

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Engenharia

Curso de Mestrado em Geotecnia e Transportes

Paulo Henrique Fernandes Fonseca

**ANÁLISE DO EFEITO CAUSAL DAS RESTRIÇÕES AOS VEÍCULOS DE CARGA
EM CIDADES BRASILEIRAS**

Belo Horizonte

2024

Paulo Henrique Fernandes Fonseca

**ANÁLISE DO EFEITO CAUSAL DAS RESTRIÇÕES AOS VEÍCULOS DE CARGA
EM CIDADES BRASILEIRAS**

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

Orientadora: Profa. Dra. Leise Kelli de Oliveira

Belo Horizonte

2024

F676a

Fonseca, Paulo Henrique Fernandes.

Análise do efeito causal das restrições aos veículos de carga em cidades brasileiras [recurso eletrônico] / Paulo Henrique Fernandes Fonseca. – 2024.

1 recurso online (71 f. : il., color.) : pdf.

Orientadora: Leise Kelli de Oliveira.

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

Bibliografia: f. 70-71.

1. Transportes – Teses. 2. Transporte de materiais – Teses. 3. Trânsito – Fluxo – Belo Horizonte (MG) – Teses. 4. Trânsito – Fluxo – São Paulo (SP) – Teses. 5. Caminhões – Rotas – Teses. 6. Teoria bayesiana de decisão estatística – Processamento de dados – Teses. I. Oliveira, Leise Kelli de. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 656(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
COLEGIADO DO CURSO DE MESTRADO EM GEOTECNIA E TRANSPORTES

FOLHA DE APROVAÇÃO

ANÁLISE DO EFEITO CAUSAL DAS RESTRIÇÕES AOS VEÍCULOS DE CARGA EM CIDADES BRASILEIRAS

PAULO HENRIQUE FERNANDES FONSECA

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 24 de setembro de 2024, pela banca constituída pelos membros:

Prof.^a. Leise Kelli de Oliveira - Orientadora (UFMG)

Prof.^a. Letícia Dexheimer (UFPEl)

Prof.^a Ligia Rabay Mangueira Araújo (UFPE)

Belo Horizonte, 24 de setembro de 2024.



Documento assinado eletronicamente por **Leise Kelli de Oliveira, Professora do Magistério Superior**, em 25/09/2024, às 08:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ligia Rabay Mangueira Araújo, Usuário Externo**, em 26/09/2024, às 15:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Letícia Dexheimer, Usuário Externo**, em 26/09/2024, às 18:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3575445** e o código CRC **386BF6DE**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter abençoado, iluminado e direcionado o meu caminho.

À minha esposa, companheira e incentivadora, Vívian, pela paciência, apoio, auxílio, compreensão e cuidado comigo e com a nossa família, especialmente durante os períodos que estive ausente para desenvolver este trabalho.

Aos meus filhos Henrique e Augusto, por serem os principais motivos da minha busca por maiores propósitos de vida e por serem as principais razões para eu continuar me desenvolvendo como pessoa e profissional.

À minha mãe Maria Helena e à toda minha família e amigos pelo incentivo e ajuda. Em especial à Tereza Beatriz (Bia) e ao Túlio, pela ajuda no processo de inscrição e matrícula no mestrado.

À minha orientadora Prof.^a Dr.^a Leise Kelli de Oliveira, pelos ensinamentos, paciência e confiança, durante a construção deste trabalho que me orgulho tanto, pois foi a realização de um grande sonho.

À Mineração Usiminas, pelo incentivo à realização deste mestrado.

E finalmente aos demais professores, funcionários e colegas da UFMG, que de alguma forma contribuíram nessa minha jornada.

A todos vocês, muito obrigado!

RESUMO

As restrições aos veículos de carga foram medidas amplamente adotadas por cidades brasileiras para minimizar os efeitos de congestionamentos, poluição do ar e acidentes. No entanto, poucos estudos avaliaram a efetividade e os impactos de tais medidas no contexto brasileiro. Neste sentido, esta dissertação tem por objetivo analisar os efeitos causais das restrições à circulação de veículos de carga nas frotas de caminhões e utilitários nas cidades das regiões metropolitanas de Belo Horizonte e São Paulo. A metodologia utilizada para estimar os efeitos causais foi o modelo bayesiano estrutural de series temporais, utilizando as variações dos perfis de veículos de janeiro/2006 a dezembro/2022. Os resultados indicam que, em Belo Horizonte, a variabilidade da frota de caminhões reduziu em 30% enquanto a da frota de utilitários aumentou em 136%. Em São Paulo, a variabilidade da frota de caminhões reduziu em 213% enquanto a da frota de utilitários aumentou em 72%. Quando são analisadas todas as cidades das regiões metropolitanas, os resultados indicam que a variabilidade da frota de caminhões das cidades da região metropolitana de Belo Horizonte reduziu em 19% enquanto a da frota de utilitários aumentou em 147%. Em todas as cidades da região metropolitana paulista, a variabilidade da frota de caminhões reduziu em 63% enquanto a da frota de utilitários aumentou em 80%. Portanto, conclui-se que as restrições aos veículos de carga contribuíram para alterar os perfis das frotas de veículos de carga das cidades pertencentes às regiões metropolitanas de Belo Horizonte e São Paulo, aumentando as variabilidades dos perfis. Além disso, os resultados indicam um potencial impacto negativo na mobilidade urbana, visto o aumento significativo do número de veículos nas frotas municipais. Veículos de carga de menor capacidade não contribuíram para reduzir o congestionamento e poluição, uma vez que o aumento das frotas nas áreas analisadas foi verificado.

Palavras-chave: transporte urbano de carga; restrição aos veículos de carga; efeito causal; modelo bayesiano estrutural de séries temporais.

ABSTRACT

Freight vehicle restrictions were measures widely adopted by Brazilian municipalities to minimize the effects of congestion, air pollution, and accidents. However, few studies have evaluated the effectiveness and impacts of such measures in the Brazilian context. In this sense, this project aims to analyze the causal effects of freight vehicle restrictions on the fleet (light freight vehicles and heavy freight vehicles) in the municipalities of the metropolitan regions of Belo Horizonte and São Paulo. To this end, causal effects were identified through the estimation of a Bayesian structural time series model. Variations in city vehicle fleets were used from January 2006 to December 2022. In the Belo Horizonte metropolitan area, the results indicate that the variability of the heavy truck fleet was reduced by 30% while that of the light truck fleet increased by 136% in Belo Horizonte. In other municipalities in the metropolitan regions, the variability of the heavy truck fleet reduced by 19% while that of the light truck fleet increased by 147%. In São Paulo, the variability of the heavy truck fleet was reduced by 213% while that of the light truck fleet increased by 72%. In other municipalities in the São Paulo metropolitan area, the variability of the heavy truck fleet was reduced by 63% while that of the light truck fleet increased by 80%. Therefore, it is concluded that the restriction of the freight vehicle had contributed to change the fleet profile of the freight vehicle. Furthermore, the results indicate a potential negative impact on urban mobility, given the significant increase in the number of vehicles in municipal fleets. As decarbonization policies are still in the incipient in Brazil, freight vehicles smaller have not contributed to reducing congestion and pollution, as the increase in the fleet in the areas analyzed was verified.

Keywords: urban freight transport; freight vehicle restriction; causal effect; bayesian structural time series model

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Procedimento de seleção da literatura	17
Figura 2 - Procedimento de seleção da literatura	24
Figura 3 - Evolução das frotas de caminhões nos municípios da RMBH de 2006 a 2022.....	29
Figura 4 - Frota de Caminhões nas Cidades da RMBH em 2006 (em cima) e 2022 (embaixo)	31
Figura 5 - Evolução das frotas de utilitários nos municípios da RMBH de 2006 a 2022	34
Figura 6 - Frota de Utilitários nas Cidades da RMBH em 2006 (em cima) e 2022 (embaixo)	35
Figura 7 - Evolução das frotas de caminhões nos municípios da RMSP de 2006 a 2022.....	39
Figura 8 - Frota de Caminhões nas Cidades da RMSP em 2006 (em cima) e 2022 (embaixo)	40
Figura 9 - Evolução das frotas de utilitários dos municípios da RMSP de 2006 a 2022	43
Figura 10 - Frota de Utilitários nas Cidades da RMSP em 2006 (em cima) e 2022 (embaixo)	44
Figura 11 - Fluxograma dos procedimentos adotados nesta pesquisa.....	47
Figura 12 - Evoluções das médias de precipitações em Belo horizonte e São Paulo de 2006 a 2022	49
Figura 13 - Evoluções das médias das temperaturas em Belo horizonte e São Paulo de 2006 a 2022	50
Figura 14 - Efeitos Absolutos dos Caminhões (em cima) dos Utilitários (embaixo) da RMBH	54
Figura 15 - Efeitos Relativos dos Caminhões (em cima) dos Utilitários (embaixo) da RMBH	55

Figura 16 - Efeitos Absolutos dos Caminhões (em cima) dos Utilitários (embaixo) da RMSP	
.....	59

Figura 17 - Efeitos Relativos dos Caminhões (em cima) dos Utilitários (embaixo) da RMSP	60
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Impactos das restrições aos veículos de carga e seus respectivos tipos de efeitos..	21
Tabela 2 - Aplicações do modelo Bayesiano Estrutural de Séries Temporais (BEST) no Transporte Urbano de Cargas (TUC), Logística e Transporte	26
Tabela 3 – Consolidado dos aumentos das frotas de caminhões nos municípios da RMBH de 2006 a 2022 (continua)	32
Tabela 4 – Consolidado dos aumentos das frotas de caminhões nos municípios da RMBH de 2006 a 2022 (conclusão).....	33
Tabela 5 – Consolidado dos aumentos das frotas de utilitários nos municípios da RMBH de 2006 a 2022 (continua)	36
Tabela 6 – Consolidado dos aumentos das frotas de utilitários nos municípios da RMBH de 2006 a 2022 (conclusão).....	37
Tabela 7 – Consolidado dos aumentos das frotas de caminhões nos municípios da RMSP de 2006 a 2022 (continua)	41
Tabela 8 – Consolidado dos aumentos das frotas de caminhões nos municípios da RMSP de 2006 a 2022 (conclusão).....	42
Tabela 9 – Consolidado dos aumentos das frotas de utilitários nos municípios da RMSP de 2006 a 2022 (continua)	45
Tabela 10 – Consolidado dos aumentos das frotas de utilitários nos municípios da RMSP de 2006 a 2022 (conclusão).....	46
Tabela 11 - Efeitos causais das restrições na frota de caminhões das cidades da RMBH	56
Tabela 12 - Efeitos causais das restrições na frota de utilitários das cidades da RMBH	57

Tabela 13 - Efeitos causais globais das restrições na frota de caminhões das cidades da RMBH	58
Tabela 14 - Efeitos causais globais das restrições na frota de utilitários das cidades da RMBH	58
Tabela 15 - Efeitos causais das restrições na frota de caminhões das cidades da RMSP	61
Tabela 16 - Efeitos causais das restrições na frota de utilitários das cidades da RMSP	62
Tabela 17 - Efeitos causais globais das restrições na frota de caminhões das cidades da RMSP	63
Tabela 18 - Efeitos causais globais das restrições na frota de utilitários das cidades da RMSP	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BEST	Bayesiano Estrutural de Séries Temporais
BHTRANS	Empresa de Transportes e Trânsito de Belo Horizonte
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
RMBH	Região Metropolitana de Belo Horizonte
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
SENATRAM	Secretaria Nacional de Trânsito
TUC	Transporte Urbano de Cargas
WCI	World Container Index
ZRCM	Zona de Restrição de Circulação Máxima

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos do trabalho	14
1.2	Justificativa e relevância	15
2	REVISÃO DA LITERATURA	16
2.1	Impactos das restrições aos veículos de carga	16
2.1.1	Procedimento da revisão da literatura.....	16
2.1.2	Conclusão da revisão da literatura	20
2.2	Aplicações do Método Bayesiano de Séries Temporais	23
2.2.1	Procedimento da revisão da literatura.....	23
2.2.2	Conclusão da revisão da literatura	26
3	MÉTODO DE TRABALHO.....	28
3.1	Caracterização da Área de Estudo.....	28
3.1.1	Belo Horizonte.....	28
3.1.2	São Paulo	37
3.2	Modelo Bayesiano de Série Temporal Estrutural	47
5	RESULTADOS	53
5.1	Discussão dos Resultados	63
6	CONCLUSÃO.....	67
	REFERÊNCIAS	69

1 INTRODUÇÃO

As restrições aos veículos de carga são medidas amplamente utilizadas por cidades em todo o mundo com o objetivo de minimizar os efeitos dos congestionamentos, acidentes e poluição do ar. No Brasil, a restrição aos veículos de carga é uma medida sugerida como solução para a mobilidade urbana de carga na Política Nacional de Mobilidade Urbana (BRASIL, 2012).

Os principais problemas associados ao transporte urbano de cargas são congestionamentos, condições de infraestrutura das vias precárias e inadequadas operações de carga/descarga, devido a fatores relacionados ao tamanho dos veículos de carga, a saturação dos níveis de tráfego, falhas de projeto e pavimentação ruim. Além disso, existem conflitos entre as atividades urbanas e a distribuição de mercadorias, gerando externalidades sociais, ambientais e econômicas. Soluções para melhorar a eficiência do transporte de carga devem levar em conta a melhoria da mobilidade, qualidade de vida da população e sustentabilidade (DE OLIVEIRA; DE OLIVEIRA, 2017). O aumento de congestionamentos tem pressionado a criação de políticas públicas, dentre elas as restrições de circulação de veículos de carga. O principal alvo de tais restrições é o transporte realizado por caminhões, uma vez que este tipo de veículo é maior, mais lento e utiliza mais faixas e espaços para estacionamento (BONTEMPO et al., 2014).

Como as medidas de restrições aos veículos de carga podem ter diferentes regras, dependendo da cidade e do país, os seus respectivos impactos também são diversos. Usualmente, as restrições aos caminhões são aplicadas no Brasil em áreas centrais das cidades, em rodovias com competição entre caminhões pesados e carros, em horários de picos, com relação ao tipo de carga, ao tamanho do veículo e aos horários de estacionamento para carga/descarga (BONTEMPO et al., 2014).

TANIGUCHI *et al.* (2014) afirmam que medidas de gerenciamento do transporte rodoviário de cargas são utilizadas para melhorar a segurança, a economia e reduzir os impactos ambientais gerados por sua operação. Tais medidas incluem questões estruturais e não estruturais, tais como construção de rodovias e alocação dos fluxos de veículos para rotas desejadas. Os fluxos de veículos de carga causam uma grande variedade de problemas. Porém, a proibição destes veículos não é uma atitude realista, considerando a sua importância para a manutenção das

atividades econômicas. Portanto, é necessária a discussão de alternativas para mitigar tais problemas.

No Brasil, as operações de carga, descarga e estacionamentos devem ser regulamentadas pelos municípios (BRASIL, 1997). Porém, restringir veículos de carga nem sempre é uma solução que gera melhorias na mobilidade urbana. Além disso, apesar de ser uma medida amplamente difundida no Brasil, não foram encontrados muitos estudos que avaliam a efetividade das medidas de restrição aos veículos de carga.

Este estudo adotou como pergunta de pesquisa se as restrições aos veículos de carga em cidades brasileiras podem interferir na variabilidade das frotas de caminhões e utilitários emplacados por mês. Logo, foi definida como hipótese que as restrições aos veículos de carga contribuíram para o aumento da variabilidade das frotas de caminhões e utilitários na própria cidade em que foram implementadas as restrições, ou seja, Belo Horizonte e São Paulo, e nas demais cidades das regiões metropolitanas destas duas cidades.

1.1 Objetivos do trabalho

Diante do exposto, o objetivo geral desta dissertação é analisar o efeito causal das restrições de circulação de veículos de carga nas frotas de caminhões e utilitários das cidades das regiões metropolitanas de Belo Horizonte e São Paulo. Para alcançar este objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Identificar as variabilidades mensais das frotas de caminhões e utilitários das cidades das regiões metropolitanas de Belo Horizonte e São Paulo;
- Estimar, por meio do modelo Bayesiano de séries temporais, os resultados das variabilidades das frotas de caminhões e utilitários, com os cenários real (com restrição aos veículos de carga) e fictício (sem restrição aos veículos de carga), nas cidades das regiões metropolitanas de Belo Horizonte e São Paulo;
- Analisar os resultados do efeito causal das medidas de restrição aos veículos de carga, através de comparações dos cenários com as hipóteses de estudo.

1.2 Justificativa e relevância

A contribuição desta dissertação é mostrar o potencial de análise dessa abordagem, ou seja, a utilização do modelo bayesiano de séries temporais para analisar o efeito causal das restrições aos veículos de carga e para apoiar decisões práticas de mobilidade urbana em cidades brasileiras.

As cidades deste estudo foram escolhidas pelo histórico na implementação de medidas restritivas aos veículos de carga nas capitais Belo Horizonte e São Paulo, as quais fazem parte das mesmas respectivas regiões metropolitanas e foram diretamente afetadas pelas alterações nos perfis de seus veículos de carga.

Logo, esta dissertação irá ampliar as análises realizadas em Fonseca *et al.* (2023), as quais tiveram como foco o efeito causal das restrições aos veículos de carga na frota de caminhões e utilitários em Belo Horizonte e São Paulo. Portanto, este estudo irá ampliar as análises para as demais cidades das respectivas regiões metropolitanas destas capitais e avaliará a efetividade da política de mobilidade urbana de restrição aos veículos de carga, aplicada em cidades brasileiras, e seus potenciais impactos na sociedade, tendo em vista o fato de não ter sido encontrado estudo que analisa a efetividade desta política de restrição aos veículos de carga na mobilidade urbana, conforme exposto neste trabalho na seção 2.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo abordará aspectos referentes à revisão da literatura deste trabalho. Duas pesquisas foram estruturadas, através da utilização de palavras-chave e critérios de exclusão e inclusão. A primeira teve como objetivo identificar relações entre as literaturas de estudo sobre o transporte urbano de cargas, restrições aos veículos de carga e restrições aos veículos em geral. A segunda teve como objetivo principal identificar as aplicações do modelo Bayesiano Estrutural de Séries Temporais nas áreas de transporte urbano de cargas, logística e transporte. Nas seções 2.1 e 2.2 serão descritos os procedimentos de seleção e as conclusões de cada pesquisa.

