que envolve o planejamento de transporte geralmente utiliza, como ferramenta, modelos para se prever a demanda em combinação com modelos que analisam a oferta”. Gonzalez-Feliu & Routhier (2012) acrescentam a essa lista os modelos de otimização, considerando demandas fixas e o modelo multiagente, sendo esse último a ferramenta para o desenvolvimento do presente estudo.

Para Taniguchi *et al.* (2001) e Bazzan & Klüg (2005), todos os modelos citados devem interagir entre si para constituírem um framework de modelagem integrada e interdisciplinar (Figura 2.9).

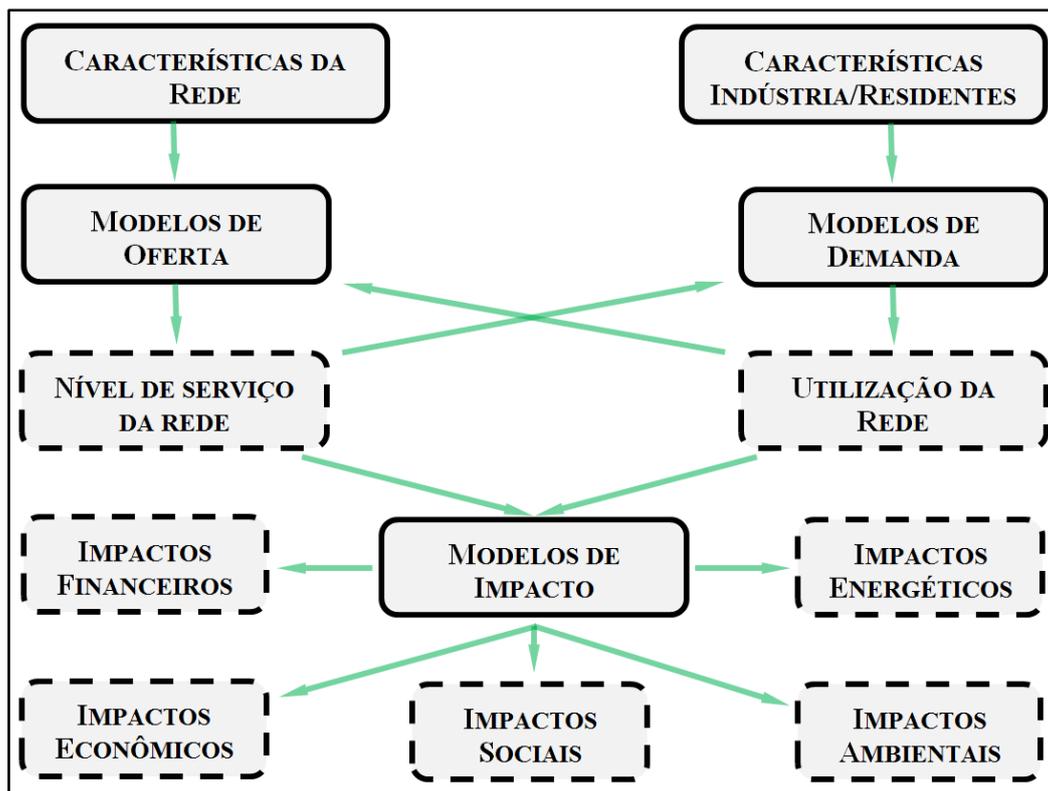


Figura 2.9: *Framework* de modelos (Adaptado de TANIGUCHI *et al.*, 2001).

De forma resumida, os modelos de oferta preveem o nível de serviço do sistema de transporte de cargas baseado nas características da rede e na demanda. Os modelos de demanda, por sua vez, preveem a demanda dos deslocamentos urbanos das cargas baseados nas características socioeconômicas e espaciais da área de estudo, assim como o nível de serviço do sistema. Finalmente, os modelos de impactos preveem os impactos energéticos, sociais, ambientais e econômicos (TANIGUCHI *et al.*, 2001).

Os modelos de otimização utilizam da pesquisa operacional para racionalizar processos relacionados ao transporte de cargas, como os modelos de localização e roteirização de veículos. Os sistemas multiagente, por sua vez, compreendem modelos de otimização, dos processos de tomada de decisão, que têm como função principal simular o comportamento dos agentes envolvidos na distribuição urbana de mercadorias (GONZALEZ-FELIU & ROUTHIER 2012). Tal modelagem é o cerne deste trabalho e está detalhada na próxima seção.

2.4 Modelagem multiagente

Segundo Benjelloun & Crainic (2009), enquanto poucos estudos foram propostos de forma específica para a logística urbana, outros foram realizados de acordo com a metodologia de planejamento utilizada para o transporte de passageiros dentro de áreas urbanas (TANIGUCHI

& HEIJDEN, 2000; TANIGUCHI *et al.*, 2001). Até os anos de 1990, o transporte urbano de mercadorias era modelado basicamente considerando os custos (OGDEN, 1992). Atualmente, a modelagem também é orientada para a verificação da implementação de medidas públicas (VAN KOLCK, 2010).

De acordo com van Kolck (2010), a metodologia geral dos modelos de logística urbana implica em primeiro estimar os pontos de origem e destino das mercadorias. Em seguida, calcular a rota ótima, considerando as influências das condições de tráfego e, finalmente, os parâmetros de saída são gerados. Ainda, segundo o mesmo autor, a maioria dos modelos não considera os interesses individuais de cada agente, sendo adaptados às perspectivas e aos conceitos gerais da sociedade. Tais análises são estáticas, uma vez que se procura um valor ótimo global para constantes de custo, demanda e fluxo de tráfego. Dessa forma, os impactos das medidas da logística urbana não são estimados para os vários agentes envolvidos.

A última geração de modelos se estende aos de apoio à tomada de decisão, que explicam o movimento urbano de veículos de carga perante a influência de várias medidas públicas, de maneira a minimizar os impactos sociais. Ainda, eles permitem o estudo da dinâmica do comportamento dos atores envolvidos e reações dos mesmos ante as medidas públicas, de forma a observar e analisar os efeitos ligados à sustentabilidade e aos aspectos sociais e econômicos. Esses modelos, conhecidos como multiagente, começaram a ser desenvolvidos na década de 1980 e, nos últimos anos, geraram um grande interesse na área de transportes (TANIGUCHI & THOMPSON, 2003; TANIGUCHI *et al.*, 2012).

Os modelos multiagentes ou modelagem baseada em agentes (MBA) apresentam grandes potencialidades no desenvolvimento da análise dos impactos diretos e indiretos sobre um meio (CANÇADO, 2009). A MBA é representada por uma variedade de agentes, dotados de atributos e regras comportamentais que, ao interagirem entre si e com o meio ambiente, originam padrões e estruturas verificáveis ao nível macroeconômico (AXTELL *et al.*, 2002; EPSTEIN, 2006). Nos modelos baseados em equações (MBE), um grupo de equações é calculado quando executados (SAWYER, 2005). A Tabela 2.2 apresenta uma comparação entre os MBA e os MBE, realizada por Parunak *et al.* (1998) e Sawyer (2005). É importante ressaltar que nela são indicadas as tendências, uma vez que determinadas características podem existir em ambas as abordagens (CANÇADO, 2009).

Tabela 2.2: MBA *versus* MBE (Adaptado de CANÇADO, 2009).

MODELAGEM BASEADA EM AGENTES	MODELAGEM BASEADA EM EQUAÇÕES
Formada por indivíduos e observações	Formada por indivíduos e observações
Os agentes interagem entre si por meio de ações comportamentais	As variáveis se relacionam entre si por meio de equações
Executar o modelo envolve ativar comportamentos	Executar o modelo envolve calcular equações
Uso de variáveis acessíveis ao agente individual (microsimulação)	Uso extensivo de variáveis ao nível de sistema (macrossimulação)
Unidade natural de decomposição é o indivíduo	Unidade natural de decomposição é o macro nível observável
Ator com estratégias racionais e não racionais	Ator racional da teoria econômica
Agentes heterogêneos	Agentes homogêneos
Agentes podem modificar suas ações durante a simulação	Comportamento do agente não se altera durante a modelagem

Na forma mais geral do conceito de modelo multiagente, considera-se a interação de cada agente com o seu ambiente, seguindo comportamentos e objetivos pré-estabelecidos (Figura 2.10).

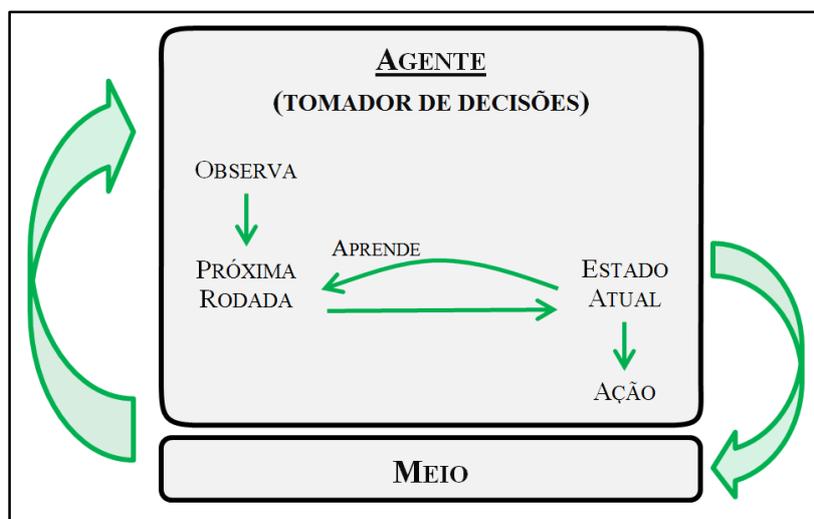


Figura 2.10: Representação do modelo multiagente (Adaptado de WOOLDRIDGE, 2002).

Um agente pode ser entendido como um sistema autônomo com um objetivo determinado e que opera assincronamente, porém, quando necessário, pode atuar de modo coordenado com outros agentes (FOX *et al.*, 2000). De acordo com Wooldridge (2002), o agente é uma entidade de *software*, situado em algum meio e que exibe um comportamento autônomo e proativo orientado aos seus objetivos. Esses agentes têm como características a autonomia, a capacidade de perceber, raciocinar e agir em seu ambiente, bem com a habilidade de interagir socialmente

e de se comunicar com a finalidade de realizar tarefas (HUHNS & SINGH, 1997). Ainda, de acordo com van Kolck (2010), o agente pode observar o seu ambiente, que contém parâmetros e informações. Essa observação pode alterar o seu estado interno, que possivelmente refletirá sobre o próximo ambiente, resultando em um comportamento que impactará o seu meio. O modelo multiagente permite, portanto, analisar a influência das relações, entre os vários agentes colocados em conjunto, ante uma situação predeterminada.

Segundo Taniguchi & Thompson (2003), normalmente, a modelagem multiagente pode ser vista a partir de três níveis de abstração, i.e., a interação entre o sistema e seu meio, a interação entre os agentes e a interação entre os componentes dos agentes. A arquitetura do modelo é modular, sendo eles “comunicação”, “decisão”, “crença”, “desejo” e “intenção”. O primeiro módulo lida com a comunicação entre os agentes ou entre os agentes e o seu ambiente. A “crença” contém um conjunto de fatos que podem ser verdadeiros ou falsos em um determinado tempo, ao passo que o “desejo” contém metas a serem realizadas.

A “intenção” é construída em três camadas: o nível superior comanda os compromissos com os outros agentes e/ou com ambiente; o segundo nível contém os planos para a realização dos compromissos e o inferior compreende as ordens de ação que são lançadas ao longo do tempo para a implementação dos planos. Como o "cérebro" do agente, o módulo de “decisão” é responsável por atualizar os estados locais e escrever mensagens de saída (TANIGUCHI & THOMPSON, 2003).

Dentre os primeiros modelos aplicados à área de produção e transportes, destacam-se os estudos de Jennings (1995) e Swaminathan *et al.* (1998). Jennings (1996) define o modelo multiagente como uma subárea da Inteligência Artificial Distribuída (IAD)⁸ que investiga o comportamento de um conjunto de agentes autônomos⁹ objetivando a solução de um problema que está além das capacidades de um único agente. Segundo Dmontier (2014), a utilização de agentes torna possível a modelagem dinâmica dos comportamentos existentes nas cadeias de suprimentos.

Portanto, a modelagem estudada compreende uma rede associada a agentes que interagem entre si para resolver problemas que vão além das capacidades individuais. Para Taniguchi &

⁸ Para uma leitura mais detalhada a respeito do tema, ver Jennings (1996).

⁹ Entende-se autonomia como a capacidade do agente agir por seus próprios objetivos sem a intervenção de outrem (WOOLDRIDGE & JENNINGS, 1995).

Thompson (2003), é natural a transformação dos atores envolvidos na logística urbana em agentes do modelo e o estabelecimento de um *framework* direcionado à área e estruturado conforme a tecnologia proposta por esse tipo de modelagem. Lang *et al.* (2008, p. 62) concluem que:

[...] problemas de planejamento de transportes têm características que correspondem a competências específicas de sistemas baseados em agentes. Em particular esses sistemas são capazes de lidar com o planejamento interorganizacional e orientado a eventos, atendendo, dessa forma, aos requisitos atuais no planejamento e execução de cadeias de suprimento.

Dentro desse contexto, a literatura apresenta um número de exemplos interessantes de aplicação da modelagem multiagente aos estudos de logística de transporte, porém, ainda sim, a maioria deles não se concentra no transporte urbano de mercadorias (TANIGUCHI *et al.*, 2012).

Wisetjindawat *et al.* (2005) propuseram uma simulação baseada em abordagem multiagente para modelar as interações nos movimentos de carga. Ossowski *et al.* (2005) apresentaram um modelo de apoio à decisão para a gestão do transporte. Jiao *et al.* (2006) aplicaram a modelagem multiagente para uma rede de produção na cadeia de suprimentos. Van Duin *et al.* (2007) incluíram o conceito de negociação, baseado em jogos de apostas ou de leilão à modelagem multiagente, além de implementarem o módulo de reclamação de residentes ante a situações de níveis elevados de ruídos. Com a modelagem multiagente, é possível incluir tais escolhas e reações individuais (TANIGUCHI *et al.*, 2008). Tamagawa *et al.* (2010) e Roorda *et al.* (2010) estimaram o efeito de ajustes de preços realizados pelas transportadoras sobre o resultado global da distribuição urbana de mercadorias.

Outras técnicas de negociação que representam o comportamento humano também foram estudadas por Anand *et al.* (2010). Taniguchi & Yamada (2007), Tamagawa *et al.* (2010), Uchiyama & Taniguchi (2014) e Pramudita *et al.* (2014) utilizaram um modelo de aprendizagem (*Q-learning*) e de roteamento de veículos com janela de tempo (VRP-TW-F). A investigação dos impactos provenientes das medidas públicas voltadas à logística urbana foram abordados por Tamagawa *et al.* (2010); Teo *et al.* (2012); van Duin *et al.* (2012); Wangapisit *et al.* (2014), Teo *et al.* (2014) e Teo (2015).

2.5 Resumo do Capítulo

Este capítulo apresentou os principais conceitos que cercam o cerne do trabalho: a vulnerabilidade da logística urbana analisada a partir de uma modelagem multiagente. A Tabela 2.3 apresenta os principais autores identificados e citados.

Tabela 2.3: Enquadramento dos artigos aos temas tratados.

TEMAS ABORDADOS	AUTORES
LOGÍSTICA URBANA	Anderson <i>et al.</i> (2005); Ballou (1997); Benjelloun <i>et al.</i> (2009); Brasil (2015); Browne <i>et al.</i> (2007); Carvalho (1998); Correia <i>et al.</i> (2010b); Crainic <i>et al.</i> (2004); Crainic <i>et al.</i> (2009); Czerniak <i>et al.</i> (2000); Dablanc (2007); Dablanc & Rodrigue (2014); Dutra (2004); Ehmke (2012); European Comission (1998); Fontes (2003); Junqueira (2001); Noortman (1984); Novaes (2001); OECD (2003); Ogden (1992); Oliveira (2014a); Oliveira <i>et al.</i> (2014a); Oliveira <i>et al.</i> (2014b); Prata & Arruda (2007); Quispel, (2002); Taniguchi & Heijden (2000); Taniguchi & Thompson (2003); Taniguchi <i>et al.</i> (2001); UNFPA (2007); van Kolck (2010); WBCSD (2001)
VULNERABILIDADE E LOGÍSTICA URBANA	Alexander (2002); Arango <i>et al.</i> (2012); Bogardi (2006); Bonatti (2011); Brasil (1999); Cançado (2009); Chambers (1989); Chardon (1999); Davidsson <i>et al.</i> (2005); Delor & Hubert (2000); Dow (2002); EMA (1998); EMA (2002); Feldman (1994); Ferreira (2010); Green (2003); Green <i>et al.</i> (2000); Hossain & Davies (2004); Kron & Thumerer (2002); Leaning (2008); Nagen (2008); Nascimento (2011); Marchand (2009); Oliveira <i>et al.</i> (2013); Oliveira <i>et al.</i> (2014a); Parker <i>et al.</i> (1987); Pelling (2003); Schreiner (2013); Silvestrini (2013); Zonensein (2007); Yevjevich (1994); Wisner <i>et al.</i> (2004)
MODELOS EM LOGÍSTICA URBANA	Bazzan & Klüg (2005); Gonzalez-Feliu & Routhier (2012); Holguín-Veras & Patil (2008); Oliveira <i>et al.</i> (2013); Ortúzar & Willumsen (2011); Routhier <i>et al.</i> (2012); Taniguchi & Tamagawa (2005); Taniguchi <i>et al.</i> (2001); Taniguchi <i>et al.</i> (2012); van Kolck (2010); Vleugel (2004); Wolpert & Reuter (2012)
MODELAGEM MULTIAGENTE	Anand <i>et al.</i> (2010); Axtell <i>et al.</i> (2002); Benjelloun & Crainic (2009); Cançado (2009); Dmontier (2014); Epstein (2006); Fox <i>et al.</i> (2000); Huhns & Singh (1997); Jennings (1995); Jennings (1996); Jiao <i>et al.</i> (2006); Lang <i>et al.</i> (2008); Ogden (1992); Ossowski <i>et al.</i> (2005); Parunak <i>et al.</i> (1998); Pramudita <i>et al.</i> (2014); Roorda <i>et al.</i> (2010); Routhier (2006); Sawyer (2005); Swaminathan <i>et al.</i> (1998); Tamagawa & Taniguchi (2009); Tamagawa <i>et al.</i> (2010); Taniguchi & Heijden (2000); Taniguchi & Thompson (2003); Taniguchi & Yamada (2007); Taniguchi <i>et al.</i> (2001); Taniguchi <i>et al.</i> (2008); Taniguchi <i>et al.</i> (2012); Teo (2015); Teo <i>et al.</i> (2012); Teo <i>et al.</i> (2014); Uchiyama & Taniguchi (2014); van Duin <i>et al.</i> (2007); van Duin <i>et al.</i> (2012); van Kolck (2010); Wangapisit <i>et al.</i> (2014); Wisetjindawat <i>et al.</i> (2005); Wooldridge (2002); Wooldridge & Jennings (1995)

2.5.1 Respondendo a subquestão 1

A subquestão 1 “Quais modelos, dentro da logística urbana, definem o contorno da problemática inicial?” fornece informações para investigar, dentro do campo geral da pesquisa, as possibilidades de escolhas e aplicações de modelos e definir aqueles que se enquadram nos objetivos deste projeto. Como visto na seção 2.3 do presente trabalho, os modelos tradicionais existentes são geralmente pouco adequados, uma vez que focam uma única dimensão do problema. Portanto, os fluxos de cargas são necessários, assim como as origens e destinos para o desenvolvimento do modelo a ser utilizado no presente trabalho (modelos de oferta e demanda). A definição de rotas de veículos também é necessária (modelos de otimização). A roteirização, em conjunto com situações de vulnerabilidade e as medidas tomadas para a redução de impactos são analisadas por meio do comportamento individual dos agentes envolvidos (modelo multiagente).

2.5.2 Respondendo a subquestão 2

A subquestão 2 “Quais são os fatores críticos dentro da vulnerabilidade e como os estudos envolvendo esse tema contribuem para a logística urbana?” fornece informações que ajudam na definição e avaliação da vulnerabilidade e de seus fatores críticos relacionados à logística urbana. Como comentado na Subseção 2.2.1 do presente estudo, a distribuição urbana de mercadorias está sujeita a incidentes ou ameaças, resultados de eventos adversos, naturais ou provocados pelo homem, causando danos humanos, materiais e ambientais e consequentes prejuízos econômicos e sociais. Considerando que a economia urbana se configura como uma rede de atividades conectadas, estudos envolvendo a vulnerabilidade e medidas voltadas a minimizar as suas consequências são de extrema importância para manter essa rede em funcionamento.

2.5.3 Respondendo a subquestão 3

A subquestão 3 “Qual modelo, dentro da logística urbana, contribui para o presente estudo?” fornece informações para definir o modelo multiagente como base para o presente estudo. Assim como foi respondido na subquestão 1, ele foi combinado com modelos de otimização, oferta e demanda, impacto e de aprendizado, todos eles comentados nas seções 2.3 e 2.4 do presente estudo. Essas informações foram utilizadas na construção do modelo de vulnerabilidade.

2.5.4 Respondendo a subquestão 4

A subquestão 4 “Qual a resposta (medida) mais adequada do poder público ante a um incidente”. Como comentado na Subseção 2.2.1, algumas medidas de controle e mitigação de dados provocados por incidentes podem ser adotadas. Entre elas, as que foram analisadas no presente estudo são as chamadas “medidas não estruturantes”, como por exemplo, a previsão e os sistemas de alerta por veículos de comunicação pública, como rádio, televisão, internet (BONATTI, 2011) e aplicativos colaborativos que fornecem informações em tempo real.

2.5.5 Respondendo a subquestão 5

As respostas referentes à subquestão 5 se encontram no Capítulo 4 do presente trabalho.

3 METODOLOGIA

O presente estudo tem como objetivo a avaliação da dinâmica da logística urbana ante uma situação de vulnerabilidade, a partir de um modelo multiagente, com aplicação em Belo Horizonte (MG). As investigações foram fundamentadas nos objetivos e comportamentos individuais dos agentes e os resultados foram apresentados em termos de impactos ambientais e financeiros. Portanto, foi proposto um estudo que auxilie no entendimento dos impactos econômicos e ambientais de incidentes, mais especificamente inundações, em uma perspectiva de rede urbana e dos agentes que nela atuam.

Quanto à definição do tipo de pesquisa realizada pelo presente trabalho, ela pode ser feita em relação aos seus objetivos, à natureza ou à abordagem utilizada para o seu desenvolvimento. Quanto aos seus objetivos, ela pode ser definida como de caráter exploratório, uma vez que o problema estudado, ainda pouco explorado na literatura, é caracterizado e definido. Quanto à sua natureza, a pesquisa é aplicada, pois tem como objetivo investigar, comprovar ou rejeitar hipóteses sugeridas pelos modelos teóricos. Quanto à abordagem, o presente estudo é classificado como quantitativo, uma vez que, influenciado pelo positivismo, ele recorre à linguagem matemática para descrever as causas de um fenômeno e as relações entre as variáveis (FONSECA, 2002; LESSA, 2006; MARTINS, 2012; MORABITO NETO & PUREZA, 2012 e OLIVEIRA, 2014a).

Para o desenvolvimento do presente trabalho, foram utilizadas modelagem e simulação, com as quais é possível manipular e compreender o objeto de estudo (MARTINS, 2012). Os modelos de simulação podem ser descritos como modelos quantitativos abstratos que fazem uso de técnicas analíticas (i.e, ferramentas matemáticas e estatísticas) e experimentais (i.e., simulação) para compreender o sistema que está sendo modelado. Ainda, tais modelos costumam ser abstratos por representarem a realidade, e quantitativos por considerarem apenas variáveis mensuráveis (MORABITO NETO & PUREZA, 2012).

As etapas do procedimento metodológico estão apresentadas na Figura 3.1 e detalhadas abaixo. A primeira e a segunda etapas compreenderam a definição do problema estudado, a partir da modelagem multiagente, assim como a determinação dos agentes e a caracterização de seus comportamentos e relações. Na terceira etapa foi definida a arquitetura do modelo, a partir da qual ele foi construído. A quarta e quinta etapas foram destinadas à definição e caracterização da área de estudo, bem como apresentados os dados utilizados para o seu desenvolvimento. Em

seguida, os cenários e as hipóteses utilizadas foram definidos, caracterizando a sexta e a sétima etapas. Na oitava foram executados testes e simulações para a verificação do modelo. Com a rede verificada, a aplicação da modelagem foi realizada. Finalmente, os resultados e discussões das simulações compõem a última etapa do trabalho.

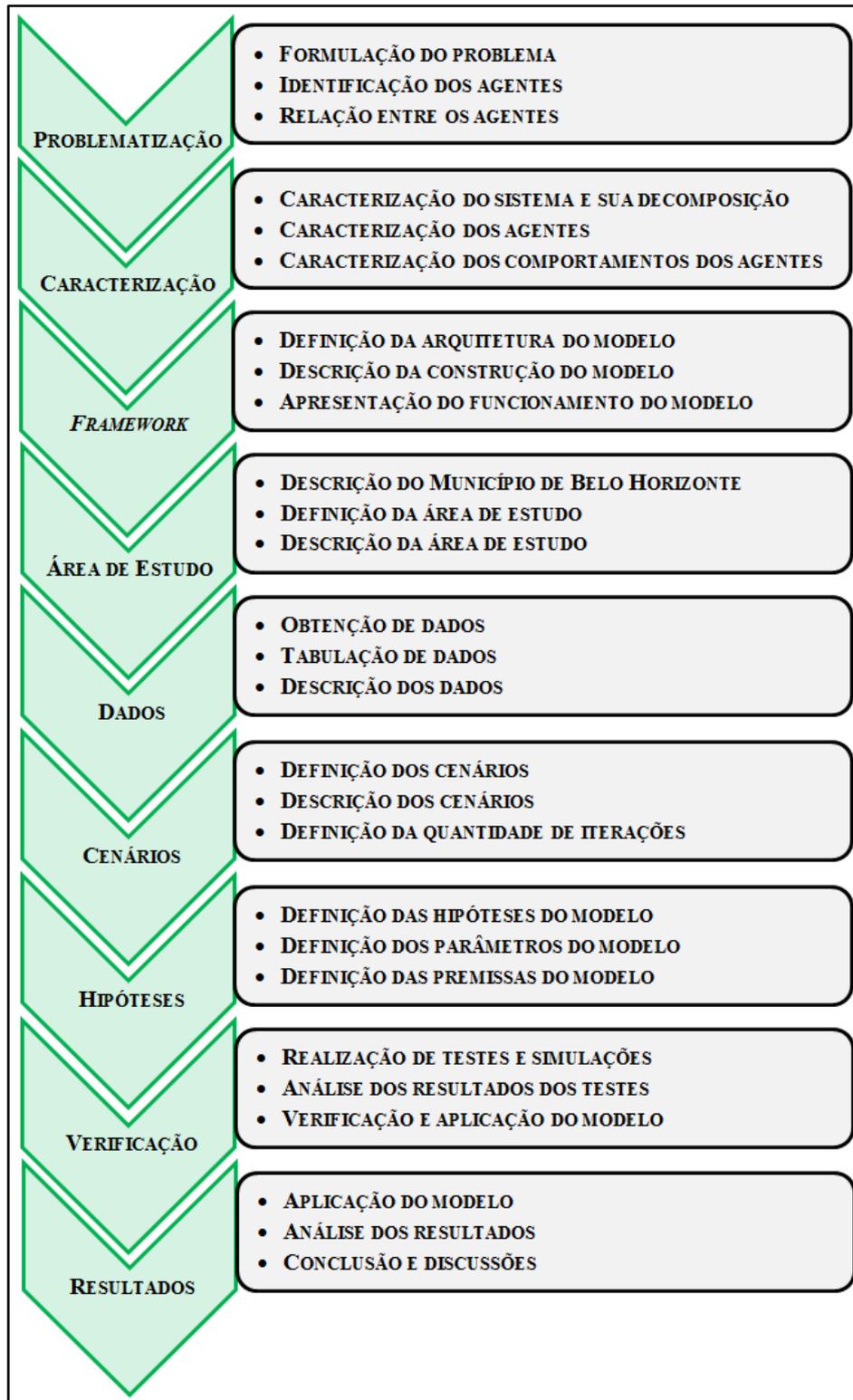


Figura 3.1: Etapas do estudo.

3.1 Formulação do problema e a identificação dos agentes

Com o objetivo de analisar a dinâmica da logística urbana ante a uma situação de vulnerabilidade, as medidas não estruturais de previsão e distribuição de alertas à população foram implementadas no modelo, conforme sugere Bonatti (2011). A questão endereçada ao modelo multiagente desenvolvido é: Qual a eficácia dos sistemas de alerta na redução de impactos gerados pela inundação na distribuição urbana de mercadorias?

Como apresentado no subitem 2.1.2 do presente trabalho, existem vários agentes associados à distribuição de cargas urbanas sendo necessário considerar o comportamento dos diversos agentes envolvidos, visto que cada um possui seu próprio objetivo diante uma mesma situação. Assim, no desenvolvimento do modelo, o foco principal está nos indivíduos que entram, habitam, trabalham ou gerenciam o centro urbano. Para tanto, os atores inseridos no modelo são: residentes, administração pública, transportadores de carga, comerciantes, chuva e inundação.

Os residentes, atingidos pelos impactos (i.e., congestionamento, aumento do tempo de viagem e de emissão de poluentes) gerados pela inundação, não toleram grandes veículos em ruas locais e têm como objetivo minimizar os níveis de congestionamento, refletidos nos níveis de emissão de poluentes (TANIGUCHI *et al.*, 2001). Dessa forma, o comportamento deles envolve a “reclamação” junto ao poder público quando esses limites forem excedidos. O objetivo do poder público, por sua vez, é minimizar o número de reclamações e, para isso, eles implementam novas medidas de logística urbana, que no caso do estudo, são a distribuição de alertas à população em situações envolvendo inundações.

Os transportadores têm como objetivo maximizar o lucro e, para isto, buscam reduzir os deslocamentos para minimizar os custos com transporte. Na operação, eles sofrem interferência direta das inundações. O comércio local, por sua vez, também sofre interferências pela diminuição do acesso às mercadorias e dos clientes às suas lojas. Com a chuva, ocorre a redução da velocidade dos veículos e, conseqüentemente, contribuem nos impactos devido ao aumento do consumo de combustível e da emissão de poluentes. Finalmente, a inundação faz com que *links* da rede sejam interrompidos, causando maiores congestionamentos e com eles, impactos econômicos e ambientais. As relações entre os comportamentos dos diferentes agentes estão apresentadas na Figura 3.2.

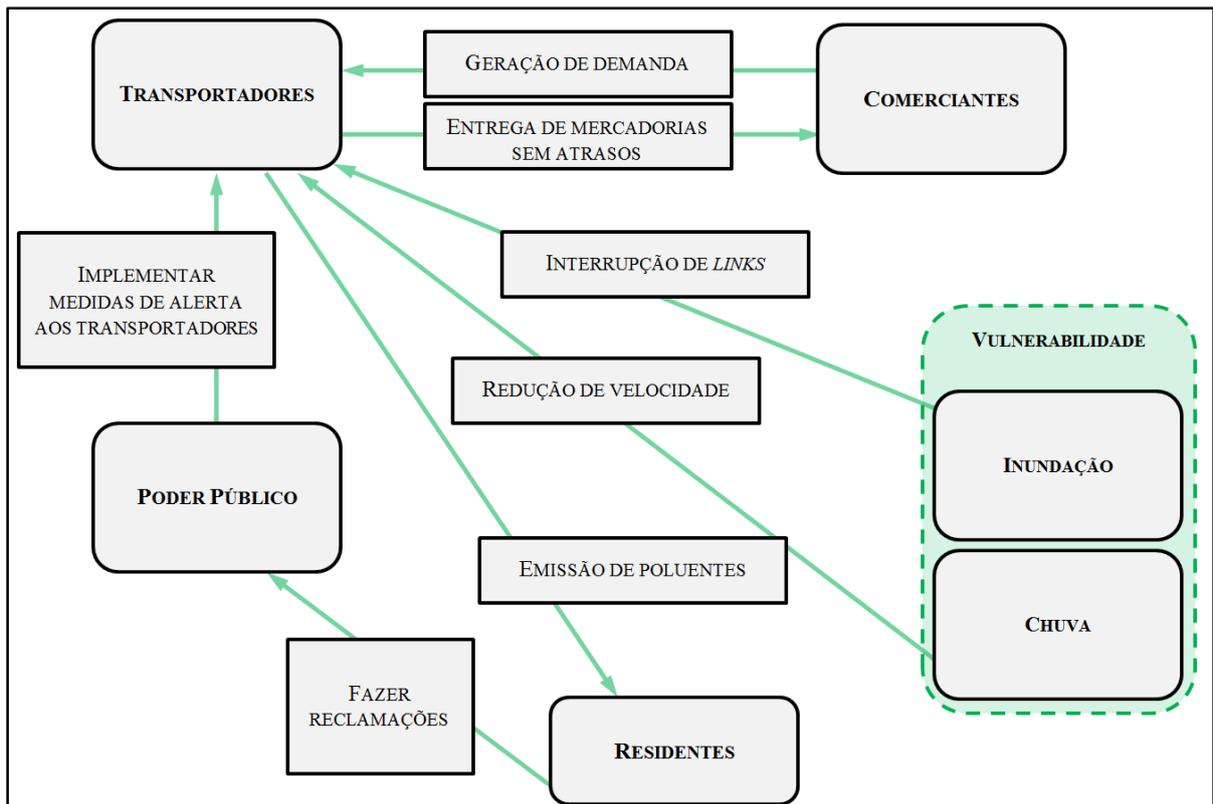


Figura 3.2: Relação dos comportamentos dos agentes (Adaptado de Taniguchi *et al.*, 2001).

Ainda, há três tipos de agentes *dummy*: os veículos particulares que terão apenas como função compartilhar os *links* com os transportadores de forma a dificultar o fluxo de veículos, tornando o modelo mais realista; os nós e as ruas utilizados pelos agentes como fonte de informações como distância, velocidade média, tempo de viagem e limites de emissões. Os nós, representados por pontos na rede viária, estão presentes nos cruzamentos das vias, representadas pelos *links*, e essas, criam o acesso ao centro urbano. O algoritmo *Dijkstra*¹⁰, com base nas informações disponibilizadas por esses agentes *dummy*, calcula o caminho mais barato para os usuários da rede viária. Como dito anteriormente, esse algoritmo auxiliará os transportadores a atingirem os seus objetivos. Eles influenciam o ambiente de forma indireta, por meio dos outros agentes (DIJKSTRA, 1959).

¹⁰ O algoritmo *Dijkstra* encontra o caminho mais curto em um gráfico ponderado entre dois nós, por exploração da rede de uma forma sucessiva. Começando no nó de origem da rota, o algoritmo visita todos os *links* vizinhos e classifica cada um deles com base na soma mínima de custos.

3.2 Identificação e decomposição do sistema

Abaixo estão indicados os pressupostos básicos que caracterizam o sistema, além dos agentes, suas características e comportamentos (Tabela 3.1).

Tabela 3.1: Identificação dos agentes e suas propriedades.

AGENTES E SUAS PROPRIEDADES	
TRANSPORTADORES	
Têm:	<ul style="list-style-type: none">• Demanda por entregas diárias aos comerciantes• Contagem de quilometragem• Velocidade de deslocamento• Habilidades de roteirização e informações de parâmetros para roteirizar• Informação da melhor rota
Podem:	<ul style="list-style-type: none">• Fazer a roteirização com a geração da melhor rota e melhor custo, para minimizar o custo de transporte• Incrementar contagem de quilometragem e tempo de forma a calcular os seus custos de tempo e combustível• Produzir emissões de NOx e MP para estimar o impacto ambiental• Dirigir a um destino para realizar a entrega• Realizar a entrega e determinar o próximo destino, de forma a completar o roteiro de entregas
CHUVA	
Tem:	<ul style="list-style-type: none">• Hora de ocorrência• Duração
Pode:	<ul style="list-style-type: none">• Reduzir a velocidade nos <i>links</i>
INUNDAÇÃO	
Tem:	<ul style="list-style-type: none">• Hora de ocorrência• Duração
Pode:	<ul style="list-style-type: none">• Interromper os <i>links</i>
COMERCIANTES	
Têm:	<ul style="list-style-type: none">• Horário de fechamento do estabelecimento• Roteiro de entrega do transportador
Podem:	<ul style="list-style-type: none">• Receber mercadorias• Indicar se o número planejado de entregas ao longo do dia foi equivalente ao real
RESIDENTES	
Têm:	<ul style="list-style-type: none">• Contador de NOx
Podem:	<ul style="list-style-type: none">• Comparar os níveis de emissão dos cenários com incidentes com os níveis do cenário base• Reclamar com o poder público caso os níveis sejam excedidos

Tabela 3.1: Identificação dos agentes e suas propriedades.

AGENTES E SUAS PROPRIEDADES	
PODER PÚBLICO	
Tem:	<ul style="list-style-type: none"> • Contador de reclamações • Capacidade de tomar decisões
Pode:	<ul style="list-style-type: none"> • Implementar medidas para redução de impactos • Reduzir o número de reclamações proveniente dos residentes
AGENTE DUMMY: VEÍCULOS PARTICULARES	
Têm:	<ul style="list-style-type: none"> • Atividades diárias para serem realizadas (trabalho, lazer, compras¹¹)
Podem:	<ul style="list-style-type: none"> • Ocupar as vias concomitantemente com os veículos de carga
AGENTE DUMMY: NÓS	
Têm:	<ul style="list-style-type: none"> • Informações de coordenadas geográficas
Podem:	<ul style="list-style-type: none"> • Contar o fluxo de veículos • Informar início/final de uma viagem nos <i>links</i>
AGENTE DUMMY: VIAS	
Têm:	<ul style="list-style-type: none"> • Informações de distância • Informações de tempo de viagem • Informações de velocidade • Parâmetros de capacidade da via • Parâmetros de emissão de poluentes (NO_x e MP) • Volume da via
Podem:	<ul style="list-style-type: none"> • Calcular o total de emissão • Contar o fluxo de veículos • Calcular a velocidade média no link • Calcular o tempo de viagem

É importante salientar que uma simulação representa um dia típico. Para cada simulação realizada, é escolhido o número de iterações que corresponde ao nível de aprendizado do agente. Assim, quanto maior o número de iterações, maior o aprendizado do agente.

3.3 Arquitetura do modelo

O modelo será utilizado para analisar econômica e ambientalmente os impactos causados devido à interrupção do tráfego. A Figura 3.3 apresenta o fluxo de modelagem para se realizar tais análises. No que tange as inundações, as informações necessárias para aplicar essa abordagem são: área diretamente afetada pelo alagamento, distribuição da inundação sobre a área definida e duração da inundação.

¹¹ Definidos e detalhados na Tabela 3.3 presente na subseção 3.7.1 do presente trabalho.

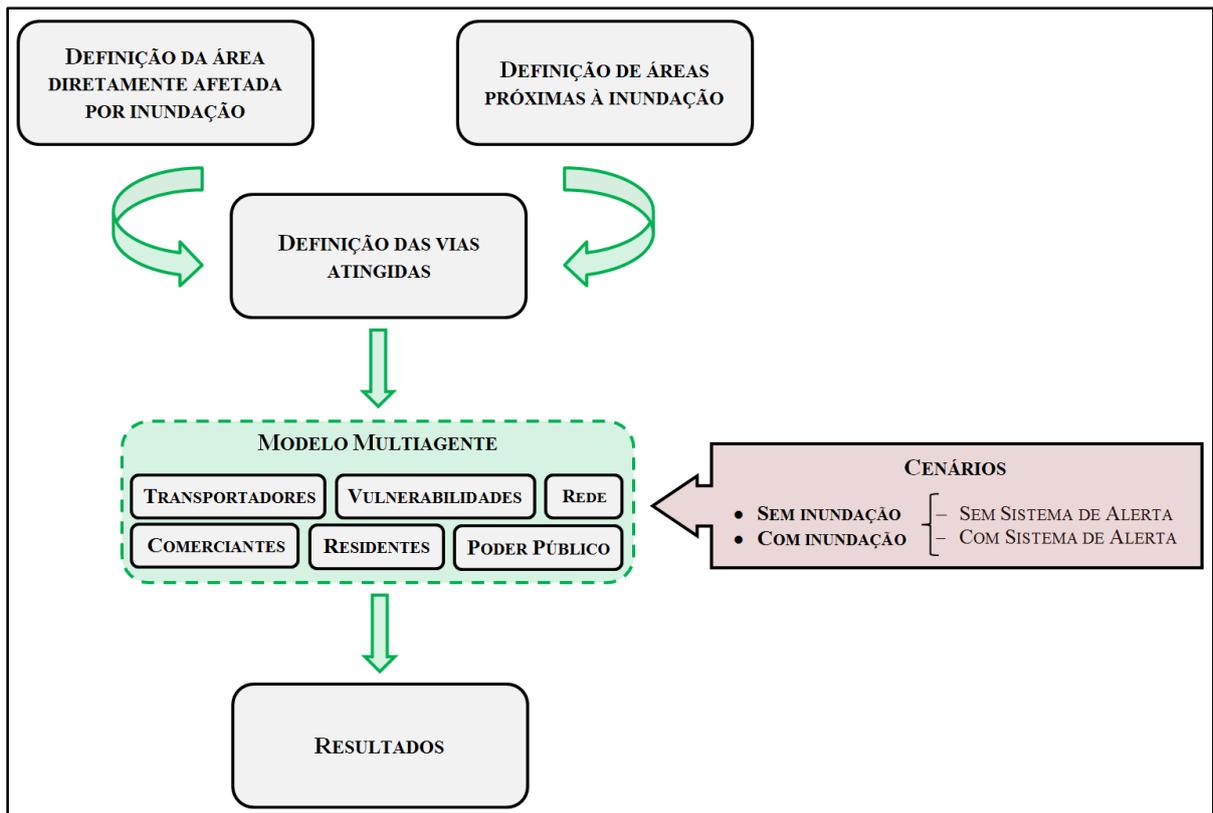


Figura 3.3: Desenvolvimento do modelo.

3.3.1 Construção do modelo multiagente no MATSim

A plataforma utilizada para se construir o modelo multiagente foi o MATSim, uma biblioteca de classes utilizada para simulação de modelos multiagente voltada, exclusivamente, para simulações de trânsito (MATSIM, 2015). Em uma simulação no MATSim, podem ser identificadas cinco etapas principais: demanda inicial, execução, pontuação, replanejamento e análise, mostradas na Figura 3.4. Os ciclos de execução, pontuação e replanejamento representam uma iteração e, em geral, quanto mais iterações forem realizadas na simulação, melhor o resultado geral ou a pontuação média de cada agente (RIESER *et al.*, 2015).

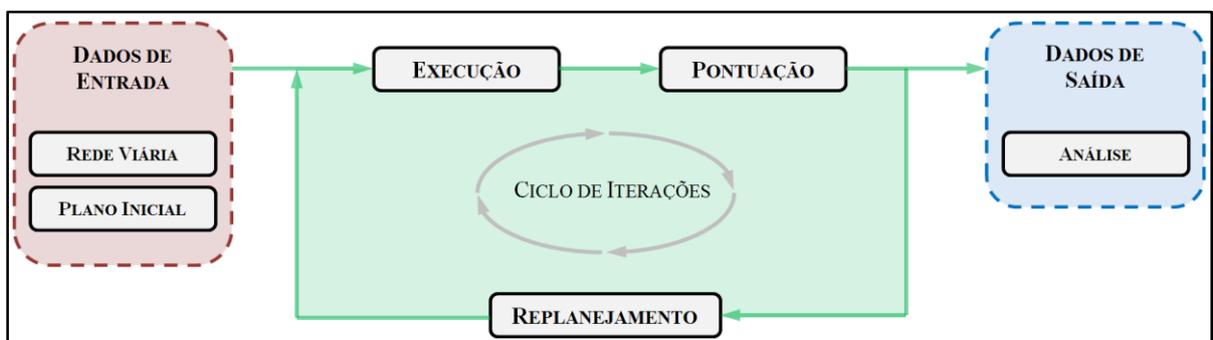


Figura 3.4: As etapas da simulação do MATSim (Adaptado de HUGENBUSCH, 2012).

A primeira etapa da simulação corresponde à entrada de dados. Os dois conjuntos de dados necessários para isso são a *network* e o *plans*. O arquivo *network* contém os nós e os *links* que compõem a rede viária da área de estudo. Para tanto, podem ser utilizadas as informações disponibilizadas por Geofabrik (2015) e o OpenStreetMap (2015). O arquivo *plans*, por sua vez, consiste nas informações da população que utiliza a rede e os seus planos iniciais.

A construção desse arquivo pode ser realizada no MATSim, sendo necessários os arquivos *census*, *travel_survey_persons* e *travel_survey_trips*. O *census* contém um registro para cada pessoa com informações como idade, local de trabalho e coordenadas da residência, sendo utilizado para criar o universo que fará parte da simulação (Subseção 3.7.1). O arquivo *travel_survey_persons* é utilizado para correlacionar os agentes aos planos associados. O arquivo *travel_survey_trips* contém os registros das viagens dos agentes, incluindo os pontos de origem e destino, o meio de transporte, o tipo e a duração da atividade realizada (MATSIM, 2015). Além dos conjuntos de dados *network* e *plans*, existe o *facilities*. Para sua criação são necessários dois arquivos: *municipalities* que contém um registro para cada área homogênea¹², com coordenadas mínimas e máximas e *business_census*, com informações de todos os estabelecimentos representados na simulação, com coordenadas, tipo (trabalho, escola, compras, lazer) e indicação da área homogênea em que se encontra.

A segunda etapa da simulação é a execução dos planos. Cada agente recebe um plano inicial para ser executado que pode estar sujeito à interferência de outras pessoas. Por exemplo, se muitos motoristas decidem por trafegar em uma mesma via em um determinado momento, um congestionamento pode ocorrer e cada indivíduo observará os seus reflexos. Dessa maneira, cada agente pode demorar mais tempo do que esperado para realizar suas atividades (RIESER *et al.*, 2015).

A terceira etapa ocorre paralelamente à segunda, a pontuação. Ao longo da execução, cada plano recebe uma pontuação, de acordo com parâmetros da biblioteca MATSim que podem ser personalizados (i.e., se um agente passar muito tempo viajando, ou gastar muito tempo em um congestionamento, ou simplesmente precisar de muitas viagens de carro para realizar suas atividades, a pontuação diminui). Essa é uma medida para comparar planos diferentes depois

¹² Segundo Minas Gerais (2012), as Áreas Homogêneas são as unidades mínimas, por cuja agregação são permitidas diferentes análises hierarquizadas. Elas foram estabelecidas para se alcançar amostras mínimas em pesquisas socioeconômicas.

do replanejamento e escolher o melhor (RIESER *et al.*, 2015). O replanejamento, por sua vez é a quarta etapa, em que cada agente mantém o melhor dos planos testados. Em cada iteração, os planos são executados e suas respectivas pontuações são armazenadas. Ao final das iterações, cada agente conhece o melhor plano executado (RIESER *et al.*, 2015).

Finalmente, a última etapa da simulação é a análise dos resultados. Além daqueles já são fornecidos pelas bibliotecas MATSim, após a simulação dos planos e eventos realizados por cada agente, indicadores, como a emissão de poluentes, são calculados para cada *link* em intervalos de 30 minutos ao longo do dia. Além disso, o número de viagens, a velocidade média, o tempo de viagem para cada motorista e em cada *link* também são calculados e analisados.

3.3.2 Funcionamento do modelo

O modelo multiagente do presente estudo combina dois submodelos: a roteirização e a aprendizagem dos agentes (Figura 3.5) que são executados alternadamente.

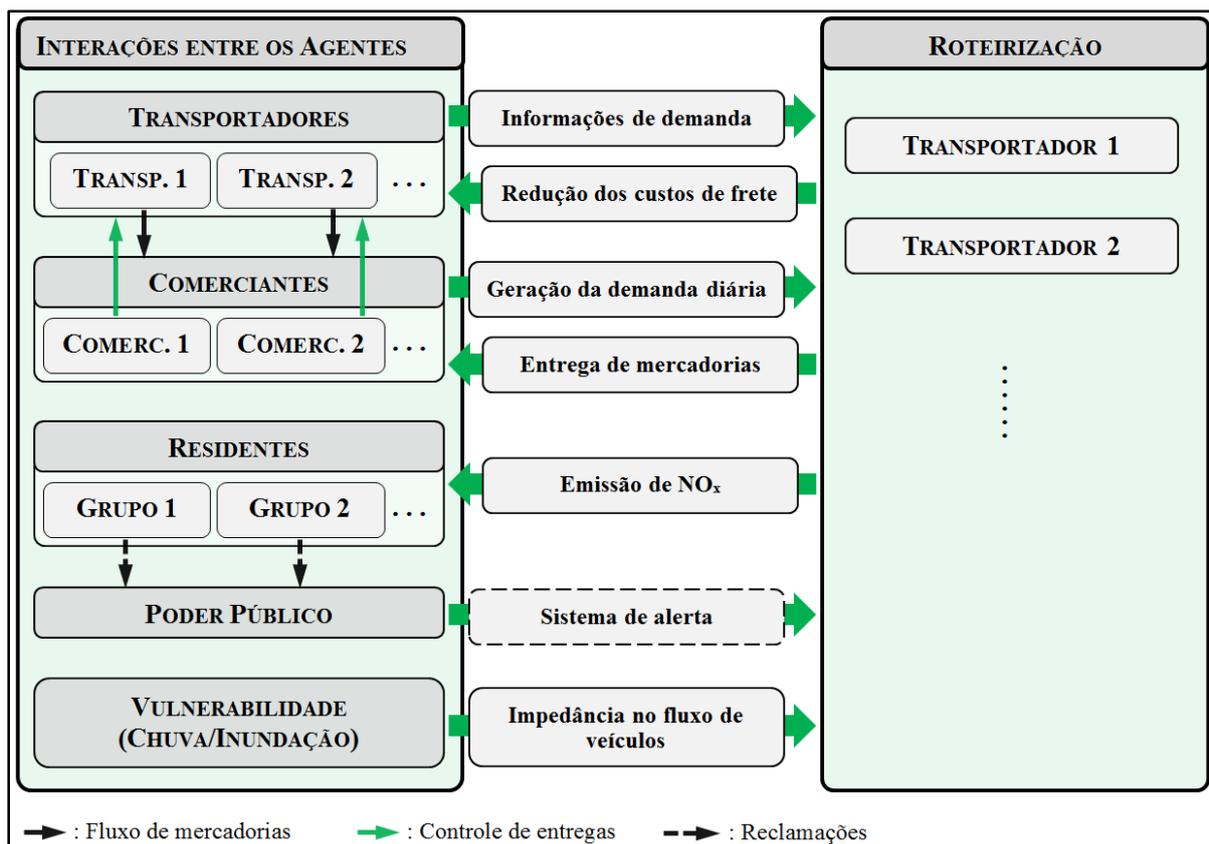


Figura 3.5: Framework do modelo multiagente.

O modelo de aprendizagem avalia o comportamento dos agentes e atribui valores a eles, que são utilizados para definir as ações dos mesmos. A roteirização, por sua vez, programa uma rota baseada na demanda de cada comerciante e na menor distância para atendê-la (utilizando

revestidos, porém, a grande maioria se encontra confinada em canais fechados (Figura 3.7), configurando-se assim, como desencadeadores dos processos de inundação durante eventos de precipitação (BELO HORIZONTE, 2010).

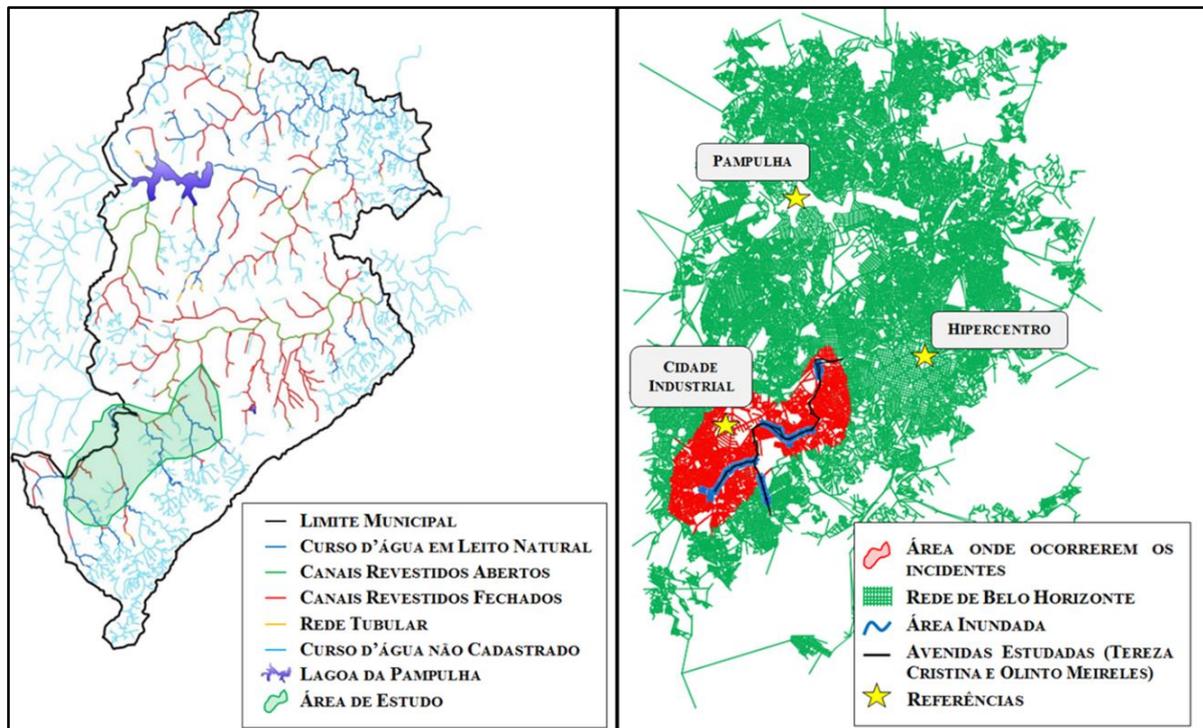


Figura 3.7: Área de estudo (Adaptado de BELO HORIZONTE, 2012).

A área de estudos foi delimitada na região que compreende parte das Av. Tereza Cristina e Olinto Meireles e seus respectivos entornos, para a ocorrência de impactos causados por chuva e inundação (Figura 3.7). O perímetro encontra-se nas sub-bacias¹³ nomeadas Rua Martins Soares, Vila Vista Alegre, Vila Guaratã, Jatobá e Barreiro (BELO HORIZONTE, 2008). A região foi selecionada por apresentar um histórico considerável de ocorrência de inundações, que podem ser ilustradas a partir das sequências de imagens apresentadas na Figura 3.8.



Figura 3.8: Pontos de inundação da Av. Tereza Cristina.

¹³ Para mais informações das sub-bacias: < http://www.pbh.gov.br/smpl/HTA_M005.pdf>.

A localização dos pontos de ocorrência de inundação A, B e C, indicados na Figura 3.8, está identificada na Figura 3.9.

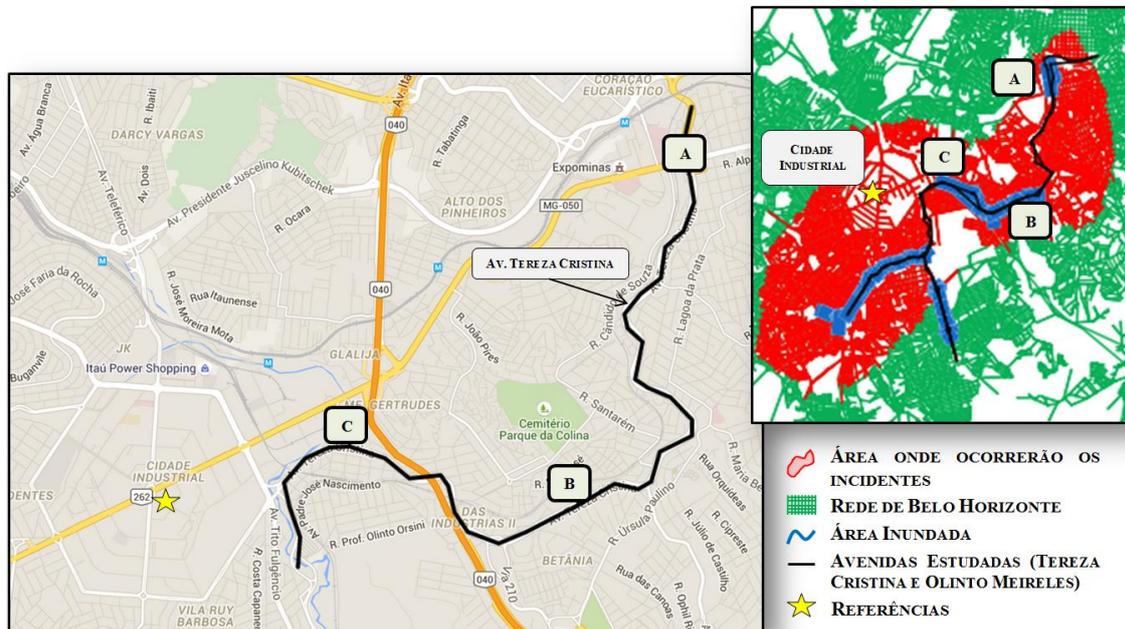


Figura 3.9: Localização dos pontos de inundação frequente na Av. Tereza Cristina.

3.5 Obtenção dos dados

A disponibilidade e a confiabilidade dos dados, devido à natureza complexa intrínseca à distribuição urbana de mercadorias, é uma grande dificuldade nos estudos desta área, prejudicando a validação de modelos, necessária para o *feedback* dos mesmos (VAN KOLCK, 2010). A coleta de dados é muito importante para a verificação dos modelos e para melhorar a compreensão de parâmetros envolvidos. Porém, pela alta competitividade dos mercados de transporte de mercadorias, a obtenção desses dados é dificultada por empresas não dispostas a fornecer informações privilegiadas sobre o seu *métier*, por razões de concorrência (VAN KOLCK, 2010).

Além disso, vale ressaltar que diferentes conjuntos de dados adquiridos são construídos a partir de diferentes metodologias, o que prejudica as comparações e avaliações dos resultados (PATIER & BROWNE, 2010). Dablanc (2009) afirma que apesar do esforço realizado nos últimos anos, em todo mundo, o transporte de passageiros é mais bem monitorado do que o de mercadorias, o que resulta em uma escassa disponibilidade de dados desse último.

Para a construção e calibração do modelo foram utilizados dados secundários de Belo Horizonte provenientes de entidades de pesquisa e desenvolvimento como:

- Agência de Desenvolvimento da Região Metropolitana: pesquisa Origem/Destino e base viária de 2012 (MINAS GERAIS, 2012);
- BHTRANS (Empresa de Transportes e Trânsito de Belo Horizonte): contagens volumétricas em algumas vias que foram selecionadas na área central de Belo Horizonte (BELO HORIZONTE, 2015);
- DENATRAN (Departamento Nacional de Trânsito): frotas de veículos de carga e veículos particulares de 2015 (BRASIL, 2015);
- Geofabrik: arquivos de mapa da região desejada (Brasil) utilizadas para a construção da rede (GEOFABRIK, 2015);
- IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística): Censo Demográfico 2010 (BRASIL, 2010);
- Prefeitura Municipal de Belo Horizonte: Cadastro Municipal de Contribuintes de Tributos Mobiliários (CMC), contendo a localização de estabelecimentos de serviços, comércio, saúde e equipamentos em Belo Horizonte no ano de 2011 (BELO HORIZONTE, 2011);
- Ministério do Meio Ambiente e CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente): limites de emissão de poluentes (BRASIL, 2011);
- OpenStreetMap: arquivos com as coordenadas limites da região desejada (Belo Horizonte) utilizadas para a construção da rede (OPENSTREETMAP, 2015);
- Prefeitura Municipal de Belo Horizonte: bacias hidrográficas de Belo Horizonte (BELO HORIZONTE, 2008) e
- SUDECAP – Belo Horizonte (Superintendência de Desenvolvimento da Capital): cartas de inundação de Belo Horizonte (BELO HORIZONTE, 2009).

3.6 Definição dos cenários e simulação

A modelagem envolve a simulação de dois grandes grupos de cenários: um em que não foi implementado um sistema de divulgação de alertas, nomeado “Sem Alerta”, e outro em que foi implementada a medida, nomeado “Com Alerta”. Dentro desses dois grupos, foram definidos três cenários, nomeados: Cenários Base, 1 e 2. O Cenário Base representou um dia típico na rede urbana. Os Cenários 1 e 2 simularam a vulnerabilidade a partir de diferentes durações de precipitação e inundação. Assim, foram gerados ao todo dez cenários, detalhados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Cenários utilizados no modelo.

CENÁRIOS		DURAÇÃO DO INCIDENTE	HORA DO INCIDENTE
SEM ALERTA	COM ALERTA		
0. BASE (SEM CHUVA)		n/a	n/a
1a. CHUVA (TR ¹⁴ = 05 ANOS)		30 minutos	07h00 – 07h30
1b. CHUVA (TR = 10 ANOS)		60 minutos	07h00 – 08h00
2a. INUNDAÇÃO (TR = 25 ANOS)		90 minutos	07h00 – 08h30
2b. INUNDAÇÃO (TR = 50 ANOS)		120 minutos	07h00 – 09h00

Para as simulações, foram inseridos eventos de precipitação, que representam uma chuva de 25 anos de tempo de retorno (TR) e 90 minutos de duração. Essa relação foi calculada por Pinheiro & Naghettini (1998). Além disso, foram inseridos outros tipos de chuvas, de TR de 5, 10 e 50 anos e duração de 30, 60 e 120 minutos (BONATTI, 2011). Segundo Bonatti (2011), em Belo Horizonte, as chuvas com TR de 5 e 10 anos não ocasionam inundações, enquanto as demais, TR de 25 e 50 anos, são representadas no modelo por inundações.

Neste estudo, o número de iterações foi utilizado como artifício para a representação da divulgação de alertas, uma vez que ele designa o nível de aprendizagem dos agentes. Assim, para fins de análise, os cenários “Sem Alerta” foram simulados com zero iteração e os “Com Alerta”, com 200. É válido ressaltar que, a partir de um determinado número de iterações, pouca diferença no aprendizado dos agentes é observada. A fim de verificar o número mais adequado, foram realizados testes para 10, 100, 200 e 500 iterações e os resultados obtidos para esse último apresentaram pouca ou nenhuma diferença, quando comparados aos de 200 iterações. Ao passo que foi nítida a evolução da aprendizagem para as simulações de 10, 100 e 200.

Ressalta-se que o menor caminho já é definido nas simulações com zero iteração, além disso, não há replanejamento de rota. Com 200 iterações, como o menor trajeto já é definido na primeira iteração (zero iterações), a aprendizagem para escolha da melhor rota é baseada em outros parâmetros, como, por exemplo, na determinação dos caminhos com menor tempo de execução, ou seja, naqueles em que não existem impedâncias. Dessa forma, por aprendizagem, os agentes tendem a escolher o itinerário sem incluir os *links* atingidos, simulando, então, o sistema de divulgação de alertas.

¹⁴ Tempo de Retorno (TR) é o período de tempo médio que um determinado evento hidrológico é igualado ou superado pelo menos uma vez (TOMAZ, 2010).

3.7 Hipóteses, parâmetros e premissas do modelo

Para se alcançar os objetivos da pesquisa, foram discutidos de forma conjunta, a partir de uma análise multisistêmica (Figura 3.10): 1) sistema incidente (inundação); 2) sistema transporte (distribuição urbana de mercadorias); 3) sistema econômico (custos gerados pelo incidente) e 4) sistema ambiental (emissões de poluentes). Para agregar todas as informações, utiliza-se uma modelagem multiagente.

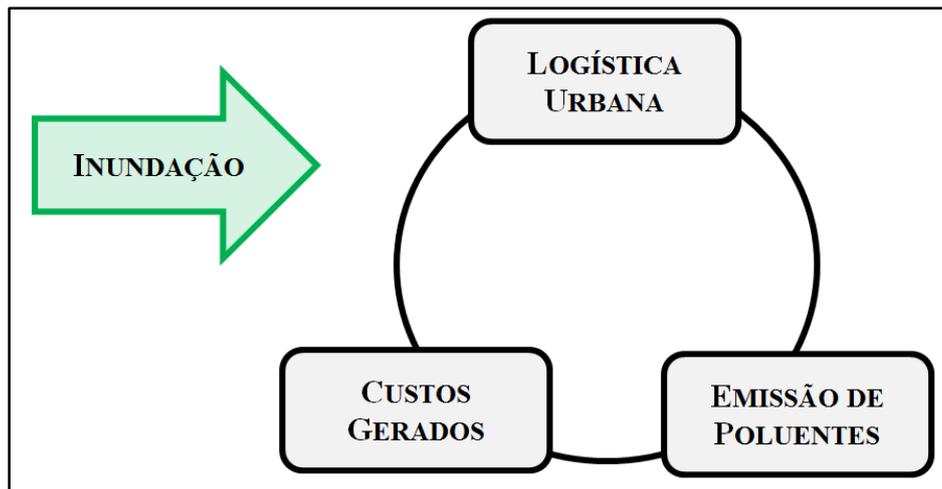


Figura 3.10: Análise multisistêmica.

Para a modelagem, a cidade é considerada como um sistema que procura, o mais rápido possível, minimizar a extensão e as perturbações externas em relação ao seu estado “normal”. Portanto, foram definidos os seguintes aspectos a serem compreendidos:

- Análise dos fatores de vulnerabilidade, como a intensidade das chuvas, inundações e suas consequências diretas (redução da velocidade ou interrupção do fluxo de veículos);
- Estimativa dos efeitos desses eventos para cada agente envolvido em termos de custo e emissão de poluentes;
- Análise da propagação dos impactos na cidade, não restritos apenas aos locais atingidos pelo incidente.

Em um espaço urbano complexo, as interdependências que se estabelecem entre os agentes são importantes. Como afirmam Hanneman & Riddle (2005), se um agente é selecionado como foco de análise e se as relações desse agente com outros é um componente importante de seu comportamento, torna-se necessário incluir todos os outros agentes no estudo. Se há dificuldade de incorporação da totalidade de seus relacionamentos, devem ser considerados aqueles mais relevantes na definição de seu comportamento.

Para modelar a vulnerabilidade e seus impactos na distribuição urbana de mercadorias, o sistema urbano é representado por meio de uma rede de transporte. Assume-se que, como a organização do espaço urbano é formada por um sistema de interconexões e interdependências, os agentes têm uma natureza fortemente relacional, logo, o impacto sobre cada um deles tem um grande potencial de propagação para os outros agentes (CANÇADO, 2009).

A escolha da relação normalmente baseia-se em um estudo teórico ou empírico que define as hipóteses de pesquisa adotada, determinadas a partir dos objetivos do sistema em estudo. Ao se analisar as relações envolvidas na distribuição urbana de mercadorias, segue-se um enfoque de vulnerabilidade em termos de acesso, como preconizado por Wisner et al. (2004), e os impactos econômicos e ambientais.

Além dos dados utilizados para o estudo, alguns pressupostos e escolhas adicionais foram aplicados, sendo detalhados nas subseções seguintes. Para o presente trabalho foi considerado que a economia urbana é aberta e ocorrem transações externas, ou seja, algumas viagens têm origem ou destinos em regiões externas à da rede. Porém, para fins de simplificação, o modelo foi definido em um espaço urbano fechado, assim, um impacto não afetará as regiões fora de seus limites e são menos expressivas na medida em que se afasta da área afetada.

A modelagem representa, então, uma região dotada de relativa independência em relação às demais. De acordo com Cançado (2009), no caso de pequenas cidades, essas hipóteses não são defensáveis, mas para os grandes espaços urbanos é possível usar essa estratégia de avaliação de impactos. A hipótese de fundo é que a maior parcela dos impactos econômicos e ambientais de um incidente (chuva com ou sem inundação) realiza-se localmente, ao nível da área urbana afetada. Neste trabalho, os impactos que podem ocorrer em esferas extra urbanas, tais como as regionais, estaduais ou mesmo nacionais, não são incorporados ao modelo em razão tanto da hipótese de sua menor relevância em relação aos impactos locais, como em função do escopo do estudo.

Por outro lado, o sistema urbano é fechado, sem acréscimos de população ou novas estruturas urbanas, de modo a tornar comparáveis os diferentes cenários de impactos de incidentes (chuvas com ou sem inundação) na logística urbana. Adota-se a hipótese microeconômica e ambiental de que o objetivo básico é minimizar os custos dos transportadores e os níveis de emissão de poluentes para aumentar o bem-estar e a qualidade de vida da população (entendida no modelo como residentes).

3.7.1 Modelando uma cidade real

A rede pode ser classificada como ambiente de interação dos agentes, podendo representar uma cidade real ou teórica, de acordo com o objetivo do estudo. Para o caso da opção de uma rede teórica, faz-se necessária sua construção po meio de qualquer linguagem de programação capaz de descrevê-la da maneira que a plataforma escolhida a compreenda. Para as redes reais (Figura 3.11), opção escolhida para o presente estudo, é comum a utilização de arquivos advindos do projeto de mapeamento colaborativo *OpenStreetMap*.

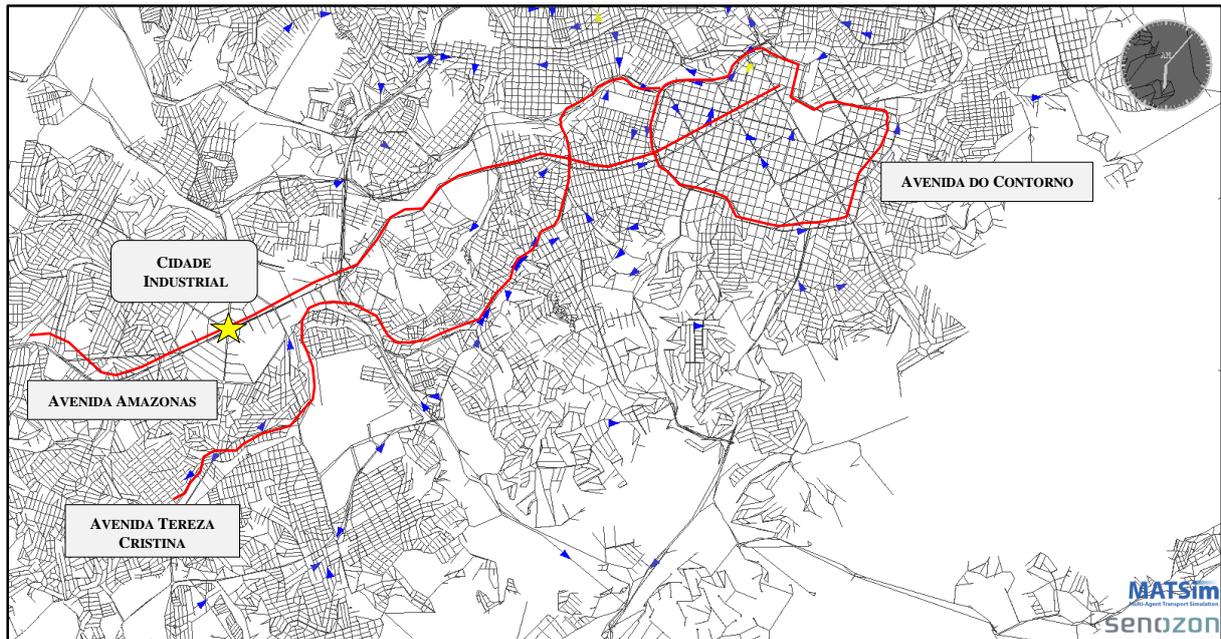


Figura 3.11: Parte da rede utilizada pelo estudo.

Outra informação importante que foi agregada ao modelo diz respeito aos locais físicos em que se realizam atividade (i.e, escolas, centros, indústrias, centros de distribuição, parques, comércios). Os dados relativos aos locais variam, podendo englobar tamanho, fator de atratividade, horário de funcionamento, dentre outros. Para o caso da rede utilizada no modelo, foi necessário obtê-los georreferenciados.

Além disso, no modelo foram inseridos agentes reativos, o que significa que foram fornecidas ao sistema informações quanto à população que habita a área de estudo ou que representa padrões que se deseja analisar. Para tanto, foram utilizados os dados censitários cruzados com as informações provenientes da matriz origem-destino (Matriz OD) de 2012, que contém viagens representativas de um dia para cada indivíduo e o modo de transporte por ele utilizado.