2.1 Impactos das restrições aos veículos de carga

2.1.1 Procedimento da revisão da literatura

O plano de pesquisa foi realizado com base no tema de pesquisa, perguntas de pesquisa, hipóteses e objetivos. Foram definidas as palavras-chave e critérios de inclusão e exclusão. A pesquisa foi estruturada para identificar relações entre estudos sobre o transporte urbano de cargas, restrições aos veículos de carga e restrições aos veículos em geral. Portanto, foram selecionadas as seguintes palavras-chave: ‘*urban freight transport*’, ‘*logistics*’, ‘*freight vehicle restriction*’ e ‘*vehicle restriction*’. A pesquisa foi conduzida utilizando a plataforma do banco de dados *ScienceDirect*.

Com o objetivo de encontrar artigos relevantes sobre o assunto da pesquisa, não foram definidos filtros com relação às datas de publicação dos documentos. A estrutura de palavras-chave utilizada na plataforma de dados *ScienceDirect* ficou da seguinte forma: (“*urban freight transport*” OR “*logistics*”) AND (“*freight vehicle restriction*” OR “*vehicle restriction*”). As palavras-chave foram direcionadas para títulos e resumos dos artigos pesquisados.

Durante este trabalho, os títulos, resumos e conclusões de todos os trabalhos foram lidos e, após terem sido considerados relevantes, o texto todo do artigo foi lido para identificar quais foram os impactos das restrições aos veículos de carga e os seus respectivos efeitos (positivos ou negativos) para o transporte urbano de cargas e para a sociedade como um todo.

Inicialmente, a pesquisa retornou com um total de 114 trabalhos. Após ser aplicado o critério de exclusão de documentos indesejados (capítulos de livros, enciclopédias, editoriais, discussões e comunicações), o número de trabalhos foi reduzido para 105 artigos. Em seguida, após a leitura dos títulos, resumos e conclusões, este número foi reduzido para 28. Por fim, após a leitura completa dos artigos, foram excluídos registros considerados irrelevantes para o objetivo da pesquisa e incluídos outros em análises qualitativas, como consequência, o número total de artigos foi reduzido para 22. Esse procedimento de seleção da literatura é ilustrado na Figura 1, onde n é o número de documentos selecionados em cada etapa do procedimento de seleção da literatura.

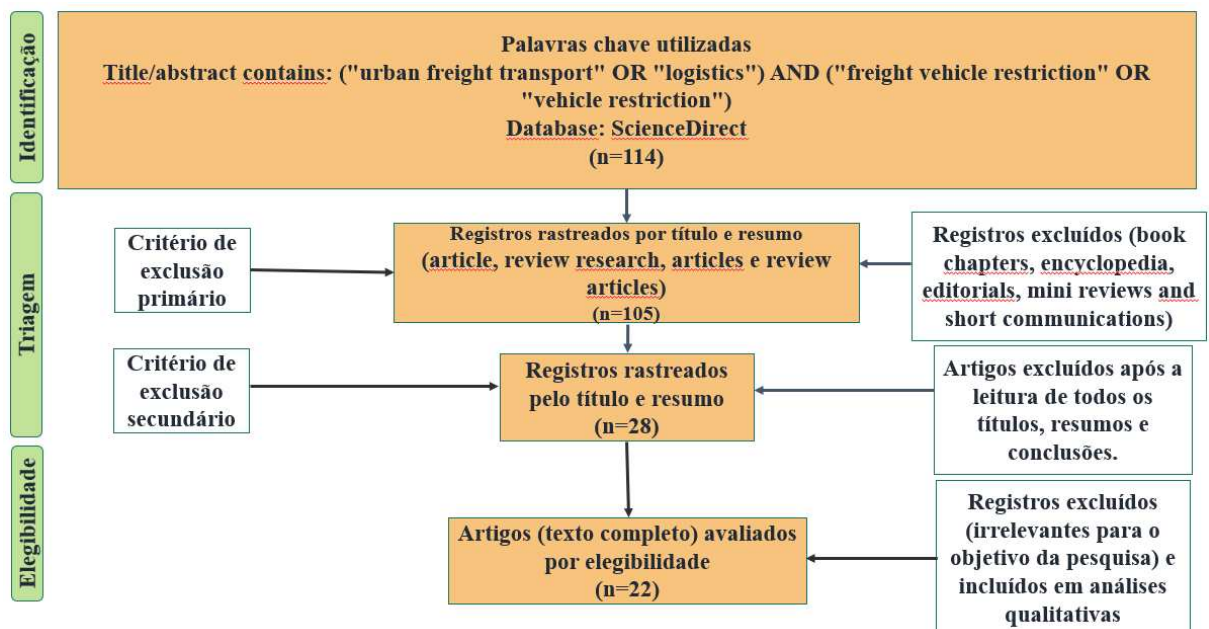


Figura 1 - Procedimento de seleção da literatura

Os resultados da revisão sistemática da literatura permitiram observar que poucos trabalhos analisaram as restrições aos veículos de carga do ponto de vista de seus impactos e respectivos tipos de efeitos para a sociedade como um todo.

Bontempo *et al.* (2014) afirmam que o uso de medidas restritivas aos veículos de carga pode contribuir para a redução da disputa por vias, redução de investimentos em infraestrutura de transporte e emissão de gases poluentes. No entanto, tais restrições afetam as empresas

transportadoras através da redução de sua eficiência logística pelo aumento do tempo de entrega, a queda do nível de serviço e pela segurança pública, estando a carga mais exposta a roubos no período noturno.

De Oliveira *et al.* (2021) analisaram as percepções de varejistas sobre o transporte urbano de carga em cidades históricas brasileiras. Nas cidades históricas analisadas existem as seguintes restrições aos veículos de carga: qualquer veículo de carga (Ouro Preto e Olinda), veículos a partir de 3,5 ton (Tiradentes), veículos a partir de 6 ton (Serro e São João del-Rei), veículos a partir de 9 ton (São João del-Rei). Em São João del-Rei e Tiradentes, devido às dificuldades de acesso impostas pelas restrições aos veículos de carga, foi apontado pelos varejistas que esta solução seria boa apenas para o centro histórico. Por outro lado, em centros históricos com topografia acentuada, a percepção sobre as restrições aos veículos de carga foi positiva.

Akyol *et al.* (2018) exploraram os melhores períodos para a restrições de circulação dos veículos de carga utilizando teoria dos jogos. Os autores analisaram 71 cenários e os resultados identificaram períodos para circulação dos veículos de carga com maior satisfação da população e pouco impacto no desempenho dos negócios varejistas.

Russo *et al.* (2010) identificaram restrições aos veículos de carga em vários países e classificaram de acordo com suas características físicas: peso, ocupação de espaço e emissões de gases poluentes. Os autores identificaram que o principal objetivo das medidas restritivas é de reduzir congestionamentos e a poluição do ar. Algumas cidades como Munique (Alemanha) e Roma (Itália) estabeleceram os limites de pesos dos seus veículos em 8,5 ton; outras cidades italianas, como Milão e Bréscia, foi considerado o limite de 7 m do comprimento dos veículos, enquanto em PIANEZA foi considerado o limite de largura 2,2 m. Os autores identificaram que restrições aos veículos de carga são políticas de regulação de transporte comumente adotadas na Europa e que tem sido cada vez mais restritivas, com a permissão de circulação de veículos de carga de pequenos portes.

Thi *et al.* (2020) classificaram as medidas de gerenciamento do transporte de carga de acordo com três objetivos: evitar, transferir ou controlar o tráfego de veículos de carga. As medidas para evitar o tráfego de veículos de carga buscam reduzir a demanda pelo transporte de carga em determinadas áreas, através de combinações, modificações e substituições de viagens. As

medidas para transferir o tráfego de veículos de carga tentam alterar a demanda de veículos em diferentes modos de transportes, tempos e destinos. Por fim, as medidas para controlar o tráfego de veículos de carga atuam definindo restrições de rotas, controlando velocidades ou carregamentos das frotas e desenvolvendo e o comportamento do trânsito para estabilizar as condições dos fluxos de veículos em determinada região. Através de uma avaliação multicritério, os autores classificaram o nível de importância das medidas de gestão do transporte de arroz. Como resultado, chegou-se à conclusão de que o principal impacto das medidas está relacionado aos custos logísticos, seguido pelos impactos de segurança das operações de transporte e proteção ao meio ambiente.

Joubert *et al.* (2019) analisaram a eficiência das restrições aos veículos de carga, através da combinação da probabilidade de um agente ser autuado e o valor da autuação por violação da restrição. Eles utilizaram simulação baseada em agentes para analisar a eficácia da proibição da circulação de caminhões, através da combinação da probabilidade de serem autuados e a respectiva punição. Os resultados mostraram que o comportamento dos motoristas é mais sensível ao cumprimento da legislação do que do tipo de punição imposta e que o comportamento dos veículos pesados é mais sensível para atingir o objetivo do que o valor da multa. Além disso, neste trabalho foi apresentado que as restrições à circulação dos veículos pesados reduzem os congestionamentos nas cidades em que são aplicadas.

De Oliveira *et al.* (2017) identificaram que a população considera que as restrições aos veículos de carga e entregas, em horários de pico, são boas soluções para a distribuição de mercadorias urbana em Belo Horizonte. No entanto, foi verificado que a imposição de medidas fáceis de implementação e eficientes, do ponto de vista de planejamento, podem não ser necessariamente efetivas em relação aos problemas de mobilidade urbana.

Al Eisaia *et al.* (2017) analisaram a influência das estratégias de restrições aos veículos pesados para diferentes classes de veículos em congestionamentos em Melbourne, Austrália. Os veículos foram classificados em três diferentes classes e foram exploradas quatro diferentes estratégias de restrições. A estratégia de restrição que proíbe todos os veículos pesados retornou os resultados mais eficientes nos períodos de pico da manhã.

Cruz *et al.* (2016) descreveram os impactos da governança de restrição aos acessos dos veículos de carga nas Zonas de Baixa Emissão em Londres e Berlim. As zonas de baixa emissão são resultados da combinação de dois tipos de políticas: aquelas relacionadas ao meio ambiente e aquelas relacionadas ao transporte. O resultado mostrou que a estratégia desencoraja o uso de veículos na área implementada.

Lyons *et al.* (2017) analisaram o impacto da política de restrição de horário para a circulação de caminhões pesados nos principais corredores de acesso da Cidade do México nos congestionamentos urbanos e na emissão de gases poluentes. Quatro grupos de cenários foram analisados e os resultados indicaram que a política de restrição de horário para a circulação de caminhões pesados tem um impacto negativo nos congestionamentos e emissões da cidade. Além disso, a implementação de centros de consolidação sem adequada infraestrutura rodoviária, não reduzem o impacto da política de restrição de horário.

Quak *et al.* (2007) estudaram os impactos das políticas governamentais de restrições aos veículos, do ponto de vista do setor varejista, e as consequências financeiras e ao meio ambiente. Eles determinaram as dimensões que devem ser consideradas para impactar os custos e o ambiente do setor varejista, baseado em quatorze casos de estudos de varejistas holandeses de diferentes setores e com diferentes sistemas operacionais. Como resultado, foi mostrado que os custos e as emissões de gases poluentes aumentam de forma moderada, quando poucas cidades são afetadas.

2.1.2 Conclusão da revisão da literatura

Durante a realização desta revisão da literatura, foram identificados diversos impactos das restrições aos veículos de carga e quais os seus respectivos tipos de efeitos para a sociedade como um todo. Ou seja, se os efeitos dos impactos melhoraram as condições de transportes (positivos) ou as pioraram (negativos). Na Tabela 1 é apresentado um resumo da literatura, destacando os efeitos das restrições aos veículos de carga. Os impactos das restrições nas emissões de gases poluentes foram encontrados com maior frequência (6 ocorrências) nesta revisão da literatura, sendo que destes, quatro estudos identificaram um efeito positivo e dois estudos identificaram efeito negativo. Os impactos mais citados encontrados são eficiência dos

processos logísticos, congestionamentos, segurança do transporte, custos logísticos e desempenho de negócios varejistas.

Tabela 1 - Impactos das restrições aos veículos de carga e seus respectivos tipos de efeitos

Impacto	Tipo de Efeito	Referências
Emissões de gases poluentes	Positivo	(RUSSO et al., 2010); (THI et al., 2020); (BONTEMPO et al., 2014); (CRUZ et al., 2016)
	Negativo	(LYONS et al., 2017); (QUAK et al., 2007)
Eficiência dos processos logísticos	Positivo	(AL EISAEIA et al., 2017); (DE OLIVEIRA et al., 2017)
	Negativo	(BONTEMPO et al., 2014); (DE OLIVEIRA et al., 2017); (DE OLIVEIRA et al., 2021)
Congestionamentos	Positivo	(RUSSO et al., 2010); (MA et al., 2020); (THI et al., 2020); (JOUBERT, 2019)
	Negativo	(LYONS et al., 2017)
Segurança do transporte	Positivo	(DE OLIVEIRA et al., 2021); (THI et al., 2020)
	Negativo	(BONTEMPO et al., 2014)
Custos logísticos	Positivo	(THI et al., 2020); (CRUZ et al., 2016); (BONTEMPO et al., 2014)
	Negativo	(QUAK et al., 2007)
Desempenho dos negócios varejistas	Negativo	(EREN AKYOL et al., 2018)

A maioria dos estudos encontrados possui impactos das restrições aos veículos de carga como efeitos positivos para eficiência dos processos logísticos, nas reduções das emissões de gases poluentes, nas reduções de congestionamentos, no aumento da segurança nos transportes e no

controle dos custos logísticos. Ademais, nenhum estudo analisou os efeitos das restrições na frota dos veículos. Desta forma, este estudo contribui com esta lacuna de pesquisa.

2.2 Aplicações do Método Bayesiano de Séries Temporais

2.2.1 Procedimento da revisão da literatura

A pesquisa foi conduzida utilizando a plataforma de banco de dados *ScienceDirect*. Foram selecionadas as seguintes palavras-chave: '*urban freight transport*', '*logistics*', '*bayesian structural time series model*'.

Com o objetivo de encontrar artigos relevantes sobre o assunto da pesquisa, não foram definidos filtros com relação às datas de publicação dos documentos. A estrutura de palavras-chave utilizada na plataforma de dados *ScienceDirect* ficou da seguinte forma: ("*urban freight transport*" OR "*logistics*") AND ("*bayesian structural time series model*"). As palavras-chave foram direcionadas para títulos e resumos dos artigos pesquisados.

Os títulos, resumos e conclusões de todos os trabalhos foram lidos e, após terem sido considerados relevantes, o texto todo do artigo foi lido para identificar quais as aplicações do modelo Bayesiano Estrutural de Séries Temporais no Transporte Urbano de Carga.

Inicialmente a pesquisa retornou com um total de 10 trabalhos. Após ser aplicado o critério de exclusão de documentos indesejados (capítulos de livros, enciclopédias, editoriais, discussões e comunicações), o número de trabalhos foi reduzido para 9 artigos. Em seguida, após a leitura dos títulos, resumos e conclusões, este número foi reduzido para 3. Por fim, após a leitura completa dos artigos, foram excluídos registros considerados irrelevantes para o objetivo da pesquisa e incluídos outros em análises qualitativas, como consequência, o número total de artigos foi de 5. Esse procedimento de seleção da literatura é ilustrado na Figura 2.

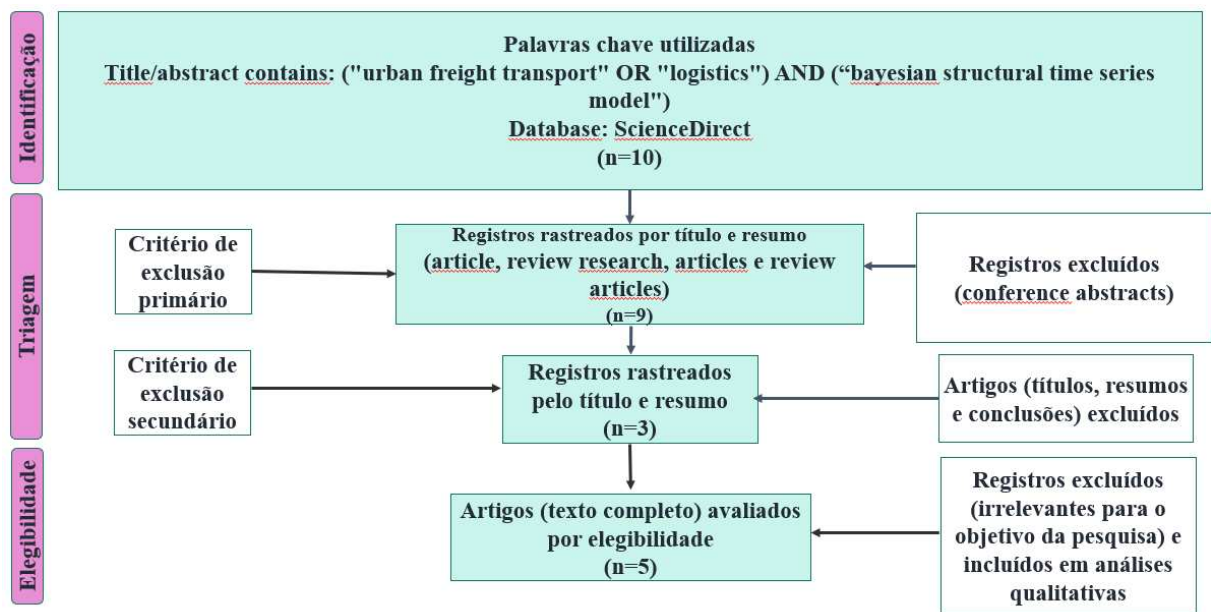


Figura 2 - Procedimento de seleção da literatura

Kohns & Bhattacharjee (2023) analisaram os benefícios dos dados de pesquisa na internet, fornecidos pelo Google Trends, para prever o real crescimento do produto interno bruto dos Estados Unidos através do modelo Bayesiano Estrutural de Séries Temporais. Eles chegaram à conclusão de que um grande conjunto de termos de pesquisa é capaz de antecipar as previsões em um trimestre antes de outros dados macroeconômicos estarem disponíveis. Além disso, foi possível concluir que termos de pesquisa com alta probabilidade de inclusão possuem boa interpretação econômica.

Mechai *et al*, (2024) utilizaram técnicas de inferência causal para quantificar e analisar os efeitos causais do acidente com o navio Ever Given no índice de preços dos fretes marítimos globais (*World Container Index – WCI*), que ocorreu em março de 2021 no canal de Suez no Egito. Eles conduziram experimentos utilizando dados de séries temporais das oito maiores rotas marítimas do mundo e alcançaram resultados estatisticamente significativos com um nível de confiança de 99,89%. Neste trabalho foi utilizado o pacote Causal Impact, devido ao fato de os dados utilizados terem sido séries temporais e por empregar o modelo Bayesiano Estrutural de Séries Temporais. Como resultado, eles demonstraram que o acidente teve impacto significativo nos preços do transporte marítimo de containers, quantificando um aumento em 40% nos preços após a ocorrência. Logo, este estudo mostra o impacto positivo que a utilização

da inferência causal pode gerar para análises de problemas logísticos práticos e teóricos. Os autores demonstraram a utilidade prática da inferência causal em quantificar efeitos disruptivos em indicadores de performance, auxiliando na construção de indicadores para a tomada de decisão no que diz respeito à redução de riscos, gestão de estoques e planos de contingência.

Xi *et al.* (2024) aplicaram o modelo Bayesiano Estrutural de Séries Temporais para inferir os impactos relativos às intervenções das vacinações da COVID-19 em cinco tipos de comportamentos de passageiros de regiões urbanas e rurais. Foi utilizado um conjunto de dados, com mais de 150 milhões informações de dispositivos móveis, de uma cidade norte americana, durante o período de 01/01/2020 a 20/04/2021. Os resultados mostraram o comportamento positivo das vacinações em estimular a valorização dos comportamentos dos passageiros e revelar as disparidades na resiliência de comportamento do passageiro em resposta aos índices de vacinações, indicadores epidemiológicos e condições do tempo em diversas áreas. Além disso, os autores mostraram que o modelo Bayesiano Estrutural de Séries Temporais pode ser utilizado como uma ferramenta para geração de informações que poderão ser utilizadas para elaborar políticas públicas de desenvolvimento dos setores de transporte e saúde.

Zhang & Fricker (2021) aplicaram o modelo Bayesiano Estrutural de Séries Temporais para quantificar o efeito causal da COVID-19 em viagens não motorizadas, através de dados de pedestres e ciclistas nos Estados Unidos. Este modelo foi aplicado para quantificar o aumento e redução em atividades não motorizadas em 11 cidades norte americanas. Os resultados mostraram que a pandemia COVID-19 foi responsável por reduzir atividade não motorizada em cidades com elevada densidade populacional, enquanto o contrário foi observado em cidades com baixa densidade populacional. Portanto, foi possível observar o quanto as atividades de pedestres e ciclistas foram afetadas pela COVID-19 em diferentes tipos de cidades e contribuir para a elaboração de políticas públicas para estratégias pós pandemia e investir em planejamento contra futuras novas pandemias.

Hu & Chen (2021) utilizaram o modelo Bayesiano Estrutural de Séries Temporais para inferir os impactos da pandemia COVID-19 no número de passageiros da cidade de Chicago. Através desta ferramenta, foi possível controlar os efeitos de variáveis de tendências, sazonalidades, feriados e condições do tempo. Os resultados indicaram que a pandemia COVID-19 foi

responsável por reduzir em 72% o número de passageiros, principalmente em regiões de áreas comerciais e com alto percentual de indivíduos brancos, com maior nível de instrução e maior renda. Além disso, foi possível criar uma percepção, em linha do tempo, da significativa redução do número de passageiros durante a pandemia e ajudar as agências de trânsito em ações para diferentes grupos socioeconômicos e medidas de contenção da transmissão do vírus.

2.2.2 Conclusão da revisão da literatura

Durante a realização desta revisão da literatura foram identificadas diversas aplicações do modelo Bayesiano Estrutural de Séries Temporais no Transporte Urbano de Cargas. Estas aplicações foram listadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Aplicações do modelo Bayesiano Estrutural de Séries Temporais (BEST) no Transporte Urbano de Cargas (TUC), Logística e Transporte

Aplicações do BEST no TUC, Logística e Transporte	Referências
Construção de indicadores de desempenho/comportamento para auxiliar em tomadas de decisões mais assertivas	(Mechai et al, 2024); (Xi et al., 2024); (Kohns & Bhattacharjee., 2023); (Hu & Chen, 2021)
Criação de planos de ação e contingência	(Mechai et al, 2024); (Xi et al., 2024); (Zhang & Fricker, 2021); (Hu & Chen, 2021)
Elaboração de políticas públicas	(Xi et al., 2024); (Zhang & Fricker, 2021)
Gestão de estoques	(Mechai et al, 2024)

As aplicações para a construção de indicadores de desempenho/comportamento para auxiliar em tomadas de decisões mais assertivas e criação de planos de ação e contingência foram encontradas com maior frequência (4 ocorrências) nesta revisão da literatura. Em seguida, as aplicações que foram encontradas com maior frequência foram: elaboração de políticas públicas, com 2 ocorrências; gestão de estoques, com 1 ocorrência.

Portanto, é possível concluir que aplicações do modelo BEST nas áreas TUC, logística e transporte para a construção de indicadores de desempenho/comportamento para auxiliar em

tomadas de decisões e criação de planos de ações e contingências, são as mais utilizadas na literatura e podem ser embasadas por aplicações do mesmo modelo, mas com o foco em quantificar os efeitos de intervenções ou eventos nos indicadores de performance.

3 MÉTODO DE TRABALHO

3.1 Caracterização da Área de Estudo

Nesta dissertação foram analisados os efeitos causais das restrições aos veículos de carga nas cidades das regiões metropolitanas de Belo Horizonte e São Paulo. Estas cidades foram escolhidas pelo histórico na implementação de medidas aos veículos de carga em Belo Horizonte e São Paulo.

3.1.1 Belo Horizonte

Em Belo Horizonte, foram definidas as regras para a circulação de veículos de carga na região central e em corredores de tráfego e para as operações de carga e descarga da cidade através da Portaria DPR 138/2009. Esta medida restringiu a circulação de veículos maiores de 5 toneladas em determinadas vias e horários. A Portaria BHTRANS DPR 077/2014 atualizou as vias com proibição de circulação de veículos de grande porte e a Portaria BHTRANS DPR 004/2019 aumentou a permissão de circulação para veículos de carga de até 5,5 toneladas. Tais medidas tiveram como objetivo promover uma fluidez mais segura e harmônica no trânsito, preservar a pavimentação e infraestrutura das vias, limitar a circulação de veículos menos seguros e ágeis. Importante ressaltar que o fator motivador para a restrição dos veículos de carga em Belo Horizonte foi um grande acidente, que envolveu um caminhão de grande porte, com vários mortos e feridos no ano de 2009.

A Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) abrange os municípios de Baldim, Belo Horizonte, Betim, Brumadinho, Caeté, Capim Branco, Confins, Contagem, Esmeraldas, Florestal, Ibirité, Igarapé, Itaguara, Itatiaiuçu, Jaboticatubas, Juatuba, Lagoa Santa, Mario Campos, Mateus Leme, Matozinhos, Nova Lima, Nova União, Pedro Leopoldo, Raposos, Ribeirão das Neves, Rio Acima, Rio Manso, Sabará, Santa Luzia, São Joaquim de Bicas, São José da Lapa, Sarzedo, Taquaraçu de Minas e Vespasiano. É importante informar que as regras e restrições à circulação de veículos de carga não são iguais em todas as cidades da RMBH. Cada cidade possui as suas características próprias e suas respectivas regras, de acordo com as suas necessidades. Porém, este estudo se limitou a analisar o efeito causal das restrições aos veículos de carga na capital da RMBH, pois definiu como hipótese que as restrições nesta cidade contribuíram para o aumento da variabilidade das frotas de caminhões e utilitários na

própria cidade e nas demais cidades da região metropolitana. Além disso, este estudo definiu como objetivo estimar e analisar os resultados dos efeitos causais das restrições da capital na própria cidade e nas demais cidades da região metropolitana.

Na Figura 3 são apresentados gráficos com as evoluções mensais dos números de caminhões dos municípios da RMBH, de 2006 a 2022, com as exceções de Belo Horizonte, Contagem e Betim, devido aos valores discrepantes destas cidades comparados com os das demais cidades da RMBH.

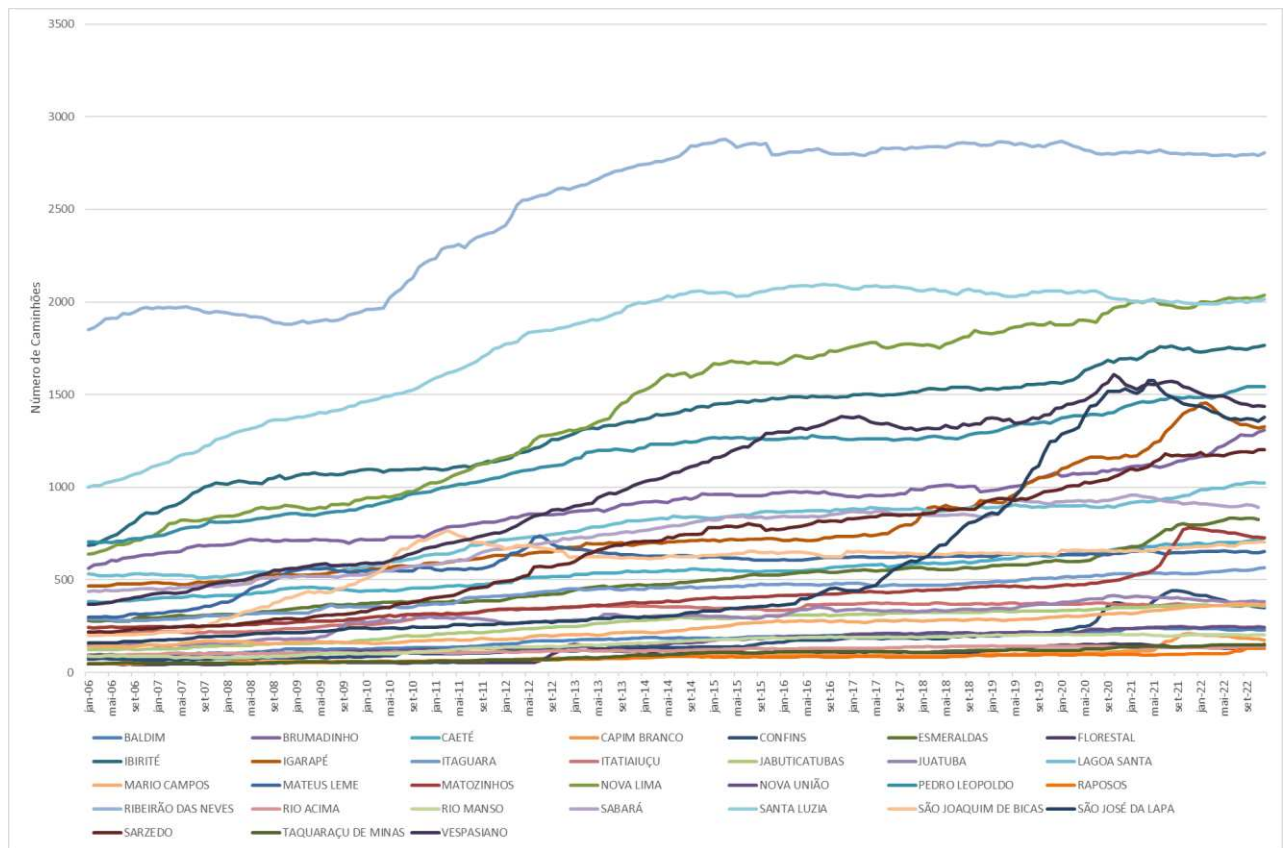


Figura 3 - Evolução das frotas de caminhões nos municípios da RMBH de 2006 a 2022

Na Figura 4 são apresentados mapas coropléticos dos números de caminhões de todos os municípios da RMBH nos anos de 2006 e 2022. É possível observar um aumento de 24.071 para 41.160 caminhões (70,99%) da cidade de Belo Horizonte, de 9.100 para 14.638 caminhões (60,86%) da cidade de Contagem e de 2.599 para 7.047 caminhões (171,14%) da cidade de Betim. Os valores mais expressivos foram os aumentos de caminhões nas cidades de São José

da Lapa (de 161 para 1377 veículos, um aumento de 755,28%), Sarzedo (de 220 para 1201 veículos, aumento de 445,91%), Confins (de 71 para 351 veículos, aumento de 394,37%), Vespasiano (de 369 para 1435 veículos, aumento de 288,89%) e São Joaquim de Bicas (de 199 para 705 veículos, aumento de 254,27%). Importante informar que não houve reduções dos números de caminhões dos municípios da RMBH, de 2006 a 2022.

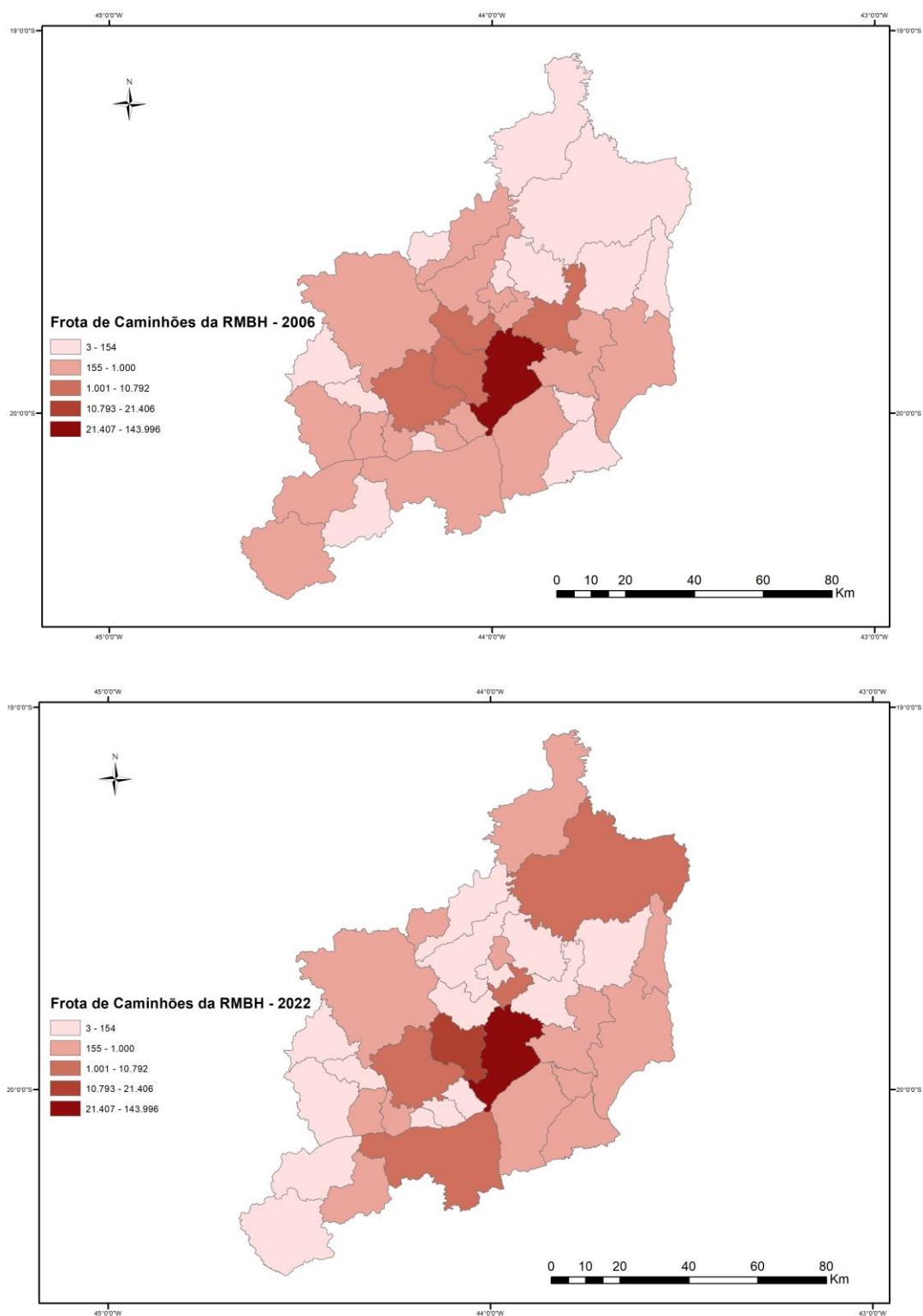


Figura 4 - Frota de Caminhões nas Cidades da RMBH em 2006 (em cima) e 2022 (embaixo)

Na Tabela 3 são apresentados os valores dos aumentos das frotas de caminhões nos municípios da RMBH, de 2006 a 2022. Importante destacar que não foram registradas reduções nos números das frotas destes veículos durante o período analisado.

Tabela 3 – Consolidado dos aumentos das frotas de caminhões nos municípios da RMBH de 2006 a 2022 (continua)

Municípios	jan-06	dez-22	Aumento Percentual
Balhim	80	231	188,75%
Belo Horizonte	24071	41160	70,99%
Betim	2599	7047	171,14%
Brumadinho	564	1310	132,27%
Caeté	383	726	89,56%
Capim Branco	50	175	250,00%
Confins	71	351	394,37%
Contagem	9100	14638	60,86%
Esmeraldas	279	826	196,06%
Florestal	46	151	228,26%
Ibirité	688	1767	156,83%
Igarapé	467	1327	184,15%
Itaguara	287	566	97,21%
Itatiaiuçu	218	364	66,97%
Jabuticatubas	123	359	191,87%
Juatuba	144	382	165,28%
Lagoa Santa	533	1023	91,93%
Mario Campos	138	365	164,49%

Tabela 4 – Consolidado dos aumentos das frotas de caminhões nos municípios da RMBH de 2006 a 2022 (conclusão)

Municípios	jan-06	dez-22	Aumento Percentual
Mateus Leme	299	652	118,06%
Matozinhos	243	728	199,59%
Nova Lima	639	2035	218,47%
Nova União	94	245	160,64%
Pedro Leopoldo	705	1541	118,58%
Raposos	45	132	193,33%
Ribeirão das Neves	1851	2804	51,49%
Rio Acima	85	142	67,06%
Rio Manso	89	202	126,97%
Sabará	439	891	102,96%
Santa Luzia	1002	2015	101,10%
São Joaquim de Bicas	199	705	254,27%
São José da Lapa	161	1377	755,28%
Sarzedo	220	1201	445,91%
Taquaraçu de Minas	46	148	221,74%
Vespasiano	369	1435	288,89%

Na Figura 5 são apresentados gráficos com as evoluções mensais dos números de utilitários dos municípios da RMBH, de 2006 a 2022, com as exceções de Belo Horizonte e Nova Lima, devido aos valores discrepantes destas cidades comparados com os das demais cidades da RMBH.