Finalmente, sob o princípio de que os modelos são representações da realidade, e de que estamos diante de um modelo complexo e dinâmico, é importante a sua comparação com a realidade para que qualquer análise seja feita. Um parâmetro de fácil comparação é a contagem volumétrica de veículos, que foi utilizada para verificação do modelo.

3.7.1.1 Localização dos estabelecimentos

O escopo do projeto restringe-se à análise do fluxo de veículos de cargas entre centroides, que são polos de atratividade dispersos na rede estudada. As informações a respeito desses pontos (i.e., coordenadas geográficas e tipo de atividades) foram obtidas para Belo Horizonte a partir do Cadastro Municipal de Contribuintes de Tributos Mobiliários (CMC), que é o registro de pessoas jurídicas que exercem atividades no município de Belo Horizonte, sujeitas ao pagamento do imposto sobre serviços de qualquer natureza ou das taxas mobiliárias (BELO HORIZONTE, 2011).

Para a modelagem, os dados da CMC foram considerados estabelecimentos fixos. Para a classificação de cada atividade, foram utilizadas as relações apresentadas na Tabela 3.3. As quatro categorias utilizadas no MATSim são padronizadas. Os estabelecimentos classificados podem ser visualizados na Figura 3.12, podendo-se observar a concentração desses na região central de Belo Horizonte, indicada pela Avenida do Contorno na mesma figura. É importante destacar que os veículos particulares têm como destino as quatro categorias utilizadas pelo *software*, enquanto os de carga, para fins de simplificação, apenas as indicadas como *work* e *shop*.

Tabela 3.3: Relação entre os tipos de atividades da Base CMC e os convertidos para o MATSim.

TIPO DE ATIVIDADE (CMC)	FACILITIES (*) (MATSim)
COMÉRCIO	<i>shop</i>
ESCOLAS	<i>education</i>
EQUIPAMENTOS LAZER E CULTURA	<i>leisure</i>
SERVIÇOS	<i>work</i>
INDÚSTRIAS	<i>work</i>
HOSPITAIS	<i>work</i>
AGRICULTURA E AGROPECUÁRIA URBANA	<i>work</i>
OUTROS	<i>work</i>

(*) Nome do arquivo utilizado no MATSim que corresponde aos estabelecimentos da Base CMC

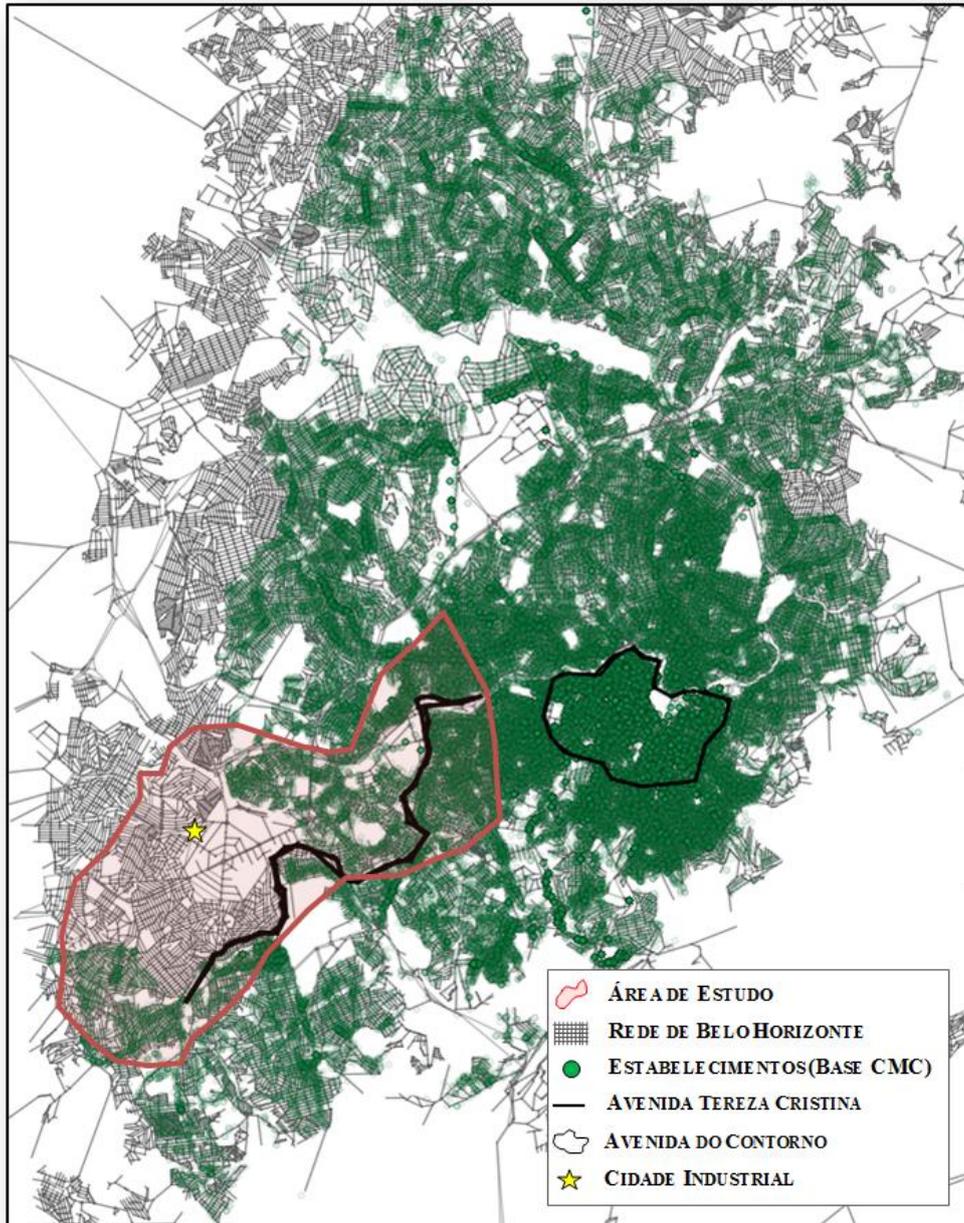


Figura 3.12: Dispersão dos estabelecimentos em Belo Horizonte.

3.7.1.2 Universo considerado para a simulação

A população, como mencionado anteriormente, é um conjunto de agentes reativos na simulação. Cada indivíduo possui um padrão de viagem, normalmente descrito pela Matriz OD. Dela, foram extraídas as viagens tangentes aos modos motorizados para passageiros (i.e., carros, carona, taxi, motos e ônibus) e de cargas. O universo simulado constitui 1% da população de Belo Horizonte, e esse deve refletir o comportamento do todo. Portanto, foram considerados 24.911 agentes (1% da população), agrupados em tipos de modos de viagem.

Os percentuais da divisão modal (Figura 3.13) foram distribuídos relacionando informações de contagens volumétricas classificatórias (BELO HORIZONTE, 2015) e da frota (DENATRAN, 2015), não sendo consideradas outras pesquisas de divisão modal para não gerar dissonância no modelo.

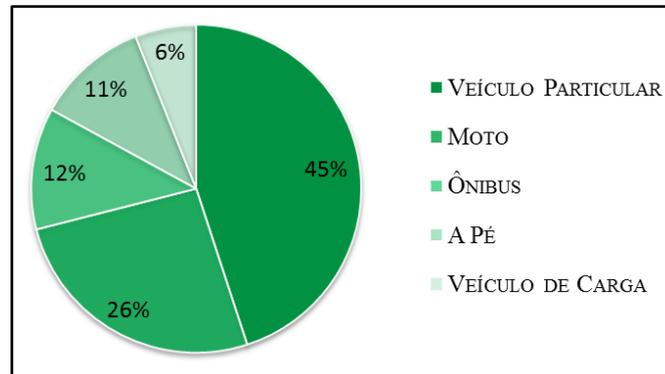


Figura 3.13: Divisão modal referencial para o modelo.

Como o MATSim não controla os trajetos dos pedestres, sendo que eles são “teletransportados” de uma origem para um destino com um intervalo de tempo aproximado pela distância entre os pontos e uma velocidade de caminhada média, eles não influenciam nas simulações dos modos motorizados. Por não fazer parte do escopo do presente trabalho, tais entes foram desconsiderados do modelo. Portanto, efetivamente, foram simulados cenários com um total de 22.189 agentes.

3.7.2 Modelando o transporte de passageiros

A definição das viagens de cada agente que não utiliza veículos de carga foi realizada a partir das rotinas diárias fornecidas pela Pesquisa Origem-Destino da RMBH em 2012 (MINAS GERAIS, 2012). Nota-se que, no modelo desenvolvido, esses agentes têm apenas a função de compartilhar os *links* com os transportadores, de forma a gerar impedância no fluxo de veículos.

3.7.3 Modelando os veículos de carga e as entregas diárias

Para a simplificação do modelo, foram considerados apenas os veículos com capacidade de até 5 ton, que representam 92% da frota de veículos de cargas (OLVEIRA, 2014a), pois esses têm acesso¹⁵ irrestrito às vias de Belo Horizonte atendendo a regulamentação de capacidade máxima

¹⁵ Vide o “Mapa de Restrição de Circulação de Veículos de Carga e Operações de Carga e Descarga”, retirado do site da BHTRANS (<http://www.bhtrans.pbh.gov.br/portal/page/portal/portalpublico/Temas/Automovel/carga-urbana-mapas-2013>).

prevista nas diretrizes de transporte de carga do município¹⁶. No modelo, por questões de simplificação, não existe distinção entre os diferentes tipos de veículos de carga existentes no mercado.

Finalmente, foi considerado que todos os transportadores são autônomos e têm uma unidade de trabalho fixa, correspondente aos centros de distribuição (CD), para onde sempre são destinadas na primeira e na penúltima viagens ao longo do dia, sendo a última delas, destinada às residências de cada um. Para os veículos de carga, foram projetadas rotinas a partir de estudos realizados por Oliveira (2014a) em Belo Horizonte. Assim, foram consideradas as seguintes premissas:

- O local de trabalho (CD) e a moradia de um transportador foram obtidos pela Pesquisa OD (MINAS GERAIS, 2012);
- A primeira viagem do transportador é feita da residência para um centro de distribuição;
- As viagens seguintes são destinadas às entregas, obedecendo aos seguintes parâmetros:
 - O tempo de carga/descarga é representado por uma distribuição triangular (mínimo de 54 minutos; média de 66 minutos; máxima de 79 minutos) (OLIVEIRA, 2014a);
 - O número de viagens depende do número de entregas, que por sua vez, segue a distribuição normal (média de 23; desvio padrão de 16). Considerou-se que mais de uma entrega poderá ser realizada em cada parada (OLIVEIRA, 2014a);
 - Determinado o número de paradas, os pontos de entrega são gerados aleatoriamente dentro de uma área e são associados a um estabelecimento existente;
 - Um algoritmo do caixeiro viajante¹⁷ determina a ordem de visita dos pontos.
- A última viagem é para a casa do transportador, sendo necessário passar primeiramente no CD.

3.7.4 Tempo simulado e jornada de trabalho

A simulação é realizada ao longo de um dia útil típico da semana, no período letivo, no horário compreendido de (0h – 23h59min). A distribuição temporal de viagens realizadas por todos os modos em Belo Horizonte encontra-se na Figura 3.14.

¹⁶ Vide as Portarias BHTRANS - DPR N° 138/2009 (18 de dezembro de 2009) e DPR N° 077/2014 (25 de junho de 2014) (BELO HORIZONTE, 2009; BELO HORIZONTE, 2014).

¹⁷ O algoritmo citado envolve a resolução do problema do caixeiro viajante apresentado a seguir: “Um caixeiro-viajante quer visitar um conjunto de cidades, uma de cada vez, e regressar à cidade inicial. Além disso, ele tem que minimizar todos os custos envolvidos em sua jornada” (RODRIGUES & SOUZA, 1995, p. 2).

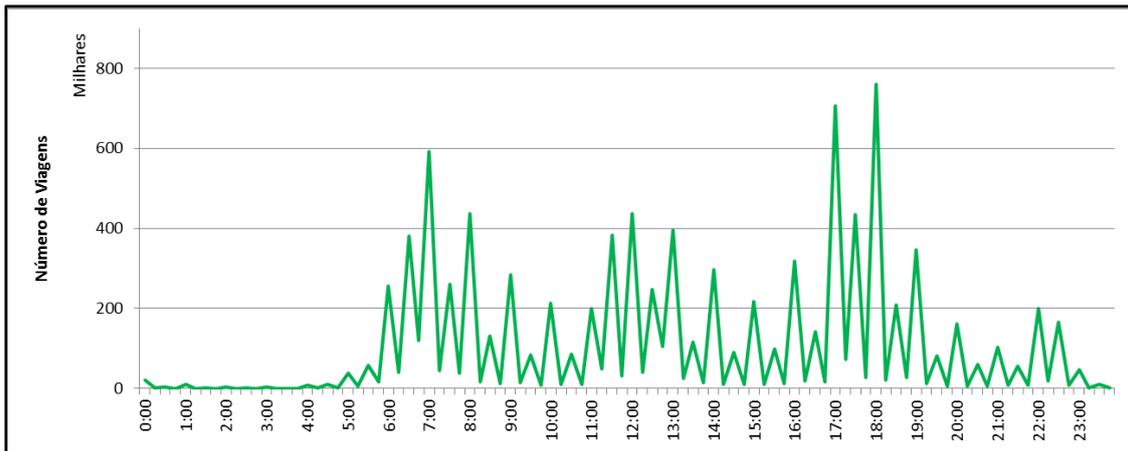


Figura 3.14: Distribuição das viagens (Adaptado de MINAS GERAIS, 2012).

A faixa de horários de entrega de mercadorias foi considerada entre 6h00 e 19h00 (OLIVEIRA, 2014a). Também se considera que dentro da faixa determinada, cada transportador tem uma jornada diária de trabalho de 8h. No modelo, cada estabelecimento pode ter um tempo de funcionamento específico, inclusive diferente para cada dia da semana. Porém, neste trabalho, por questões de simplificação e por considerar que a simulação sempre representará um dia útil, foram definidos horários de funcionamento de acordo com o tipo de atividade, como indicado na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Horários de funcionamento dos estabelecimentos.

TIPO DE ATIVIDADE	ABERTURA	FECHAMENTO
TRABALHO	06:00	19:00
COMPRAS	08:00	22:00
EDUCAÇÃO	07:30	18:00
LAZER	07:30	18:00
OUTROS	00:00	23:59

3.7.5 Modelando a vulnerabilidade

Segundo Parker *et al.* (1987), a dependência, a capacidade de transferência e a suscetibilidade estão diretamente correlacionadas e definem o grau de vulnerabilidade de uma rede. A primeira representa a dependência da área afetada em relação à malha urbana. A capacidade de transferência é representada pelo adiamento da demanda até as condições de normalidade (transferência no tempo) ou pela transferência de demanda para outro local (transferência no espaço). Por fim, a suscetibilidade determina as consequências do incidente no restante da região onde se encontra a área afetada. Em outras palavras, a suscetibilidade é a identificação

Para as simulações, foram inseridos eventos de precipitação que representam uma chuva de 25 anos de TR e 90 minutos de duração, além de chuvas de TR de 5, 10 e 50 anos e duração de 30, 60 e 120 minutos (BONATTI, 2011), que podem ser verificados pela equação IDF (Intensidade, Duração e Frequência de Chuvas Intensas), que produz as curvas de precipitação apresentadas nas Figura 3.16 e Figura 3.17 (BELO HORIZONTE, 2009).

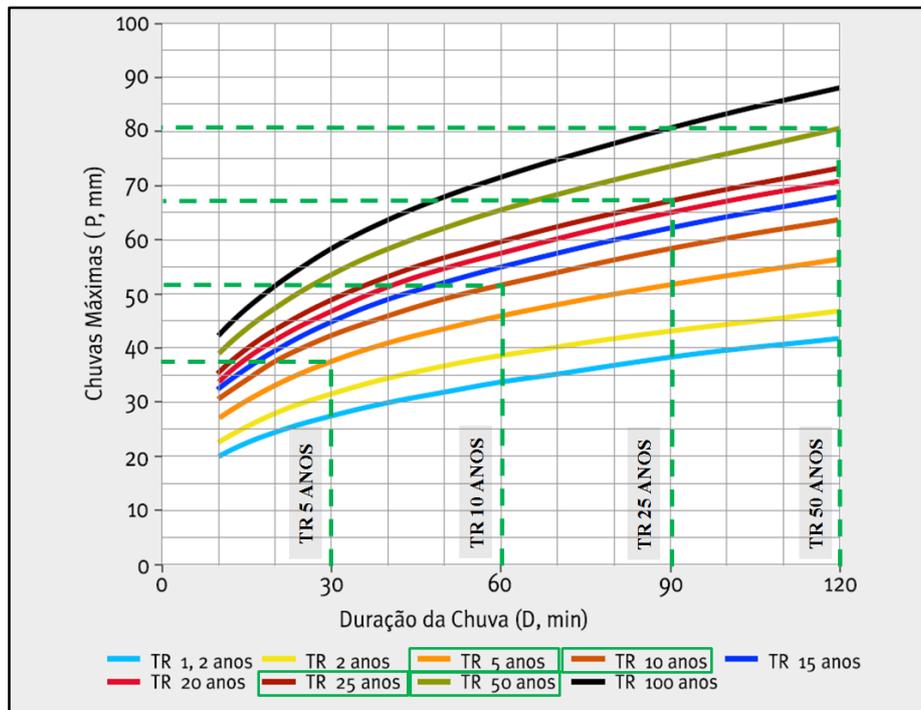


Figura 3.16: Curvas de Precipitação (Adaptado de BELO HORIZONTE, 2009).

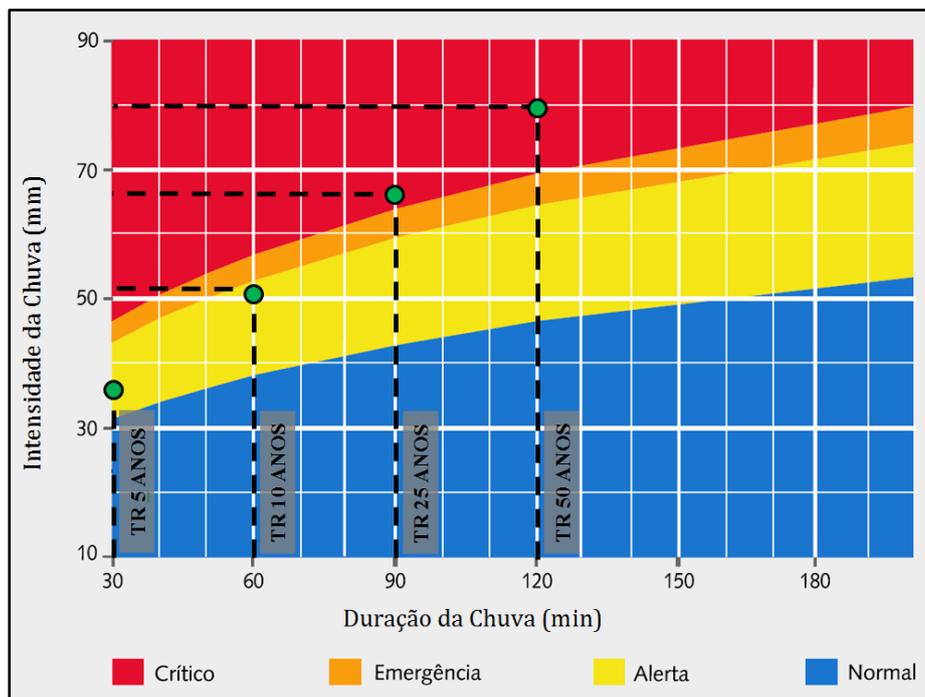


Figura 3.17: Curvas Referenciais para Macrodrenagem.

A Figura 3.18 ilustra a mancha de inundação em pontos distintos das sub-bacias selecionadas para o estudo, retiradas do relatório realizado pela SUDECAP-Belo Horizonte (BELO HORIZONTE, 2009).

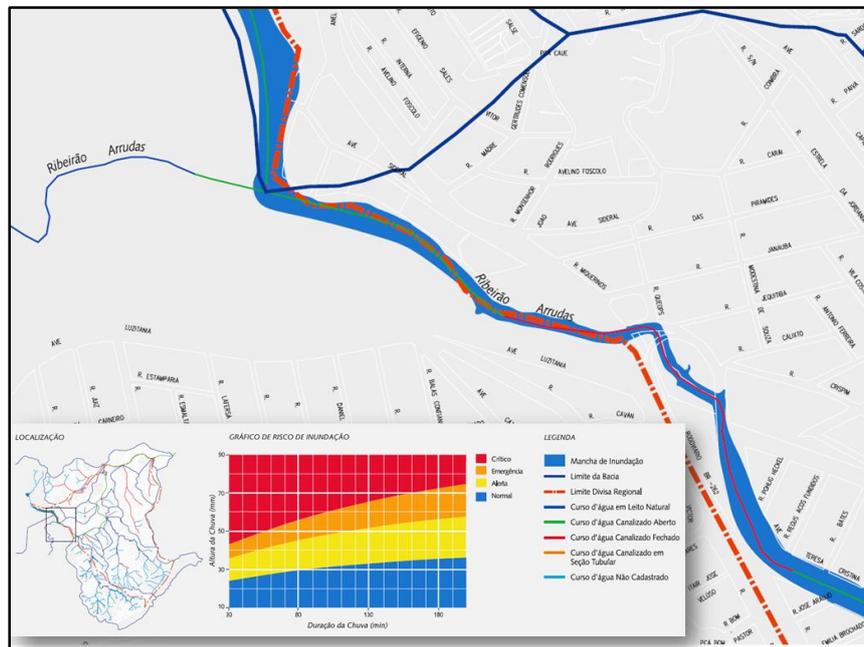


Figura 3.18: Mancha de inundação – Ribeirão Arrudas: Avenida Tereza Cristina (Adaptado de BELO HORIZONTE, 2009).

3.7.6 Estimativa de emissão por veículo de carga

As estimativas de emissão de poluentes foram realizadas apenas para os veículos de carga e têm por objetivo auxiliar na avaliação dos impactos das chuvas e inundações na área estudada. Os óxidos de nitrogênio (NO_x) e os materiais particulados (MP) foram calculados por meio das Equações (3.1 e (3.2 respectivamente (NILIM, 2003 *apud* WANGAPISIT *et al.*, 2014), considerando veículos de carga a diesel.

$$NO_x = l_{ij} \times \left(1,06116 + 0,000213 \times v_{ij}^2 - 0,0246v_{ij} + \frac{16,258}{v_{ij}} \right), \quad (3.1)$$

$$MP = l_{ij} \times \left(0,03442 - 0,000039391 \times v_{ij}^2 + 0,0036777v_{ij} + \frac{1,2754}{v_{ij}} \right), \quad (3.2)$$

em que:

NO_x = Emissão estimada de NO_x estimada por veículo (g);

MP = Emissão estimada de material particulado (g);

l_{ij} = Comprimento da via (*link*) entre os nós i e j (km);

v_{ij} = Velocidade do veículo passando entre os nós i e j (km/h).

3.7.7 Limites de velocidade com precipitação

No modelo, as velocidades de cada veículo são definidas a partir da capacidade¹⁹, nível de serviço²⁰ e dos limites de velocidades das vias (*links*), determinados a partir da classificação viária prevista pelo Código de Trânsito Brasileiro (CTB) (BRASIL, 1997). Para situações com precipitação, foi considerado que os limites de velocidades nas vias (*links*) diminuem de forma diferente para veículos leves (passeio) e veículos pesados (carga e ônibus), essas definições foram sugeridas por Dotta (2000) *apud* Yabiku (2006). As relações de redução de velocidade, consideradas em situações de chuva, foram definidas a partir dos cálculos de distância de parada²¹ em asfaltos rugosos secos e molhados, para veículos leves e pesados, conforme estabelecido por Dotta (2000) *apud* Yabiku (2006), indicados nas Tabela 3.5 e Tabela 3.6, respectivamente.

Tabela 3.5: Distância de parada em asfalto rugoso e seco (DOTTA, 2000 *apud* YABIKU, 2006).

VELOCIDADE (km/h)	VEÍCULO DE PASSEIO			VEÍCULO DE CARGA E ÔNIBUS		
	DISTÂNCIA DE PARADA (m)			DISTÂNCIA DE PARADA (m)		
	REAÇÃO	FRENAGEM	TOTAL	REAÇÃO	FRENAGEM	TOTAL
40	11	8	19	11	11	22
60	17	17	34	17	24	41
80	22	30	52	22	41	63
100	28	48	76	28	62	90

Tabela 3.6: Distância de parada em asfalto rugoso e molhado (DOTTA, 2000 *apud* YABIKU, 2006).

VELOCIDADE (km/h)	VEÍCULO DE PASSEIO			VEÍCULO DE CARGA E ÔNIBUS		
	DISTÂNCIA DE PARADA (m)			DISTÂNCIA DE PARADA (m)		
	REAÇÃO	FRENAGEM	TOTAL	REAÇÃO	FRENAGEM	TOTAL
40	11	12	23	11	16	27
60	17	28	45	17	35	52
80	22	49	71	22	61	83
100	28	77	105	28	94	122

¹⁹ A capacidade é o número máximo de veículos que poderá passar por um determinado trecho de uma faixa ou pista durante um período de tempo determinado, sob as condições reais predominantes na via e no tráfego. (BRASIL, 2006).

²⁰ O nível de serviço definido como uma medida qualitativa das condições de operação, conforto e conveniência de motoristas. Depende de fatores como: liberdade na escolha da velocidade, finalidade para mudar de faixas nas ultrapassagens e saídas e entradas na via e proximidade dos outros veículos. (BRASIL, 2006).

²¹ “A distância de parada é a distância percorrida pelo veículo no momento de reação do motorista ao avistar o obstáculo ou pessoa, mais a distância percorrida durante a frenagem.” (YABIKU, 2006, p.III.8).

A partir dos dados acima, considerando os tempos de frenagem para cada situação para distâncias de parada constante em asfalto seco, foi encontrada uma relação de redução dos limites de velocidade das vias (*links*) para os tipos de veículos já mencionados em asfaltos rugosos molhados. Os percentuais de redução encontrados foram empregados na construção do modelo e estão apresentados na Tabela 3.7 e Tabela 3.8.

Tabela 3.7: Redução dos limites de velocidade de veículos de passeio em situação de chuva.

VEÍCULO DE PASSEIO		
ASFALTO SECO	ASFALTO MOLHADO	REDUÇÃO DA VELOCIDADE (%)
VELOCIDADE (km/h)	VELOCIDADE (km/h)	
30 ^(*)	25	17
40	33	17
60	45	24
80	59	27
110 ^(*)	86	28

(*) Valores estimados a partir dos demais limites de velocidade considerados por DOTTA (2000) *apud* YABIKU (2006).

Tabela 3.8: Redução dos limites de velocidade de veículos de carga e ônibus em situação de chuva.

VEÍCULO DE CARGA E ÔNIBUS		
ASFALTO SECO	ASFALTO MOLHADO	REDUÇÃO DA VELOCIDADE (%)
VELOCIDADE (km/h)	VELOCIDADE (km/h)	
30 ^(*)	20	30
40	28	30
60	39	35
80	50	37
110 ^(*)	74	38

(*) Valores estimados a partir dos demais limites de velocidade considerados por DOTTA (2000) *apud* YABIKU (2006).

3.7.8 Avaliação econômica dos impactos

Os custos podem ser interpretados e analisados sob a forma de indicadores, a partir do conceito de vulnerabilidade (GOES, 2015). Para Oliveira *et al.* (2014a), os indicadores de vulnerabilidade medem quão vulnerável é uma rede viária ou a importância de seus componentes (*links*) para a sua vulnerabilidade. Em relação às variáveis quantificadas, as principais consideradas são o tempo e o custo de viagem, potencializados durante uma possível interrupção de *link*. Segundo Scott *et al.* (2006), a interrupção total ou parcial de um *link*, decorrente de um incidente, expõe a capacidade do sistema de transporte de operar continuamente sob a condição de pressão ou risco. Dependendo da vulnerabilidade da rede, a região afetada pode sofrer com a interrupção no abastecimento de uma cadeia de suprimentos, em que os custos associados à reprogramação e redirecionamento dos veículos de carga podem ser proibitivos para alguns fornecedores e operadores logísticos.

O efeito de uma interrupção da via é representado na Figura 3.19, cuja espessura dos *links* representa a intensidade do fluxo existente entre o ponto *i* ao ponto *j*. A rede opera conforme a Situação 1 no estado de equilíbrio. Na ocorrência de falha em um dos *links*, nota-se que o fluxo converge para uma rota alternativa através do nó *k*, conforme Situação 2. Tais eventos ocasionam aumentos de custos, tanto monetários (combustível, desgaste da via e do veículo, a citar) como não monetários (tempo, risco, poluição) para os agentes envolvidos direta e indiretamente na interrupção (GOES, 2015).

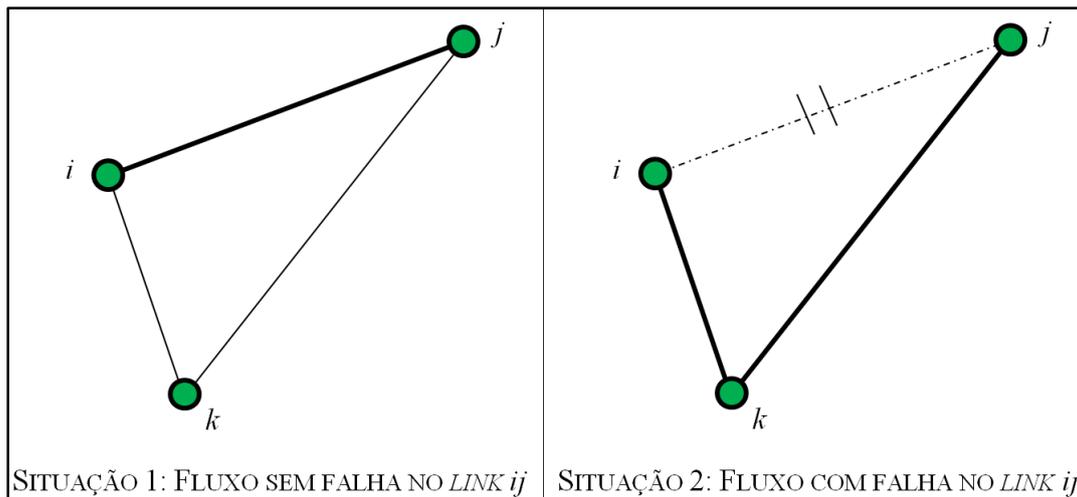


Figura 3.19: Alteração de rota mediante uma interrupção de um *link* (Adaptado de GOES, 2014).

3.7.8.1 Custo com combustível

Neste estudo são obtidas algumas variáveis importantes para a análise do impacto da inundação: tempo de viagem, distância, consumo de combustível e emissão de poluentes. Essas informações são calculadas por *link* e por transportador e foram representadas em valores monetários, a partir das equações abaixo. O custo mensal do combustível foi obtido por transportador, a partir da Equação (3.3) (CANÇADO, 2009; BRASIL, 2011):

$$C_{cn} = (y_c \times p_c) \times l_n \times D \quad (3.3)$$

em que:

C_{cn} = Custo total mensal de combustível (diesel) para o transportador *n*;

y_c = Consumo de diesel por veículo (L/km);

p_c = Preço do diesel na bomba;

l_n = Comprimento total da viagem²² diária realizada pelo transportador *n*;

D = Dias úteis no mês (24 dias).

²² Para o cálculo do custo do combustível, foram consideradas as viagens diárias totais de cada transportador.

O consumo de diesel por veículo (y_C) considerado é o relativo ao da categoria “Veículos de Carga Leves”, conforme indicado na Tabela 3.9 abaixo.

Tabela 3.9: Valores médios de L/km para veículos a diesel (Adaptado de BRASIL, 2011).

CATEGORIA	CONSUMO DIESEL (L _{diesel} /100 km)	CONSUMO DIESEL (L _{diesel} /km)
COMERCIAIS LEVES	11,00	0,11
VEÍCULOS DE CARGA LEVES	13,14	0,13
VEÍCULOS DE CARGA MÉDIOS	18,00	0,18
VEÍCULOS DE CARGA PESADOS	31,50	0,32
ÔNIBUS URBANOS	43,50	0,44
ÔNIBUS RODOVIÁRIOS	33,00	0,33

O preço do diesel, segundo Petrobras (2014), é composto pela margem bruta, dependente do mercado local em que é vendido, pelos tributos e finalmente, pelos preços de refinaria, que são nivelados aos preços praticados em outros países. Para o cálculo do custo total de combustível foi utilizada a média praticada em 2014 do preço do diesel na bomba (p_C) US\$ 1,02/L (PETROBRAS, 2014; BANCO MUNDIAL, 2014), que corresponde a aproximadamente R\$ 2,40 (considerando a média da cotação do dólar em 2014). Além disso, de acordo com os dados fornecidos por NTC & Logística (2013), considera-se 24 os dias úteis no mês (D) para o cálculo de custos voltados aos transportadores.

3.7.8.2 Custo do tempo de viagem

Segundo Cançado (2009), a definição de um valor monetário do tempo é problemática e controversa. Entretanto, para uma base comum de análise utiliza-se a adaptação da formulação proposta por IPEA & ANTP (1999) representada pela Equação (3.4 para a sua mensuração,

$$C_{Tn} = \frac{w \times ES \times FA \times HP_n}{y_w} \times t_v \quad (3.4)$$

em que:

C_{Tn} = Custo mensal do tempo de viagem para o transportador n ;

w = Renda média mensal dos transportadores;

ES = Encargos sociais 95,02% (1,9502);

FA = Possibilidade de uso alternativo do tempo (0,3);

HP_n = Percentual de uso produtivo do tempo do transportador n ;

y_w = Número de horas de trabalho por mês;

t_{vn} = Tempo de viagem do transportador n (h).

Para a Equação (3.4), a partir dos dados fornecidos por NTC & Logística (2013) obteve-se os valores da renda média (R\$ 3.614,10) e das horas médias trabalhadas no mês (220 horas) pelos transportadores. Além disso, para o percentual do uso produtivo do tempo foi considerado o recomendado por IPEA & ANTP (1999) quando o dado não for disponível (0,5). O tempo de viagem por veículo de carga foi calculado a partir da velocidade média e da distância total percorrida ao longo do dia. Vale a pena ressaltar que o modelo considera como viagem cada par de entrada e de saída de um *link*.

3.7.8.3 Custo ambiental

Finalmente, é feita a monetização dos poluentes. Considerou-se para a avaliação econômica os materiais particulados (MP) e o óxido de nitrogênio (NO_x). Para IPEA & ANTP (1999):

O óxido de nitrogênio (NO_x) provoca irritação e contração das vias respiratórias diminuindo a resistência orgânica às infecções e participa do desenvolvimento do enfisema pulmonar. Já o material particulado atinge os alvéolos pulmonares, produzindo alergia, asma, bronquite crônica e agravamento de sintomas produzidos por outros poluentes.

Segundo Cançado (2009), a definição de valores monetários para os poluentes pode ser (conceitualmente) mais controversa do que o tempo, tendo como referência a “utilidade econômica” do indivíduo. Entretanto, a monetização dos poluentes envolve os efeitos da poluição sobre o ser humano e sobre o ambiente, variando segundo as condições ambientais locais, além da consideração dos efeitos da ação conjunta dos poluentes.

Como já mencionado anteriormente, para garantir uma base comum de análise, foram utilizados dados de IPEA & ANTP (1999), que adaptaram fontes americanas e europeias para a realidade brasileira, considerando as relações entre a renda *per capita* dos países. Os valores finais mensais adotados estão indicados nas Equações (3.5 e (3.6,

$$NO_x = R\$ 1,12 * D/kg, \quad (3.5)$$

$$MP = 0,91 * D/kg, \quad (3.6)$$

em que:

NO_x = Custo por kg de NO_x emitido ao longo de um dia simulado (R\$);

MP = Custo por kg de MP emitido ao longo de um dia simulado (R\$);

D = Dias úteis no mês (24 dias).