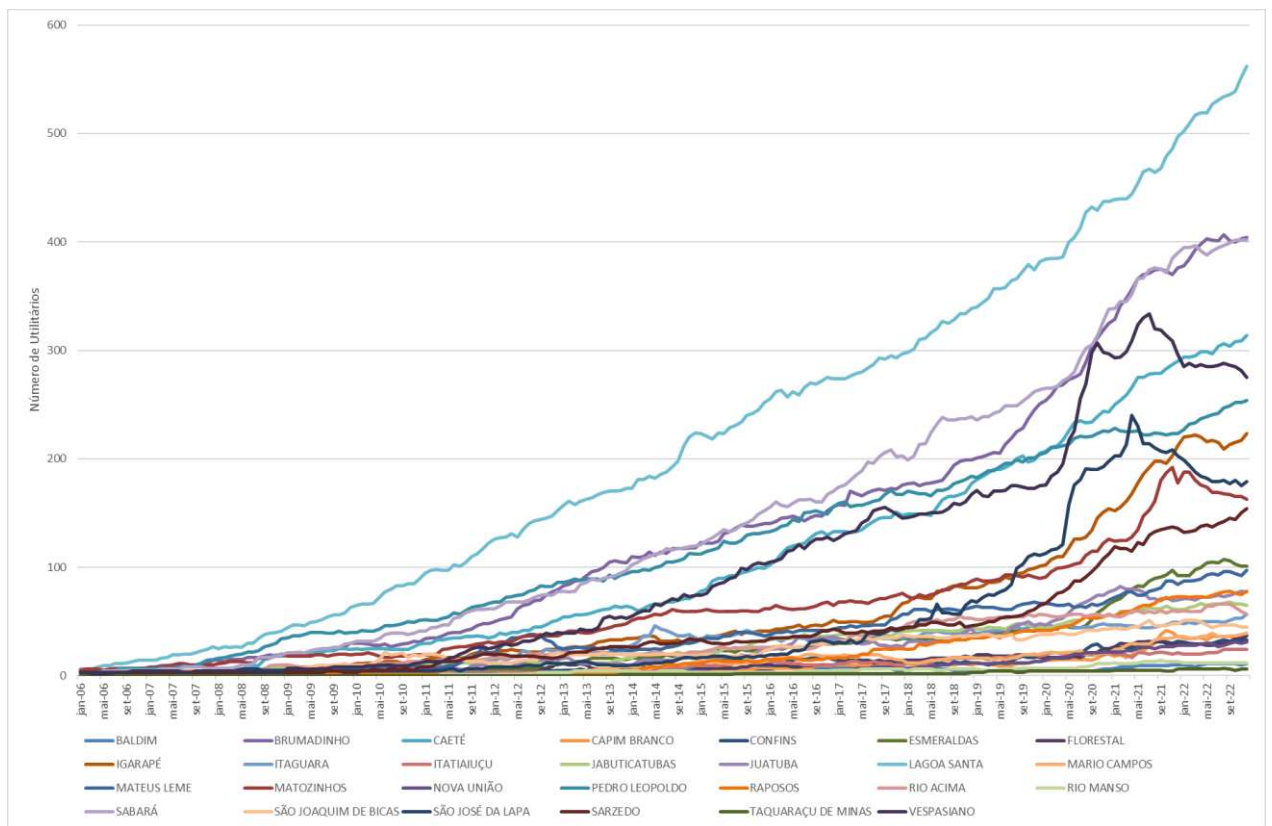


Figura 5 - Evolução das frota de utilitários nos municípios da RMBH de 2006 a 2022

Na Figura 6 são apresentados mapas coropléticos dos números de utilitários de todos os municípios da RMBH nos anos de 2006 e 2022. É possível observar um aumento de 1550 para 48064 utilitários (3000,90%) da cidade de Belo Horizonte. Os valores mais expressivos foram os aumentos de utilitários nas cidades de Caeté (de 2 para 314 veículos, um aumento de 15600,00%), Sabará (de 3 para 402 veículos, aumento de 13300,00%), Pedro Leopoldo (de 2 para 254 veículos, aumento de 12600,00%), Emeraldas (de 1 para 101 veículos, aumento de 10000,00%) e Lagoa Santa (de 6 para 562 veículos, aumento de 9266,67%). Importante informar que não houve reduções dos números de utilitários dos municípios da RMBH, de 2006 a 2022.

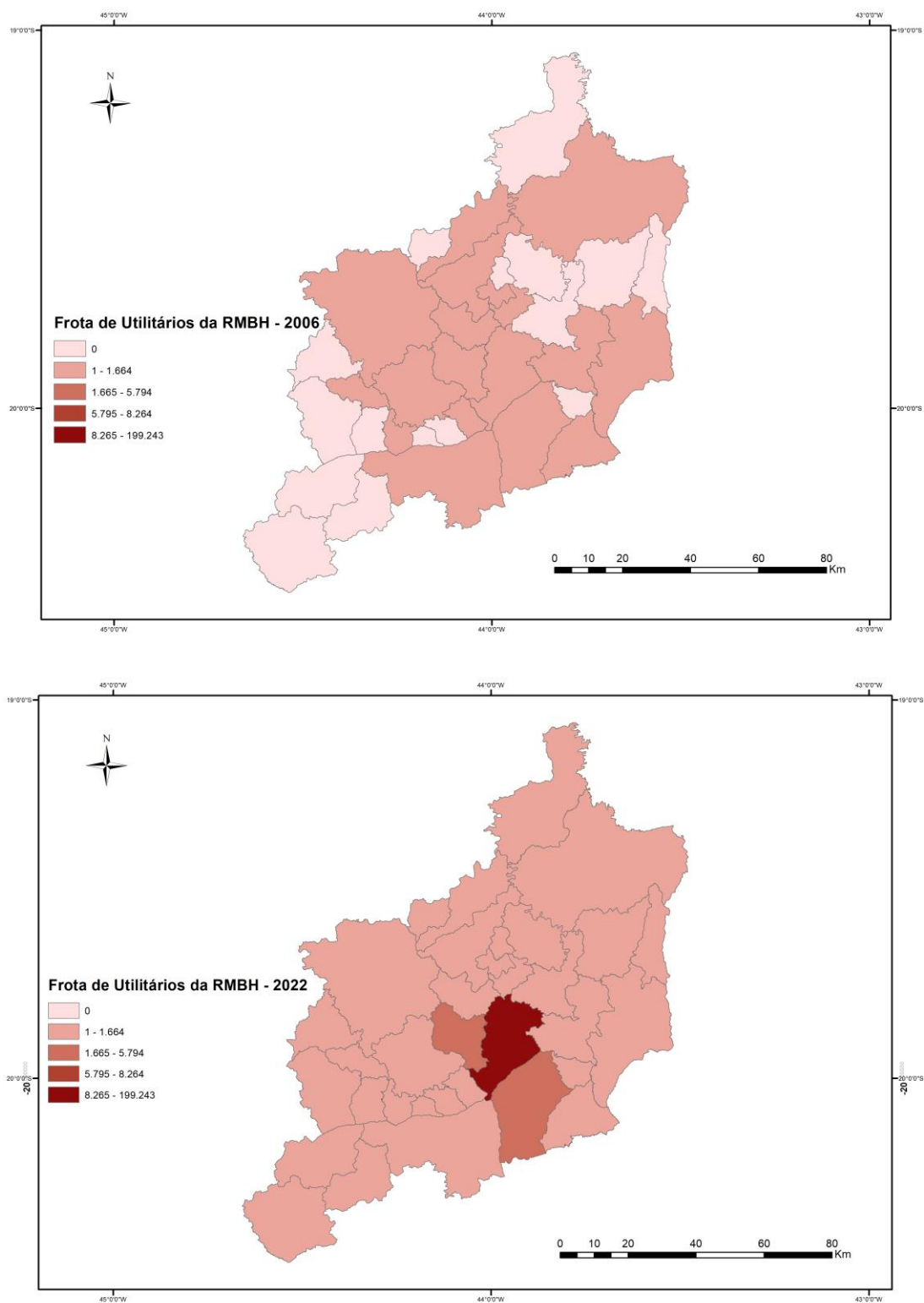


Figura 6 - Frota de Utilitários nas Cidades da RMBH em 2006 (em cima) e 2022 (embaixo)

Na Tabela 4 são apresentados os valores dos aumentos das frotas de utilitários nos municípios da RMBH, de 2006 a 2022. Importante destacar que não foram registradas reduções nos números das frotas destes veículos durante o período analisado.

Tabela 5 – Consolidado dos aumentos das frotas de utilitários nos municípios da RMBH de 2006 a 2022 (continua)

Municípios	jan-06	dez-22	Aumento Percentual
Baldim	0	11	-
Belo Horizonte	1550	48064	3000,90%
Betim	15	1318	8686,67%
Brumadinho	5	404	7980,00%
Caeté	2	314	15600,00%
Capim Branco	0	31	-
Confins	0	33	-
Contagem	96	2621	2630,21%
Esmeraldas	1	101	10000,00%
Florestal	0	37	-
Ibirité	4	283	6975,00%
Igarapé	0	223	-
Itaguara	0	57	-
Itatiaiuçu	0	24	-
Jaboticatubas	1	65	6400,00%
Juatuba	2	77	3750,00%
Lagoa Santa	6	562	9266,67%
Mario Campos	0	39	-
Mateus Leme	0	97	-

Tabela 6 – Consolidado dos aumentos das frotas de utilitários nos municípios da RMBH de 2006 a 2022 (conclusão)

Municípios	jan-06	dez-22	Aumento Percentual
Matozinhos	5	163	3160,00%
Nova Lima	34	1976	5711,76%
Nova União	0	31	-
Pedro Leopoldo	2	254	12600,00%
Raposos	0	78	-
Ribeirão das Neves	4	258	6350,00%
Rio Acima	2	57	2750,00%
Rio Manso	0	12	-
Sabará	3	402	13300,00%
Santa Luzia	4	363	8975,00%
São Joaquim de Bicas	1	45	4400,00%
São José da Lapa	3	179	5866,67%
Sarzedo	0	154	-
Taquaraçu de Minas	0	6	-
Vespasiano	3	275	9066,67%

3.1.2 São Paulo

Em São Paulo, a primeira restrição aos veículos de carga foi implantada em 1982, por meio do decreto nº 002/1982, que restringiu a circulação de veículos acima de 15 toneladas em determinadas vias e horários. Através do DECRETO nº 48.338, em 2007, foi delimitada a Zona de Restrição de Circulação Máxima (ZRCM) que restringiu a circulação de caminhões, na área com alta densidade de circulação de veículos e estabelecimentos comerciais, e que estabeleceu

uma zona especial de circulação restrita nas zonas exclusivamente residenciais. Em 2009, a ZRCM foi complementada com as vias estruturais restritas, sendo estas vias de tráfego rápido ou arteriais com alto volume de veículos. Por último, em 2012, foram atualizadas as regras identificando as vias com restrição aos veículos de carga através da Portaria SMT.G 024/2012.

A Região Metropolitana da São Paulo (RMSP) abrange os municípios de Arujá, Barueri, Biritiba Mirim, Caieiras, Cajamar, Carapicuíba, Cotia, Diadema, Embu, Embu-Guaçu, Ferraz de Vasconcelos, Francisco Morato, Franco da Rocha, Guararema, Guarulhos, Itapeverica da Serra, Itapevi, Itaquaquecetuba, Jandira, Jquitiba, Mairiporã, Mauá, Mogi das Cruzes, Osasco, Pirapora do Bom Jesus, Poa, Ribeirão Pires, Rio Grande da Serra, Salesópolis, Santa Isabel, Santana do Parnaíba, Santo André, São Bernardo do Campo, São Caetano do Sul, São Lourenço da Serra, São Paulo, Suzano, Taboão da Serra e Vargem Grande Paulista. É importante informar que as regras e restrições à circulação de veículos de carga não são iguais em todas as cidades da RMSP. Cada cidade possui as suas características próprias e suas respectivas regras, de acordo com as suas necessidades. Porém, este estudo se limitou a analisar o efeito causal das restrições aos veículos de carga na capital da RMSP, pois definiu como hipótese que as restrições nesta cidade contribuíram para o aumento da variabilidade das frotas de caminhões e utilitários na própria cidade e nas demais cidades da região metropolitana. Além disso, este estudo definiu como objetivo estimar e analisar os resultados dos efeitos causais das restrições da capital na própria cidade e nas demais cidades da região metropolitana.

Na Figura 7 são apresentados gráficos com as evoluções mensais dos números de caminhões dos municípios da RMSP, de 2006 a 2022, com exceção da cidade de São Paulo, devido aos valores discrepantes desta cidade comparados com os das demais cidades da RMSP.

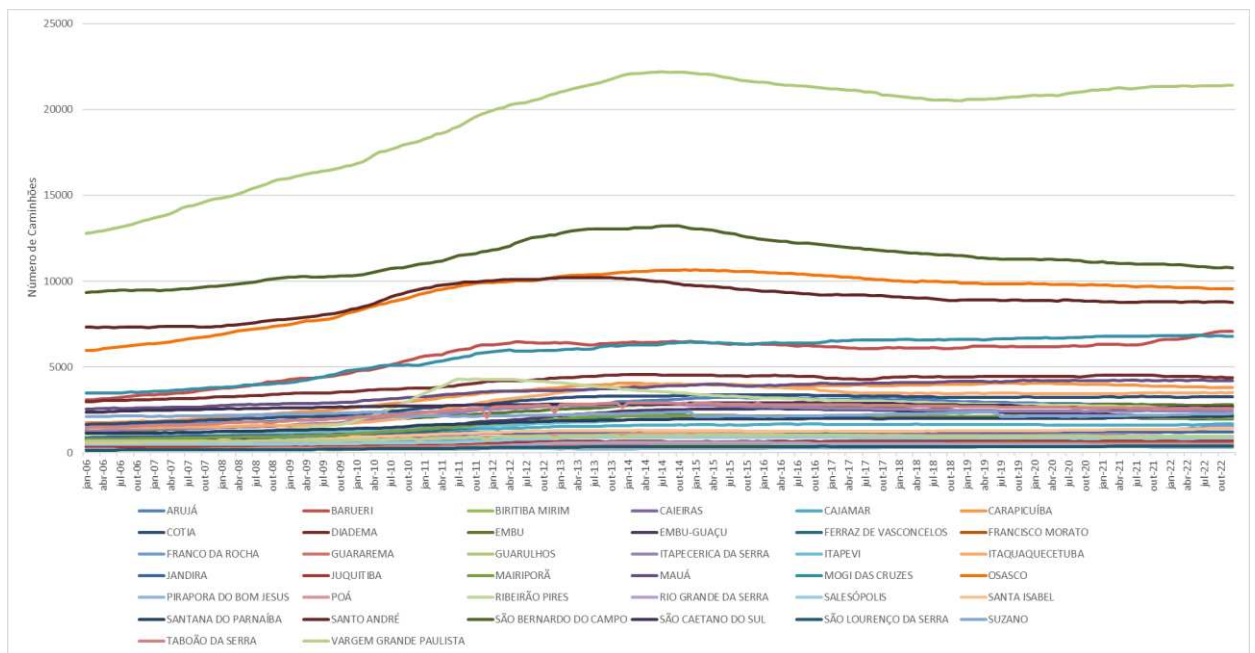


Figura 7 - Evolução das frotas de caminhões nos municípios da RMSP de 2006 a 2022

Na Figura 8 são apresentados mapas das frotas de caminhões nas cidades da RMSP nos anos de 2006 e 2022. É possível observar um aumento de 120.901 para 143.996 caminhões (19,10%) da cidade de São Paulo e de 12.780 para 21.406 caminhões (67,5%) da cidade de Guarulhos. Os valores mais expressivos foram os aumentos de caminhões nas cidades de Franco da Rocha (de 436 para 1534 veículos, um aumento de 251,84%), Guararema (de 214 para 589 veículos, aumento de 175,23%), Embu-Guaçu (de 781 para 2061 veículos, aumento de 163,89%), Mairiporã (de 784 para 2017 veículos, aumento de 157,27%) e São Lourenço da Serra (de 154 para 386 veículos, aumento de 150,65%). Importante informar que não houve reduções dos números de caminhões dos municípios da RMSP, de 2006 a 2022.

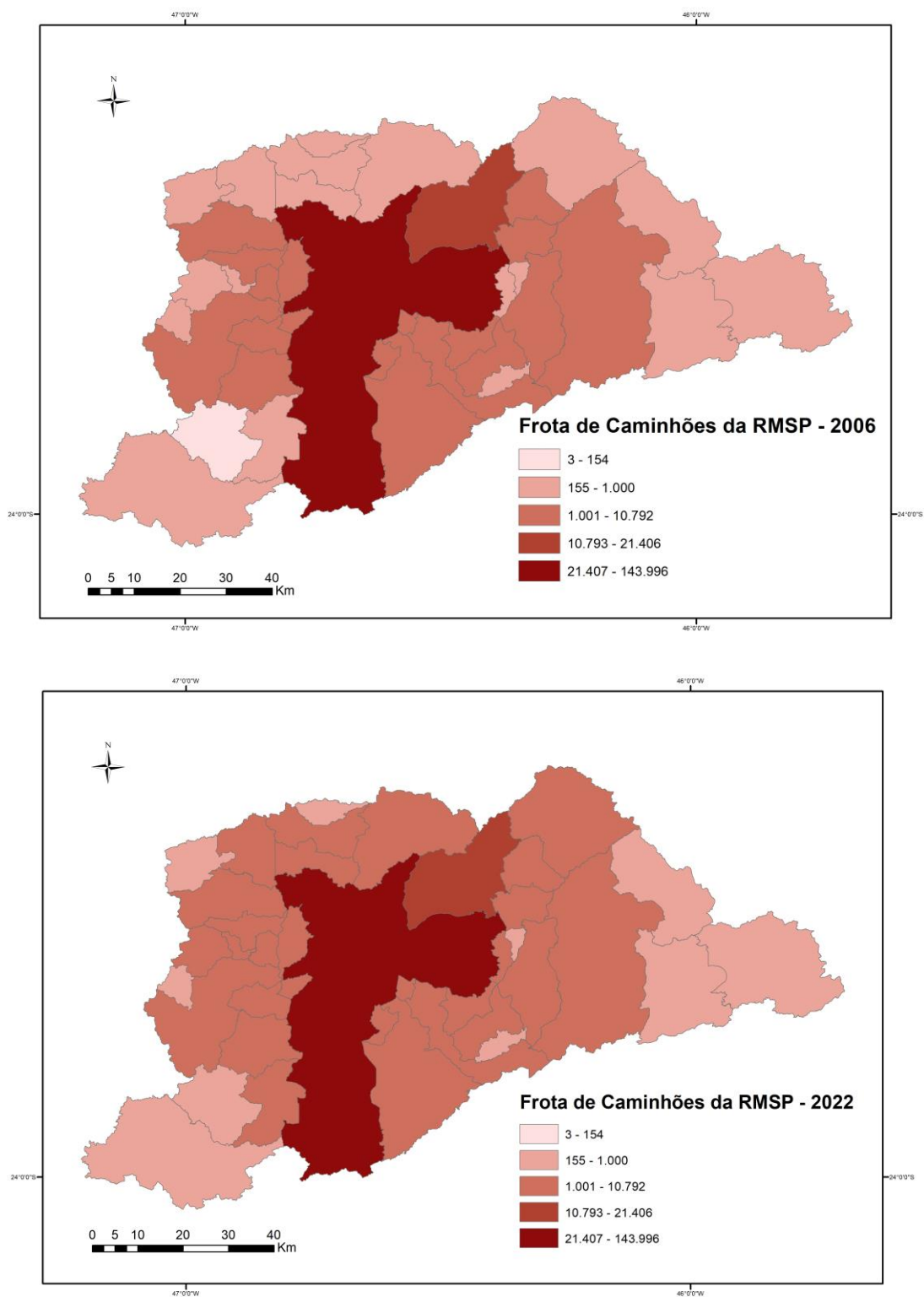


Figura 8 - Frota de Caminhões nas Cidades da RMSP em 2006 (em cima) e 2022 (embaixo)

Na Tabela 5 são apresentados os valores dos aumentos das frotas de caminhões nos municípios da RMSP, de 2006 a 2022. Importante destacar que não foram registradas reduções nos números das frotas destes veículos durante o período analisado.

Tabela 7 – Consolidado dos aumentos das frotas de caminhões nos municípios da RMSP de 2006 a 2022 (continua)

Municípios	jan-06	dez-22	Aumento Percentual
Arujá	1642	2758	67,97%
Barueri	3079	7062	129,36%
Biritiba Mirim	224	539	140,63%
Caieiras	612	1220	99,35%
Cajamar	702	1701	142,31%
Carapicuíba	1750	3803	117,31%
Cotia	1662	3255	95,85%
Diadema	2976	4397	47,75%
Embu	1251	2791	123,10%
Embu-Guaçu	781	2061	163,89%
Ferraz de Vasconcelos	836	1985	137,44%
Francisco Morato	338	585	73,08%
Franco da Rocha	436	1534	251,83%
Guararema	214	589	175,23%
Guarulhos	12780	21406	67,50%
Itapecerica da Serra	1339	2444	82,52%
Itapevi	979	2221	126,86%
Itaquaquecetuba	1459	3509	140,51%
Jandira	939	1217	29,61%

Tabela 8 – Consolidado dos aumentos das frotas de caminhões nos municípios da RMSP de 2006 a 2022 (conclusão)

Municípios	jan-06	dez-22	Aumento Percentual
Juquitiba	346	722	108,67%
Mairiporã	784	2017	157,27%
Mauá	2537	4208	65,87%
Mogi das Cruzes	3466	6793	95,99%
Osasco	5944	9568	60,97%
Pirapora do Bom Jesus	162	328	102,47%
Poá	633	978	54,50%
Ribeirão Pires	1056	2606	146,78%
Rio Grande da Serra	198	461	132,83%
Salesópolis	501	860	71,66%
Santa Isabel	595	1442	142,35%
Santana do Parnaíba	1137	2148	88,92%
Santo André	7317	8754	19,64%
São Bernardo do Campo	9333	10792	15,63%
São Caetano do Sul	2378	2693	13,25%
São Lourenço da Serra	154	386	150,65%
São Paulo	120901	143996	19,10%
Suzano	2124	2286	7,63%
Taboão da Serra	1482	2581	74,16%
Vargem Grande Paulista	669	962	43,80%

Na Figura 9 são apresentados gráficos com as evoluções mensais dos números de utilitários dos municípios da RMSP, de 2006 a 2022, com exceção da cidade de São Paulo, devido aos valores discrepantes desta cidade comparados com os das demais cidades da RMSP.

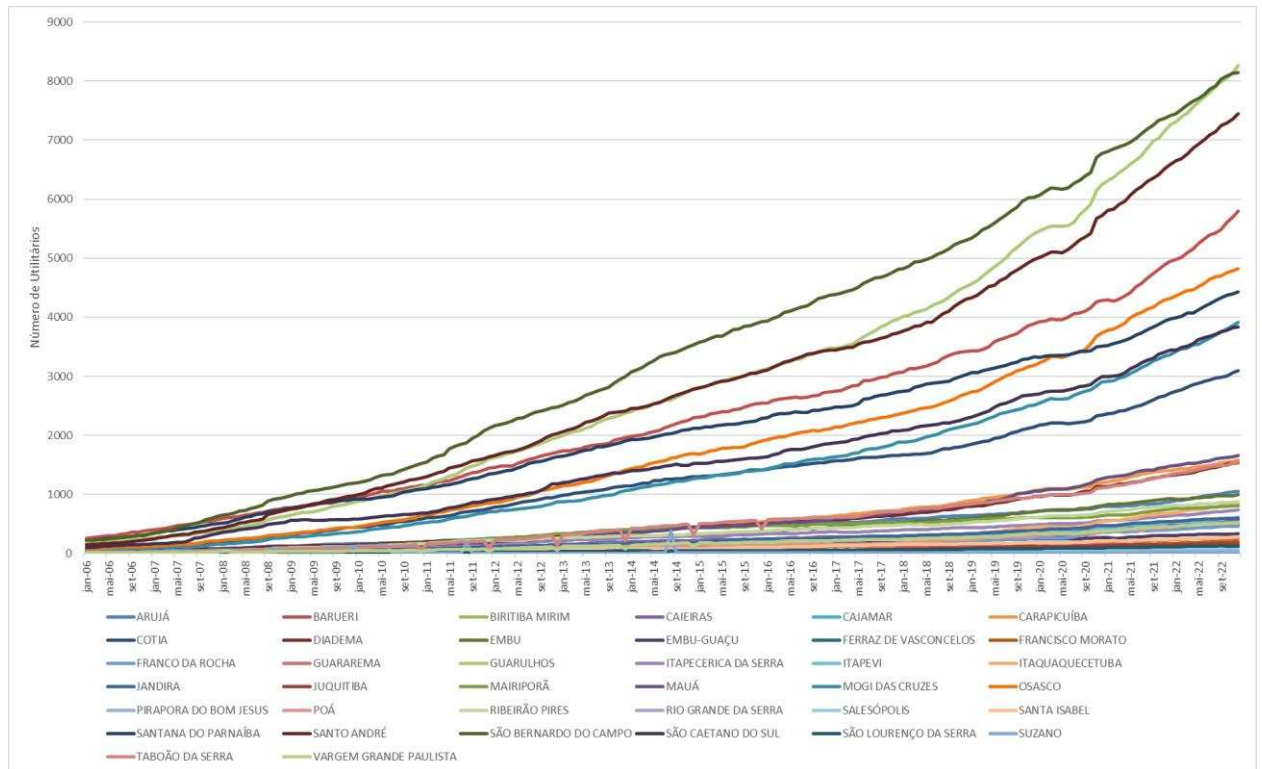


Figura 9 - Evolução das frotas de utilitários dos municípios da RMSP de 2006 a 2022

Na Figura 10 são apresentadas as frotas de utilitários nas cidades da RMSP nos anos de 2006 e 2022. É possível observar um aumento de 8941 para 199243 utilitários (2128%) da cidade de São Paulo. Os valores mais expressivos foram os aumentos de utilitários nas cidades de Franco da Rocha (de 1 para 459 veículos, um aumento de 45800%), Ferraz de Vasconcelos (de 3 para 490 veículos, aumento de 16233%), Carapicuíba (de 11 para 1577 veículos, aumento de 14236%), Santa Isabel (de 2 para 284 veículos, aumento de 14100%) e Taboão da Serra (de 11 para 1551 veículos, aumento de 14000%). Importante informar que não houve reduções dos números de utilitários dos municípios da RMSP, de 2006 a 2022.

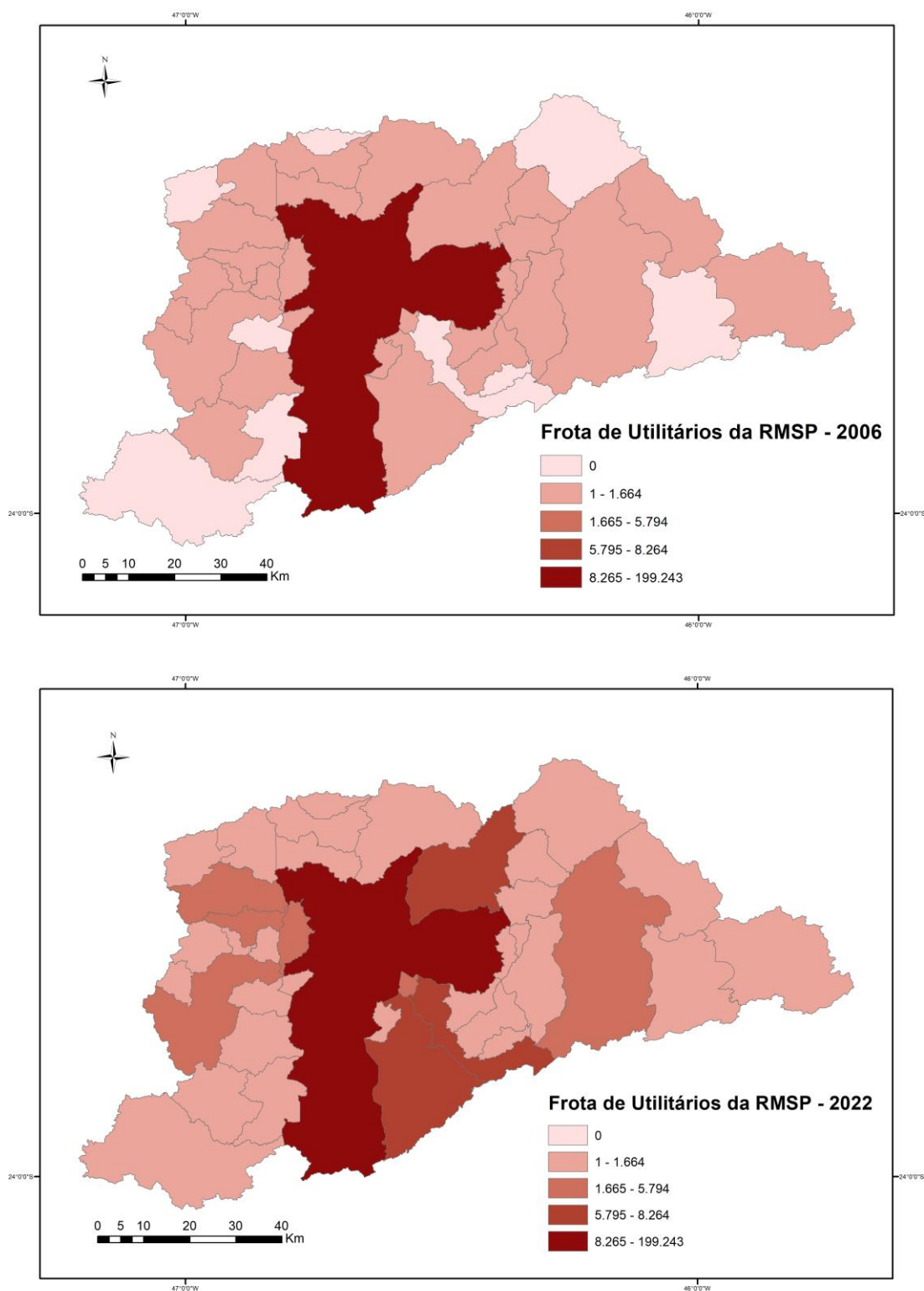


Figura 10 - Frota de Utilitários nas Cidades da RMSP em 2006 (em cima) e 2022 (embaixo)

Na Tabela 6 são apresentados os valores dos aumentos das frotas de utilitários nos municípios da RMSP, de 2006 a 2022. Importante destacar que não foram registradas reduções nos números das frotas destes veículos durante o período analisado.

Tabela 9 – Consolidado dos aumentos das frotas de utilitários nos municípios da RMSP de 2006 a 2022 (continua)

Municípios	jan-06	dez-22	Aumento Percentual
Arujá	35	1050	2900,00%
Barueri	258	5794	2145,74%
Biritiba Mirim	0	105	-
Caieiras	9	570	6233,33%
Cajamar	15	530	3433,33%
Carapicuíba	11	1577	14236,36%
Cotia	62	3091	4885,48%
Diadema	32	1541	4715,63%
Embu	9	1000	11011,11%
Embu-Guaçu	0	332	-
Ferraz de Vasconcelos	3	490	16233,33%
Francisco Morato	0	204	-
Franco da Rocha	1	459	45800,00%
Guararema	3	252	8300,00%
Guarulhos	165	8264	4908,48%
Itapecerica da Serra	11	735	6581,82%
Itapevi	8	615	7587,50%
Itaquaquecetuba	6	841	13916,67%
Jandira	7	599	8457,14%

Tabela 10 – Consolidado dos aumentos das frotas de utilitários nos municípios da RMSP de 2006 a 2022 (conclusão)

Municípios	jan-06	dez-22	Aumento Percentual
Juquitiba	0	153	-
Mairiporã	21	810	3757,14%
Mauá	23	1664	7134,78%
Mogi das Cruzes	63	3909	6104,76%
Osasco	77	4824	6164,94%
Pirapora do Bom Jesus	0	48	-
Poá	9	522	5700,00%
Ribeirão Pires	22	874	3872,73%
Rio Grande da Serra	0	105	-
Salesópolis	1	100	9900,00%
Santa Isabel	2	284	14100,00%
Santana do Parnaíba	227	4427	1850,22%
Santo André	150	7448	4865,33%
São Bernardo do Campo	219	8147	3620,09%
São Caetano do Sul	98	3841	3819,39%
São Lourenço da Serra	5	126	2420,00%
São Paulo	8941	199243	2128,42%
Suzano	19	11	-42,11%
Taboão da Serra	11	1551	14000,00%
Vargem Grande Paulista	5	515	10200,00%

3.2 Modelo Bayesiano de Série Temporal Estrutural

A partir do modelo bayesiano de séries temporais, este trabalho analisou o efeito causal das restrições aos veículos de carga nas cidades das regiões metropolitanas de Belo Horizonte e São Paulo, que foram escolhidas pelo histórico na implementação de medidas restritivas aos veículos de carga em suas capitais. Os procedimentos metodológicos de pesquisa estão ilustrados de forma sintetizada na Figura 11.

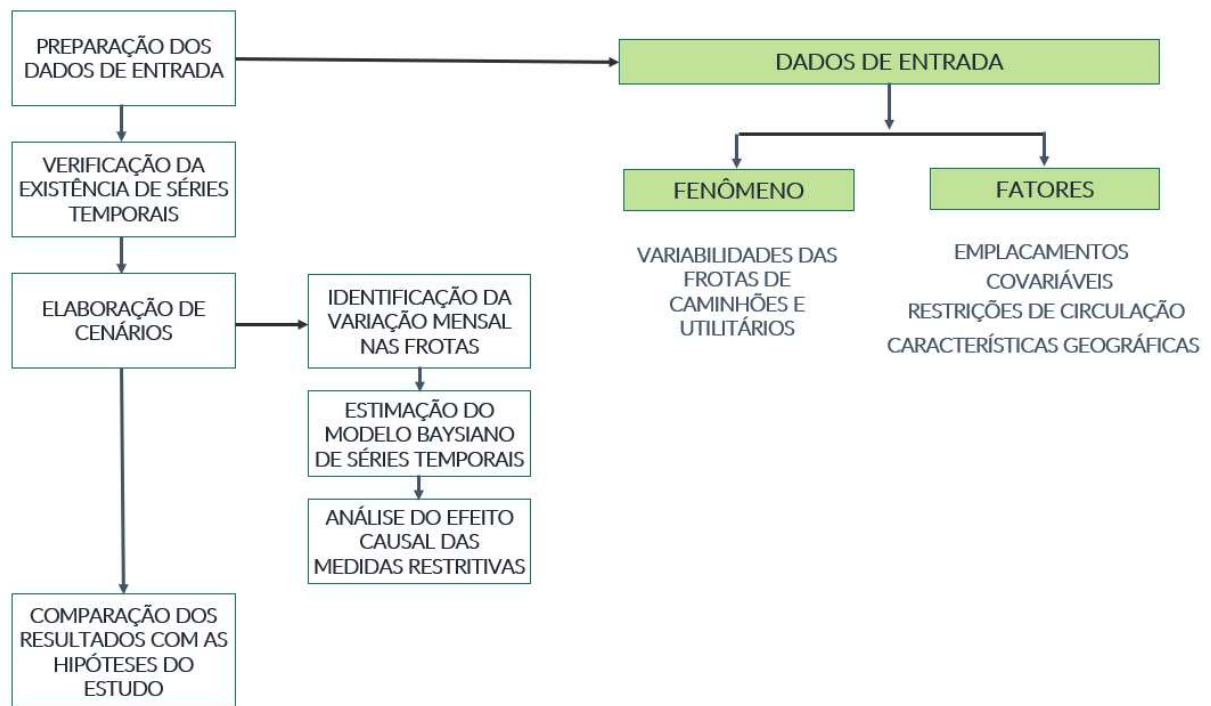


Figura 11 - Fluxograma dos procedimentos adotados nesta pesquisa.

Como informações de entrada, foram utilizados dados públicos dos emplacamentos de caminhões e utilitários das cidades das regiões metropolitanas de Belo Horizonte e São Paulo, obtidos através do Portal de Serviços da Secretaria Nacional de Trânsito – SENATRAM (Brasil, 2023). Estas informações foram denominadas como o fenômeno dos dados de entrada. Além disso, foram considerados os fatores dos dados de entrada, que neste caso foram caracterizados como os emplacamentos, as covariáveis, as restrições de circulação dos veículos e as características geográficas das regiões analisadas. Importante dizer que todas estas informações

foram consideradas como dados de entrada do estudo e fazem parte da etapa de preparação dos dados do procedimento adotado neste trabalho.

A etapa de elaboração de cenários é constituída pelas seguintes ações: identificação da variação mensal nas frotas analisadas; estimação do modelo Bayesiano de Séries Temporais; análise do efeito causal das medidas restritivas. Todos estes processos foram de grande importância para a elaboração e análises dos cenários deste estudo.