3.8 Verificação do modelo

A verificação e a validação de modelos de simulação, segundo Pidd *et al.* (1997), é sempre uma difícil tarefa e na literatura se encontram várias técnicas e sugestões a serem empregadas. Zeigler (1976) *apud* Pidd *et al.* (1997) afirma que a validação dos modelos pode ser realizada apenas com estruturas experimentais bem especificadas, que colocam o modelo no contexto exato que se pretende estudar. Dessa forma, assume-se que um modelo não pode ter uma validade geral. Paul & Hlupic (1994) têm um ponto de vista mais extremo, pois argumentam que a validação de modelo é impossível, no sentido de ter certeza de que o modelo irá sempre funcionar como pretendido, principalmente quando se trata de uma situação de vulnerabilidade, em que se imprimem comportamentos não esperados das pessoas.

Ainda, devido à falta de dados, a validação de um modelo para o estudo da logística urbana é ainda mais complexa (VAN KOLCK, 2010). Alguns estudos, no entanto, recaem na contagem volumétrica para se obter a validação de um modelo. Porém, é importante destacar que foram utilizados, para a construção da rede viária, dados secundários de contagem volumétrica (BELO HORIZONTE, 2015) e, portanto, não se pode ter domínio e certezas quanto às suas inferências e às metodologias aplicadas para suas coletas e análises. Dessa forma, a validação do modelo construído para o presente estudo foi realizada a partir de uma calibração manual realizada baseando-se nos dados de contagem volumétrica, para pontos específicos da rede viária de Belo Horizonte.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, com base nos resultados obtidos nas simulações, a última subquestão²³ proposta na Seção 1.3 será respondida. A partir da modelagem multiagente, foi verificado se um sistema de divulgação de alertas para a população tem o efeito desejado de reduzir os impactos no tráfego urbano, nas emissões de poluentes, nos custos gerados, assim como na realização das entregas diárias de mercadorias. Para tanto, as análises foram realizadas, primeiramente, para os cenários “Sem Alerta” e, posteriormente, para os “Com Alerta” para os “links atingidos” e “links não atingidos” (tratados também neste trabalho como *links* externos) (1). É válido ressaltar que o estudo, por ser de caráter exploratório, analisa as tendências dos resultados, não avaliando, portanto, valores em termos absolutos.

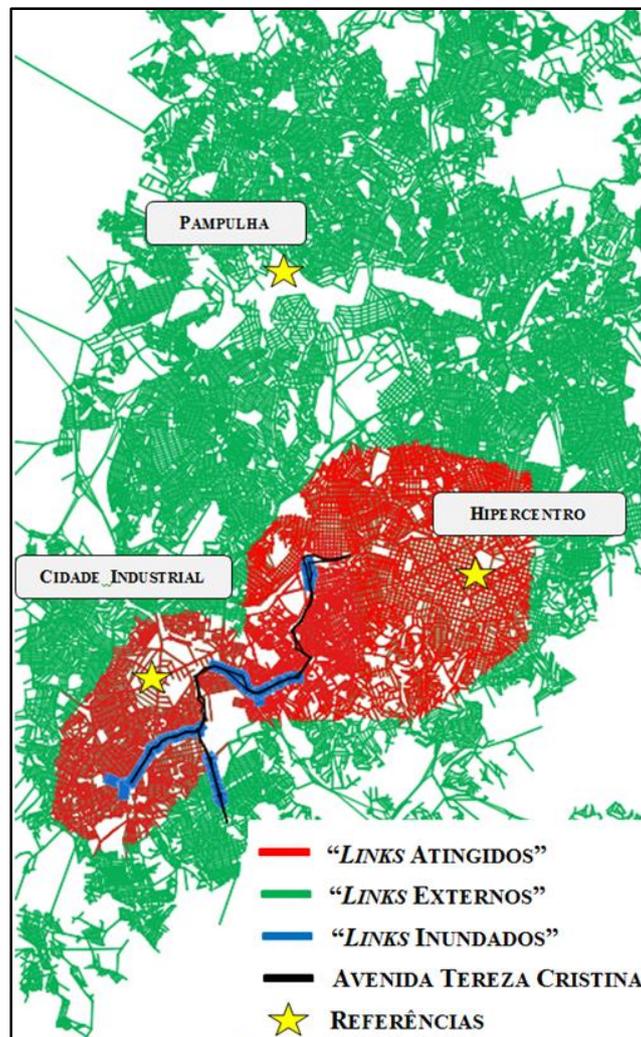


Figura 4.1: Definições utilizadas no capítulo.

²³ Vide subseção 1.3: “Como os cenários propostos impactam o estudo da dinâmica da logística urbana?”.

4.1 Cenários Sem Alerta

Para os cenários “Sem Alerta” foram realizadas simulações com zero iteração. Nelas, a rota de menor distância já é definida pelos transportadores e não ocorre o replanejamento dos itinerários, não possibilitando, dessa forma, a aprendizagem desses agentes. A seguir, foram analisados os impactos da chuva/inundação aos diferentes agentes ligados à logística urbana.

4.1.1 Efeito da chuva/inundação nas condições de tráfego

Nesta Subseção foi verificado o efeito dos incidentes nas condições de tráfego, representadas pela quantidade de viagens, tempo de viagem e velocidade média nos “links atingidos” da rede, durante o período dos incidentes de cada cenário. Em seguida, foram feitas comparações entre os resultados obtidos para os “links atingidos” e “links não atingidos”. A fim de tornar os resultados comparáveis, as análises foram realizadas para o mesmo período (07h - 09h) em todos os cenários e estão apresentadas na Figura 4.2, Figura 4.3 e Figura 4.4.

A quantidade de viagens dos veículos de carga nos “links atingidos”, durante o período dos incidentes, reduz de maneira pouco expressiva, em média 0,2%, dos três primeiros cenários²⁴ quando comparados ao Cenário Base. Observa-se, porém, uma redução maior entre o Cenário 2b e o Cenário Base (1,9%). Entre os quatro cenários com incidentes, a variação é muito pequena (Figura 4.2). A pequena variação entre a quantidade de viagens nos links pode ser explicada pelo não replanejamento de rotas durante as simulações, devido ao número de iterações considerado (zero iteração).

A velocidade média dos veículos de carga nos “links atingidos”, como esperado, reduz de maneira significativa (variação média de 23%) entre os cenários com chuva/inundação e o Cenário Base, durante o período de incidentes (Figura 4.3). Essa redução é explicada pelos limites pré-estabelecidos no modelo, a partir das distâncias de frenagem em situações de precipitação, determinadas a partir do conceito de “velocidade compatível com a segurança do trânsito”, definido pelo CTB.

O tempo de viagem dos veículos de carga nos “links atingidos”, de forma coerente, apresenta um acréscimo considerável (em média 31%) entre os cenários com chuva/inundação e o

²⁴ Cenários 1a (chuva com duração de 30 min), 1b (chuva com duração de 60 min) e 2a (inundação com duração de 90 min).

Cenário Base (Figura 4.4). Esse aumento no tempo de viagem é explicado pela redução da velocidade média nos *links* nos cenários com incidente (Figura 4.5), e naqueles com inundação, acrescenta-se ainda o fato da interrupção de alguns *links*.

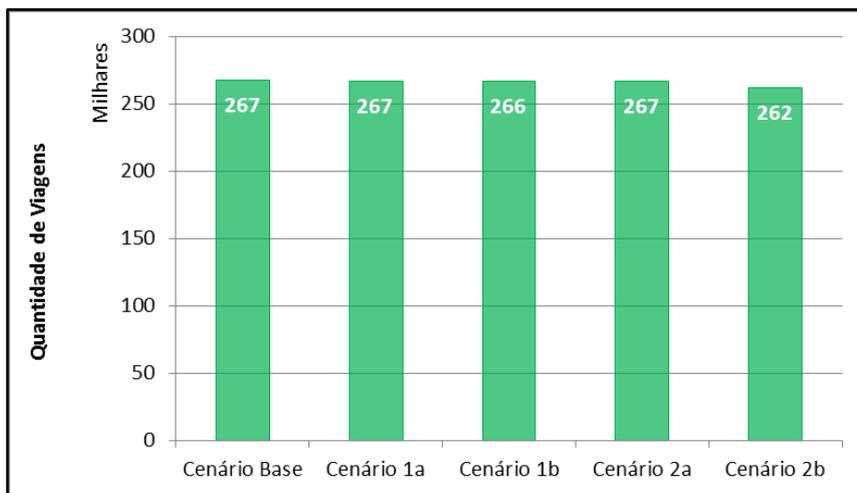


Figura 4.2: Variação da quantidade de viagens de veículos de carga nos “*links* atingidos” (07h - 09h).

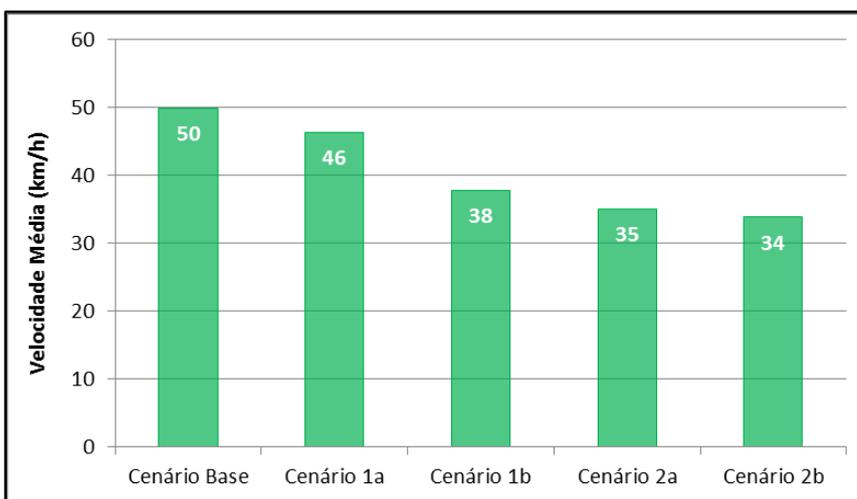


Figura 4.3: Variação da velocidade média dos veículos de carga nos “*links* atingidos” (07h - 09h).

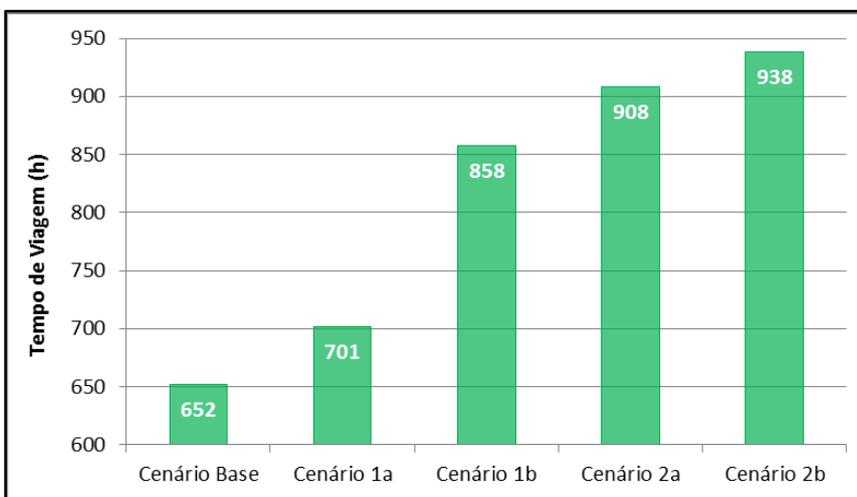


Figura 4.4: Variação do tempo de viagem dos veículos de carga nos “*links* atingidos” (07h - 09h).

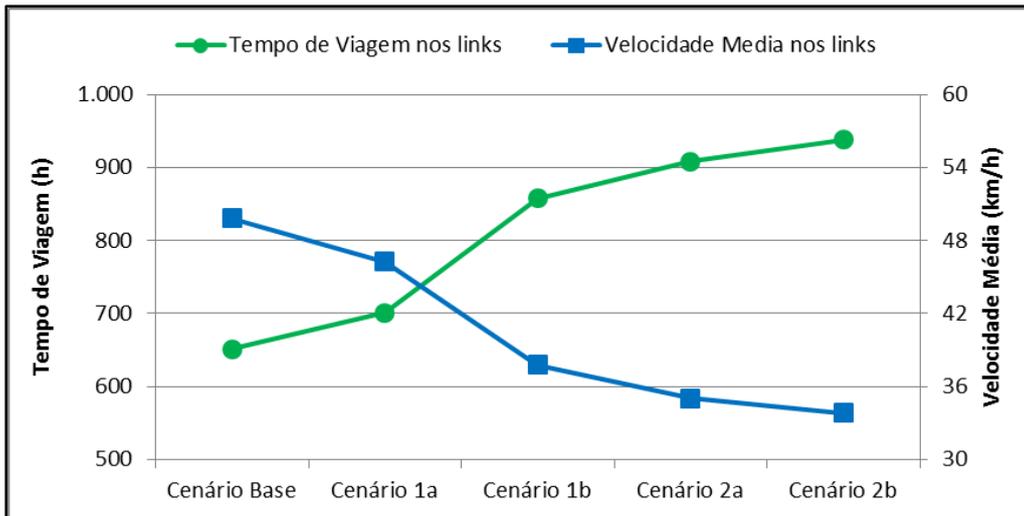


Figura 4.5: Relação entre o tempo de viagem e velocidade média nos “links atingidos”.

As mesmas análises foram realizadas para os *links* externos à área afetada (Figura 3.7), porém, os resultados para os três indicadores utilizados na avaliação dos impactos nas condições de tráfego (quantidade de viagens, velocidade média e tempo de viagem) apresentou pouca variação entre os cenários. Essa pequena variação indica que, no geral, os incidentes ocorridos não afetam de forma expressiva as áreas externas a eles, confirmando a hipótese considerada neste trabalho (Seção 3.6).

A Figura 4.6, Figura 4.7 e Figura 4.8 apresentam tais variações entre os cenários e a comparação entre os resultados obtidos para os “links atingidos” e os “links não atingidos” durante o período de análise (07h – 09h).

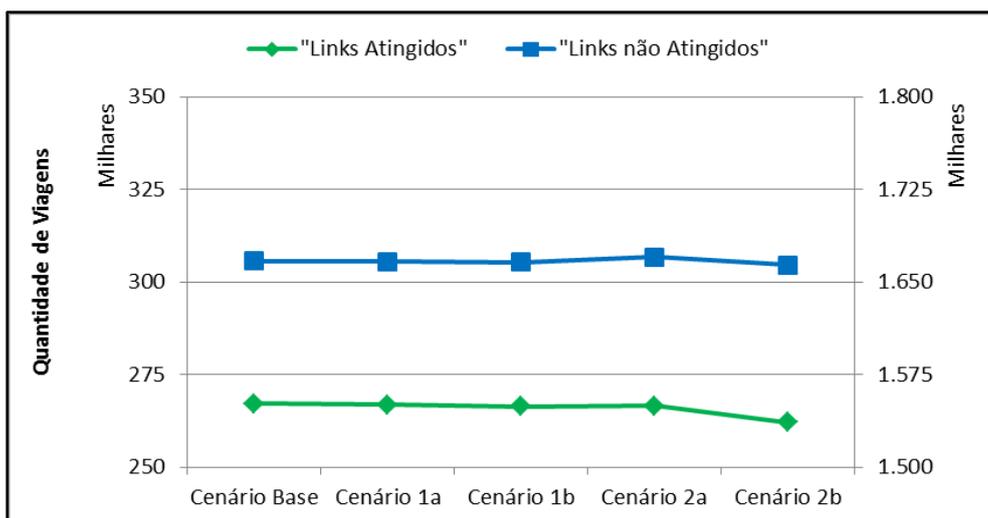


Figura 4.6: Comparação entre as quantidades de viagens dos veículos de carga nos “links atingidos” e “não atingidos” (07h - 09h).

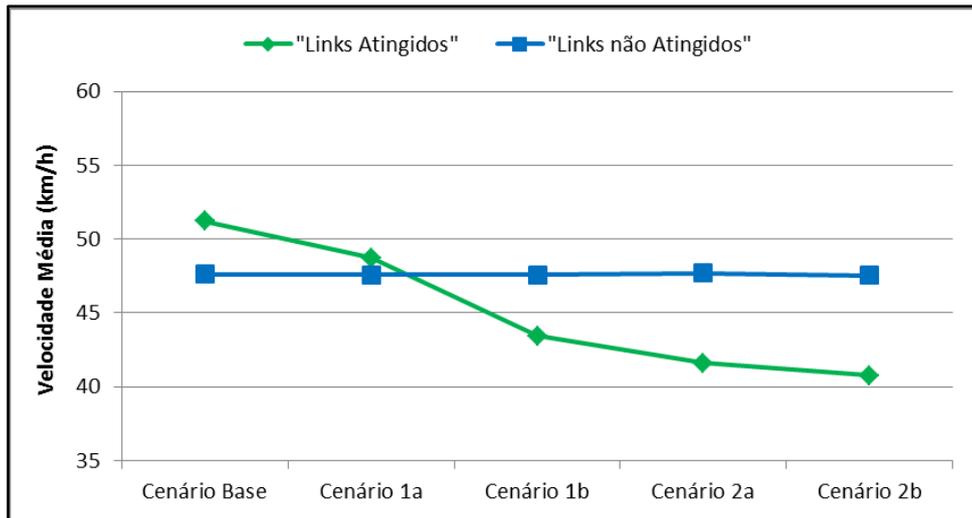


Figura 4.7: Comparação entre as velocidades média dos veículos de carga nos “links atingidos” e nos “não atingidos” (07h - 09h).

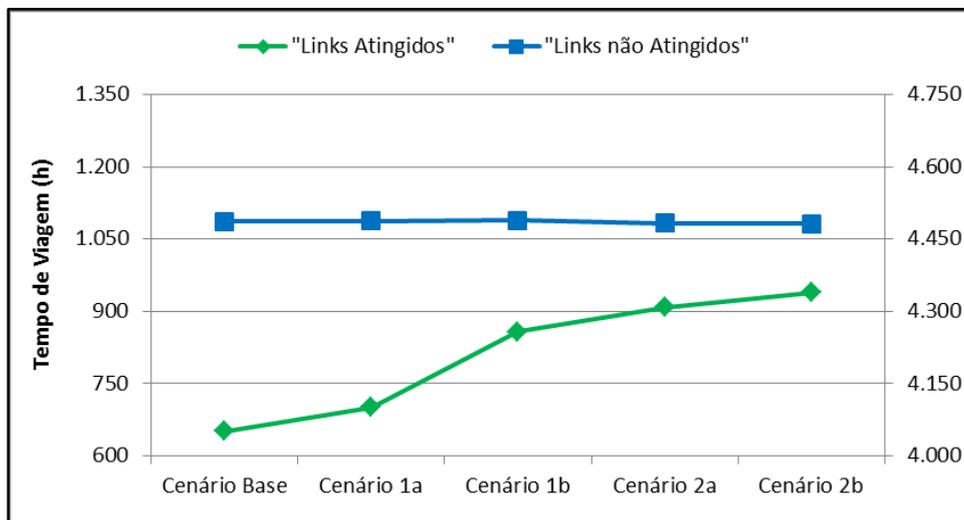


Figura 4.8: Comparação entre os tempos de viagem dos veículos de carga nos “links atingidos” e nos “não atingidos” (07h - 09h).

4.1.2 Efeito da chuva/inundação nos níveis de emissão de poluentes

Nesta Subsecção foram analisados os impactos ambientais gerados pelos incidentes. Como indicadores, foram utilizados as emissões de poluentes (NO_x e MP) dos veículos de carga que passam nos *links* da rede e o número de reclamações da população, representado pela quantidade de *links* onde foi verificado, no final do dia simulado, o aumento nas emissões em relação ao Cenário Base. Em seguida, foram feitas comparações entre os resultados dos “links atingidos” e “não atingidos”. Para tornar os resultados comparáveis, foram considerados os *outputs* de todo o dia simulado para todos os cenários (0h – 23h59min).

Os níveis de emissão de poluentes dos veículos de carga nos “links atingidos” ao longo do dia simulado aumentam em média 5,0% entre os cenários com chuva/inundação e o Cenário Base (Figura 4.9), sendo que os níveis de emissão variam com o comprimento e com a velocidade nos links. Por se tratar da mesma rede, o comprimento total dos links é constante para todos os cenários e, dessa forma, as emissões dependem da velocidade nos links e da quantidade de veículos que trafega em cada um deles.

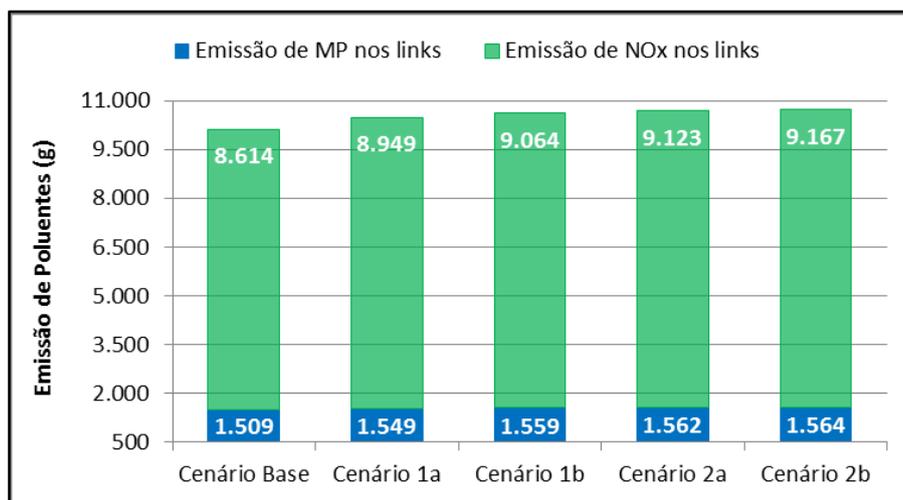


Figura 4.9: Emissões de poluentes dos veículos de carga nos “links atingidos” (07h - 09h).

Como pode ser observado na Figura 4.10 (relação Velocidade *versus* Emissão de Poluentes), as emissões de NO_x diminuem com o acréscimo de velocidade até 60 km/h (U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 1994; ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2003; NILIM, 2003 *apud* WANGAPISIT *et al.*, 2014) e, por sua vez, as emissões de MP sempre decrescem com o aumento de velocidade, sendo essa redução mais acentuada até aproximadamente 20 km/h. Assim, o aumento das emissões observado nos cenários pode ser explicado pela redução significativa da velocidade (apresentada na Subseção 4.1.1). Vale lembrar que para as simulações “Sem Alerta” a quantidade de viagens nos links apresentou pouca variação, não interferindo, dessa forma, nas emissões de poluentes.

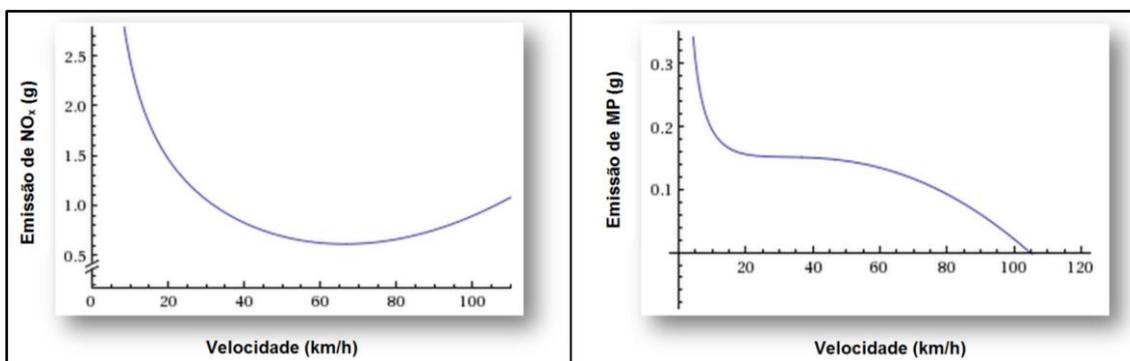


Figura 4.10: Variação das emissões de poluentes em relação à velocidade.

Observa-se ainda na Figura 4.9 que os Cenários 1b, 2a e 2b apresentaram pouca diferença nos níveis de emissão de poluentes. Em um primeiro momento, espera-se que haja um aumento significativo das emissões nos cenários mais críticos, ou seja, quando há inundação (2a e 2b). Porém, deve-se notar que devido à interrupção de *links*, alguns veículos deixam de circular durante o incidente, diminuindo, nesses casos, a emissão de poluentes.

O número de reclamações no final do dia aumenta nos cenários com incidente, quando comparados ao Cenário Base, como pode ser observado na Figura 4.11. Em média, 19% dos “*links atingidos*” apresentaram reclamações no final do dia. De forma segregada, a Figura 4.12 e a Figura 4.13 apresentam as tendências dos níveis de emissão de NO_x e de MP e dos respectivos números de *links* com reclamações.

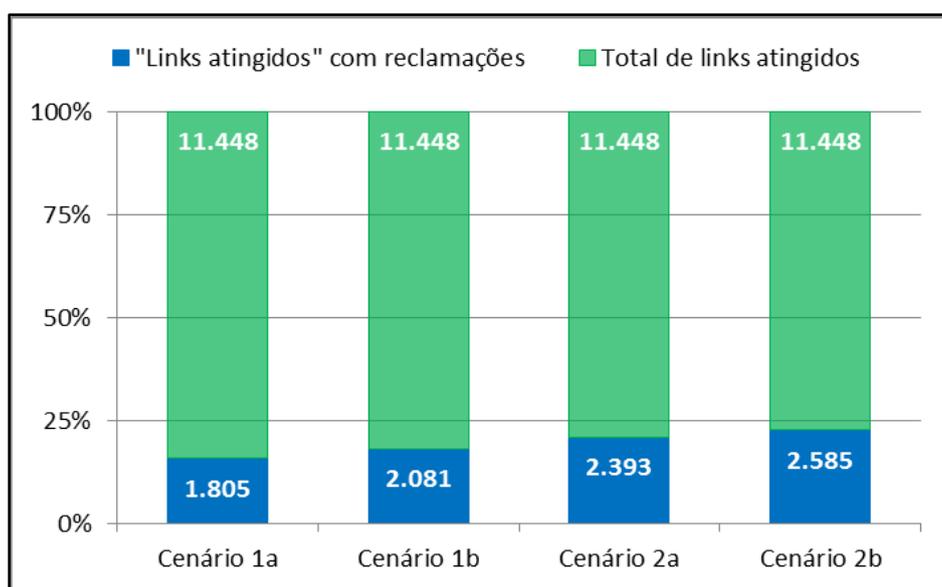


Figura 4.11: Porcentagem dos “*links atingidos*” que apresentaram reclamações no final do dia.

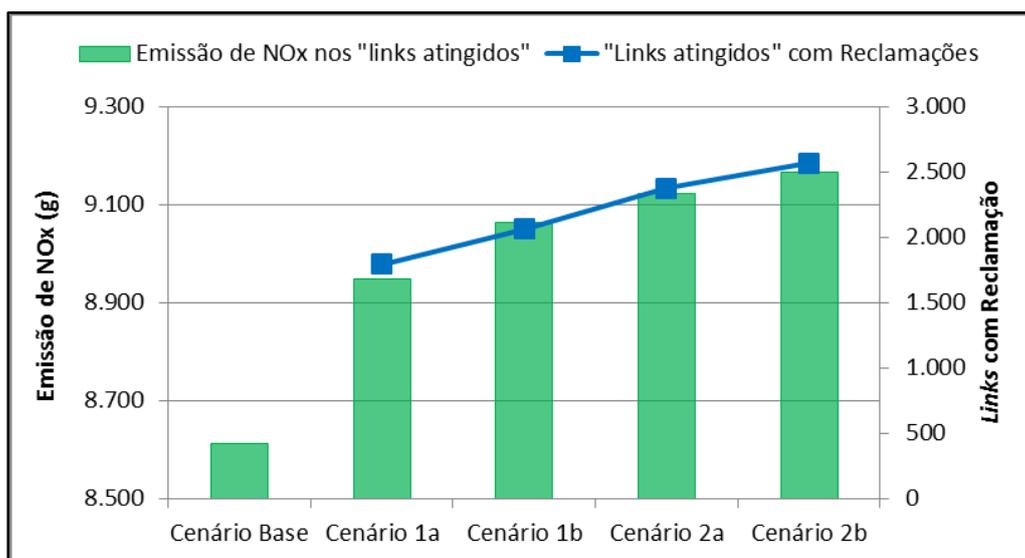


Figura 4.12: Emissão de NO_x com os respectivos números de *links* com reclamações no final do dia.

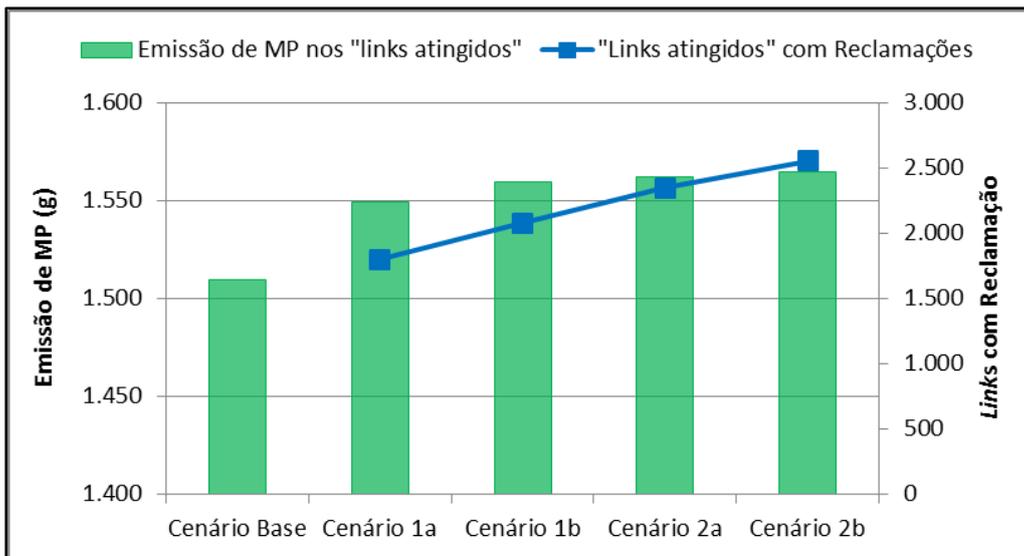


Figura 4.13: Emissão de MP com os respectivos números de *links* com reclamações no final do dia.

As análises também foram realizadas para os *links* externos à área afetada, porém, os resultados encontrados apresentaram pouca variação, que pode indicar que, no geral, que os incidentes ocorridos não afetam de forma expressiva as áreas externas a eles. Ainda, como se pode observar, o número de “*links* não atingidos” com reclamações, apesar de sofrer acréscimo entre os cenários com incidentes (Figura 4.16), quando comparados ao número total de *links* nas áreas externas aos incidentes, são pouco expressivos (0,5% do total). As Figura 4.14, Figura 4.15 e Figura 4.16 apresentam tais análises e as comparações entre os resultados obtidos para os “*links* atingidos” e os “*links* não atingidos” ao longo do dia simulado.

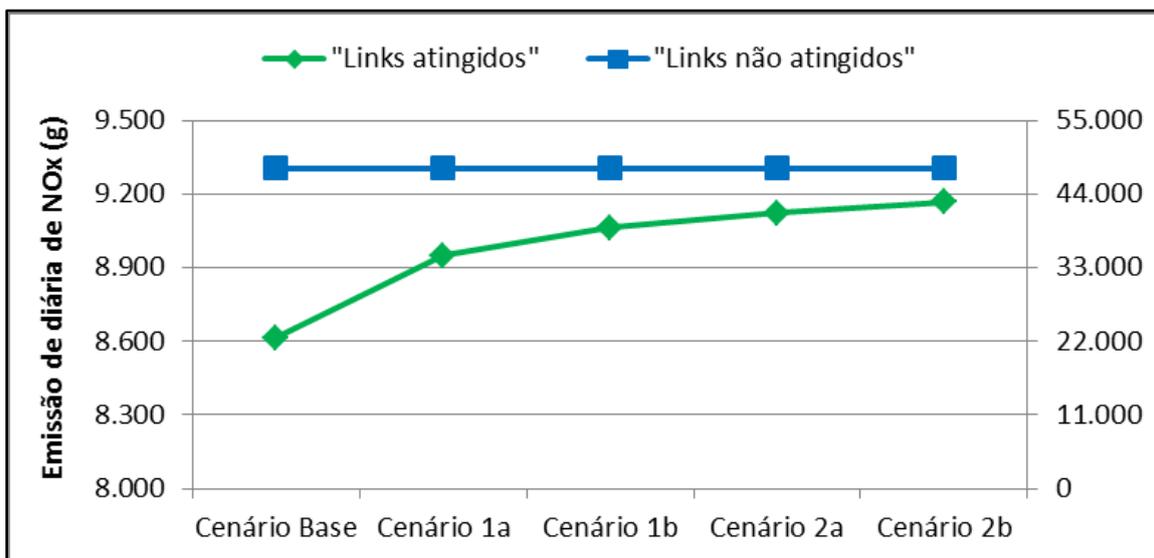


Figura 4.14: Comparação entre as emissões de NO_x dos veículos de carga nos “*links* atingidos” e os “*links* não atingidos” ao longo do dia simulado.

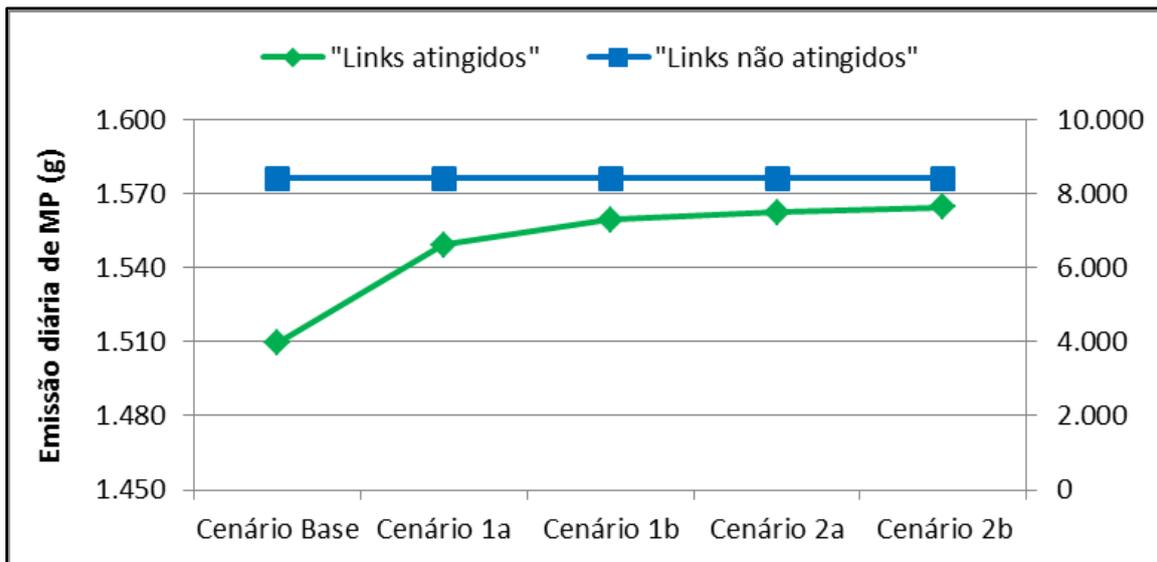


Figura 4.15: Comparação entre as emissões de MP dos veículos de carga nos “links atingidos” e os “não atingidos” ao longo do dia simulado.