Caminhão é definido como um veículo automotor destinado ao transporte de carga, com carroceria e peso bruto total superior a 3.500 kg. Utilitário é todo veículo misto, caracterizado pela sua versatilidade de uso, inclusive fora de estrada. Importante ressaltar que, apesar da frota de utilitários não incluir especificamente veículos urbanos de carga, é a categoria que os veículos de pequeno porte são registrados.

O modelo bayesiano de séries temporais foi estimado usando o pacote CausalImpact, desenvolvido por Brodersen *et al.* (2015) para o ambiente R. A fim de estimar como a série temporal se comportaria sem a interferência das restrições aos veículos de carga, é preciso utilizar outras séries temporais que estejam relacionadas com a série de interesse, mas que não tenham sido afetadas pelas restrições, as covariáveis. Esse modelo assume que as covariáveis não são afetadas pelos efeitos do tratamento. Importante dizer que neste trabalho o tratamento é a restrição à circulação de veículos de carga. Logo, utilizou-se como covariáveis dados públicos das temperaturas médias (°C) e os volumes de precipitações pluviométricas (mm), os quais foram obtidos através do Portal de Serviços do Instituto Nacional de Meteorologia INMET (INMET, 2023).

Na Figura 12 é apresentado gráfico com a evolução dos valores mensais da média de precipitações (em mm) no município de Belo Horizonte e São Paulo, de 2006 a 2022. Estes valores foram utilizados como covariáveis nas simulações de todos os municípios da RMBH e da RMSP, respectivamente.

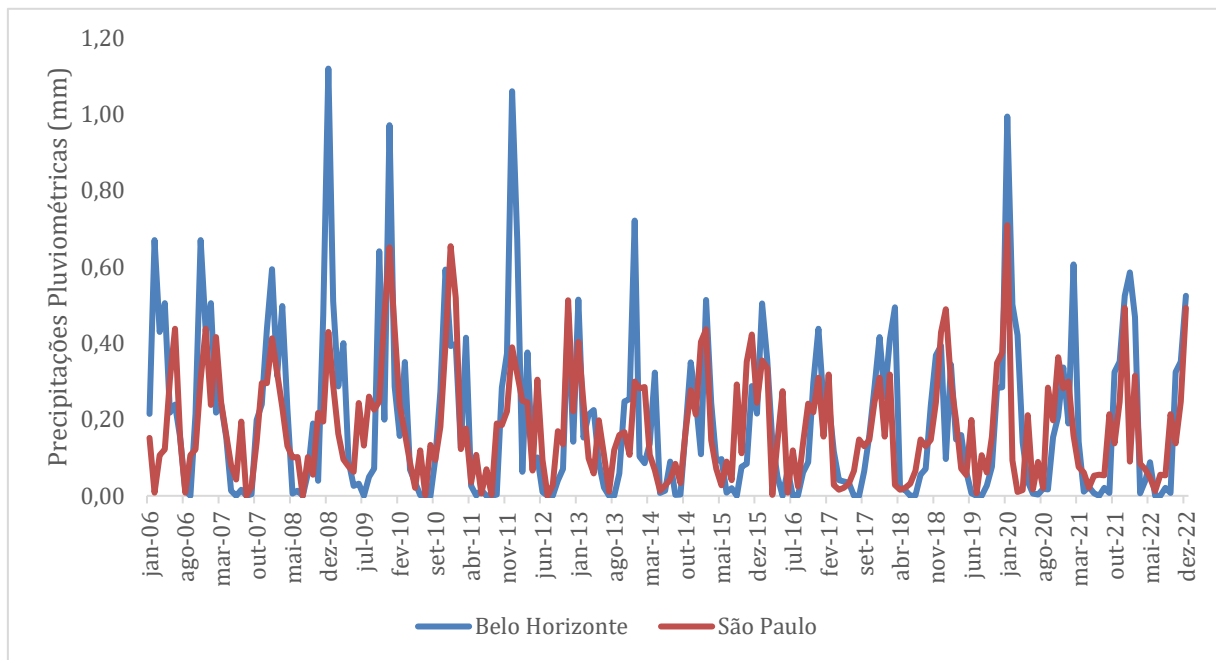


Figura 12 - Evoluções das médias de precipitações em Belo horizonte e São Paulo de 2006 a 2022

Na Figura 13 é apresentado gráfico com a evolução dos valores mensais da média das temperaturas (em °C) no município de Belo Horizonte e São Paulo, de 2006 a 2022. Estes valores foram utilizados como covariáveis nas simulações de todos os municípios da RMBH e da RMSP, respectivamente.

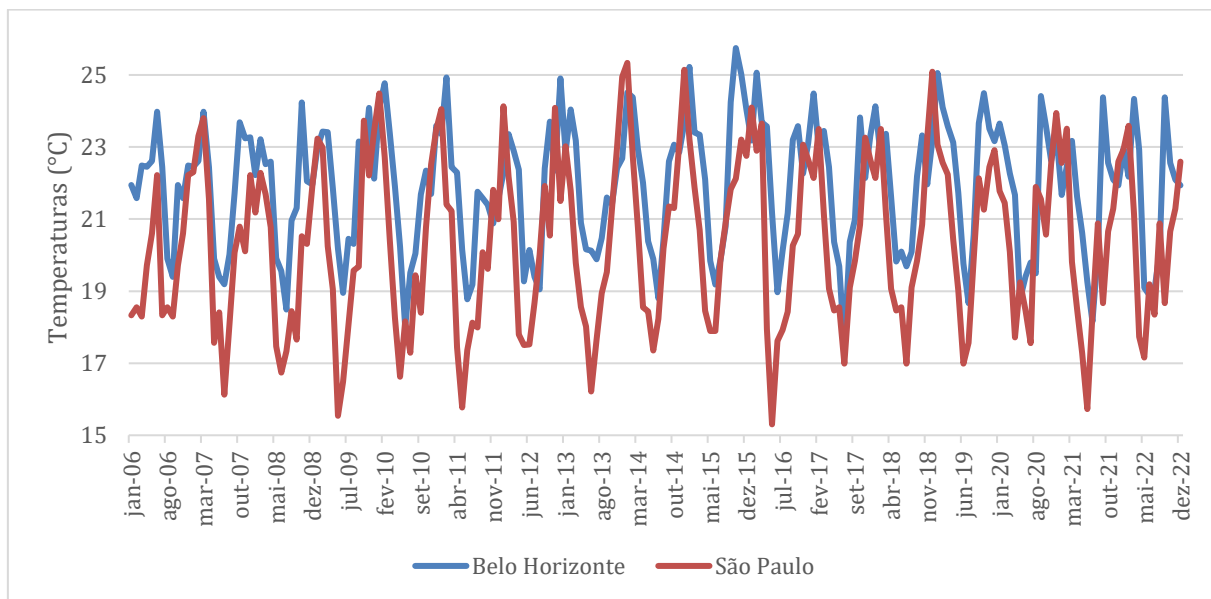


Figura 13 - Evoluções das médias das temperaturas em Belo horizonte e São Paulo de 2006 a 2022

A variação mensal da evolução da frota foi obtida e os resultados foram analisados por meio de inferência causal. O efeito causal de um tratamento é a diferença entre o valor observado da resposta e o valor não observado que teria sido obtido sob o tratamento alternativo, ou seja, o efeito do tratamento na série temporal. Neste cenário, a variável resposta é uma série temporal. Dessa forma, o efeito causal de interesse é a diferença entre o valor das séries observadas e os valores que teriam sido observados caso a intervenção não tivesse ocorrido. Logo, foi avaliado o efeito causal das medidas de restrições aos veículos de carga (tratamento) nas frotas de caminhões e utilitários (variável resposta), nas cidades das regiões metropolitanas de Belo Horizonte e São Paulo.

Contrafactual é uma situação ou evento que não aconteceu, mas que poderia ter acontecido. Neste estudo o contrafactual é a não implementação das restrições à circulação de veículos de carga. Uma abordagem poderosa para a construção do contrafactual é baseada na ideia de combinar um conjunto de variáveis preditoras em um único “controle sintético”. Em termos gerais, existem três fontes de informações disponíveis para a construção de um sistema de controle sintético adequado. A primeira é o comportamento de séries temporais da resposta em si, antes da intervenção. A segunda é o comportamento de outras séries temporais que foram preditoras das séries alvo antes da intervenção. Tais séries de controle podem ser baseadas, por

exemplo, no mesmo produto em uma região diferente da que não recebeu a intervenção ou em uma métrica que reflete atividade na indústria como um todo. Em um modelo bayesiano estrutural, a terceira fonte de informação para a inferência do contrafactual é a disponibilidade de conhecimento prévio sobre os parâmetros do modelo através de estudos prévios.

Como resultados, serão apresentados os valores das variabilidades em cenários reais (com restrição aos veículos de carga), cenários fictícios (sem restrição aos veículos de carga), os valores dos efeitos absolutos e efeitos relativos.

Os valores dos cenários com restrição correspondem aos valores das séries temporais realmente observadas antes e após os tratamentos. Os valores dos cenários sem restrição correspondem aos valores das séries temporais fictícias obtidas a partir das simulações e que são interpretados como os valores que teriam sido observados caso as intervenções não tivessem ocorrido. Os valores dos efeitos absolutos correspondem aos efeitos causais absolutos, ou seja, a diferença entre os valores dos cenários com restrição e os valores dos cenários sem restrição. Os valores dos efeitos relativos correspondem aos efeitos causais relativos, ou seja, a diferença entre os valores dos cenários com restrição e os valores dos cenários sem restrição, mas em um percentual de variação.

Conforme Brodersen *et al.* (2015), as equações do modelo bayesiano de séries temporais estruturais podem ser definidas pelo seguinte par de equações:

$$y_t = Z_t^T \alpha_t + \varepsilon_t, \quad (1)$$

$$\alpha_t + 1 = T_t \alpha_t + R_t \eta_t, \quad (2)$$

em que $\varepsilon_t \sim N(0, \sigma_t^2)$ e $\eta_t \sim N(0, Q_t)$ são independentes de todos os outros parâmetros desconhecidos. A equação (1) é a equação de observação, a qual realiza a ligação do dado observado y_t com um latente vetor de estado d-dimensional α_t . A equação (2) é a equação de estado, ela controla a evolução do vetor de estado α_t através do tempo. Neste trabalho, y_t é uma observação escalar, Z_t é um vetor de saída d-dimensional, T_t é uma matriz de transição d x d, R_t é uma matriz de controle d x q, ε_t é um erro de observação escalar com a variância de ruído σ_t , e η_t é um erro de sistema q-dimensional com uma matriz de difusão de estado $q \times q$.

$\mathcal{Q}_t$, onde $q \leq d$. Descrever o erro estrutural da equação (2) como $R_t\eta_t$ nos permite incorporar componentes de estado de classificação inferior a completa.

5 RESULTADOS

Os resultados para a RMBH estão ilustrados nas Figuras 8 e 9, através de mapas coropléticos com os resultados dos efeitos absolutos e relativos dos caminhões, que estão descritos nas Tabelas 7 e 8. Os intervalos das legendas dos mapas foram padronizados, divididos em cinco classes pelo método de quebras naturais de Jenks, de maneira a facilitar as análises. Os menores efeitos absolutos dos caminhões da RMBH são observados nas cidades de Belo Horizonte (-33 veículos/mês) e Contagem (-13 veículos/mês), com as maiores reduções de caminhões, em números absolutos, causadas pela restrição à circulação destes veículos em Belo Horizonte. Por outro lado, os maiores valores dos efeitos absolutos são verificados nas cidades de São José da Lapa (5,5 veículos/mês) e Ribeirão das Neves (3,7 veículos/mês). Além disso, pode-se verificar que os menores efeitos relativos dos caminhões são observados nas cidades de Confins (-1.018%) e Mario Campos (-506%) e os maiores valores são verificados nas cidades de Rio Manso (563%) e Ribeirão das Neves (346%), causados pela restrição à circulação dos caminhões em Belo Horizonte.

Nas Figuras 14 e 15 também são apresentados os mapas coropléticos com os resultados dos efeitos absolutos e relativos dos utilitários da RMBH. A partir da observação desta figura, pode-se verificar que os menores efeitos absolutos dos utilitários são observados nas cidades de São Joaquim de Bicas (-0,02 veículos/mês) e Baldim (0,068 veículos/mês). Por outro lado, os maiores valores dos efeitos absolutos são verificados nas cidades de Belo Horizonte (152 veículos/mês) e Contagem (8,2 veículos/mês). Além disso, pode-se verificar que os menores efeitos relativos dos utilitários são observados nas cidades de Vespasiano (-8.726%) e Mateus Leme (-265%) e os maiores efeitos relativos dos utilitários são verificados nas cidades de São José da Lapa (31.867%) e Itaguara (16.190%), causados pela restrição à circulação dos caminhões em Belo Horizonte.

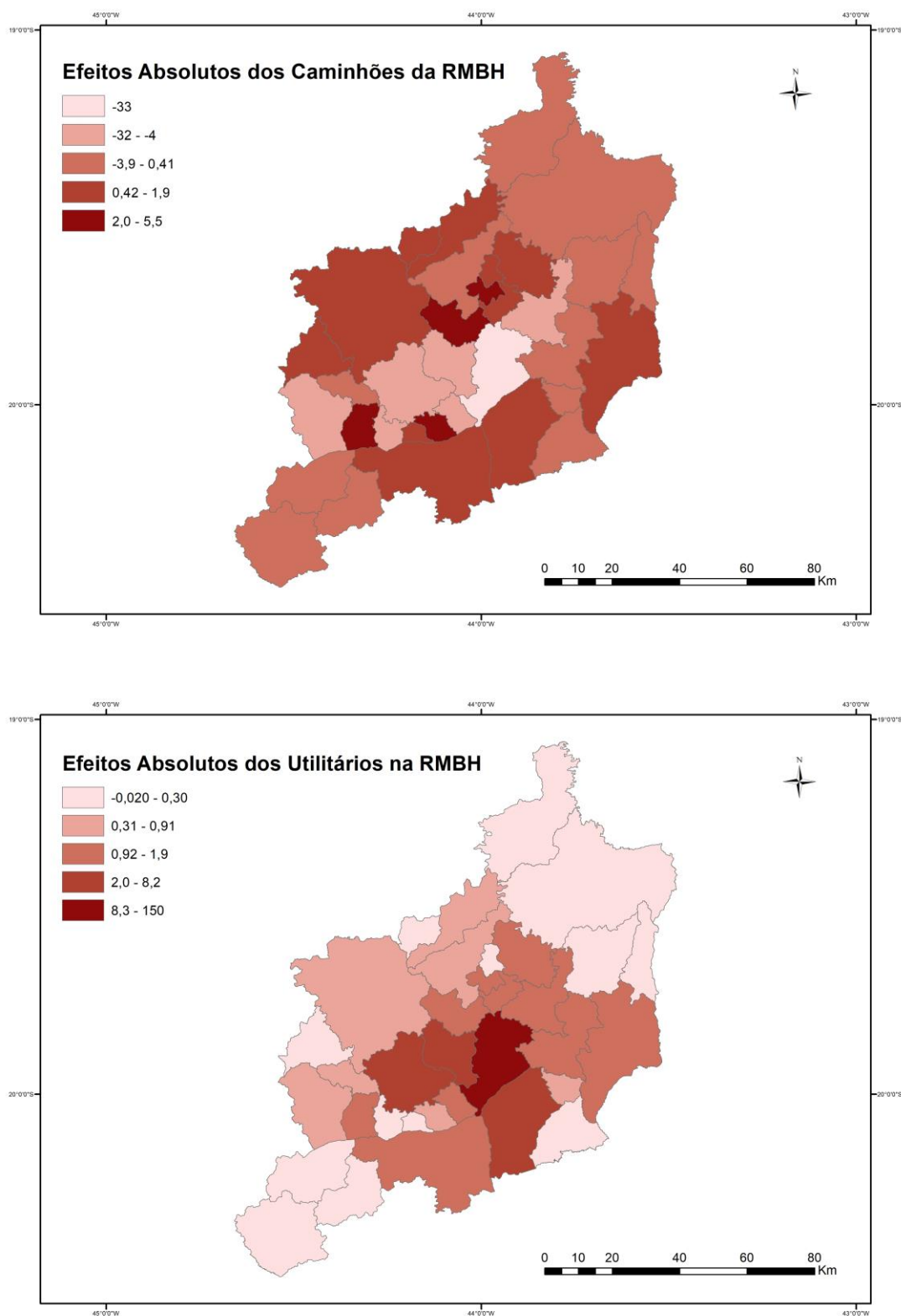


Figura 14 - Efeitos Absolutos dos Caminhões (em cima) dos Utilitários (embaixo) da RMBH

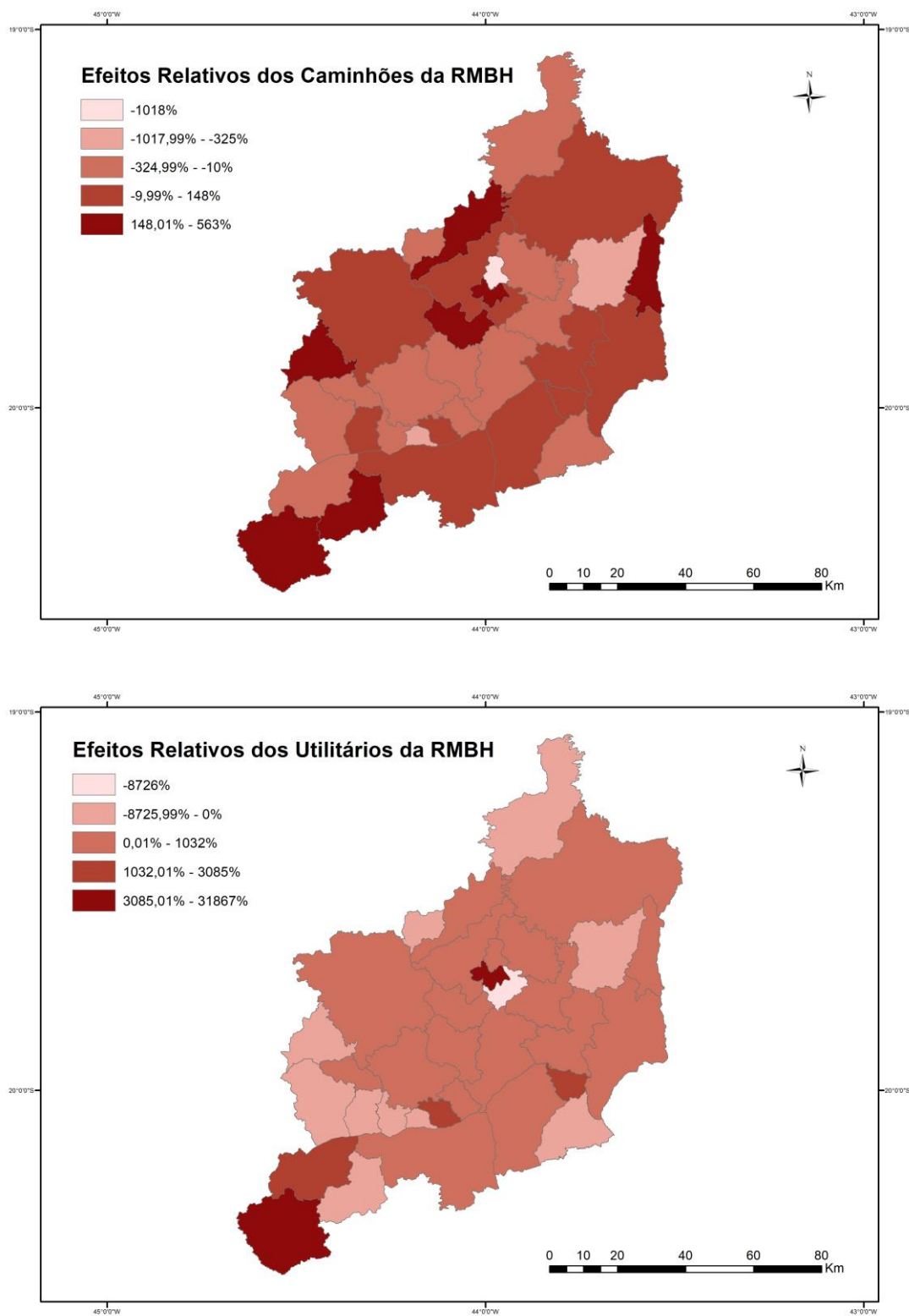


Figura 15 - Efeitos Relativos dos Caminhões (em cima) dos Utilitários (embaixo) da RMBH