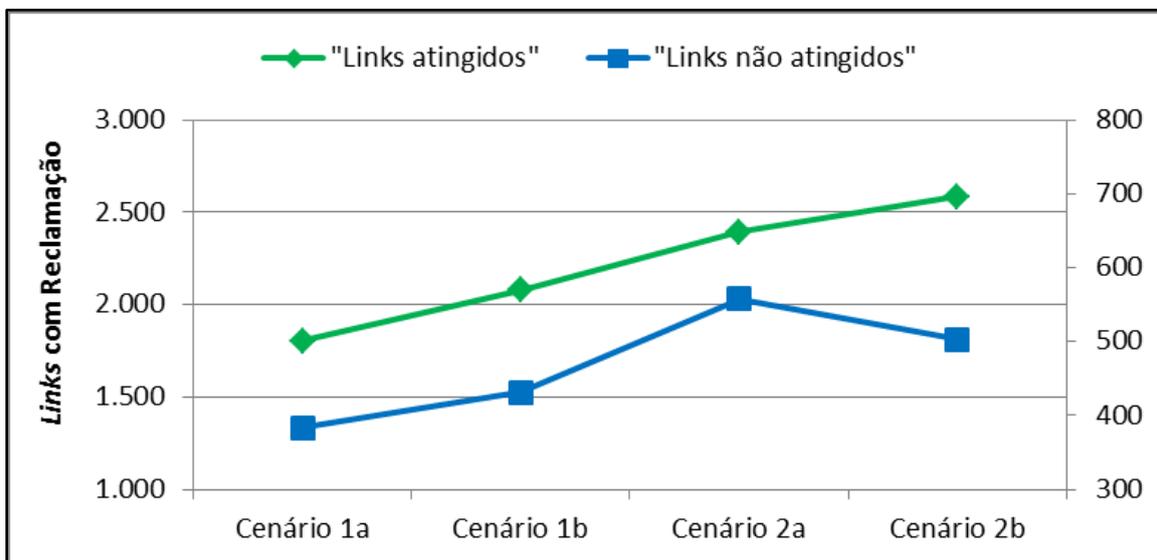


Figura 4.16: Comparação entre o número de links com reclamações nas áreas afetadas e nas áreas externas aos incidentes.

4.1.3 Efeito da chuva/inundação nos custos

Para a avaliação econômica dos impactos gerados pelos incidentes, esta Subseção foi subdividida em três partes: custo com combustível, custo do tempo de viagem e custos ambientais. Essas análises, diferentemente das realizadas nas subseções anteriores, foram construídas a partir dos resultados obtidos por transportador e não por link.

4.1.3.1 Custo com combustível

O custo estimado com combustível tem como única variável a distância diária percorrida por transportador. Portanto, primeiramente foi verificado o efeito dos incidentes nas distâncias percorridas pelos transportadores. Em seguida, os custos de combustível foram calculados para todos os cenários. A fim de tornar os resultados comparáveis, as análises foram realizadas para qualquer transportador que tenha passado pelos “links atingidos” em qualquer cenário e com qualquer número de iterações.

A distância total percorrida pelos transportadores nos três primeiros cenários (Base, 1a e 1b) não sofreu alterações, indicando que a chuva não impediu que os transportadores passassem pelos “links atingidos” nos cenários “Sem Alerta”. Porém, para os cenários com inundação, os transportadores que não estavam nos links inundados e que tiveram uma possibilidade de sair com antecedência desses locais, tiveram que percorrer distâncias maiores para o atendimento das demandas. Conseqüentemente, os custos com combustível foram maiores (Figura 4.17).

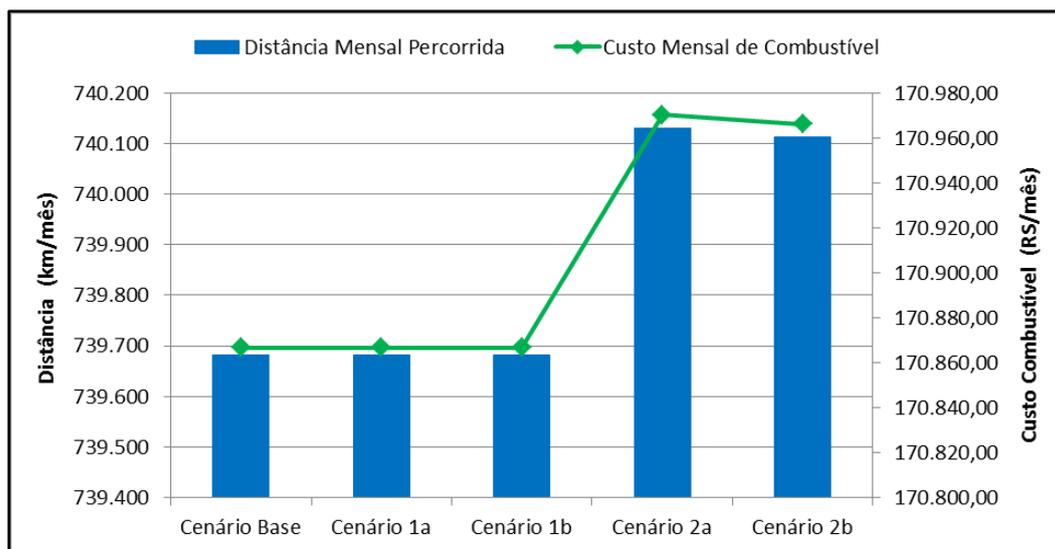


Figura 4.17: Relação entre a distância percorrida e custo mensal de combustível dos transportadores.

Ainda, verifica-se a diminuição das distâncias percorridas no cenário 2b em relação ao 2a, que pode ser explicado pelo maior número de transportadores que tiveram suas entregas interrompidas durante a inundação e que após o incidente continuaram em suas rotas previamente programadas sem desvios.

4.1.3.2 Custo do tempo de viagem

Para determinar o custo do tempo de viagem, primeiramente foi verificado o efeito dos incidentes nos tempos de viagem dos transportadores. A fim de tornar os resultados

comparáveis, as análises foram realizadas para qualquer transportador que tenha passado por “links atingidos” em qualquer cenário e com qualquer número de iterações. Em seguida, os custos dos tempos de viagens foram calculados para todos os cenários.

Os resultados indicaram que o tempo total de viagem dos transportadores aumentou gradativamente entre os cenários devido à interferência dos incidentes nas condições de tráfego²⁵ e nas distâncias dos trajetos²⁶. Consequentemente, os custos do tempo de viagem também sofreram acréscimos entre os cenários. Tais conclusões podem ser confirmadas pela Figura 4.18.

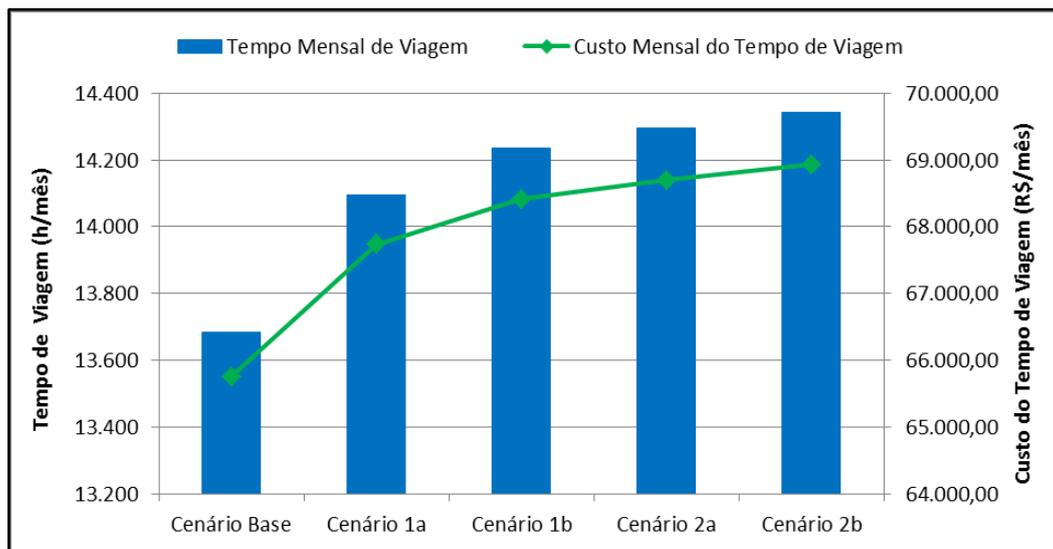


Figura 4.18: Relação entre o tempo de viagem e o seu custo mensal para os transportadores.

4.1.3.3 Custos ambientais

A partir das Equações (3.5 e (3.6, o custo das emissões de NO_x e de MP são respectivamente calculados. Portanto, para as análises, primeiramente foi verificado o efeito dos incidentes nos níveis de emissão de poluentes dos transportadores. A fim de tornar os resultados comparáveis, as análises foram realizadas para qualquer transportador que tenha passado por “links atingidos” em qualquer cenário e com qualquer número de iterações. Em seguida, os custos ambientais foram calculados para todos os cenários.

A emissão total de poluentes (NO_x e MP) dos transportadores sofre acréscimos consideráveis entre os cenários com incidentes e o Cenário Base (Figura 4.19). Observa-se ainda que os

²⁵ Vide subseção 4.1.1.

²⁶ Vide as relações entre as distâncias dos diferentes cenários em 4.1.3.1.

Cenários 2a e 2b, mesmo aumentando os níveis de emissão em relação ao Cenário Base, sofrem decréscimos quando comparados aos cenários 1a e 1b. Como dito anteriormente, em um primeiro momento, espera-se que haja um aumento significativo das emissões nesses cenários, uma vez que são os mais críticos. Porém, deve-se notar que devido à interrupção de *links*, alguns veículos deixam de circular durante o incidente, diminuindo, nesses casos, a emissão de poluentes.

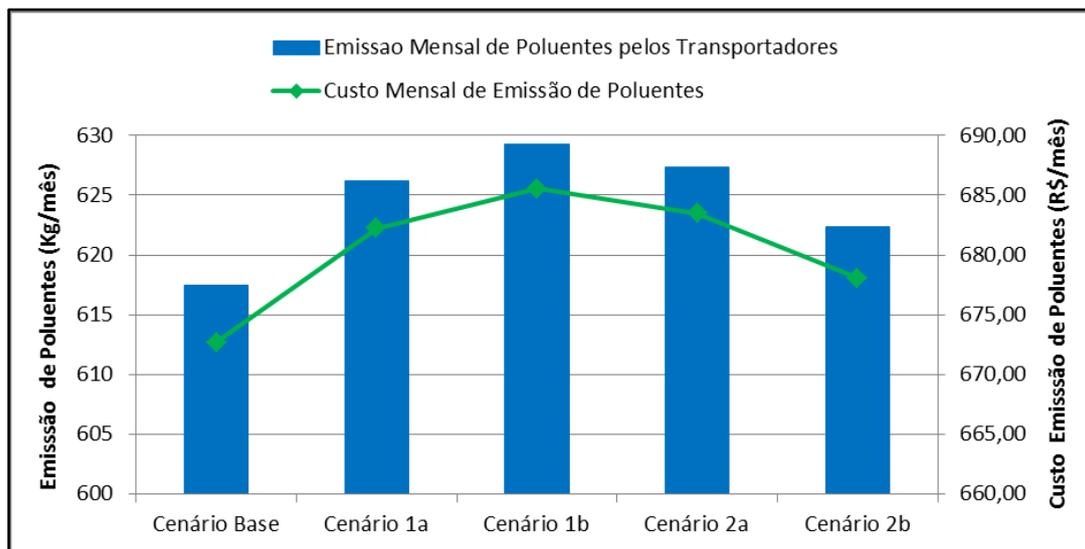


Figura 4.19: Relação entre a emissão total de poluentes e o seu custo mensal.

4.1.4 Efeito da chuva/inundação nas entregas de mercadorias

Para a avaliação dos efeitos da chuva/inundação na entrega de mercadorias, foram analisados os atrasos computados pelos comerciantes localizados dentro e fora da região atingida pelos incidentes. Como não se tem uma base de dados com a quantidade de atrasos nas entregas de mercadorias, o Cenário Base foi utilizado como referência, sendo computado nenhum atraso (premissa adotada). Para tornar os resultados comparáveis, foram considerados os resultados de todo o dia (0h – 23h59min) para todos os cenários.

Primeiramente, as análises foram feitas para os “*links* atingidos”, em que foram computadas 1.160 entregas durante o dia simulado. Dessas, 71% em média foram realizadas com atraso ao longo do dia nos Cenários 1a, 1b, 2a e 2b (Figura 4.20). Nos “*links* não atingidos”, por sua vez, foram computadas 7.995 entregas durante o dia simulado e, em média, 18% delas foram com atraso (Figura 4.21).

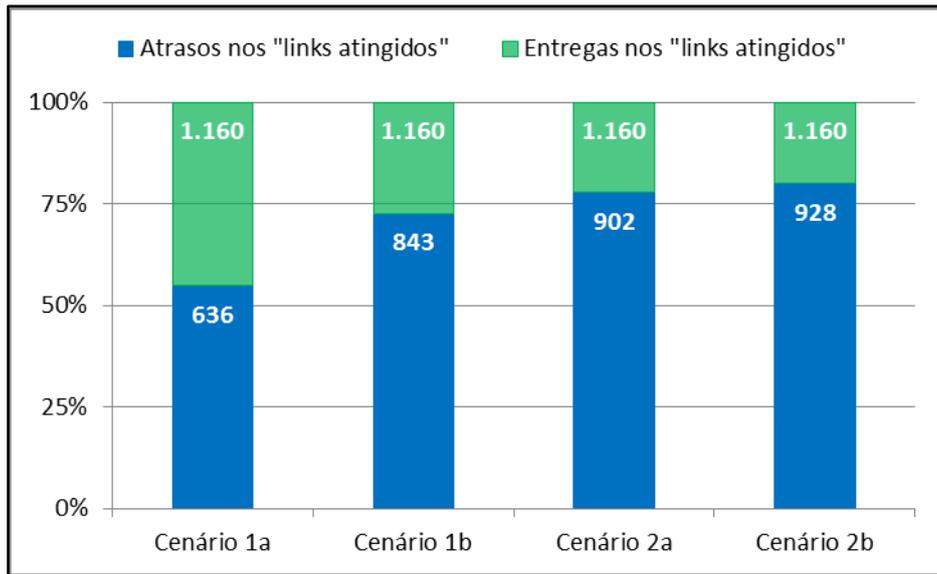


Figura 4.20: Percentual de atrasos em relação ao número total de entregas nos “links atingidos”.

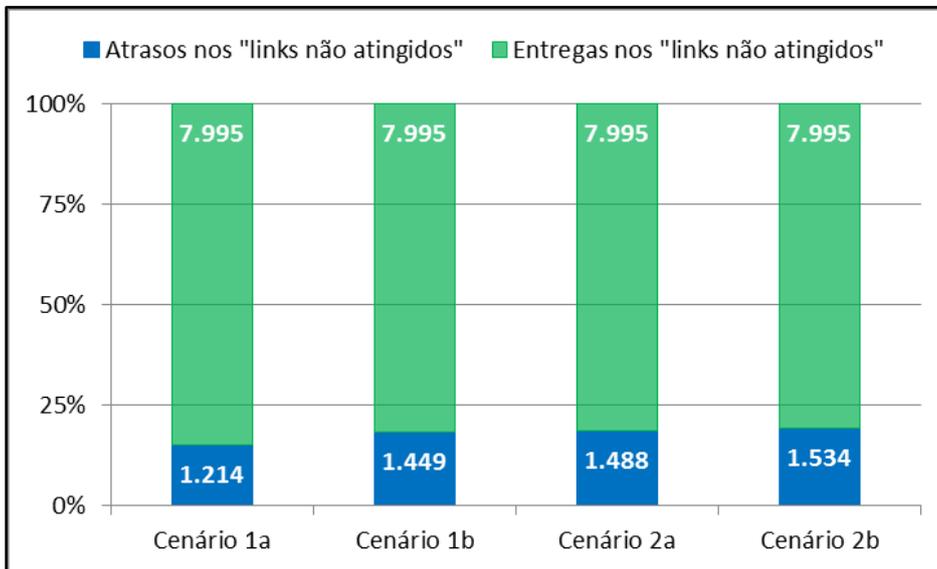


Figura 4.21: Percentual de atrasos em relação ao número total de entregas nos “links não atingidos”.

4.2 Cenários Com Alerta

Para os cenários “Com Alerta” foram realizadas simulações com 200 iterações. Como a menor rota já é definida para zero iteração, o replanejamento dos itinerários é realizado a partir dos trajetos com o menor tempo, caracterizando a aprendizagem dos transportadores e simulando o sistema de distribuição de alertas.

4.2.1 Efeito da chuva/inundação nas condições de tráfego

Como realizado nas análises “Sem Alerta”, para as condições de tráfego, os indicadores analisados foram a quantidade de viagens, o tempo de viagem e a velocidade média nos “links

atingidos” da rede, durante o período dos incidentes de cada cenário. Em seguida, foram feitas comparações entre os resultados dos “links atingidos” e “não atingidos”. Para tornar os resultados comparáveis, as análises foram realizadas entre 07h e 09h. As relações estão apresentadas na Figura 4.22, Figura 4.23 e Figura 4.24.

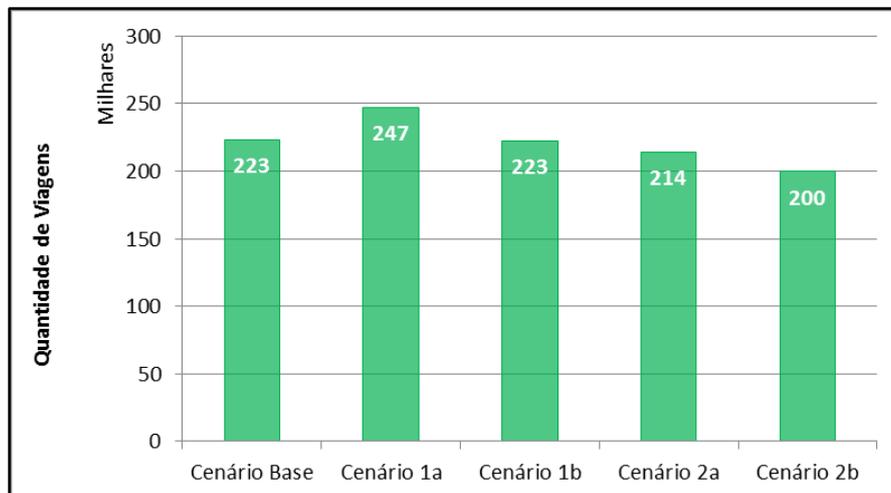


Figura 4.22: Variação da quantidade de viagens de veículos de carga nos “links atingidos” (07h - 09h).

A quantidade de viagens nos *links*, durante o período dos incidentes, reduz em média 3,2% entre os cenários com incidentes (1a, 1b, 2a e 2b) e o Cenário Base, durante os incidentes (Figura 4.22). A maior redução ocorre no Cenário 2b (10,5%) e pode ser explicada por dois fatores, sendo eles a aprendizagem dos agentes, que evitaram passar pelos “links atingidos” durante o incidente e a interrupção dos *links* inundáveis. No Cenário 1a, porém, houve um pequeno incremento na quantidade de viagens nos “links atingidos” (2,0%) em relação ao Cenário Base. Nesse caso, conclui-se que chuvas de pequena duração não representam uma impedância significativa no fluxo de veículos de carga.

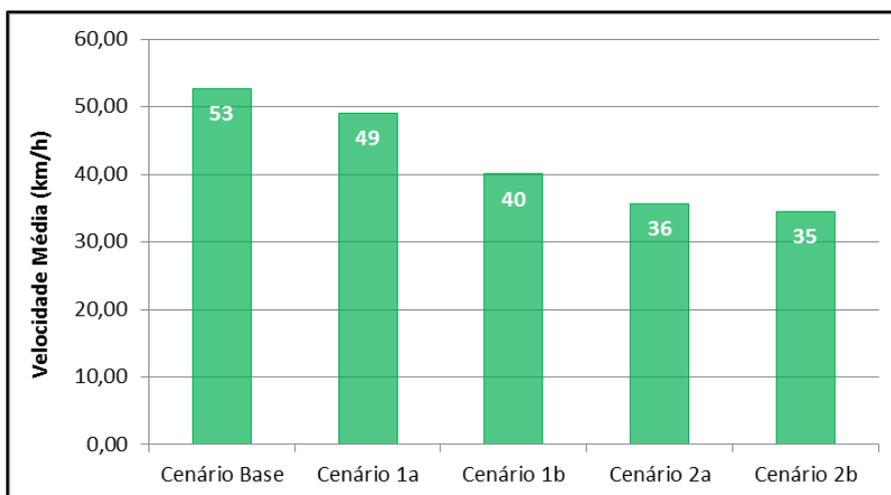


Figura 4.23: Variação da velocidade média dos veículos de carga nos “links atingidos” (07h - 09h).

A velocidade média dos veículos de carga nos “links atingidos”, assim como para os cenários “Sem Alerta”, reduz de maneira significativa (em média 28%) entre os cenários com chuva/inundação e o Cenário Base, durante o período dos incidentes (Figura 4.22).

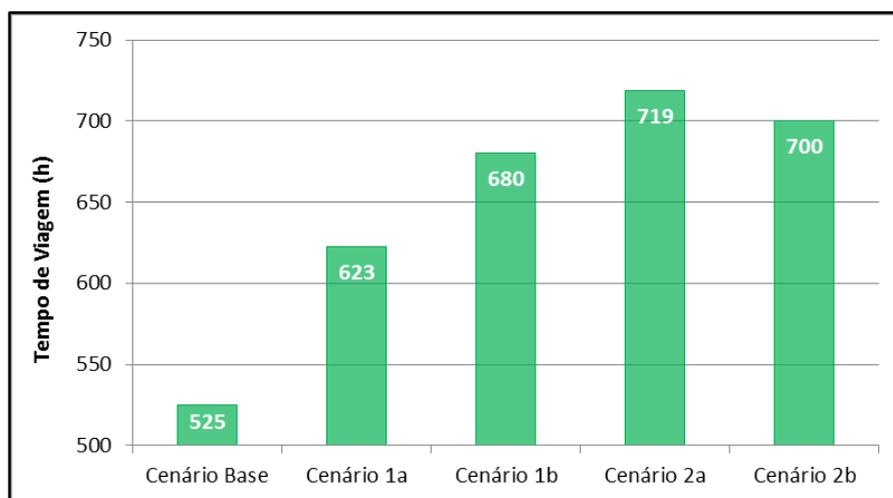


Figura 4.24: Variação do tempo de viagem dos veículos de carga nos “links atingidos” (07h - 09h).

O tempo de viagem dos veículos de carga nos “links atingidos”, de forma coerente, assim com para os cenários “Sem Alerta”, apresenta um acréscimo considerável (em média 32%) entre os cenários com incidentes (1a, 1b, 2a e 2b) e o Cenário Base (Figura 4.24). Esse aumento no tempo de viagem é explicado pela redução da velocidade média nos links nos cenários com incidente (Figura 4.25), e naqueles com inundação, acrescenta-se ainda o fato da interrupção de alguns links. Observa-se, porém, um decréscimo no tempo de viagens nos links entre os Cenários 2a e 2b, que pode ser justificado pela redução considerável da quantidade de viagens nos mesmos, conforme mencionado anteriormente (Figura 4.26).

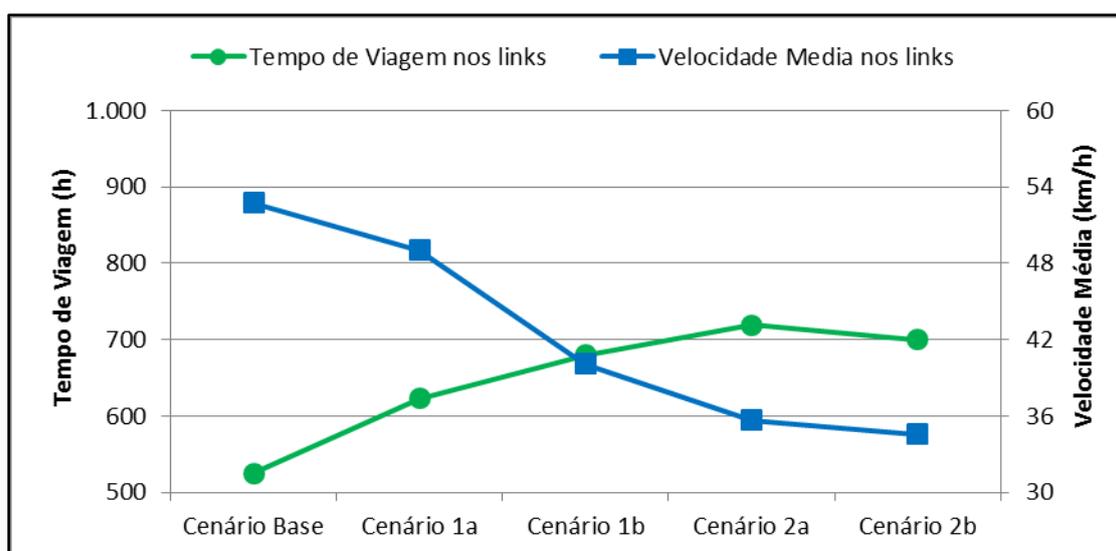


Figura 4.25: Relação entre o tempo de viagem e velocidade média nos “links atingidos” (07h – 09h).

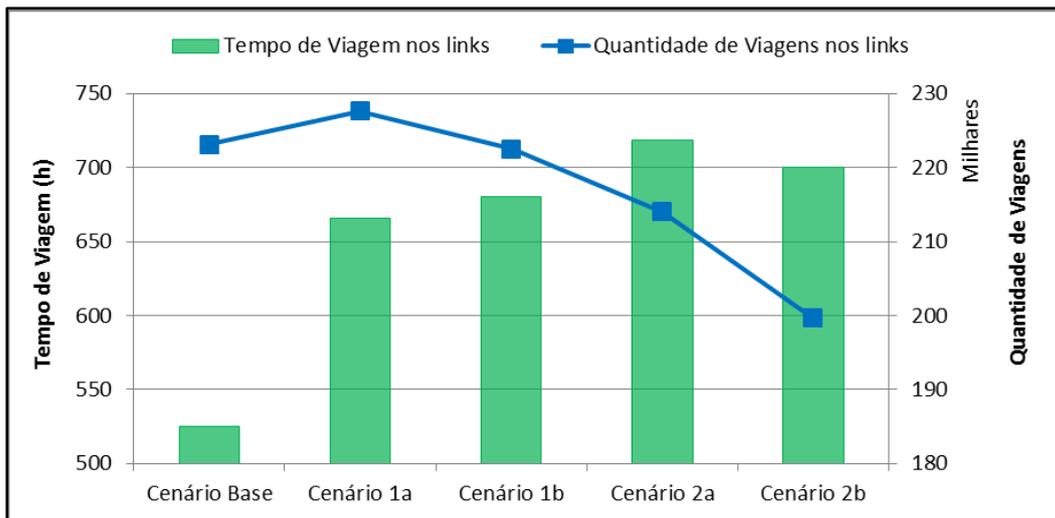


Figura 4.26: Relação entre o tempo e a quantidade de viagens nos “links atingidos” (07h – 09h).

As mesmas análises foram realizadas para os links externos à área afetada e, diferentemente das simulações “Sem Alerta”, os cenários com incidentes apresentaram resultados com variações consideráveis, em relação ao Cenário Base, no que tange os três indicadores utilizados na avaliação dos impactos nas condições de tráfego (quantidade de viagens, velocidade média e tempo de viagem). Porém, entre os cenários com incidente²⁷, pouca alteração foi observada, assim como constatado nas simulações “Sem Alerta”. A Figura 4.27, Figura 4.28 e Figura 4.29 apresentam tais variações entre os cenários e a comparação entre os resultados obtidos para os “links atingidos” e os “links não atingidos” durante o período de análise (07h – 09h).

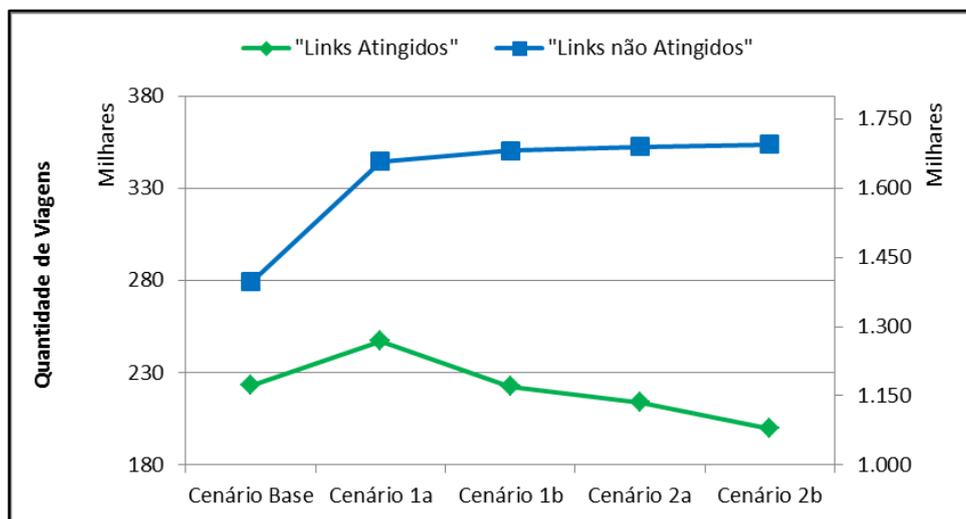


Figura 4.27: Comparação entre as quantidades de viagens dos veículos de carga nos “links atingidos” e nos “não atingidos” (07h - 09h).

²⁷ Cenários com incidentes: Cenários 1a (chuva com duração de 30 min), 1b (chuva com duração de 60 min) e 2a (inundação com duração de 90 min) e 2b (inundação com duração de 120 min).

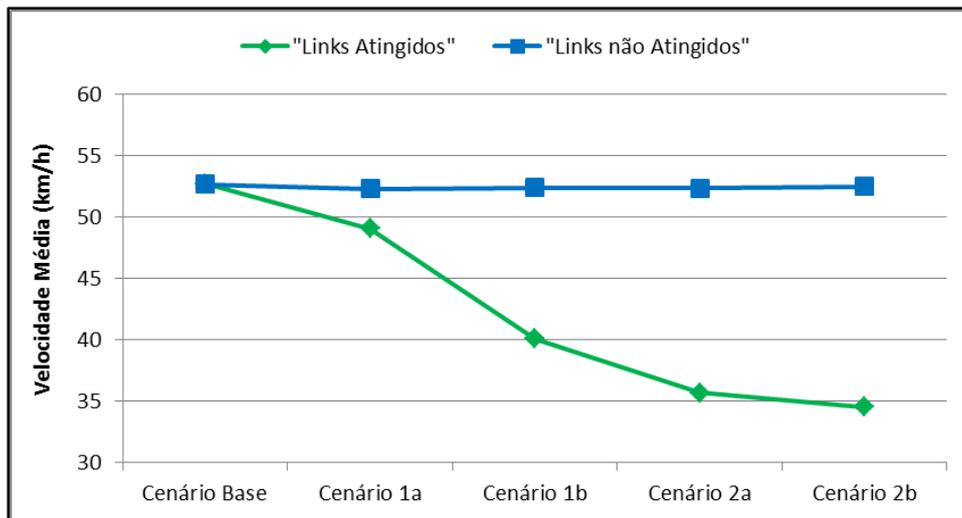


Figura 4.28: Comparação entre as velocidades média dos veículos de carga nos “links atingidos” e nos “não atingidos” (07h - 09h).

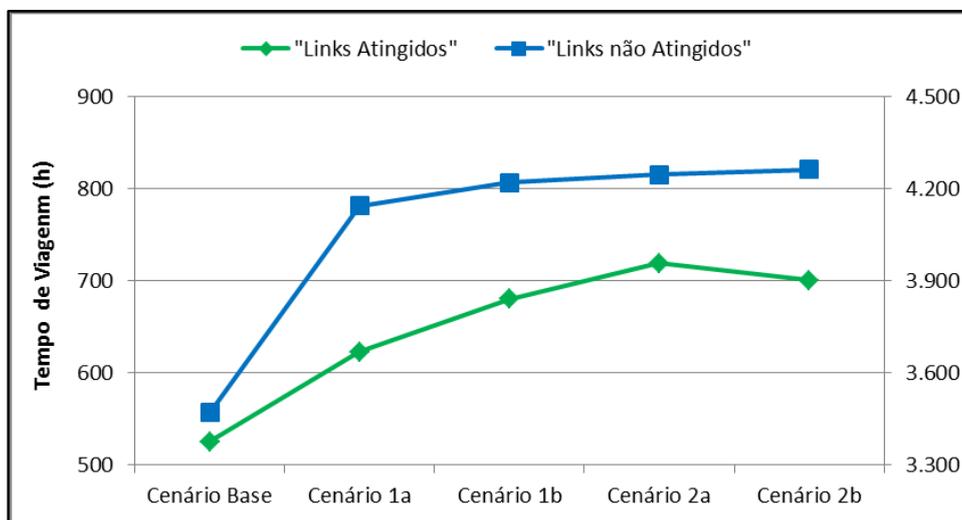


Figura 4.29: Comparação entre os tempos de viagem dos veículos de carga nos “links atingidos” e nos “não atingidos” (07h - 09h).

Como pode ser observado na Figura 4.27 e na Figura 4.29, os resultados relativos à quantidade e ao tempo de viagens nos “links não atingidos” apresentaram um considerável acréscimo entre os cenários com incidente e o Cenário Base. Tais variações confirmam a eficácia do sistema de divulgação de alertas, uma vez que a quantidade de viagens dos “links atingidos” diminuiu, enquanto as dos “links não atingidos” aumentaram consideravelmente nos cenários com incidente. Com o aumento do número de viagens, o tempo de deslocamento nesses links consequentemente também aumentou. A velocidade média nos “links não atingidos”, porém, apresentou pouca variação entre os cenários (Figura 4.28).

4.2.2 Efeito da chuva/inundação nos níveis de emissão de poluentes

Nesta Subsecção foi verificado o efeito da distribuição de alertas nos impactos ambientais gerados pelos incidentes. Assim como para os cenários “Sem Alerta”, foram utilizados como indicadores as emissões de poluentes (NO_x e MP) dos veículos de carga nos *links* da rede e o número de reclamações realizadas pela população, representada pela contagem dos *links* em ocorreu, no final do dia simulado, o acréscimo das emissões, comparando-os com o Cenário Base. Em seguida, foram feitas comparações entre os resultados dos “*links* atingidos” e “não atingidos”. Para tornar os resultados comparáveis, foram considerados, para todos os cenários, os *outputs* de todo o dia simulado (0h – 23h59min).

Os níveis de emissão de poluentes dos veículos de carga nos “*links* atingidos” ao longo do dia simulado reduzem em média 1,3% entre os cenários com incidentes (1a, 1b, 2a e 2b) e o Cenário Base (Figura 4.30), indicando a eficácia do sistema de divulgação de alertas na redução das emissões de poluentes nas áreas atingidas por incidentes. Essa redução pode explicada pela maior variação da quantidade de viagens apresentada nos casos “Com Alerta”. Portanto, o aumento da emissão de poluentes devido à redução da velocidade foi compensado pela redução dos níveis emissão devido à quantidade de viagens nos *links*. Quando é realizada a comparação entre os cenários com incidentes, verifica-se um pequeno aumento das emissões de poluentes, que pode ser explicado pela redução de velocidade dos veículos de carga nos *links*.

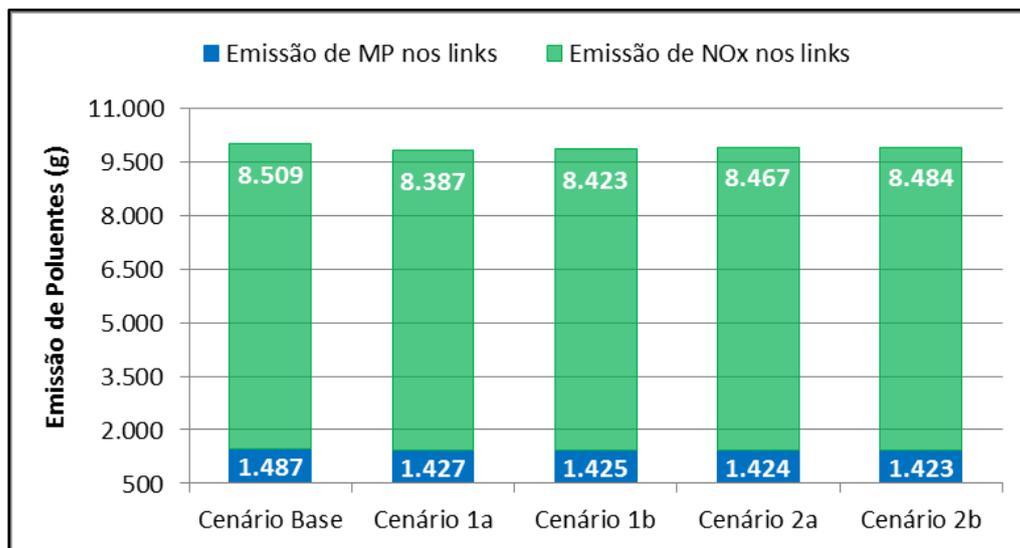


Figura 4.30: Emissões de poluentes dos veículos de carga nos “*links* atingidos” (07h - 09h).

Observa-se ainda na Figura 4.30 que os cenários 1a, 1b, 2a e 2b, mesmo com o acréscimo gradual, apresentaram pouca diferença nos níveis de emissão de poluentes. Em um primeiro

momento, espera-se que haja um aumento significativo das emissões nos cenários mais críticos, ou seja, quando a inundação ocorre (2a e 2b). Porém, deve-se notar que devido à interrupção de *links*, alguns veículos deixam de circular durante o incidente, diminuindo, nesses casos, a emissão de poluentes. Além disso, o número de reclamações no final do dia simulado aumenta entre os cenários com incidente. Como pode ser observado na Figura 4.31, em média, 19% dos “*links* atingidos” apresentaram reclamações no final do dia.

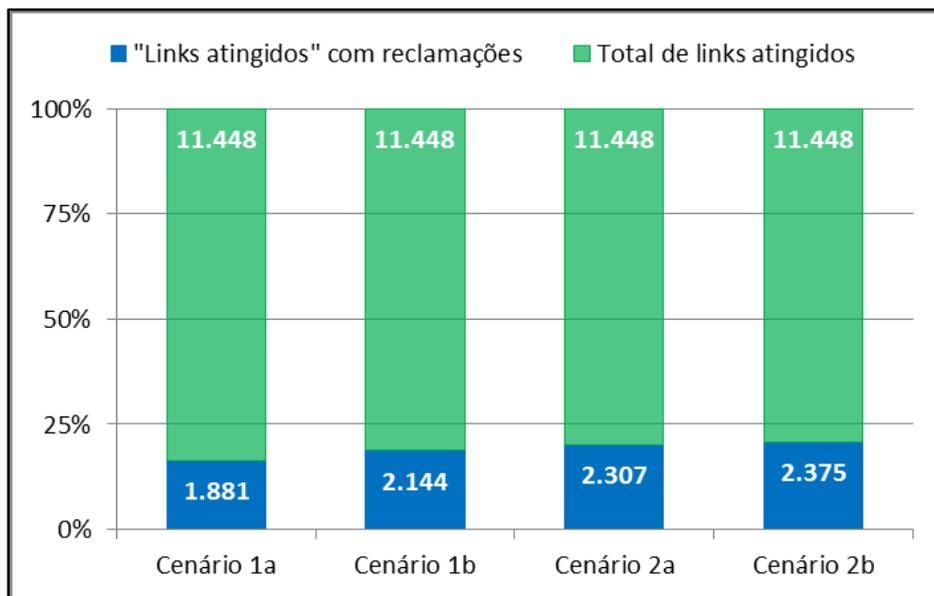


Figura 4.31: Porcentagem dos “links atingidos” que apresentaram reclamações no final do dia.

De forma segregada, a Figura 4.32 e a Figura 4.33 apresentam as tendências dos níveis de emissão de NO_x e de MP e dos respectivos números de *links* com reclamações.

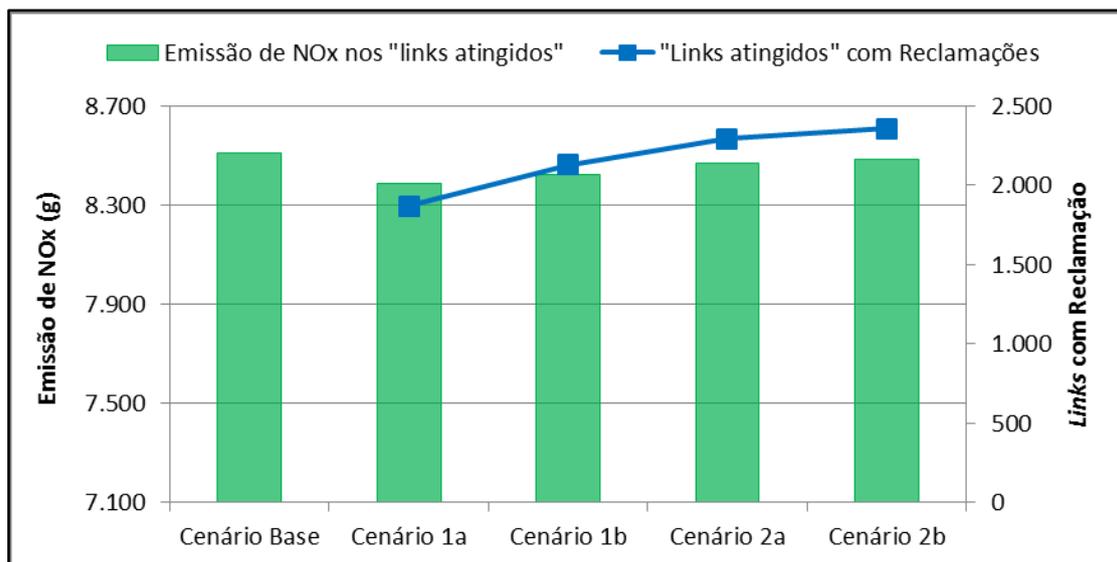


Figura 4.32: Emissão de NO_x com os respectivos números de *links* com reclamações no final do dia.

Na Figura 4.33, como os níveis de emissão sofreram reduções, talvez seja esperado que o número de reclamações também diminua. Porém, é possível que em poucos *links* os níveis de emissão tenham reduzido de forma brusca e, na maioria, aumentado de forma não expressiva, fazendo com que o total das emissões diminuísse, enquanto, pelos pequenos acréscimos de emissões por *links*, o número de reclamações²⁸ aumentasse.

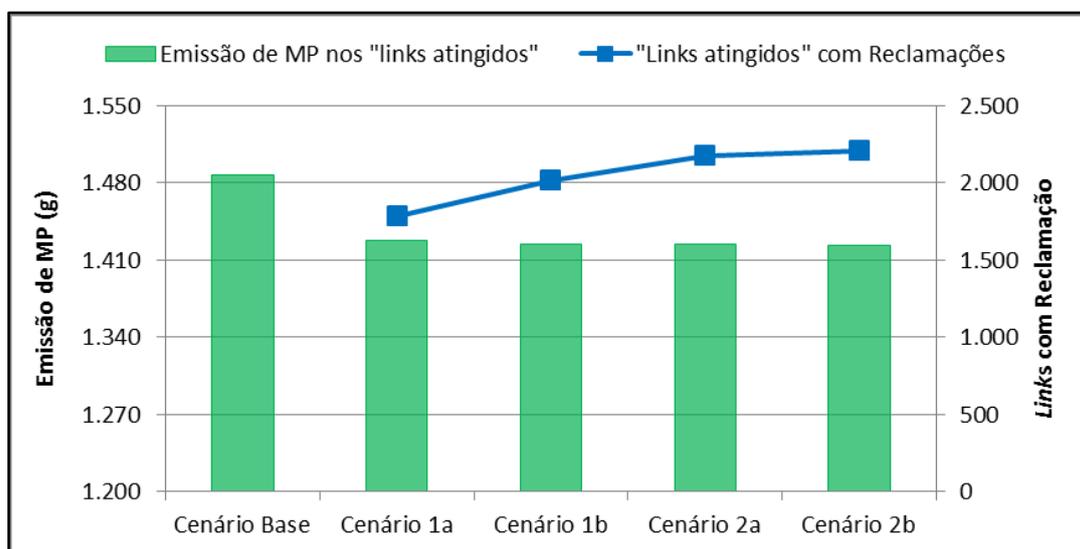


Figura 4.33: Emissão de MP com os respectivos números de *links* com reclamações no final do dia.

As análises também foram realizadas para os *links* externos à área afetada, e, assim como nas simulações “Sem Alerta”. O número de “*links* não atingidos” com reclamações, apesar de apresentar pouca variação entre os cenários, comparativamente aos resultados das simulações “Sem Alerta”, aumentou consideravelmente. Esse fato pode ser explicado pela aprendizagem dos transportadores, que ao evitarem os “*links* atingidos”, passaram a utilizar os *links* externos à área afetada, ocasionando o aumento das emissões, e com ele, o acréscimo nas reclamações (Figura 4.34, Figura 4.35 e Figura 4.36).

²⁸ Como dito anteriormente, o número de reclamações da população é obtido pela contagem dos *links* onde ocorreu o aumento das emissões em relação ao Cenário Base, no final do dia simulado.

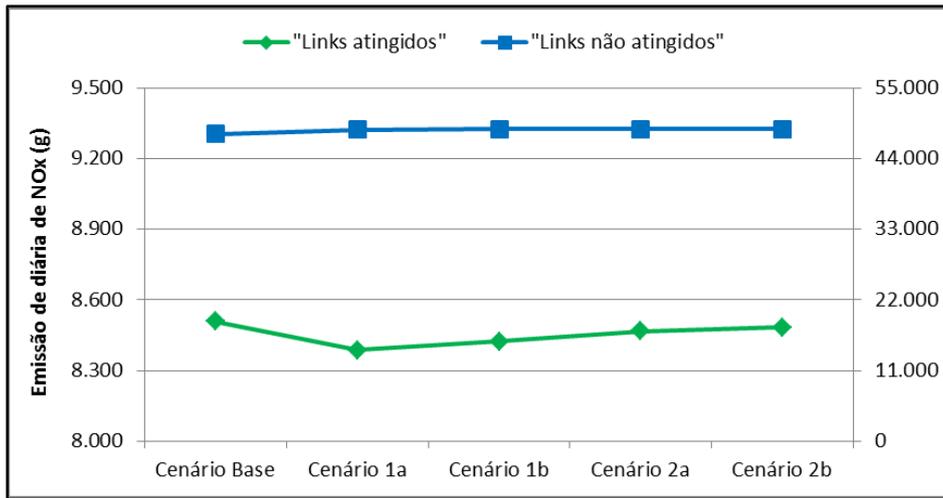


Figura 4.34: Comparação entre as emissões de NO_x dos veículos de carga nos “links atingidos” e os “não atingidos” ao longo do dia simulado.

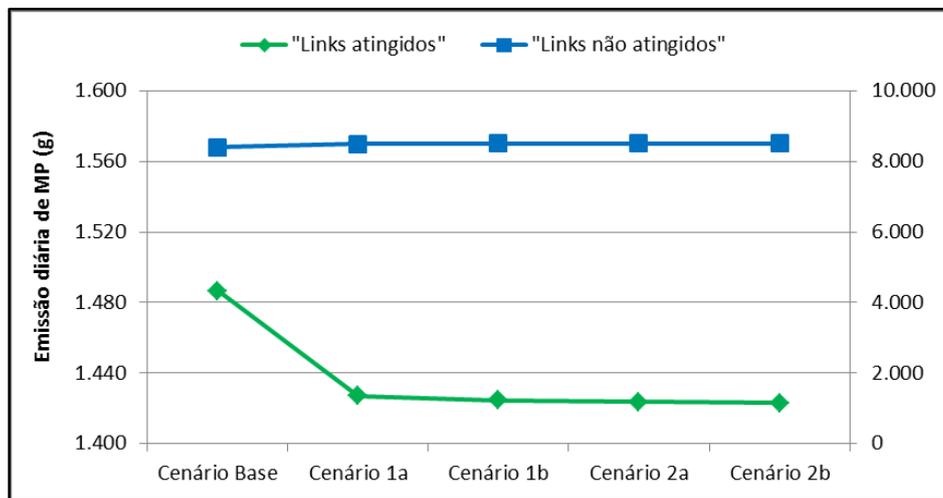


Figura 4.35: Comparação entre as emissões de MP dos veículos de carga nos “links atingidos” e os “não atingidos” ao longo do dia simulado.

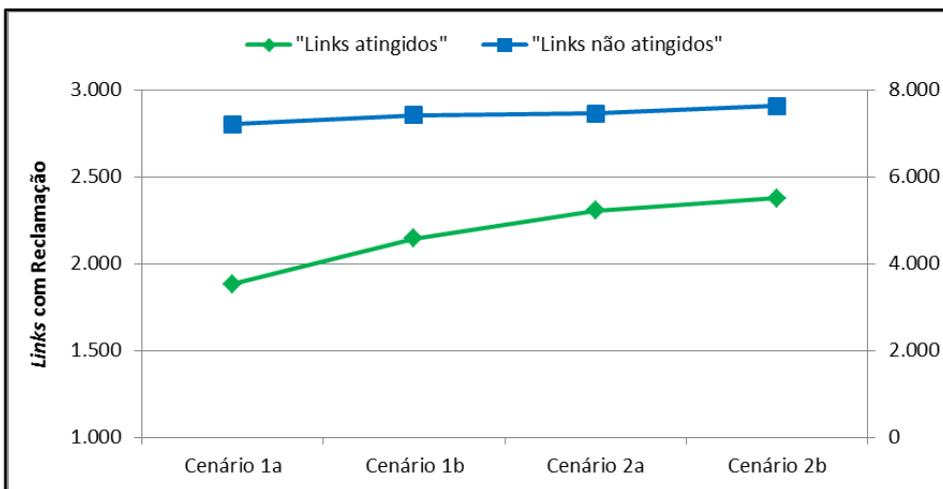


Figura 4.36: Comparação entre o número de links com reclamações nas áreas afetadas e nas áreas externas aos incidentes.

4.2.3 Efeito da chuva/inundação nos custos

Nesta Subseção foi verificado o efeito da divulgação de alertas nos impactos econômicos gerados pelos incidentes. Para tanto, assim como foi feito para os cenários “Sem Alerta”, esta Subseção foi subdividida em três partes: custo de combustível, custo do tempo de viagem e custos ambientais. Essas análises foram realizadas a partir dos resultados obtidos por transportador e não por *link*.

4.2.3.1 Custo com combustível

A distância total percorrida pelos transportadores nos cenários com incidentes sofreu acréscimos consideráveis em relação ao Cenário Base. Como a menor rota já é definida para zero iteração, o replanejamento dos itinerários é realizado a partir dos trajetos com o menor tempo, o que caracteriza a aprendizagem dos transportadores e simula o sistema de distribuição de alertas. Conseqüentemente, os custos de combustíveis também sofreram acréscimos nos Cenários 1a, 1b, 2a e 2b (Figura 4.37).

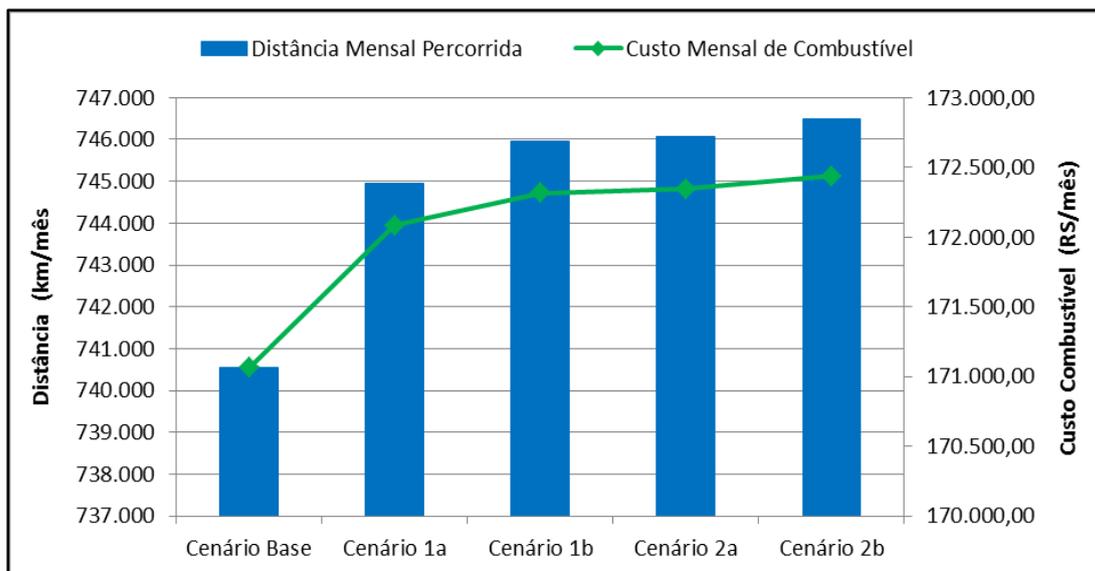


Figura 4.37: Relação entre a distância percorrida e custo mensal de combustível dos transportadores.

4.2.3.2 Custo do tempo de viagem

O tempo total de viagem dos transportadores aumentou gradativamente entre os cenários devido à interferência dos incidentes nas condições de tráfego e nas distâncias dos trajetos. Conseqüentemente, os custos do tempo de viagem também sofreram acréscimos entre os cenários. Tais conclusões podem ser confirmadas na Figura 4.38.

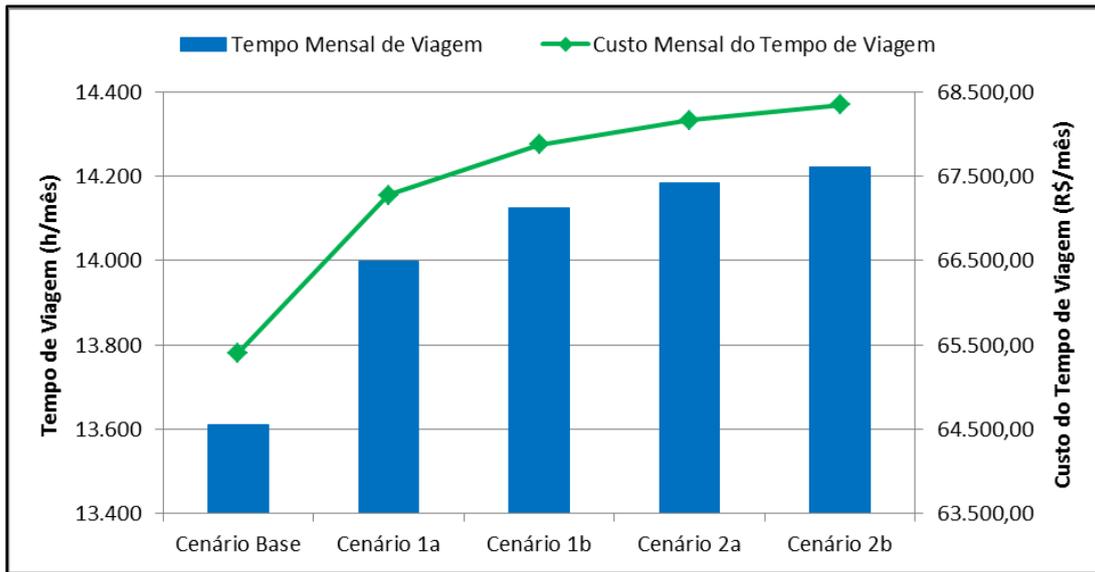


Figura 4.38: Relação entre o tempo de viagem e o seu custo mensal para os transportadores.

4.2.3.3 Custos ambientais

A emissão de poluentes dos transportadores sofre acréscimos consideráveis entre os cenários com incidentes e o Cenário Base (Figura 4.39). Observa-se ainda que os Cenários 2a e 2b, mesmo aumentando os níveis de emissão em relação ao Cenário Base, sofrem decréscimos. Como dito anteriormente, em um primeiro momento, espera-se que haja um aumento significativo das emissões nesses cenários, uma vez que são os mais críticos. Porém, deve-se notar que devido à interrupção de *links*, alguns veículos deixam de circular durante o incidente, diminuindo, nesses casos, a emissão de poluentes.

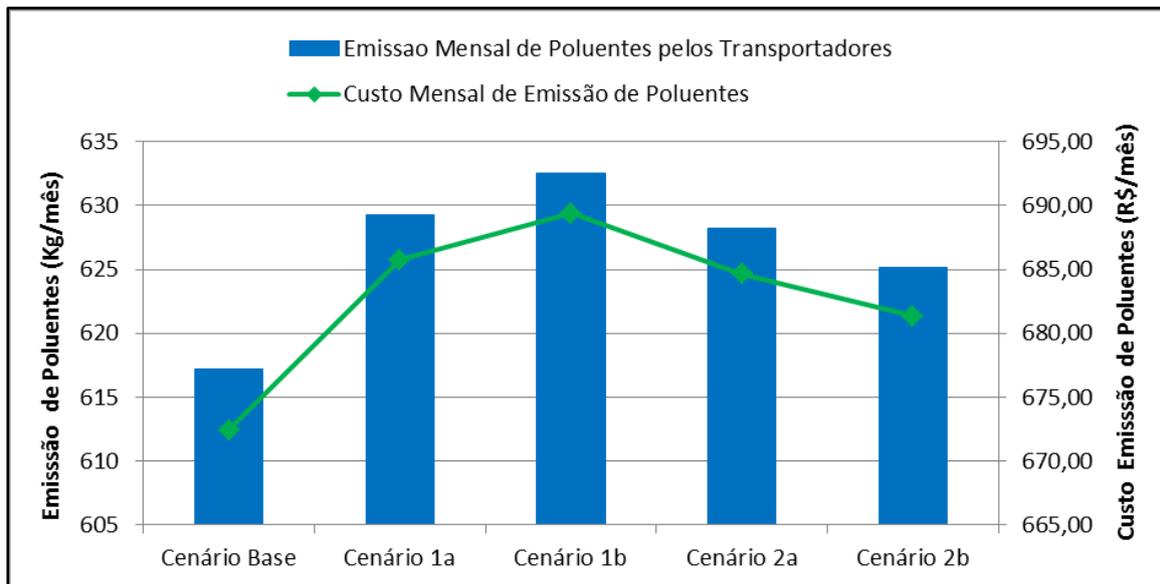


Figura 4.39: Relação entre a emissão total de poluentes e o seu custo mensal.

4.2.4 Efeito da chuva/inundação nas entregas de mercadorias

Primeiramente, as análises foram feitas para os “links atingidos”, em que foram computadas 1.160 entregas durante o dia simulado. Dessas, 21% em média foram realizadas com atraso ao longo do dia nos Cenários 1a, 1b, 2a e 2b (Figura 4.40). Nos “links não atingidos”, por sua vez, foram computadas 7.995 entregas durante o dia simulado e, em média, 15% delas foram com atraso (Figura 4.41).

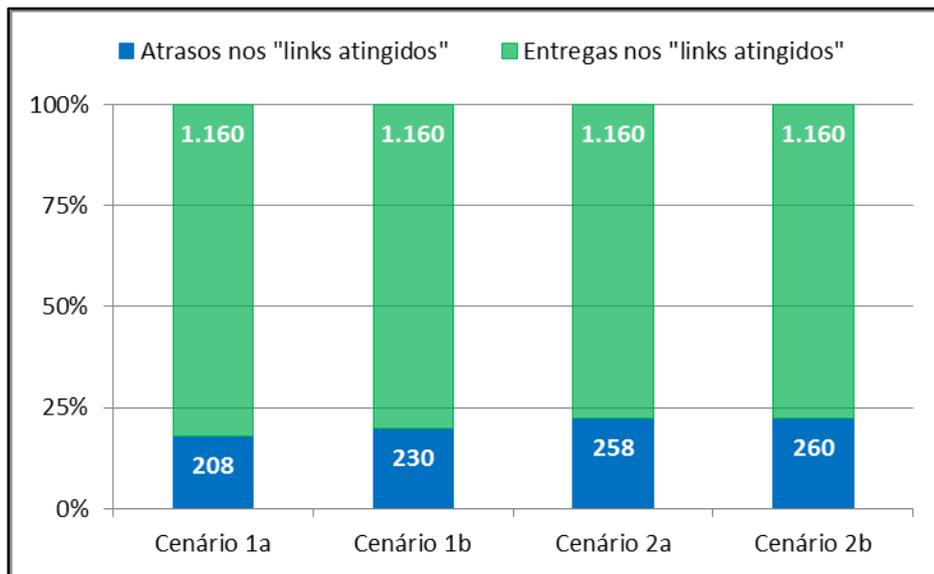


Figura 4.40: Percentual de atrasos em relação ao número total de entregas nos “links atingidos”.

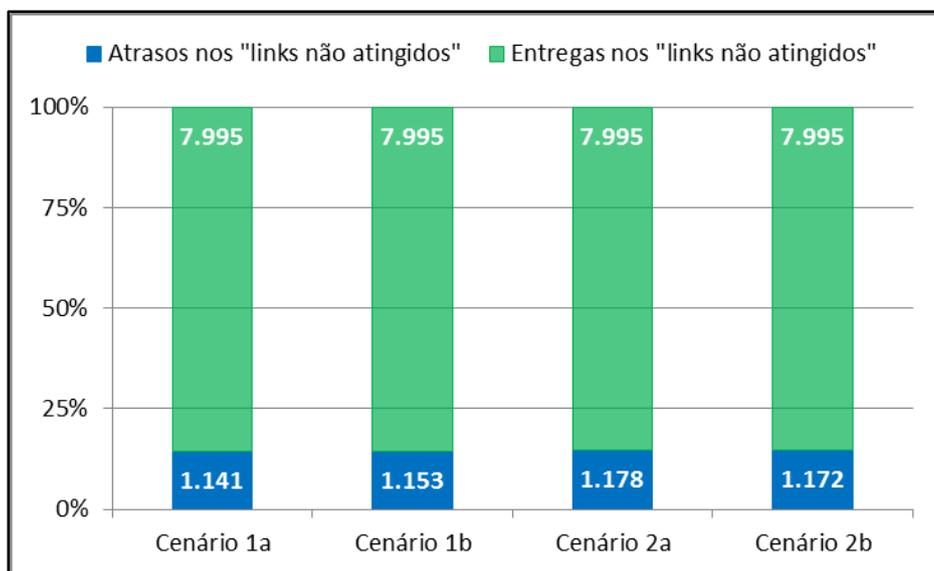


Figura 4.41: Percentual de atrasos em relação ao número total de entregas nos “links não atingidos”.

4.4 Analisando a eficácia do sistema de alertas simulado no modelo construído

O sistema de divulgação de alertas pode ser utilizado como medida de controle e mitigação de danos provocados por incidentes. Ele é definido por Yevjevich (1994) como uma medida estrutural, uma vez que é tomada para mudar os impactos e as consequências de incidentes, no caso chuva/inundação, sem mudar as características físicas e morfológicas da bacia e do rio. De acordo com Bonatti (2011), a previsão de inundação é relativamente precisa e realizada com antecedência suficiente para que os alertas sejam bem distribuídos à população, por veículos de comunicação pública, como rádio, televisão, internet. Assim, alcançando o último objetivo específico do presente trabalho, o sistema de divulgação de alerta como auxílio à distribuição urbana de mercadorias *vis-à-vis* uma situação de vulnerabilidade foi analisada e os resultados obtidos estão apresentados a seguir.

4.4.1 Comparativo entre os impactos nas condições de tráfego para os cenários “Sem Alerta” e “Com Alerta”

Os impactos nas condições de tráfego dos veículos de carga foram analisados a partir dos resultados obtidos para quantidade de viagens, tempo de viagem e velocidade média nos *links* da região que apresentou situações de vulnerabilidade. Os comparativos apresentam dados relativos ao período de ocorrência dos incidentes (07h – 09h) de todos os cenários propostos e estão indicados nas Figura 4.42, Figura 4.43 e Figura 4.44.

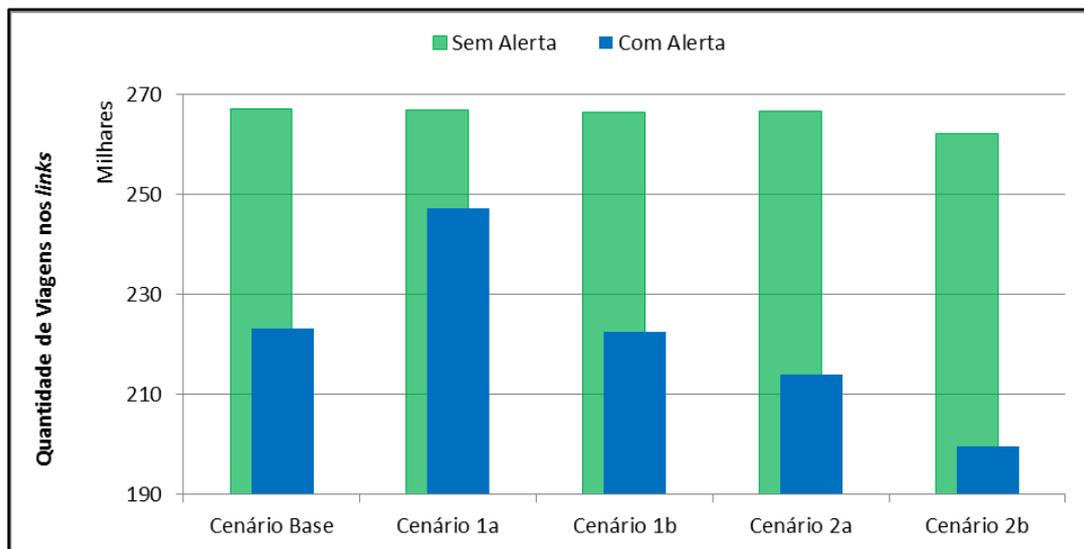


Figura 4.42: Comparativo entre as quantidades de viagem dos cenários “Sem Alerta” e “Com Alerta”.

No que tange as quantidades de viagens de veículos de cargas, nas simulações “Sem Alerta” observou-se uma pequena variação entre os cenários, que pode ser explicada pelo não

replanejamento das rotas durante as simulações, devido ao número de iterações considerado (zero iteração). Porém, nas simulações “Com Alerta”, observa-se maiores variações entre os cenários e, comparativamente aos resultados obtidos em “Sem Alerta”, verifica-se uma redução média de 17% entre os cenários (Figura 4.42), indicando que os “links atingidos”, por apresentarem riscos para a entrega de mercadorias, foram evitados nos períodos da chuva/inundação. Tal resultado confirma, para esse indicador, a eficácia dos sistemas de alertas.

A velocidade média nos “links atingidos” tanto para as simulações “Sem Alerta” quanto para as “Com Alerta” apresenta um decréscimo gradual entre os Cenários Base, 1a, 1b, 2a e 2b. Essa redução é explicada pelos limites pré-estabelecidos no modelo, a partir das distâncias de frenagem em situações de precipitação. Quando comparados entre si, observa-se um acréscimo médio de 9% entre os cenários “Sem Alerta” e “Com Alerta”, indicando mais uma vez que os “links atingidos” foram menos utilizados durante o período dos incidentes (Figura 4.43). Tal resultado confirma a aprendizagem dos transportadores representada no modelo construído pelo sistema de divulgação de alertas.

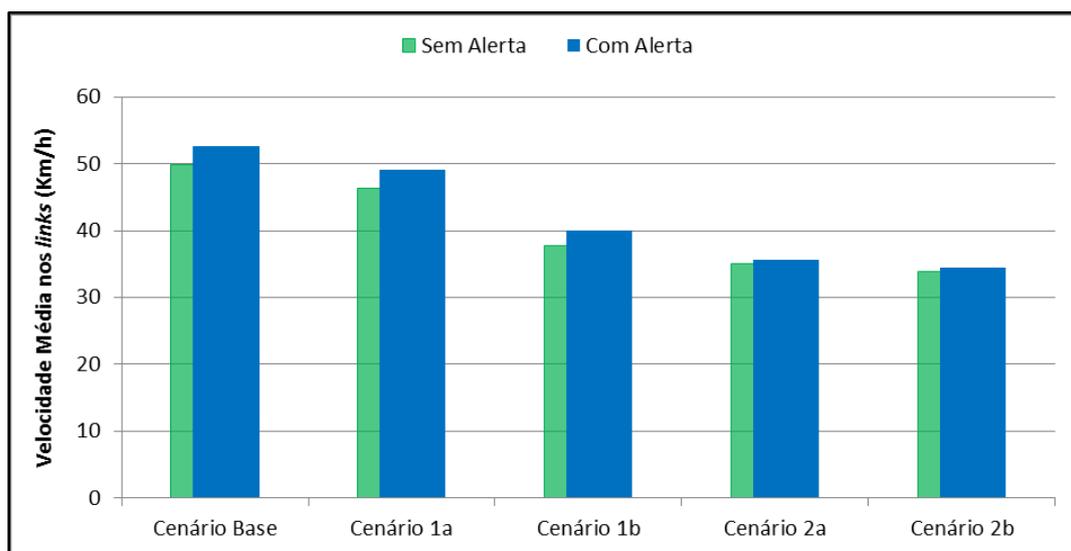


Figura 4.43: Comparativo entre as velocidades média dos cenários “Sem Alerta” e “Com Alerta”.

Quanto ao tempo de viagem nos “links atingidos”, tanto para as simulações “Sem Alerta” quanto para as “Com Alerta” verifica-se o acréscimo gradual entre os Cenários Base, 1a, 1b, 2a e 2b. Esse aumento é explicado pela redução da velocidade média nos links. Quando comparados entre si, observa-se um decréscimo médio de 20% entre os cenários, indicando mais uma vez que os “links atingidos” foram menos utilizados durante o período dos incidentes (Figura 4.44). Tal resultado confirma a aprendizagem dos transportadores representada no modelo construído pelo sistema de divulgação de alertas.

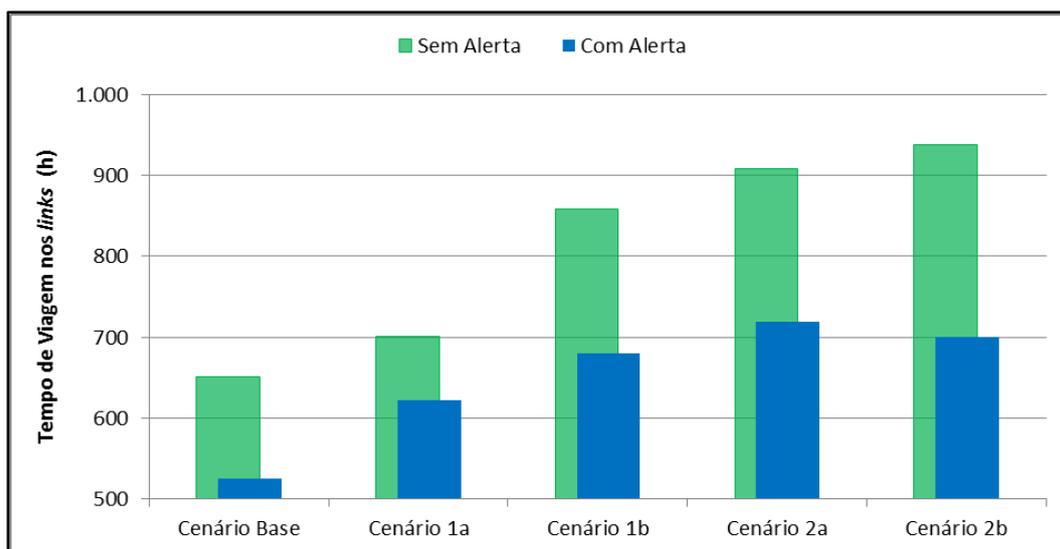


Figura 4.44: Comparativo entre os tempos de viagem dos cenários “Sem Alerta” e “Com Alerta”.

4.4.2 Comparativo entre impactos nos níveis de emissão de poluentes nos “links atingidos” para os cenários “Sem Alerta” e “Com Alerta”

Os impactos ambientais gerados pelos incidentes foram analisados a partir dos resultados obtidos nos “links atingidos”, e do número de reclamações realizadas pela população, obtido com a contagem dos links em que ocorreu o aumento das emissões em relação ao Cenário Base. Como pode ser observado na Figura 4.45, as simulações “Sem Alerta” apresentaram um aumento gradual das emissões totais de poluentes entre os cenários, explicado pela redução significativa de velocidade entre eles (U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 1994; ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2003; NILIM, 2003 *apud* WANGAPISIT *et al.*, 2014). Porém, nas simulações “Com Alerta”, foi observada a redução das emissões entre o Cenário Base e os cenários com chuva/inundação, explicada pela maior variação da quantidade de viagens apresentada nos casos “Com Alerta”. Portanto, o aumento da emissão de poluentes devido à redução da velocidade foi compensado pela redução dos níveis emissão devido ao menor número de viagens nos links. Ainda, comparativamente aos resultados obtidos em “Sem Alerta”, verifica-se uma redução média de 9% das emissões de poluentes entre os cenários (Figura 4.45).

Tal resultado confirma a eficácia do sistema de distribuição de alertas para a redução das emissões nas áreas atingidas por incidentes. No que tange o número de reclamações, estes não apresentam grandes variações entre os cenários “Sem Alerta” e “Com Alerta”. Em média, nos dois casos, 19% dos “links atingidos” apresentaram reclamações no final do dia simulado,

indicando que os sistemas de alerta, mesmo com a redução total de emissões, não influenciaram no total de reclamações realizadas pela população.