Tabela 11 - Efeitos causais das restrições na frota de caminhões das cidades da RMBH

Cidade	Incremento da frota com restrição (veículos/mês)	Incremento da frota sem restrição (veículos/mês)	Caminhão Efeito Absoluto (veículos/mês)	Caminhão Efeito Relativo (%)	Probabilidade do Efeito Causal (p-valor)
Baldim	0,6	1,1	-0,5 [-1,0, -0,0]	-42,0% [-62,0%, -0,6%]	97,6% (0.02407)
Belo Horizonte	76,0	109,0	-33,0 [-50,0, -16,0]	-30,0% [-40,0%, -18,0%]	99,9% (0.001)
Betim	19,0	29,0	-11,0 [-15,0, -5,8]	-36,0% [-44,0%, -24,0%]	99,9% (0.001)
Brumadinho	3,8	3,1	0,8 [-1,2, 2,8]	44,0% [-24,0%, 246,0%]	78,0% (0.221)
Caeté	1,8	1,2	0,6 [-0,4, 1,6]	70,0% [-20,0%, 610,0%]	91,0% (0.09228)
Capim Branco	0,8	0,2	0,6 [0,2, 0,9]	-106,0% [-3678,0%, 5423,0%]	99,8% (0.002)
Confins	1,7	0,2	1,5 [1,1, 2,0]	-1018,0% [-11030,0%, 7074,0%]	99,9% (0.00101)
Contagem	24,0	37,0	-13,0 [-22,0, -3,8]	-33,0% [-47,0%, -14,0%]	99,5% (0.005)
Esmeraldas	2,9	2,0	1,0 [-0,2, 2,0]	65,0% [-6,3%, 214,0%]	95,2% (0.04814)
Florestal	0,6	0,1	0,6[0,2, 0,9]	282,0% [-4924,0%, 5819,0%]	99,7% (0.003)
Ibirité	4,3	9,1	-4,8 [-8,4, -1,4]	-51,0% [-66,0%, -24,0%]	99,2% (0.00802)
Igarapé	4,9	2,4	2,6 [1,5, 3,6]	123,0% [45,0%, 278,0%]	99,9% (0.001)
Itaguara	1,4	1,4	-0,1 [-1,3, 1,2]	249,0% [-52,0%, 348,0%]	52,0% (0.483)
Itatiaiuçu	0,7	1,1	-0,4 [-1,0, 0,2]	-18,0% [-60,0%, 47,0%]	89,0% (0.11033)
Jaboticatubas	1,2	1,0	0,2 [-0,5, 0,9]	39,0% [-29,0%, 254,0%]	71,0% (0.29)
Juatuba	0,7	3,1	-2,3 [-4,3, -0,4]	-72,0% [-86,0%, -36,0%]	99,0% (0.01003)
Lagoa Santa	2,9	1,2	1,7 [0,3, 3,1]	-121,0% [-2389,0%, 1774,0%]	98,5% (0.015)
Mario Campos	1,3	0,3	1,0 [0,2, 1,9]	-506,0% [-3130,0%, 5283,0%]	99,2% (0.00802)
Mateus Leme	0,7	4,7	-4,0 [-6,5, -1,8]	-85,0% [-91,0%, -73,0%]	99,9% (0.001)
Matozinhos	2,8	0,9	1,9 [1,3, 2,6]	296,0% [89,0%, 998,0%]	99,9% (0.001)
Nova Lima	7,1	6,6	0,5 [-1,9, 3,0]	11,0% [-21,0%, 73,0%]	63,0% (0.37412)
Nova Uniao	0,8	0,4	0,4 [-0,1, 0,9]	296,0% [-606,0%, 1382,0%]	95,2% (0.048)
Pedro Leopoldo	4,2	4,1	0,1 [-1,2, 1,5]	6,2% [-23,0%, 55,0%]	56,0% (0.441)
Raposos	0,5	0,3	0,2 [-0,1, 0,5]	111,0% [-584,0%, 823,0%]	90,0% (0.095)
Ribeirão das Neves	5,5	1,7	3,7 [0,7, 6,9]	346,0% [-2088,0%, 2961,0%]	99,0% (0.01003)
Rio Acima	0,2	0,5	-0,3 [-0,8, 0,2]	-10,0% [-80,0%, 188,0%]	86,0% (0.14372)
Rio Manso	0,6	0,3	0,3 [-0,2, 0,8]	563,0% [-1653,0%, 1848,0%]	90,0% (0.10431)
Sabara	2,4	2,0	0,3 [-1,1, 1,8]	56,0% [-31,0%, 324,0%]	70,0% (0.30191)
Santa Luzia	3,6	9,6	-6,0 [-8,0, -4,0]	-62,0% [-69,0%, -53,0%]	99,9% (0.001)
São Joaquim de Bicas	1,3	6,1	-4,9 [-7,0, -2,8]	-79,0% [-85,0%, -68,0%]	99,9% (0.001)
São José da Lapa	7,3	1,8	5,5 [4,9, 6,2]	316,0% [202,0%, 531,0%]	99,9% (0.001)
Sarzedo	5,6	2,4	3,3 [2,5, 4,1]	148,0% [81,0%, 266,0%]	99,9% (0.001)
Taquaraçu de Minas	0,6	0,2	0,4 [0,1, 0,6]	-325,0% [-2160,0%, 2062,0%]	99,2% (0.008)
Vespasiano	5,4	4,5	0,9 [-0,5, 2,2]	23,0% [-8,2%, 68,0%]	90,0% (0.09729)

Tabela 12 - Efeitos causais das restrições na frota de utilitários das cidades da RMBH

Cidade	Utilitário com Restrição (veículos/mês)	Utilitário sem Restrição (veículos/mês)	Utilitário Efeito Absoluto (veículos/mês)	Utilitário Efeito Relativo (%)	Probabilidade do Efeito Causal (p-valor)
Baldim	0,1	0,0	0,1 [-0,0, 0,1]	-233,0% [-2592,0%, 2694,0%]	96,7% (0.033)
Belo Horizonte	266,0	113,0	152,0 [139,0, 1660]	136,0% [109,0%, 168,0%]	99,9% (0.001)
Betim	8,1	3,5	4,6 [3,6, 5,6]	137,0% [78,0%, 225,0%]	99,9% (0.001)
Brumadinho	2,4	0,5	1,9 [1,6, 2,2]	427,0% [193,0%, 1151,0%]	99,9% (0.001)
Caete	1,9	0,5	1,3 [1,0, 1,7]	242,0% [94,0%, 1074,0%]	99,9% (0.001)
Confins	0,2	0,1	0,1 [0,1, 0,2]	158,0% [-2752,0%, 2858,0%]	99,9% (0.001)
Contagem	15,0	6,3	8,2 [6,8, 9,7]	133,0% [88,0%, 202,0%]	99,9% (0.001)
Esmeraldas	0,6	0,1	0,5 [0,3, 0,7]	210,0% [-2864,0%, 3604,0%]	99,9% (0.001)
Ibirité	1,7	0,5	1,2 [0,8, 1,5]	2,8%	99,9% (0.001)
Igarapé	1,4	0,2	1,2 [1,0, 1,3]	-360,0% [311,0%, 2717,0%]	99,9% (0.001)
Itaguara	0,4	0,1	0,3 [0,2, 0,4]	16190,0% [-2867,0%, 4803,0%]	99,9% (0.001)
Itatiaiuçu	0,1	0,0	0,1 [0,0, 0,2]	1962,0% [-2634,0%, 3498,0%]	99,8% (0.002)
Jaboticatubas	0,4	0,1	0,3 [0,0, 0,5]	557,0% [-2555,0%, 4041,0%]	98,5% (0.015)
Juatuba	0,5	0,0	0,4 [0,3, 0,6]	1032,0% [-6533,0%, 9842,0%]	99,9% (0.001)
Lagoa Santa	3,2	1,3	1,9 [1,5, 2,4]	160,0% [91,0%, 282,0%]	99,9% (0.001)
Mateus Leme	0,6	0,1	0,5 [0,4, 0,7]	-265,0% [-9436,0%, 11633,0%]	99,9% (0.001)
Matozinhos	0,9	0,3	0,6 [0,3, 0,9]	253,0% [44,0%, 1079,0%]	99,9% (0.001)
Nova Lima	11,0	5,0	6,1 [5,0, 7,1]	125,0% [85,0%, 184,0%]	99,9% (0.001)
Nova União	0,2	0,0	0,2 [0,1, 0,2]	260,0% [-4212,0%, 5336,0%]	99,9% (0.001)
Pedro Leopoldo	1,4	0,7	0,7 [0,4, 1,1]	130,0% [35,0%, 338,0%]	99,9% (0.001)
Raposos	0,5	0,0	0,5 [0,4, 0,5]	3085,0% [-19903,0%, 24681,0%]	99,9% (0.001)
Ribeirão das Neves	1,6	0,3	1,3 [1,0, 1,6]	437,0% [-2106,0%, 2272,0%]	99,9% (0.001)
Rio Acima	0,3	0,2	0,1 [-0,1, 0,3]	-2,4% [-44,0%, 711,0%]	78,0% (0.22066)
Sabará	2,4	0,6	1,8 [1,4, 2,1]	322,0% [133,0%, 764,0%]	99,9% (0.00101)
Santa Luzia	2,1	0,6	1,6 [1,2, 1,9]	406,0% [120,0%, 952,0%]	99,9% (0.001)
São Joaquim de Bicas	0,2	0,3	-0,0 [-0,2, 0,2]	-24,0% [-51,0%, 321,0%]	56,0% (0.438)
São José da Lapa	1,1	0,0	1,1 [1,0, 1,3]	31867,0% [-27392,0%, 20524,0%]	99,9% (0.001)
Sarzedo	1,0	0,1	0,9 [0,8, 1,0]	1490,0% [-8974,0%, 11627,0%]	99,9% (0.00101)
Vespasiano	1,7	0,1	1,6 [1,4, 1,8]	-8726,0% [-16208,0%, 16467,0%]	99,9% (0.001)

Nas Tabelas 7 e 8 foram apresentados os valores das variabilidades em cenários reais (com restrição aos veículos de carga), cenários fictícios (sem restrição aos veículos de carga), os valores dos efeitos absolutos e efeitos relativos das cidades da RMBH. Os valores reais, fictícios e dos efeitos absolutos são apresentados utilizando a unidade de medida veículos/mês. Além disso, os efeitos absolutos e relativos foram apresentados com os seus respectivos intervalos de probabilidade, os quais informam os intervalos em que se encontram 95% dos valores respostas.

De forma global, nas tabelas 9 e 10 foram apresentados os valores das variabilidades em cenários reais e fictícios, assim como os efeitos absolutos e relativos dos caminhões e utilitários, respectivamente.

Tabela 13 - Efeitos causais globais das restrições na frota de caminhões das cidades da RMBH

Cidade	Caminhão com Restrição (veículos/mês)	Caminhão sem Restrição (veículos/mês)	Caminhão Efeito Absoluto (veículos/mês)	Caminhão Efeito Relativo (%)	Probabilidade do Efeito Causal (p-valor)
RMBH	200	248	-48 [-68, -28]	-19% [-25%, -12%]	99.8997% (0.001)

Tabela 14 - Efeitos causais globais das restrições na frota de utilitários das cidades da RMBH

Cidade	Utilitário com Restrição (veículos/mês)	Utilitário sem Restrição (veículos/mês)	Utilitário Efeito Absoluto (veículos/mês)	Utilitário Efeito Relativo (%)	Probabilidade do Efeito Causal (p-valor)
RMBH	326	133	194 [176, 211]	147% [117%, 182%]	99.8997% (0.001)

Nas Figuras 16 e 17 estão ilustrados os resultados para a RMSP, que estão descritos nas Tabelas 7 e 8. A partir da observação destas figuras, pode-se verificar que os menores efeitos absolutos dos caminhões da RMSP são observados nas cidades de Guarulhos (-95 veículos/mês) e Osasco (-60 veículos/mês). Por outro lado, os maiores valores dos efeitos absolutos são verificados nas cidades de São Paulo (518 veículos/mês) e Franco da Rocha (0,54 veículos/mês). Além disso, pode-se verificar que os menores efeitos relativos dos caminhões são observados nas cidades de São Paulo (-213%) e Ribeirão Pires (-131%) e os maiores valores são verificados nas cidades de Franco da Rocha (14%) e Biritiba Mirim (6,7%), causados pela restrição à circulação dos caminhões em São Paulo. Na Figura 8 também são apresentados os mapas coropléticos com os resultados dos efeitos absolutos e relativos dos utilitários da RMSP. A partir da observação desta figura, pode-se verificar que os menores efeitos absolutos dos utilitários são observados em Pirapora do Bom Jesus (0,047 veículos/mês) e Mairiporã (0,15 veículos/mês). Por outro lado, os maiores valores são verificados em São Paulo (462 veículos/mês) e Guarulhos (30 veículos/mês). Além disso, pode-se verificar que os menores efeitos relativos dos utilitários são observados nas cidades de Salesópolis (-856%) e Mairiporã (5,2%) e os maiores valores são verificados em Biritiba Mirim (1.370%) e Ferraz de Vasconcelos (1.018%), causados pela restrição à circulação dos caminhões em São Paulo.

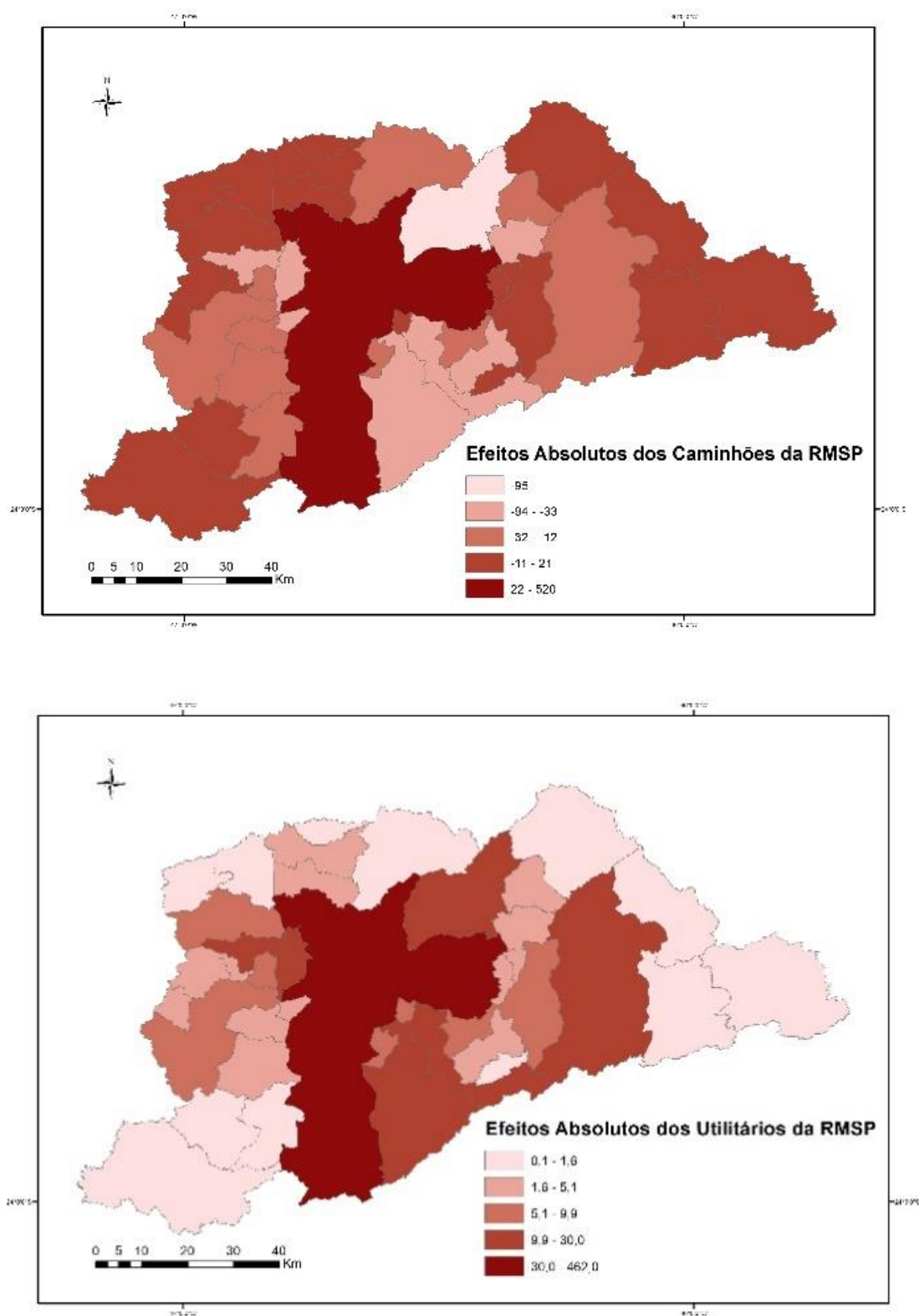


Figura 16 - Efeitos Absolutos dos Caminhões (em cima) dos Utilitários (embaixo) da RMSP