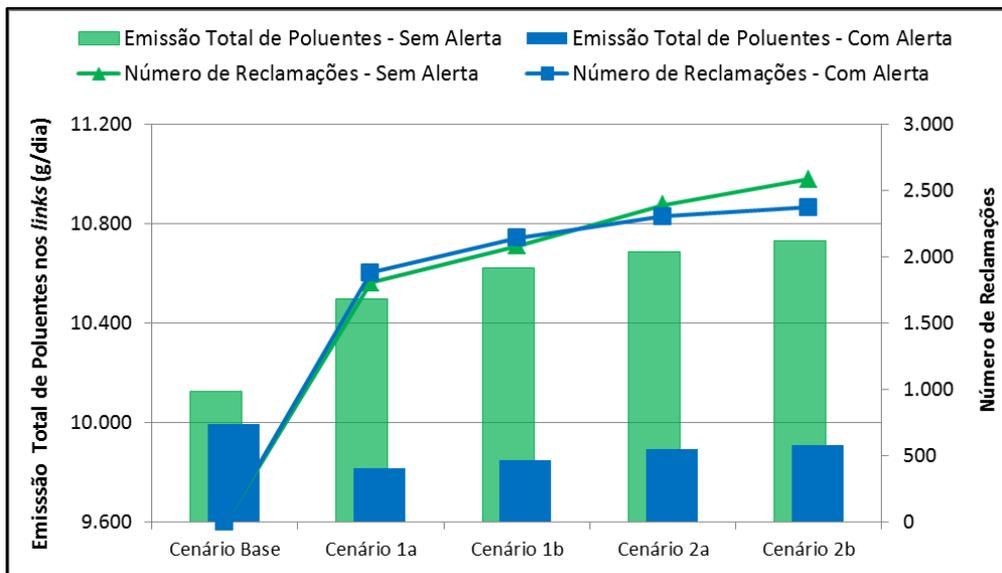


Figura 4.45: Comparativo entre as emissões de poluentes e reclamações dos cenários “Sem Alerta” e “Com Alerta”.

Como os níveis de emissão sofreram reduções, talvez seja esperado que o número de reclamações também diminua. Porém, é possível que em poucos *links* os níveis de emissão tenham reduzido de forma brusca e, na maioria, aumentado de forma não expressiva, fazendo com que o total das emissões diminuísse, enquanto, pelos pequenos acréscimos de emissões por *links*, o número de reclamações²⁹ aumentasse. Assim, sugere-se para futuras análises a determinação de um limite mínimo na detecção dos incrementos nas emissões de poluentes, de forma a descartar, na hora da contagem, os aumentos pouco expressivos de emissão. A análise para a rede completa não apresentou um resultado representativo.

4.4.3 Comparativo entre impactos econômicos para os cenários “Sem Alerta” e “Com Alerta”

No que tange os custos de combustível, tanto nas simulações “Sem Alerta”, quanto nas “Com Alerta” foi observado um acréscimo entre os respectivos cenários. Porém, nas simulações “Com Alerta”, observa-se maiores variações entre os cenários com incidentes e o Cenário Base.

²⁹ Como dito anteriormente, o número de reclamações da população é obtido pela contagem dos *links* onde ocorreu o aumento das emissões em relação ao Cenário Base, no final do dia simulado.

Ainda, comparativamente aos resultados obtidos “Sem Alerta” pode ser verificado um aumento nesses custos.

Como a menor rota já é definida para zero iteração (“Sem Alerta”), o replanejamento dos itinerários é realizado a partir dos trajetos com o menor tempo. Conseqüentemente, como pode ser observado na Figura 4.46, o tempo total de viagem diminui e a distância total percorrida aumenta para as simulações com mais iterações (“Com Alerta”) e, com isso, os custos do tempo de viagem sofrem decréscimos (em média 0,73%) e o de combustíveis (em média 0,66%), acréscimos entre os seus cenários (Figura 4.47 e Figura 4.48).

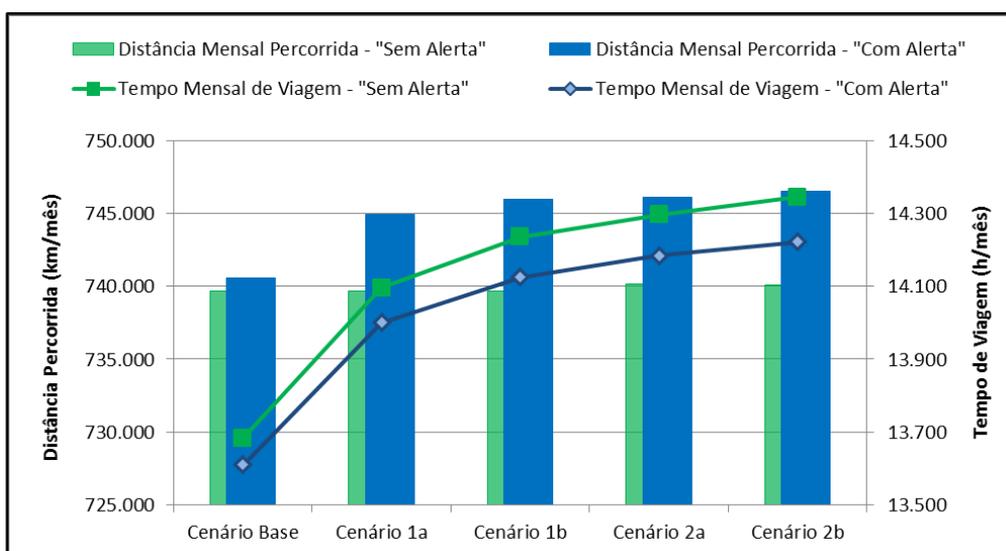


Figura 4.46: Comparativo entre as distâncias e tempos de viagem dos cenários “Sem Alerta” e “Com Alerta”.

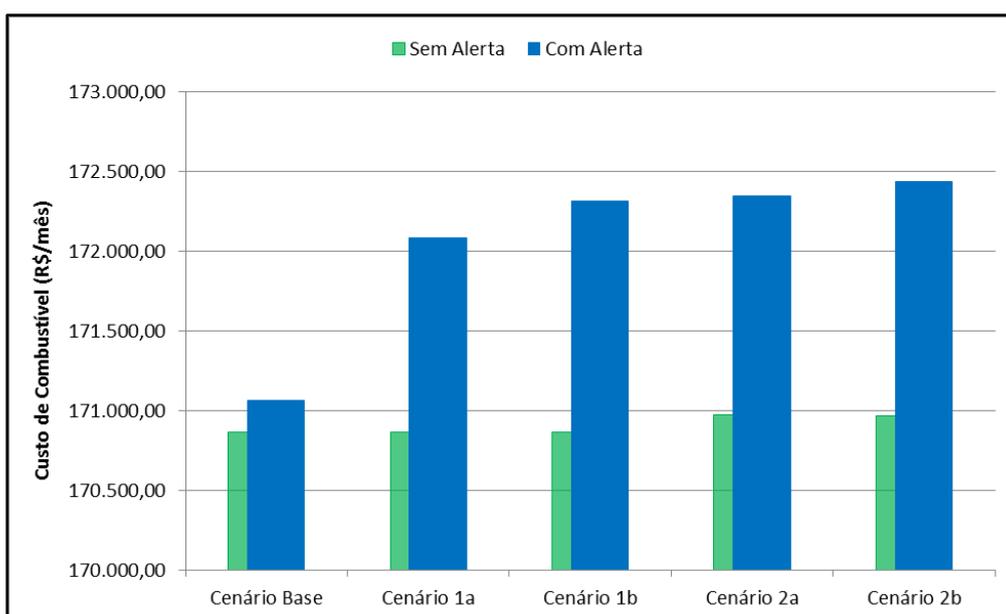


Figura 4.47: Comparativo entre os custos de combustível dos cenários “Sem Alerta” e “Com Alerta”.

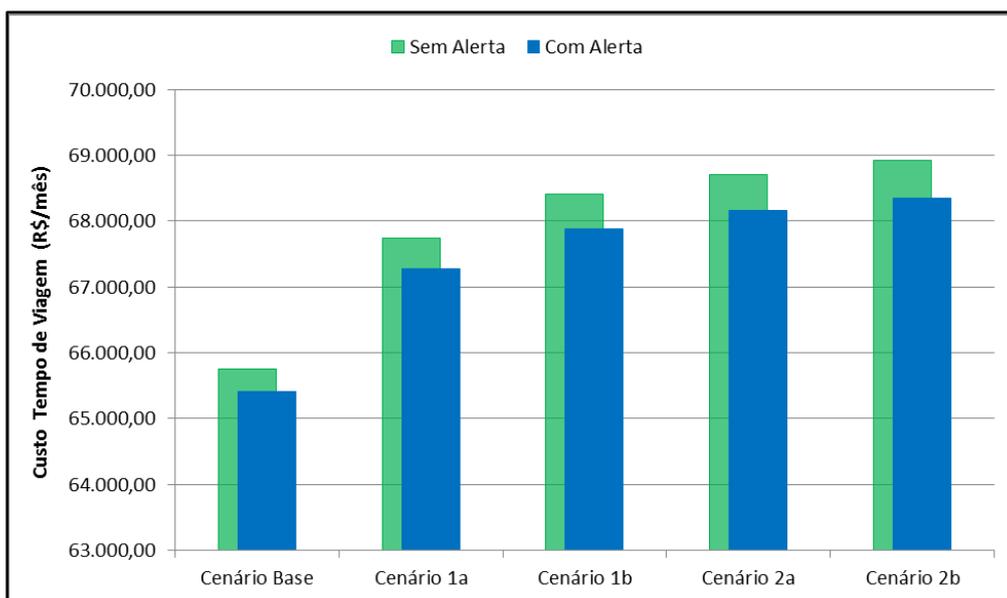


Figura 4.48: Comparativo entre os custos de tempo de viagem dos cenários “Sem Alerta” e “Com Alerta”.

Quanto aos níveis de emissão total de poluentes (NO_x e MP) dos transportadores, diferentemente da tendência observada nas análises realizadas por *links*, foi verificado um acréscimo nos cenários “Com Alerta” quando comparados aos “Sem Alerta” (Figura 4.49). Esse aumento pode ser justificado pelo aumento da distância das rotas realizadas pelos transportadores. Portanto, os custos ambientais, mesmo que pouco representativos, sofrem acréscimos nos cenários em que há a divulgação de alertas (0,34%).

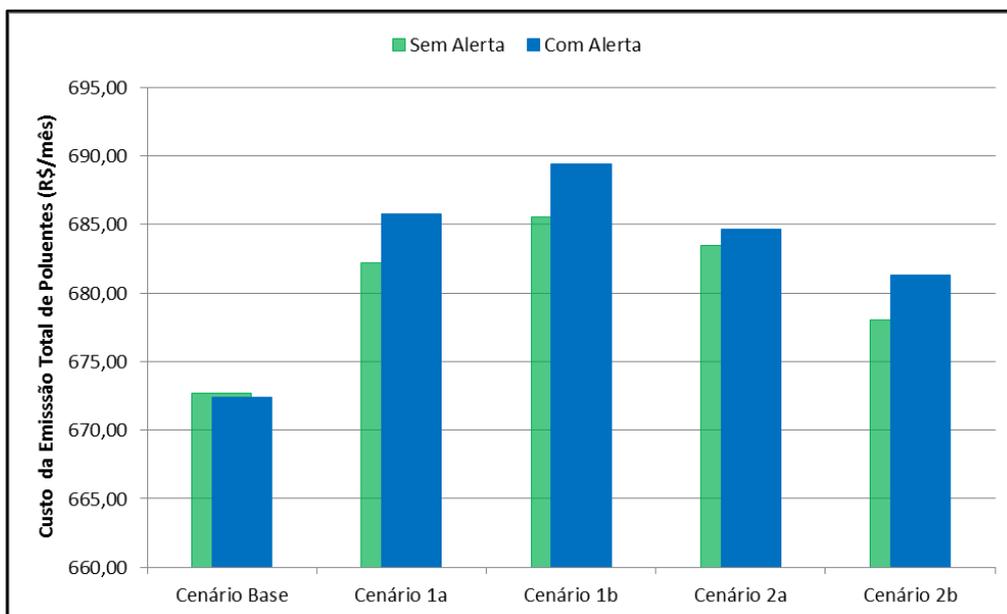


Figura 4.49: Comparativo entre os custos ambiental dos cenários “Sem Alerta” e “Com Alerta”.

4.4.4 Comparativo entre impactos nas entregas de mercadorias para os cenários “Sem Alerta” e “Com Alerta”

Como pode ser observado na Figura 4.50 e na Figura 4.51, os resultados dos cenários “Sem Alerta” e “Com Alerta” apresentaram um aumento gradual dos atrasos, considerando os “links atingidos” e “não atingidos”.

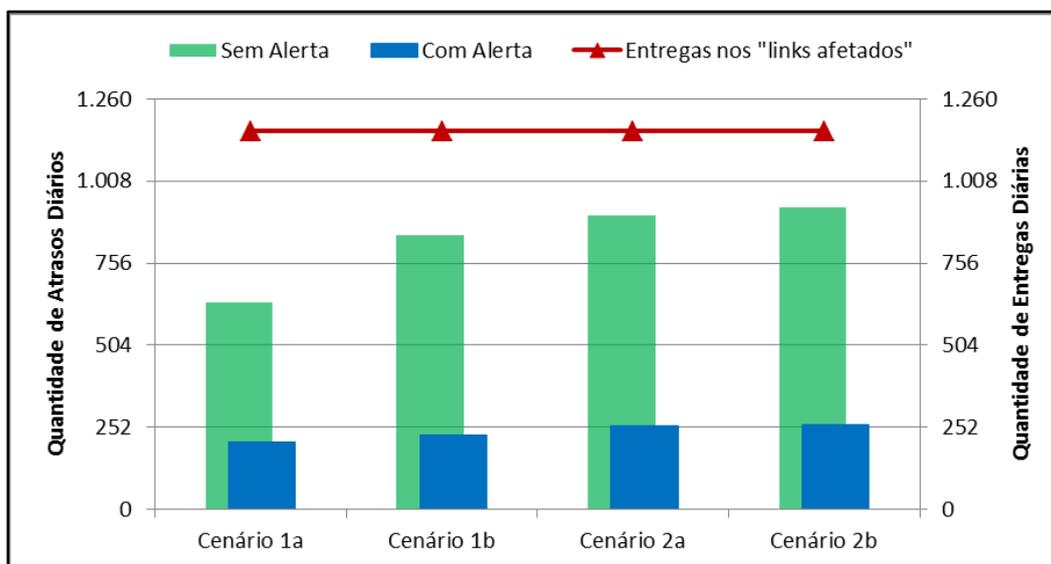


Figura 4.50: Comparativo entre a quantidade de atrasos diários dos cenários “Sem Alerta” e “Com Alerta” nos “links atingidos.”

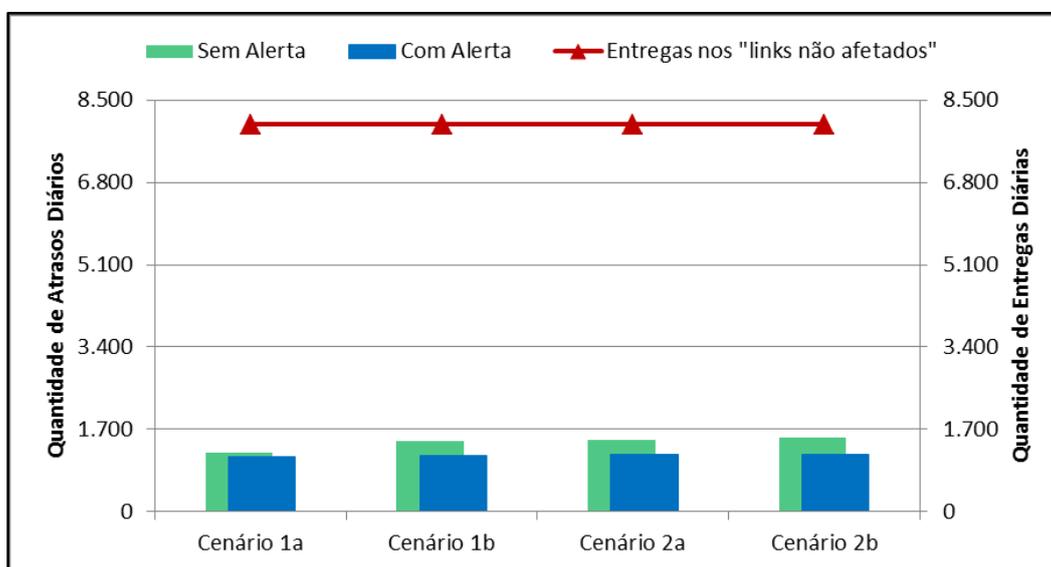


Figura 4.51: Comparativo entre a quantidade de atrasos diários dos cenários “Sem Alerta” e “Com Alerta” nos “links não atingidos.”

Para os “links atingidos” nos cenários “Sem Alerta”, percebe-se uma considerável redução do número de atrasos computados pelos comerciantes dos cenários “Com Alerta” (em média 71%).

Em relação ao número de entregas totais nas áreas afetadas (1.160 para os dois casos), o percentual de atrasos reduziu de 71% para 28% (Figura 4.50). Para os “links não atingidos”, mesmo em proporções menores, foram observadas as mesmas tendências (Figura 4.51). Tais resultados confirmam a eficácia do sistema de divulgação de alertas para a redução dos atrasos nas entregas diárias realizadas.

Ainda, foram realizadas investigações em relação ao número de entregas que foram deixadas de ser realizadas ao longo do dia. Os resultados acusaram que apesar dos atrasos já mencionados, nenhuma entrega deixou de ser efetivada. Para testar, então, o modelo, foram feitos alguns testes de sensibilidade considerando outros cenários com maiores períodos de inundação, por exemplo, de 07h – 19h, que apresentaram diferenças nas quantidades de mercadorias entregues ao longo do dia, confirmando o funcionamento do modelo. Esses dados, porém, não foram analisados com detalhes no corpo deste estudo, uma vez que, pelo histórico de inundações em Belo Horizonte, tal cenário (longo período de inundação – 12h) não representa uma situação real de incidente.

4.4.5 Principais conclusões do capítulo

Neste capítulo foram apresentados diversos resultados provenientes de simulações realizadas no modelo multiagente, construído a partir da base viária de Belo Horizonte, para avaliar a dinâmica da distribuição urbana de mercadorias ante a uma situação de vulnerabilidade. As investigações foram fundamentadas nos objetivos e comportamentos individuais dos agentes e os resultados foram apresentados em termos de impactos ambientais, financeiros e nas condições de tráfego na rede criada.

Os indicadores analisados correspondem a resultados específicos para cada agente. Nessa Subseção serão comparados, para os Cenários “Sem Alerta” e “Com Alerta”, os níveis de emissão de poluentes nos *links*, o número de reclamações provenientes dos Agentes “População”; os custos ambientais resultantes das emissões dos *links*, o custo de combustível e de tempo de viagem para os Agentes “Transportadores”; e a quantidade de atrasos de entregas provenientes das contagens dos Agentes “Comerciantes”. A medida do Agente “Administração Pública” foi a inserção de um sistema de divulgação de alertas para a redução dos impactos gerados. Os resultados estão apresentados na Figura 4.52, Figura 4.53, Figura 4.54 e Figura 4.55.

A Figura 4.52 e a Figura 4.53 apresentam os resultados provenientes das simulações em que não foi implementado o sistema de divulgação de alerta em casos de incidentes, como chuva e inundação. A referência para comparação são os indicadores encontrados no Cenário Base, aos quais foi atribuído o valor 1 para todos. Nas figuras que seguem, os valores encontrados são considerados satisfatórios quando são menores do que 1. Ressalta-se que como pouca variação foi observada nos “links não atingidos”, para esta análise foram considerados apenas os resultados para os “links atingidos” e para os transportadores que tenham passado nesses links em qualquer cenário e em qualquer número de iterações.

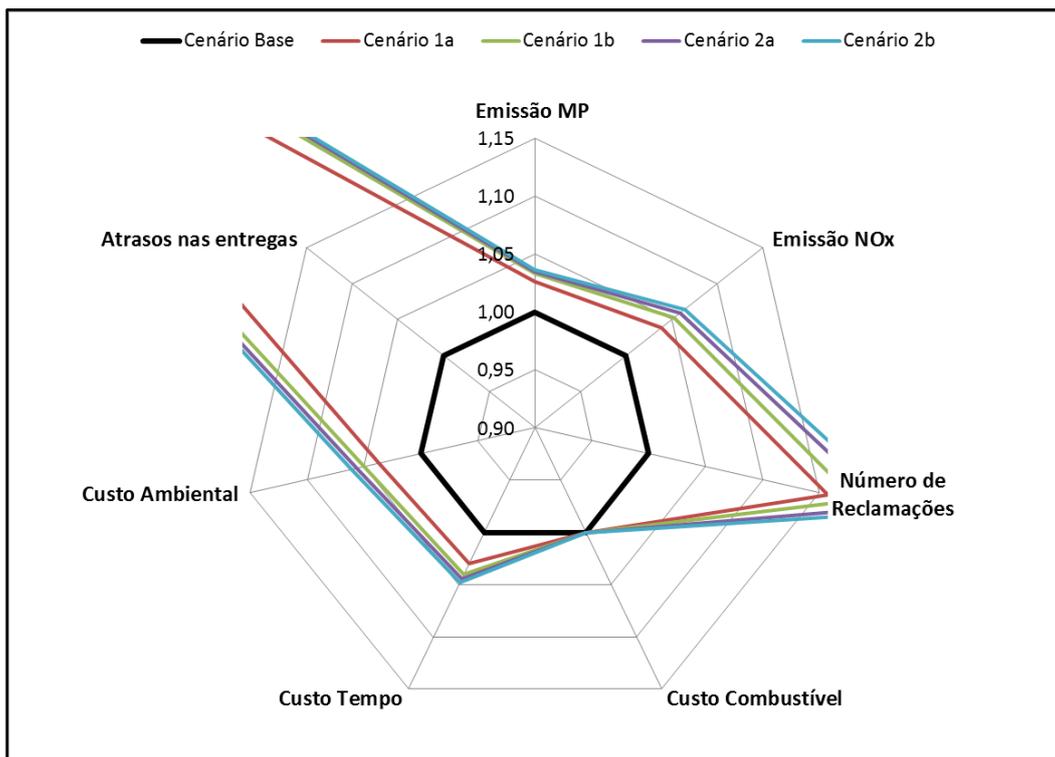


Figura 4.52: Resultados para todos os indicadores nos Cenários “Sem Alerta”.

Dessa forma, como pode ser observado, para todos os cenários simulados com zero iteração, ou seja, sem a adoção da medida mitigadora sugerida neste trabalho, todos os indicativos de emissão de poluentes, custos, reclamações e atrasos nas entregas pioram em relação ao Cenário Base. Mais especificamente, os dois últimos citados são os que mais pioram. A fim de melhorar a visualização dos outros indicativos, a Figura 4.53 reforça os resultados sem reclamações e atrasos.

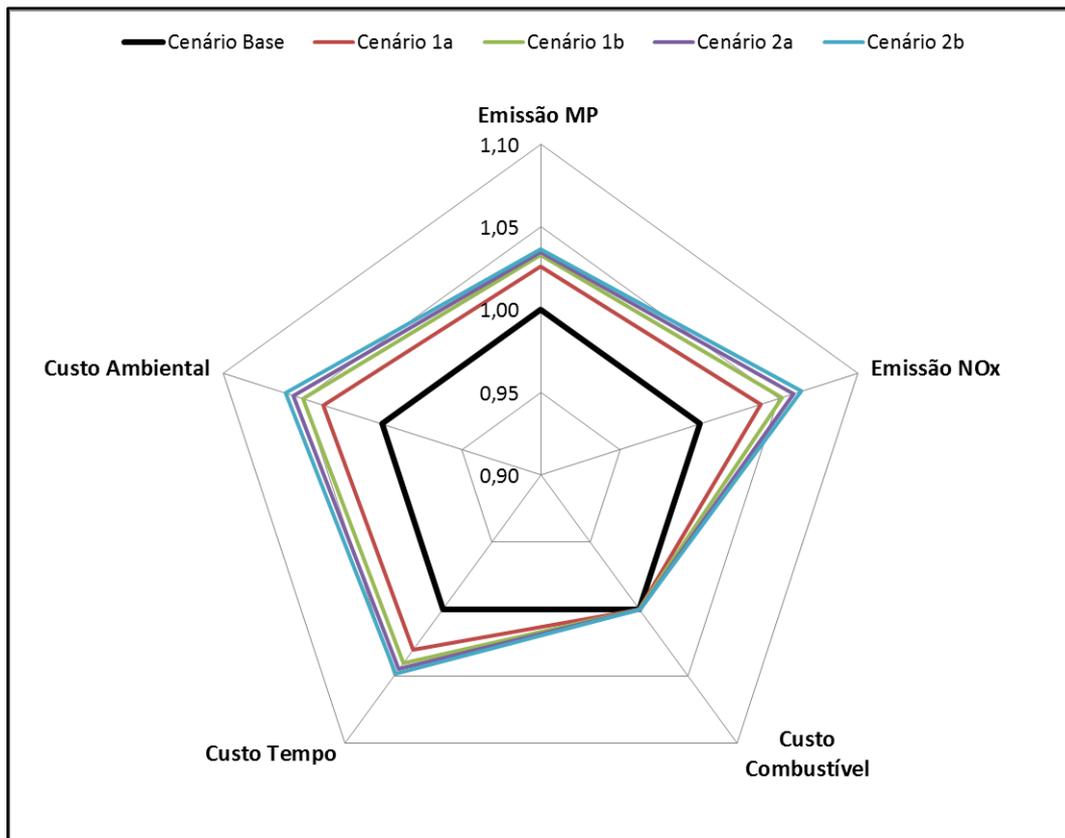


Figura 4.53: Resultados para os indicadores nos Cenários “Sem Alerta” (sem “atrasos de entrega” e “reclamações”).

A Figura 4.54 e a Figura 4.55 apresentam os resultados provenientes das simulações em que a Administração Pública implementou o sistema de divulgação de alerta em casos de incidentes, como chuva e inundação, como medida para redução de impactos. Dessa forma, com a adoção da medida mitigadora sugerida neste trabalho, os indicadores de custo de tempo de viagem e de combustível, assim como os números de atrasos nas entregas de mercadorias e de reclamações da população, pioram em relação ao Cenário Base. Todavia, os outros indicadores (i.e., custo ambiental e emissões ambientais) melhoram em relação ao Cenário Base. Ainda, na comparação entre o desempenho de tais indicadores com os encontrados nos cenários em que não foi implementado o sistema de alertas, nota-se que todos eles sofreram reduções. Assim, respondendo a problemática proposta no Capítulo 3³⁰, os resultados obtidos confirmam a eficácia do sistema de alertas em situações de vulnerabilidade.

³⁰ Vide subseção 3.1: “Até que ponto sistemas de alerta são eficientes na diminuição de impactos gerados pela inundação à logística urbana?”.

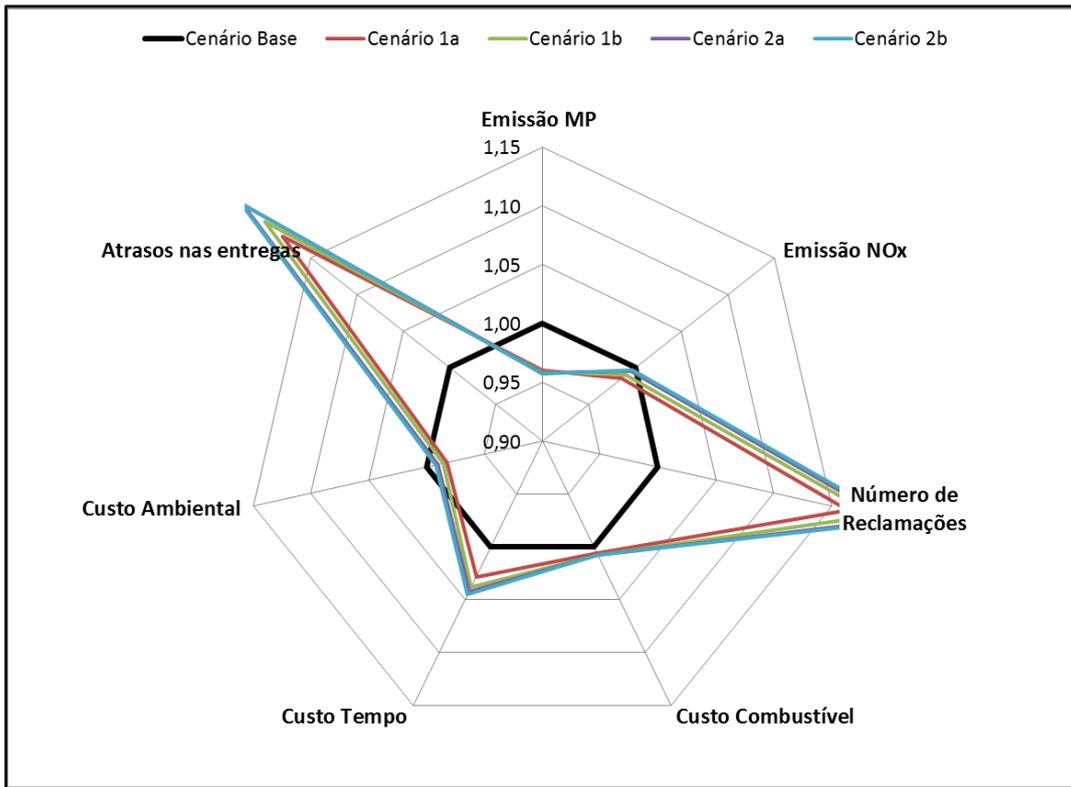


Figura 4.54: Resultados para todos os indicadores nos Cenários “Com Alerta”.

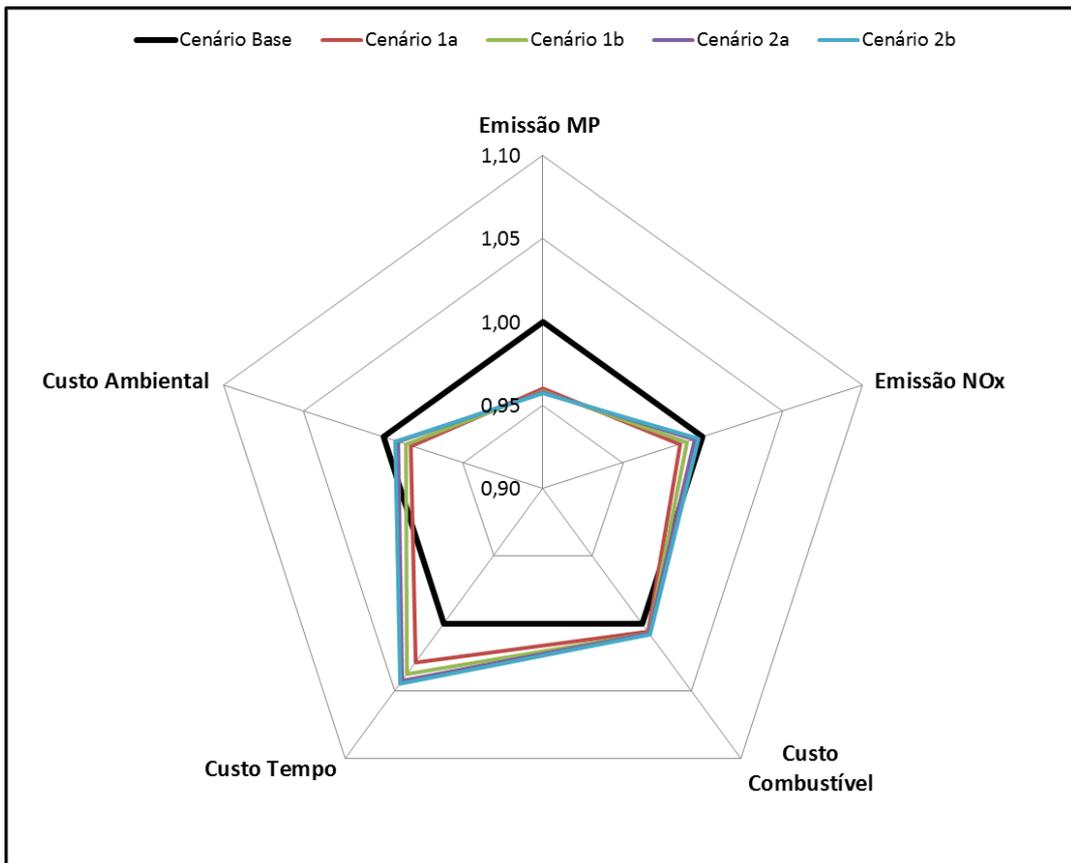


Figura 4.55: Resultados para os indicadores nos Cenários “Com Alerta” (sem “atrasos de entrega” e “reclamações”).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O principal objetivo deste trabalho foi avaliar a dinâmica da distribuição urbana de mercadorias ante uma situação de vulnerabilidade com o suporte de um modelo multiagente, construído a partir da base viária e características da cidade de Belo Horizonte (MG). Ainda, buscou-se, a partir do presente trabalho, criar e apresentar um arcabouço metodológico e conceitual multidisciplinar para análise do impacto de eventos naturais no transporte de mercadorias em áreas urbanas. Dessa forma, procurou-se estudar e compreender as três grandes temáticas que envolvem a pesquisa: logística urbana, vulnerabilidade e modelagem multiagente.

A fim de associar todas as definições envolvidas no estudo, foi construído um modelo multiagente no qual, a partir da definição das relações e comportamentos entre os agentes da logística urbana, foi possível investigar as perturbações de incidentes, como chuva e inundações, na distribuição urbana de mercadorias, assim como os impactos ambientais e econômicos gerados. A agregação dessas três temáticas (vulnerabilidade, modelagem multiagente e logística urbana) é uma lacuna na literatura, e de fato, não foram encontradas referências significativas.

Nos procedimentos metodológicos e de análise, foram verificados alguns pontos fundamentais, como a necessidade da disponibilidade/coleta e da confiabilidade dos dados, o encontro do equilíbrio entre os objetivos do trabalho e a capacidade computacional dos aplicativos de *software* e máquinas utilizadas e as dificuldades que envolvem a criação de um modelo multiagente, construído a partir do zero, que represente de forma coerente o ambiente que se quer estudar. Entretanto, a criação do modelo constitui-se em um espaço de aprendizagem, e a partir dele, dois outros grandes trabalhos de graduação foram originados.

As simulações realizadas possibilitaram verificar a consistência dos fundamentos teóricos adotados e a coerência das rotinas analíticas utilizadas na construção do modelo. Ainda, os resultados mostraram a viabilidade e potencialidade de aplicação dessa modelagem para análise de impactos dos incidentes e na análise de medidas voltadas à redução de seus impactos na perspectiva da logística urbana. Os indicadores analisados permitiram concluir que a medida de distribuição de alertas à população, desde que bem empregada, pode ser uma solução, em situações de incidentes, para a logística urbana.

Assim, a pesquisa abre um vasto campo para novos estudos. A metodologia utilizada para a criação do modelo permite criar agentes ainda mais complexos, com regras comportamentais mais dinâmicas associadas à percepção do ambiente. Pode-se ainda avançar no estudo, buscando-se uma maior integração entre a modelagem socioeconômica e a de tráfego, a fim de que possa ocorrer uma realimentação constante de informações. Desta forma, espera-se que os estudos realizados neste estudo tragam elementos para melhor compreensão dos processos complexos envolvendo a vulnerabilidade e a logística urbana.

Com os estudos desenvolvidos nesta dissertação, procurou-se explorar um tipo de modelagem pouco utilizada na análise de impactos ambientais e socioeconômicos, de forma a abrir um amplo campo de possibilidades para estudos futuros. Para a construção de tal modelo, definiu-se uma estrutura básica que pode ser continuamente aperfeiçoada. Em um horizonte de curto e médio prazo, o banco de dados e o modelo permitem avanços nas análises exploratórias, que não foram incorporadas na dissertação por limitações de práticas e tempo, tais como:

- Inserir algoritmos de calibração no modelo, para melhoria da precisão dos resultados;
- Analisar outras áreas inundáveis em Belo Horizonte;
- Analisar a propagação dos efeitos da inundação na cidade, para aprimoramentos e ajustes no modelo proposto. Um aspecto relevante que poderia ser estudado seria quanto tempo, após uma inundação, a cidade levaria para recuperar sua estrutura original;
- Determinar a relação entre a intensidade de precipitação e a redução da velocidade para cada tipo de classificação viária. Como esse não era o foco do trabalho, essa relação foi estimada com base em dados de estudos de direção defensiva e considerada empiricamente satisfatória, com base em observações, práticas e vivências do dia a dia;
- Melhorar a precisão dos dados utilizados, com o emprego de pesquisas mais atualizadas e/ou procedendo a coleta de dados.

O modelo desenvolvido abre inicialmente três grandes perspectivas para estudos futuros: o aprofundamento das análises de impactos de incidentes na logística urbana; a investigação de novas medidas para a redução dos impactos gerados por esses incidentes; e, extrapolando a temática do estudo, a avaliação de medidas públicas voltadas à logística urbana, como a criação de centros de distribuição, pedágio urbano, restrição de tráfego, entre outras. Abre-se, portanto, a possibilidade para colaboração mútua, troca de informações e de conhecimento científico envolvendo a problemática da logística urbana, a vulnerabilidade e a modelagem multiagente.

REFERÊNCIAS

- ABREU, B. R. A., LESSA, D. A., MIRANDA, L. L., OLIVEIRA, L. K. Avaliação da adesão a um sistema colaborativo de trânsito para a distribuição de mercadorias: um estudo exploratório em Belo Horizonte (MG). In: ANPET - CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, nov. 2014. *Anais do XXVIII ANPET*, Curitiba, v. Único, 2014.
- ALEXANDER, D. Principles of emergency planning and management. Harpenden: Terra Publishing, 2002.
- ANAND, N.; VAN DUIN, R.; TAVASSZY, L. Multi-agent Modeling for city logistics policy analysis: potentials and challenges. Proceedings of The 45th Annual Conference Transportation and Logistics Trends and Policies: Successes and Failures. p. 582-596, 2010.
- ANDERSON, S.; ALLEN, J.; BROWNE, M. Urban logistics: how can it meet policy makers sustainability objectives? *Journal of Transport Geography*, v. 13, p. 71-81, 2005.
- ANTP. Restrição à circulação de veículos de carga em Belo Horizonte. In: 57º FORUM MINEIRO DE GERENCIADORES DE TRANSPORTES E TRÂNSITO, mar. 2013, Araxá.
- ARANGO, M. D. A. S.; SERNA, C. A. U.; ALVAREZ, K. C. U. Collaborative autonomous systems in models of urban logistics. *Dyna*, v. 79, p. 171-179, 2012.
- AXTELL, R. L.; EPSTEIN, J. M.; DEANS, J. S.; GUMERMAN, G. J.; SWEDLUND, A.; HARBURGER, J.; CHAKRAVARTY, S.; HAMMOND, R.; PARKER, J.; PARKER, M. Population Growth and Collapse in a Multiagent Model of the Kayenta Anasazi in Long House Valley. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 99, p. 7275-7279, 2002.
- BALLOU, R. H. Business logistics: importance and some research opportunities. *Gestão & Produção*, v. 4, n. 2, p. 117-129, 1997.
- BANCO MUNDIAL. Pump price for diesel fuel (US\$ per liter). 2014. Disponível em: <<http://data.worldbank.org/indicator/EP.PMP.DESL.CD/countries>>. Acesso 09 jun. 2015.
- BAZZAN, A; KLÜG, F. Agents in traffic and transportation: Exploring autonomy in logistics, management, simulation, and cooperative driving. *Transportation Research Part C*, v. 13, p. 251-254, 2005.
- BELO HORIZONTE. Bacias hidrográficas de Belo Horizonte. 2008. Disponível em <http://www.pbh.gov.br/smpl/HTA_M005.pdf>. Acesso em 08 jun. 2015.

- BELO HORIZONTE. Empresa de Transportes e Trânsito de Belo Horizonte (BHTRANS). Pesquisas de Contagem Classificada Volumétrica de Veículos. 2015.
- BELO HORIZONTE. Plano diretor de drenagem de Belo Horizonte: desafios na implantação do sistema de monitoramento hidrológico e alerta contra inundações. In: WORKSHOP GESTÃO DAS ÁGUAS PLUVIAIS NA RMBH, mar. 2012, Belo Horizonte. Disponível em: <<http://www.sme.org.br/arquivos/pdf/WorkshopRicardoAroeira.pdf>>. Acesso em 24 jun. 2015.
- BELO HORIZONTE. Prefeitura Municipal de Belo Horizonte. Cadastro Municipal de Contribuintes. 2011.
- BELO HORIZONTE. Prefeitura Municipal de Belo Horizonte. Plano municipal de saneamento de Belo Horizonte 2008/2010: Atualização 2010. 2010. Disponível em: <http://www.pbh.gov.br/comusa/VolumeI_Texto.pdf>. Acesso em 24 jun. 2015.
- BELO HORIZONTE. Secretaria Municipal de Serviços Urbanos. Empresa de Transportes e Trânsito de Belo Horizonte (BHTRANS). Portaria BHTRANS DPR nº 077/2014 de 25 de junho de 2014. Diário Oficial do Município, Poder Executivo, 25 de junho de 2014.
- BELO HORIZONTE. Secretaria Municipal de Serviços Urbanos. Empresa de Transportes e Trânsito de Belo Horizonte (BHTRANS). Portaria BHTRANS DPR nº 138/2009 de 18 de dezembro de 2009. Diário Oficial do Município, Poder Executivo, 18 de dezembro de 2009.
- BELO HORIZONTE. Superintendência de Desenvolvimento da Capital (SUDECAP). Carta de inundações de Belo Horizonte: identificação de áreas potencialmente suscetíveis. 2009. Disponível em: <http://portalpbh.pbh.gov.br/pbh/ecp/comunidade.do?evento=portlet&pIdPlc=ecpTaxonomiaMenuPortal&app=sudecap&lang=pt_BR&pg=5581&tax=17792> . Acesso em 04 mai. 2015.
- BENJELLOUN, A.; CRAINIC, T. G. Trends, challenges, and perspectives in city logistics. Buletinul AGIR, n. 4, p. 45-51, 2009.
- BOGARDI, J. J. Introduction. In: BIRKMANN, J. Measuring vulnerability to natural hazards: Towards disaster resilient. United Nations University Press, Tokyo, New York, Paris, 2006. Cap. 1, p. 1-6.
- BONATTI, R. A. *Desenvolvimento de modelo para a gestão de sistemas de trânsito em situações de contingência de inundações*. 2011. 172 p. Dissertação, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2011.
- BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). *Manual de estudos de tráfego*. 2006. 388 p.

- BRASIL. Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN). *Estatística da Frota*. 2015. Disponível em <<http://www.denatran.gov.br/frota.htm>>. Acesso em 08 jun. 2015.
- BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). *Censo demográfico 2010: população estimada 2014. 2010*. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=310620>>. Acesso em 08 jun. 2015.
- BRASIL. *Lei nº 9.503* de 23 de setembro de 1997. Institui o Código de Trânsito Brasileiro. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 24 de setembro de 1997, p. 21201.
- BRASIL. Ministério da Integração Nacional: Secretaria de Defesa Civil. *Manual de planejamento em defesa civil*. 1999. 69 p.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. *Inventário nacional de emissões atmosféricas por veículos automotores rodoviários*. 2011. 114 p.
- BROWNE, M.; PIOTROWSKA, M.; WOODBURN, A.; ALLEN, J. *Literature Review WM9: Part I - Urban Freight Transport*. Green Logistics Project. University of Westminster, London, 2007.
- BROWNE, M.; SWEET, M.; WOODBURN, A.; ALLEN, J. *Urban freight consolidation centers*. Londres: University of Westminster, 2005. 190 p. Relatório de pesquisa.
- CANÇADO, V. L. *Consequências econômicas das inundações e vulnerabilidade: desenvolvimento de metodologia para avaliação do impacto nos domicílios e na cidade*. 417 p. Tese. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.
- CARVALHO, J. A. *Uma contribuição ao planejamento do transporte de cargas em áreas urbanas*. 1998. 113 p. Dissertação, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, 1998.
- CHAMBERS, R. Editorial introduction: vulnerability, coping and policy. *Ids Bulletin*, v. 20, n. 2, p. 1-7, 1989.
- CHARDON, A. A geographic approach of the global vulnerability in urban area: case of Manizales, Colombian Andes. *GeoJournal*, n. 49, p. 197–212, 1999.
- CORREIA, V. A., OLIVEIRA L. K., ABREU, B. R. A. Modelo para avaliar a adesão de transportadores e varejistas em relação à utilização de um centro de distribuição urbano. In: ANPET - CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, nov. 2010. *Anais do XXIV ANPET*, Salvador, v. Único, 2010a.

- CORREIA, V. A.; OLIVEIRA L. K.; MATEUS, G. R. Perspectivas para a melhoria da distribuição urbana de mercadorias. In: ANPET - CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, nov. 2010, Salvador. *Anais do XXIV ANPET*, Salvador, v. Único, 2010b.
- CRAINIC, T. G.; RICCIARDI, N.; STORCHI, G. Advanced freight transportation systems for congested urban areas. *Transportation Research Part C*, v. 12, p. 119-137, 2004.
- CRAINIC, T. G.; RICCIARDI, N.; STORCHI, G. Models for Evaluating and Planning City Logistics Systems. *Transportation Science*, v. 43, n. 4, p. 432-454, 2009.
- CZERNIAK, R. J.; LAHSENSE, J. S.; CHATTERJEE, A. *Urban freight movement: What form Will it take? A1B07: Committee on Urban Goods Movement*, Chair: Janice S. Lahsene, Transportation Research Board, 2000.
- DABLANC, L. *Freight transport for development toolkit: Urban Freight*. Washington: Transport Research Support: The World Bank, 2009. 50 p. Relatório.
- DABLANC, L. Goods transport in large European cities: Difficult to organize, difficult to modernize. *Transportation Research Part A*, v. 41, p. 280-285, 2007.
- DABLANC, L.; RODRIGUE, J. P. City Logistics: towards a global typology. In: TRANSPORT RESEARCH ARENA, 2014, Paris. *Proceedings of TRA 2014*, Paris, 2014.
- DAVIDSSON, P.; HENESEY, L.; RAMSTEDT, L.; TÖRNQUIST, J.; WERNSTEDT, F. An analysis of agent-based approaches to transport logistics. *Transportation Research Part C*, v. 13, p. 255-271, 2005.
- DELOR, F.; HUBERT, M. Revisiting the concept of “vulnerability”. *Social science & Medicine*, v. 50, p. 1557-1570, 2000.
- DIJKSTRA, E. W. *Note on two problems in connexion with graphs*. *Numerische Mathematik I*, p. 269-271, 1959.
- DOTTA, A. *O condutor defensivo*. Porto Alegre: Ed. Sagra, 1998 *apud* YABIKU, L. *Pedestre: modalidade de transporte na cidade uma visão ergonômica*. 2006. 419 p. Tese, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- DOW, K. Exploring differences in our common future(s): The meaning of vulnerability to the global environmental change. *Geoforum*, v. 23, n. 3, p. 417-436, 1992.
- DUTRA, N. G. S. *O enfoque de “city logistics” na distribuição urbana de encomendas*. 2004. 229 p. Tese. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.
- EHMKE, J. F. City Logistics. In: EHMKE, J. F. *Integration of information and optimization models for routing in city logistics*. Nova York: Springer, 2012. Cap. 2, p. 9-22.

- EMERGENCY MANAGEMENT AUSTRALIA. *Disaster Loss Assessment Guidelines*. State of Queensland and Commonwealth of Australia: Department of Emergency Services, 2002. 101 p. Relatório. Disponível em: < <https://www.em.gov.au/Documents/Manual27-DisasterLossAssessmentGuidelines.pdf>>. Acesso em 11 mai. 2015.
- EMERGENCY MANAGEMENT AUSTRALIA. *Manual 3: Australian Emergency Management Glossary*. State of Queensland and Commonwealth of Australia: Department of Emergency Services, 1998. 150 p. Relatório. Disponível em: <<https://www.em.gov.au/Documents/Manual03-AEMGlossary.PDF>>. Acesso em 11 mai. 2015.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. MOBILE6.2, 2003. Disponível em: < <http://www3.epa.gov/otaq/m6.htm>>. Acesso em 21 set. 2015.
- EPSTEIN, J. M. *Generative Social Science*. Princeton: Princeton University Press, 2006.
- EUROPEAN COMMISSION. *COST 321: Urban Goods Transport. Final Report of Action*. Luxembourg : Directorate General Transport, 1998. 110 p. Relatório.
- FELDMAN, A. D. Assessment of Forecast Technology To Flood Control Operation. In ROSSI, G.; HARMANCIOGLU, N.; YEVJEVICH, V. *Coping With Floods*. Colorado: NATO ASI Series, 1994. cap. 20, p 445-458.
- FERREIRA, F. *Dynamic Response Recovery Tool for Emergency Response within State Highway Organizations in New Zealand*. 2010. 217 p. Tese, University of Canterbury, Canterbury, UK, 2010.
- FONSECA, J. J. S. *Metodologia da pesquisa científica*. Fortaleza: UEC, 2002. Notas de Aula.
- LIMA JÚNIOR, O. F. A carga na cidade: hoje e amanhã. *Revista dos Transportes Públicos – ANTP*, n. 100, p. 219-230, 2003.
- FOX, M. S.; BARBUCEANU, M.; TEIGEN, R. Agent-oriented supply-chain management. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, v. 12, n. 2, p. 165-188, 2000.
- GEOFABRIK. *Download OpenStreetMap data for this region: Brazil*. Geofabrik Downloads. Disponível em: <<http://download.geofabrik.de/south-america/brazil.html>>. Acesso em 17 jun. 2015.
- GIL, A. C. *Metodologia do ensino superior*. 4.ed. São Paulo: Atlas, 2006. 128 p.
- GONZALEZ-FELIU, J.; ROUTHIER, J-L. Modeling urban goods movement: how to be oriented with so many approaches? *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, v. 39, p. 89-100, 2012.

- GREEN, C. Evaluating vulnerability and resilience in flood management. In: NEDIES WORKSHOP IN SEARCH OF A COMMON METHODOLOGY ON DAMAGE ESTIMATION, mai. 2003, Holanda. *Workshop proceedings*, Holanda, maio 2003.
- GREEN, C. The Evaluation of Vulnerability to Flooding. *Disaster Prevention and Management*, v. 13, n. 4, p. 323-329, 2004.
- GREEN, C.H.; PARKER D.J.; TUNSTALL, S.M. Assessment of Flood Control and Management Options. Thematic Review IV.4. Cape Town: WORLD COMMISSION ON DAMS (WCD), nov. 2000, 183 p. Relatório de trabalho *apud* CANÇADO, V. L. *Consequências econômicas das inundações e vulnerabilidade: desenvolvimento de metodologia para avaliação do impacto nos domicílios e na cidade*. 2009. 417 p. Tese, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.
- HANNEMAN, R.; RIDDLE M. *Introduction to social network methods*. Riverside, CA: University of California, Riverside, 2005. 322 p.
- HOLGUÍN-VERAS, J.; PATIL, G. R. A multicommodity integrated freight origin-destination synthesis model. *Networks and Spatial Economics*, v. 8, p. 309-326, 2008.
- HOSSAIN, M. S.; DAVIES, C. G. A GIS to Reduce Flood Impact on Road Transportation Systems. In: ESRI INTERNATIONAL USER CONFERENCE. San Diego, California, 2004
- HUGENBUSCH, D. *Simulation of Evacuation Scenarios Using MATSim: Case Study on Hamburg*. 2012. 75 p. Monografia, University of Kiel, Alemanha, 2012.
- HUHNS, M. N.; SINGH, M. P. *Readings in agents*. San Francisco, Califórnia: Morgan Kaufmann, 1997. 523 p.
- IPEA; ANTP. Redução das deseconomias urbanas pela melhoria do transporte público. *Revista dos transportes Públicos (ANTP)*, v. 21, p. 35-92, 1999.
- JENNINGS, N. R. Controlling cooperative problem solving in industrial multi-agent systems using joint intentions. *Artificial Intelligence*, v. 75, n. 2, p. 195-240, 1995.
- JENNINGS, N. R. Coordination Techniques for DAI. In: O'HARE, G.; JENNINGS, N R. (Eds.). *Foundations of distributed artificial intelligence*. John Wiley and Sons, 1996. cap.6.
- JIAO, J.; YOU, X.; KUMAR, A. An agent-based framework for collaborative negotiation in the global manufacturing supply chain network. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, v. 22, p. 239-255, 2006.
- JUNQUEIRA, L. Logística de carga urbana: uma visão impressionista. *Revista dos Transportes Públicos – ANTP*, n.93, p. 43-50, 2001.

- KRON, W.; THUMERER, T. *Water-related Disasters: Loss Trends and Possible Countermeasures from a (Re-)Insurers Point of View*. Munich Reinsurance Company, Germany *apud* NAGEM, F. R. M. *Avaliação econômica dos prejuízos causados pelas cheias urbanas*. 2008. 125 p. Dissertação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2008.
- LANG, N.; MOONEN, H.; SROUR, F.; ZUIDWIJK, R. Multi agent systems in logistics: A literature and state-of-the-art review. *ERIM Report Series Research in Management*, 69p. 2008.
- LEANING, J. Disasters and Emergency Planning. *International Encyclopedia of Public Health*, p. 204-215, 2008 *apud* SCHREINER, S. A. Urban transport and logistics in case of natural disasters. In: TANIGUCHI, E.; FWA, T.; THOMPSON, G. *Urban Transportation and Logistics: Health, Safety, and Security Concerns*. Kyoto: CRC Press, 2013. cap. 9, p. 1-16.
- LEITAO, P. Agent-based distributed manufacturing control: A state-of-the-art survey. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, v. 22, n. 7, p. 979 -991, 2009.
- LESSA, J. F. *Manual para normalização de publicações técnico-científicas*. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2006.
- LINDHOLM, M.; S. BEHREND. Challenges in urban freight transport planning: a review in the Baltic Sea Region. *Journal of Transport Geography*, v. 22, p. 129-136, 2012.
- MANCHAND, M. *Modelling Coastal Vulnerability*. Design and evaluation of a vulnerability model for tropical storms and floods. 2009. 259 p. Tese, Universidade Técnica de Delft, Holanda, 2009.
- MARTINS, R. A. Abordagens quantitativa e qualitativa. In: MIGUEL, P. A. C. (Ed.). *Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012. cap. 3, p. 47-63.
- MATSIM. *Agent-Based Transport Simulations*. Disponível em: <<http://www.matsim.org/>>. Acesso em 15 jun. 2015.
- MINAS GERAIS. *Relatório final e banco de dados completo da Pesquisa Origem-Destino 2012 da Região Metropolitana de Belo Horizonte*. 2012. Disponível em: <<http://www.rmbh.org.br/pt-br/repositorio/municipios/pesquisa-origem-destino-od-2012-rmbh>>. Acesso em 08 jun. 2015.
- MORABITO NETO, R.; PUREZA, V. Modelagem e simulação. In: MIGUEL, P. A. C. (Ed.). *Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012. cap. 8, p. 169-198.

- NAGEM, F. R. M. *Avaliação econômica dos prejuízos causados pelas cheias urbanas*. 2008. 125 p. Dissertação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2008.
- NASCIMENTO, N. O. *Escopo para a elaboração do plano de contingência de inundações para a Bacia Hidrográfica do Ribeirão Arrudas*. UFMG, Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos, Belo Horizonte, 2011. Rev. 1
- NILIM. *Qualitative appraisal index calculations used for basic unit for computation of CO₂, NO_x and SPM*. 2003 (in Japanese) *apud* WANGAPISIT, O.; TANIGUCHI, E.; TEO, J. S. E.; QURESHI, A. G. Multi-agent systems modelling for evaluating joint delivery systems. *Procedia Social and Behavioral Sciences*, v. 125, p. 472-483, 2014.
- NOORTMAN, H. J. Goods distribution in urban areas. In: EUROPEAN CONFERENCE OF MINISTERS OF TRANSPORTE. *Goods distribution systems in urban areas: Report of the 61st Round Table on Transport Economics*. Paris, pp. 5-64, 1984.
- NOVAES, A. G. N. (2001) *Logística e gerenciamento da cadeia de distribuição*. Editora Campus, Rio de Janeiro. 424 p.
- NTC & Logística. *Planilhas referenciais de custo do transporte rodoviário de cargas*. 2013.
- OGDEN, K. W. *Urban goods movement: a guide to policy and planning*. Inglaterra: Editora Ashgate, 1992. 397 p.
- OLIVEIRA, E.; PORTUGAL, L.; PORTO, W. Determining critical links in a road network: vulnerability and congestion indicators. *Procedia Social and Behavioral Sciences*, v. 162, p. 158-167, 2014a.
- OLIVEIRA, L. K. Diagnosis of loading and unloading spaces for urban freight distribution: a case study in Belo Horizonte. *Journal of Transport Literature*, v. 8, n. 1, pp. 178-209, 2014a.
- OLIVEIRA, L. K. *Técnicas de pesquisa*. Belo Horizonte: UFMG, 2014b. Notas de Aula.
- OLIVEIRA, L. K. Uma revisão sistemática da literatura científica em logística urbana no Brasil. In: ANPET - CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, nov. 2013, Belém. *Anais XXVII ANPET*, Belém, novembro 2013.
- OLIVEIRA, L. K.; OLIVEIRA JUNIOR, A. C.; NASCIMENTO, N. O.; SCHREINER, S. Use of simulation for assessment of natural disaster: a case study of flooding in Belo Horizonte (Brazil). In: WCTR, 13, 2013, Rio de Janeiro, Brasil. *Proceedings of the 13th WCTR*, Rio de Janeiro, 2013.
- OLIVEIRA, L. K.; OLIVEIRA, R. P.; CORREIA V. A de. Simulation of an Urban Logistic Space for the Distribution of Goods in Belo Horizonte, Brazil. *Procedia Social and Behavioral Sciences*, v. 125, p. 496-505, 2014b.

- OPENSTREETMAP. *OpenStreetMap*. Disponível em: <<http://www.openstreetmap.org/>>. Acesso em 17 jun. 2015.
- ORGANIZAÇÃO PARA COOPERAÇÃO ECONÔMICA E DESENVOLVIMENTO – OECD. *21st century challenges to urban goods transports*. Paris: OECD Working Group on Urban Freight Logistics, 2003. 153 p. Relatório.
- ORTÚZAR, J. D.; WILLUMSEN, L. G. *Modelling Transport*. 4 ed. Chichester: Wiley, 2011. 608 p.
- OSSOWSKI, S.; HERNANDEZ, J. Z.; BELMONTE, M-V.; FERNANDEZ, A.; GARCIA-SERRANO, A.; PEREZ-DE-LA-CRUZ, J-L.; SERRANO, J-M.; TRIGUERO, F. Decision support for traffic management based on organizational and communicative multiagente abstractions. *Transportation Research Part C*, v.13, p. 272-298, 2005.
- PARKER, D. J.; GREEN, C.H.; THOMPSON, P.M. *Urban Flood Protection Benefits: a Project Appraisal Guide*. Gower Technical Press Ltda, England, 1987.
- PARUNAK, H. V. D.; SAVIT, R.; RIOLO, R. L. Agent-Based Modeling vs. Equation Based Modeling: a case study and users' guide. In: MULLTI-AGENT SYSTEMS AND AGENT- BASED SIMULATION (MABS'98), LNAI, 1998, Springer. *Proceedings Springer*, 1998, p. 10-25.
- PATIER, D.; BROWNE, M. A methodology for the evaluation of urban logistics Innovations. *Procedia Social and Behavioral Sciences*, v. 2, p. 6229-6241, 2010.
- PAUL, R. J.; HLUPIC, V. The CASM environment revisited. In: SOCIETY FOR COMPUTER SIMULATION, 1994, San Diego, Los Angeles. *Proceedings 27th Winter Simulation Conference*, 1994, p. 641- 648.
- PELLING, M. *The vulnerability of the cities: Natural disasters and social resilience*. 1ª ed. Gateshead, UK: Earthscan Publications Ltd, 2003. 219 p.
- PETROBRAS. *Comparativo dos preços ao consumidor em vários países: preços internacionais de diesel*. 2014. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/produtos-e-servicos/composicao-de-precos/diesel/>>. Acesso em: 09 jun. 2015.
- PIDD, M.; EGGLESE, R.; NISHAKUMARI, F. S. da. CEMPS: A prototype spatial decision support system to aid in planning emergency evacuations *Transactions in GIS*, v. 1, n. 4, p. 321 – 334, 1997.
- PINHEIRO JUNIOR, D. A. *Colaboração em sistemas multiagentes na roteirização dinâmica de veículos: um método para avaliação de estratégias em empresas OEM*. 2014. 179p. Tese, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

- PINHEIRO, M. M. G., NAGHETTINI, M. Análise regional de frequência e distribuição temporal das tempestades na Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH). *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* (RBRH), v. 3, n. 4, p. 73 – 88, 1998.
- PRATA, B. de A.; ARRUDA, J. B. F. Avaliação do Transporte de Cargas na Cidade de Fortaleza sob o Enfoque da Logística Urbana: Diagnóstico e Proposição de Intervenções. In: ANPET - CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, nov. 2007, Rio de Janeiro. *Anais do XXI ANPET*, Rio de Janeiro, nov. 2007.
- QUISPEL, M. Active partnerships: the key to sustainable urban freight transport. In: EUROPEAN CONFERENCE ON MOBILITY MANAGEMENT – ECOMM, mai. 2002, Gent. *Anais do 6th ECOMM*, Gent, maio 2002.
- REINO UNIDO. *Key Performance Indicators for the Next-day Parcel Delivery Sector: Freight Best Practice*. Department for Transport, 2006. 21 p. Relatório de Pesquisa.
- RIESER, M.; DOBLER, C.; DUBERNET, T.; GREYER, D.; HORNI, A.; L'AMMEL, G.; WARAICH, R.; ZILSKE, M.; AXHAUSEN, K. W.; NAGEL, K. *MATSim User Guide*. MATSim, 2015. 65 p.
- RODRIGUE, J. P. COMTOIS, C.; SLACK, B. *The geography of transport systems*. 3 ed. New York: Routledge, 2013. 432 p.
- RODRIGUES, R. F. de; SOUZA, P. S. de. Asynchronous Organizations for Multi-Algorithm Problems. In: 5th WORKSHOP OF THE DGOR-WORKING GROUP, 1995, Germany. *Proceedings of the 5th Workshop of the DGOR-Working Group "Multicriteria Optimization and Decision Theory"*, Germany, 1995.
- ROORDA, M.; CAVALRCANTE, R.; MCCABE, S.; KWAN, H. A conceptual framework for agent-based modeling in logistics services. *Transportation Research Part E*, v. 46, p. 18-31, 2010.
- ROUTHIER, J. *Urban goods transport modelling with FRETURB*, Séminaire MATAARI, Aix-en-Provence, 2006 *apud* VAN KOLCK, A. *Multi-agent model for the urban distribution center*. 2010. 199p. Master Thesis, Delft University of Technology, Delft, 2010.
- SAWYER, R. *Social emergence: societies as complex systems*. Nova York: Cambridge University Press, 2005. 276 p.
- SCHREINER, S. A. Urban transport and logistics in case of natural disasters. In: TANIGUCHI, E.; FWA, T.; THOMPSON, G. *Urban Transportation and Logistics: Health, Safety, and Security Concerns*. Kyoto: CRC Press, 2013. cap. 9, p. 1-16.
- SCOTT, D. M.; NOVAK, D.C.; AULTMAN-HALL, L.; GUO, F. Network Robustness Index: A new method for identifying critical links and evaluating the performance of transportation networks. *Journal of Transport Geography*, v. 14, n. 3, p. 215-227, 2006.

- SILVESTRINI, P. *Estudo da vulnerabilidade logística do Mercado Central de Belo Horizonte*. 2013. 38 p. Monografia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.
- SINAY, M. C. F. de; CAMPOS, V. B. G.; DEXHEIMER, L.; NOVAES, A. G. Distribuição de carga urbana: componentes, restrições e tendências. In: RIO DE TRANSPORTES II, 2004, Rio de Janeiro. *Anais do Rio de Transportes II*, Rio de Janeiro, v. Único, 2004.
- SWAMINATHAN, J. M.; SMITH, S. F.; SADEH, N. M. Modeling supply chain dynamics: A multiagent approach. *Decision Sciences*, v. 29, n. 3, p. 607-632, 1998.
- TAMAGAWA, D.; TANIGUCHI, E.; YAMADA, T. Evaluating city logistics measures using multi-agent model. *Procedia Social and Behavioral Sciences*, v. 2, p. 6002-6012, 2010.
- TANIGUCHI, E.; HEIJDEN, R. E. C. M. V. D. An evaluation methodology for city logistics. *Transport Reviews*, v. 20, n. 1, p. 65-90, 2000.
- TANIGUCHI, E.; TAMAGAWA D. Evaluating city logistics measures considering the behavior of several stakeholders. *Journal of Eastern Asia Society for Transportation Studies*, v. 6, p. 3062-3076, 2005.
- TANIGUCHI, E.; THOMPSON, R. G. *Innovations in freight transport*. Southampton: WIT Press, 2003. 203 p.
- TANIGUCHI, E.; THOMPSON, R. G.; YAMADA, T. Data collection for modelling, evaluating and benchmarking city logistics schemes. In: 4th INTERNATIONAL CONFERENCE ON CITY LOGISTICS, jul. 2005, Langkawi, Malásia. *Proceedings of the 4th International Conference on City Logistics*, Langkawi, 2006.
- TANIGUCHI, E.; THOMPSON, R. G.; YAMADA, T. Emerging techniques for enhancing the practical application of city logistics models. *Procedia Social and Behavioral Sciences*, v. 39, p. 3-18, 2012.
- TANIGUCHI, E.; THOMPSON, R. G.; YAMADA, T.; VAN DUIN, R. *City Logistics: Network modelling and intelligent transport systems*. First ed. Netherlands: Pergamon, 2001. 252 p.
- TANIGUCHI, E.; THOMPSON, R.; YAMADA, T. Modelling the behaviour of stakeholders in City Logistics. In: TANIGUCHI, E.; TOMPSON, R. G. *Innovations in City Logistics*. Nova Science Publishers, Inc., 2008. cap. 1.
- TANIGUCHI, E.; YAMADA, T.; OKAMOTO, M. A multi-agent modelling for evaluating dynamic vehicle routing and scheduling systems. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, v. 7, p. 933-948, 2007.
- TEO, J. S. E. Multi-agent Modelling of Freight Policies under Network Uncertainty. *KURENAI - Kyoto University Research Information Repository*. P. 152 – 156, 2015.

- TEO, J. S. E.; TANIGUCHI, E.; QURESHI, A. G. Evaluating city logistics measure in e-commerce with multi-agent systems. *Procedia Social and Behavioral Sciences*, v. 39, p. 249-359, 2012.
- TEO, J. S. E.; TANIGUCHI, E.; QURESHI, A. G. Evaluation of Load Factor Control and Urban Freight Road Pricing Joint Schemes with Multi-agent Systems Learning Models. *Procedia Social and Behavioral Sciences*, v. 125, p. 62-74, 2014.
- TOMAS, P. Período de Retorno. In: TOMAS, P. *Cálculos hidrológicos para obras municipais*. Cap. 3, 2010.
- TONUCCI FILHO, J. B. M. *Dois momentos do planejamento metropolitano em Belo Horizonte: um estudo das experiências do PLAMBEL e do PDDI-RMBH*. 2012. 236 p. Dissertação, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2012.
- TRIOLA, M. F. *Introdução à estatística*. 7 ed. Rio de Janeiro: LTC S.A., 1999. 412 p.
- UNITED NATIONS POPULATION FUND – UNFPA. *State of world population 2007: Unleashing the potential of urban growth*. Nova York: UNFPA, 2007. 108p. Relatório.
- U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Automobile Emissions: An Overview*. Fact Sheet OMS-5, 1994.
- VAN DUIN, J. H. R.; TAVASSZY, L.; TANIGUCHI, E. Real time simulation of auctioning and re-scheduling processes in hybrid freight markets, *Transportation Research Part B*, v. 41, p. 1050–1066, 2007.
- VAN DUIN, J. H. R.; VAN KOLCK, A.; ANAND, N.; TAVASSZY, L. A., TANIGUCHI, E. Towards an agent-based modelling approach for the evaluation of dynamic usage of urban distribution centres. *Procedia Social and Behavioral Sciences*, v. 39, p. 333-348, 2012.
- VAN KOLCK, A. *Multi-agent model for the urban distribution center*. 2010. 199p. Master Thesis, Delft University of Technology, Delft, 2010.
- VLEUGEL, J. Modelling goods city distribution in the Netherlands, *European Transport*, n. 28, p. 20-33, 2004.
- WANGAPISIT, O.; TANIGUCHI, E.; TEO, J. S. E.; QURESHI, A. G. Multi-agent systems modelling for evaluating joint delivery systems. *Procedia Social and Behavioral Sciences*, v. 125, p. 472-483, 2014.
- WISETJINDAWAT, W.; ITO, H.; FUJITA, M.; HIDESHIMA, E. Modeling Disaster Response Operations including Road Network Vulnerability. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, v. 10, p. 196-214, 2013.

- WISSETJINDAWAT, W.; SANO, K.; MATSUMOTO, S. Supply chain simulation for modeling the interactions in freight movement. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, v. 6, p. 2991-3004, 2005.
- WISNER, B.; BLAIKIE, P.; CANNON, T.; DAVIS, I. *At Risk: natural hazards, people's vulnerability and disasters*. 2. ed. Londres, Nova York: Routledge Taylor & Francis Group, 2004. 471 p.
- WOLPERT, S.; REUTER, C. Status quo of city logistics in scientific literature systematic review. *Transportation Research Record*, n. 2269, p. 110-116, 2012.
- WOOLDRIDGE, M. *An Introduction to MultiAgent Systems*. 1 ed. John Wiley & Sons, 2002, 348 p.
- WOOLDRIDGE, M.; JENNINGS, N. R. Intelligent Agents: Theory and Practice. *The Knowledge Engineering Review*, v.10, n.2, p.115–152, 1995.
- WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT – WBCSD. *Mobility 2001: world mobility at the end of the twentieth century and its sustainability*, Genebra, 2001. 188 p. Relatório.
- YABIKU, L. *Pedestre: modalidade de transporte na cidade uma visão ergonômica*. 2006. 419 p. Tese, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- YEVJEVICH, V. Technology for coping with floods in the 21st century. In: ROSSI, G.; HARMANCIOGLU, N.; YEVJEVICH, V. *Coping With Floods*. Colorado: NATO ASI Series, 1994. cap. 3, p 35-43.
- ZEIGLER, B. P. *Theory of Modelling and Simulation*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1976.
- ZONENSEIN, J. *Índice de Risco de Cheia como Ferramenta de Gestão de Enchentes*. 2007. 105 P. Dissertação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2007.

APÊNDICE A – SUREWAY!

O SUREWAY! é um aplicativo, fruto de um concurso realizado pelo Ministério da Comunicação, cujo objetivo é o de dar suporte às atividades relacionadas à logística urbana, por meio da criação de um Sistema Colaborativo para Transportadores (SCT). A proposta de criação do aplicativo enviada ao Ministério da Comunicação é derivada de pesquisa de campo que visava criar uma inovação ao transporte urbano de cargas, de modo a melhorar a mobilidade urbana.

O SUREWAY! é uma plataforma computacional que permite o acesso a informações relevantes e úteis atualizadas em tempo real, que podem ser armazenadas em um dispositivo móvel. Entre as funcionalidades do aplicativo, destacam-se:

- Localização de vagas de carga e descarga;
- Indicação das áreas com restrição veicular³¹;
- Informes sobre uma região de interesse (divulgadas por órgãos oficiais por meio do *Twitter* e páginas *web* com RSS);
- Informações de caráter educativo com o intuito de conscientizar os transportadores em relação a assuntos cotidianos, como inspeção técnica veicular, direção defensiva, meio ambiente, etc.

³¹ Vide as Portarias BHTRANS - DPR N° 138/2009 (18 de dezembro de 2009) e DPR N° 077/2014 (25 de junho de 2014) (BELO HORIZONTE, 2009; BELO HORIZONTE, 2014).