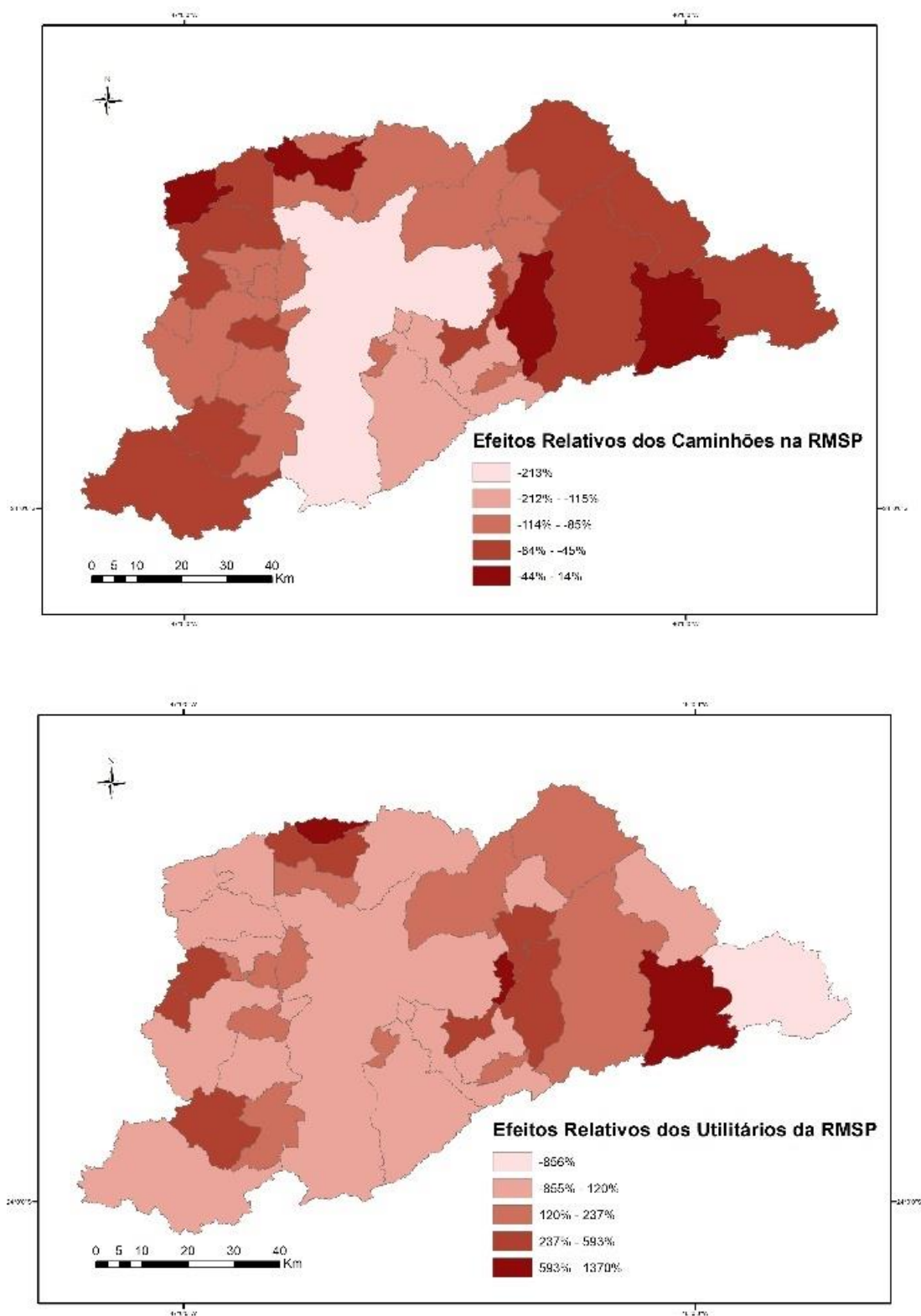


Figura 17 - Efeitos Relativos dos Caminhões (em cima) dos Utilitários (embaixo) da RMSP

Tabela 15 - Efeitos causais das restrições na frota de caminhões das cidades da RMSP

Cidade	Caminhão com Restrição (veículos/mês)	Caminhão sem Restrição (veículos/mês)	Caminhão Efeito Absoluto (veículos/mês)	Caminhão Efeito Relativo (%)	Probabilidade do Efeito Causal (p-valor)
Arujá	0.82	15	-14 [-19, -10]	-94% [-96%, -92%]	99.8997% (0.001)
Barueri	5.7	44	-39 [-49, -28]	-87% [-90%, -83%]	99.8997% (0.001)
Biritiba Mirim	1.5	1.5	0.018 [-0.6, 0.63]	6.7% [-29%, 73%]	52% (0.478)
Caieiras	0.52	7.8	-7.3 [-9.6, -5.1]	-93% [-95%, -91%]	99.8997% (0.001)
Cajamar	2.2	9.7	-7.5 [-11, -3.9]	-76% [-83%, -63%]	99.9% (0.001)
Carapicuíba	2	26	-24 [-29, -19]	-92% [-94%, -91%]	99.8997% (0.001)
Cotia	2.7	18	-16 [-19, -12]	-85% [-88%, -81%]	99.8997% (0.001)
Diadema	1.6	19	-18 [-22, -13]	-92% [-93%, -89%]	99.8997% (0.001)
Embu	3.5	17	-13 [-18, -8]	-78% [-84%, -70%]	99.8997% (0.001)
Embu-Guacu	1.5	16	-14 [-19, -9.8]	-90% [-92%, -87%]	99.8997% (0.001)
Ferraz de Vasconcelos	2.9	12	-9.4 [-13, -5.6]	-76% [-82%, -66%]	99.8997% (0.001)
Francisco Morato	0.18	3.3	-3.1 [-4.3, -2]	-94% [-96%, -92%]	99.9% (0.001)
Franco da Rocha	5.8	5.2	0.54 [-1.4, 2.2]	14% [-19%, 63%]	74% (0.26131)
Guararema	0.97	3.4	-2.4 [-3.6, -1.2]	-70% [-79%, -55%]	99.8997% (0.001)
Guarulhos	11	106	-95 [-108, -82]	-90% [-91%, -89%]	99.8997% (0.001)
Itapeçerica da Serra	-0.92	21	-22 [-31, -16]	-104% [-106%, -103%]	99.89047% (0.0011)
Itapevi	4.8	8.8	-4.1 [-6.6, -1.6]	-45% [-58%, -25%]	99.9% (0.001)
Itaquaquecetuba	3.3	53	-50 [-75, -27]	-93% [-96%, -89%]	99.87624% (0.00124)
Jandira	0.11	3.5	-3.3 [-5.1, -1.6]	-97% [-98%, -94%]	99.9% (0.001)
Juquitiba	0.75	4	-3.2 [-4.3, -2.1]	-81% [-85%, -74%]	99.9% (0.001)
Mairipora	2.2	19	-16 [-26, -10]	-88% [-92%, -82%]	99.89485% (0.00105)
Maua	4.8	16	-12 [-16, -7.1]	-70% [-77%, -60%]	99.8997% (0.001)
Mogi das Cruzes	6.6	36	-29 [-39, -19]	-81% [-85%, -74%]	99.9% (0.001)
Osasco	-2.9	57	-60 [-69, -51]	-105% [-106%, -104%]	99.8997% (0.001)
Pirapora do Bom Jesus	0.72	1.1	-0.36 [-0.92, 0.25]	-26% [-56%, 55%]	89% (0.107)
Poa	0.22	4.5	-4.2 [-6.2, -2.3]	-95% [-97%, -92%]	99.9% (0.001)
Ribeirão Pires	-13	44	-57 [-77, -39]	-131% [-149%, -120%]	99.8997% (0.001)
Rio Grande da Serra	0.48	3.8	-3.4 [-5.1, -1.6]	-87% [-91%, -78%]	99.8997% (0.001)
Salesópolis	1	3.4	-2.4 [-4.2, -0.69]	-68% [-80%, -40%]	99.6991% (0.00301)
Santa Isabel	1.9	7.1	-5.2 [-7.8, -2.6]	-72% [-80%, -57%]	99.9% (0.001)
Santana do Parnaíba	3	8.7	-5.7 [-8.6, -3.1]	-65% [-74%, -51%]	99.9% (0.001)
Santo André	-10	40	-50 [-63, -38]	-126% [-137%, -119%]	99.8997% (0.001)
São Bernardo do Campo	-8.3	38	-46 [-56, -36]	-122% [-130%, -117%]	99.8997% (0.001)
São Caetano do Sul	-88	6	-6.9 [-9.2, -4.5]	-115% [-125%, -111%]	99.9% (0.001)
São Lourenço da Serra	0.6	2.2	-1.6 [-2.6, -0.74]	-72% [-81%, -55%]	99.9% (0.001)
São Paulo	160	-358	518 [136, 913]	-213% [-366%, 47%]	99.26% (0.007)
Suzano	0.41	-20	21 [-97, 143]	-101% [-114%, -91%]	64% (0.35613)
Taboão da Serra	-0.76	32	-33 [-138, 75]	-101% [-121%, -69%]	72% (0.27726)
Vargem Grande Paulista	0.35	4.6	-4.3 [-12, 3.5]	-99% [-179%, -51%]	86% (0.13846)

Tabela 16 - Efeitos causais das restrições na frota de utilitários das cidades da RMSP

Cidade	Utilitário com Restrição (veículos/mês)	Utilitário sem Restrição (veículos/mês)	Utilitário Efeito Absoluto (veículos/mês)	Utilitário Efeito Relativo (%)	Probabilidade do Efeito Causal (p-valor)
Arujá	6.1	3.2	2.9 [2, 3.8]	98% [48%, 169%]	99.8997% (0.001)
Barueri	33	17	16 [13, 19]	94% [65%, 129%]	99.9% (0.001)
Biritiba Mirim	0.77	0.09	0.68 [0.59, 0.77]	1370% [-2085%, 5840%]	99.9% (0.001)
Caieiras	3.5	1.5	2 [1.5, 2.6]	150% [74%, 287%]	99.9% (0.001)
Cajamar	3.2	1.6	1.6 [0.95, 2.4]	120% [42%, 278%]	99.9% (0.001)
Carapicuíba	10	3.1	7.2 [6.2, 8.1]	237% [147%, 375%]	99.8997% (0.001)
Cotia	18	10	7.3 [5.1, 9.3]	73% [41%, 111%]	99.8997% (0.001)
Diadema	9.9	3.2	6.6 [5.7, 7.6]	211% [134%, 326%]	99.8997% (0.001)
Embu	6.4	2.4	4 [3.1, 4.8]	177% [97%, 317%]	99.9% (0.001)
Embu-Guacu	2	0.91	1.1 [0.65, 1.5]	134% [48%, 321%]	99.9% (0.001)
Ferraz de Vasconcelos	3.4	0.44	3 [2.7, 3.3]	1018% [349%, 3471%]	99.8997% (0.001)
Francisco Morato	1.5	0.17	1.3 [1.1, 1.5]	1001% [-1547%, 6975%]	99.9% (0.001)
Franco da Rocha	3.1	0.72	2.4 [1.9, 2.8]	350% [163%, 959%]	99.8997% (0.001)
Guararema	1.5	0.78	0.73 [0.29, 1.2]	118% [24%, 404%]	99.9% (0.001)
Guarulhos	51	21	30 [25, 34]	142% [95%, 202%]	99.8997% (0.001)
Itapecerica da Serra	4.3	2.3	2	0,95	99.9% (0.001)
Itapevi	4.1	1.1	3 [2.5, 3.5]	296% [161%, 549%]	99.9% (0.001)
Itaquaquecetuba	6	0.96	5.1 [4.5, 5.5]	593% [311%, 1207%]	99.9% (0.001)
Jandira	3.7	1.7	2.1	135% [62%, 265%]	99.9% (0.001)
Juquitiba	0.92	0.61	0.31 [0.0013, 0.61]	61% [0.14%, 190%]	97.5% (0.025)
Mairipora	4.2	4.1	0.15 [-0.89, 1.1]	5.2% [-17%, 36%]	63% (0.37111)
Maua	11	2.6	8.6 [7.7, 9.6]	349% [217%, 573%]	99.8997% (0.001)
Mogi das Cruzes	25	9.4	15 [13, 17]	164% [112%, 232%]	99.8997% (0.001)
Osasco	30	11	19 [17, 21]	169% [121%, 236%]	99.8997% (0.001)
Pirapora do Bom Jesus	0.25	0.2	0.047 [-0.1, 0.19]	52% [-31%, 332%]	75% (0.254)
Poa	3.4	0.97	2.4 [1.9, 2.9]	285% [132%, 620%]	99.9% (0.001)
Ribeirão Pires	5	2.9	2.1 [0.96, 3.1]	77% [24%, 162%]	99.9% (0.001)
Rio Grande da Serra	0.68	0.31	0.37 [0.19, 0.55]	152% [38%, 432%]	99.8% (0.002)
Salesópolis	0.65	0.17	0.49 [0.29, 0.7]	-856% [-1920%, 3276%]	99.9% (0.001)
Santa Isabel	1.8	0.65	1.2 [0.88, 1.5]	195% [95%, 412%]	99.8997% (0.001)
Santana do Parnaíba	23	16	7.3 [4.4, 10]	46% [23%, 76%]	99.8997% (0.001)
Santo André	44	22	22 [18, 26]	102% [70%, 140%]	99.8997% (0.001)
São Bernardo do Campo	46	28	17 [12, 23]	63% [34%, 102%]	99.8997% (0.001)
São Caetano do Sul	22	12	9.9 [6.9, 13]	82% [45%, 134%]	99.8997% (0.001)
São Lourenço da Serra	0.83	0.25	0.58 [0.4, 0.78]	350% [87%, 1426%]	99.9% (0.001)
São Paulo	1107	645	462 [392, 527]	72% [55%, 91%]	99.89% (0.001)
Suzano	0.085	0.54	-0.45 [-7.9, 7.2]	-100% [-128%, -66%]	54% (0.45553)
Taboão da Serra	10	6	4.1 [-2.8, 11]	94% [-1201%, 973%]	88% (0.12126)
Vargem Grande Paulista	3.3	0.98	2.3 [0.46, 4.3]	275% [-2595%, 3044%]	99.1453% (0.00855)

Nas Tabelas 11 e 12 foram apresentados os valores das variabilidades em cenários reais (com restrição aos veículos de carga), cenários fictícios (sem restrição aos veículos de carga), os valores dos efeitos absolutos e efeitos relativos das cidades da RMSP. Os valores reais, fictícios e dos efeitos absolutos são apresentados utilizando a unidade de medida veículos/mês. Além disso, os efeitos absolutos e relativos foram apresentados com os seus respectivos intervalos de probabilidade, os quais informam os intervalos em que se encontram 95% dos valores respostas.

De forma global, nas tabelas 13 e 14 foram apresentados os valores das variabilidades em cenários reais e fictícios, assim como os efeitos absolutos e relativos dos caminhões e utilitários, respectivamente.

Tabela 17 - Efeitos causais globais das restrições na frota de caminhões das cidades da RMSP

Cidade	Caminhão com Restrição (veículos/mês)	Caminhão sem Restrição (veículos/mês)	Caminhão Efeito Absoluto (veículos/mês)	Caminhão Efeito Relativo (%)	Probabilidade do Efeito Causal (p-valor)
RMSP	366	1009	-643 [-806, -484]	-64% [-69%, -57%]	99.8997% (0.001)

Tabela 18 - Efeitos causais globais das restrições na frota de utilitários das cidades da RMSP

Cidade	Utilitário com Restrição (veículos/mês)	Utilitário sem Restrição (veículos/mês)	Utilitário Efeito Absoluto (veículos/mês)	Utilitário Efeito Relativo (%)	Probabilidade do Efeito Causal (p-valor)
RMSP	1522	847	675 [582, 772]	80% [62%, 103%]	99.8995% (0.00101)

5.1 Discussão dos Resultados

Analisando os resultados foi possível verificar que, na maioria dos casos, os efeitos causais foram estatisticamente significativos.

Na RMBH, Rio Acima e Raposos foram as cidades cuja resposta causal as restrições à circulação dos veículos de carga na capital foram menores. Por outro lado, os maiores valores de variabilidade dos caminhões foram em Belo Horizonte (76 veículos/mês) e Contagem (24 veículos/mês). Logo, Belo Horizonte e Contagem foram as duas cidades que as respostas causais, das restrições à circulação dos veículos de carga na capital, foram maiores. Quando são

analisados os cenários fictícios (sem restrições à circulação de veículos) na RMBH, os menores valores de variabilidade dos caminhões foram observados em Florestal (0,1 veículos/mês) e Capim Branco (0,2 veículos/mês) enquanto Belo Horizonte (109 veículos/mês) e Contagem (37 veículos/mês) tiveram as maiores variações. Além disso, foi possível verificar que, em Belo Horizonte, a variabilidade da frota de caminhões reduziu em 30%. Quando são analisadas todas as cidades da região metropolitana de Belo Horizonte, os resultados indicam que a variabilidade da frota de caminhões reduziu em 19%. Observando apenas as cidades da RMBH, com exceção de Belo Horizonte, os resultados indicam que a variabilidade da frota de caminhões reduziu em 6,9%. Portanto, os resultados mostraram que, de forma geral, as variabilidades mensais das frotas de caminhões foram respostas causais, nas cidades analisadas, das restrições à circulação dos veículos de carga em Belo Horizonte.

Em relação a frota de utilitários na RMBH, os menores valores foram observados em Baldim (0,1 veículos/mês) e Itatiaiuçu (0,1 veículos/mês), enquanto as maiores variações ocorreram em Belo Horizonte (266 veículos/mês) e Contagem (15 veículos/mês). Quando é analisado o cenário fictício (sem restrições à circulação de veículos), é possível constatar que os menores valores de variabilidade dos utilitários são observados em Baldim (0,01 veículos/mês) e São José da Lapa (0,01 veículos/mês), enquanto Belo Horizonte (113 veículos/mês) e Contagem (6,3 veículos/mês) também tiveram as maiores variações. Além disso, foi possível verificar que, em Belo Horizonte, a variabilidade da frota de utilitários aumentou em 136%. Quando são analisadas todas as cidades da região metropolitana de Belo Horizonte, os resultados indicam que a variabilidade da frota de utilitários aumentou em 147%. Observando apenas as cidades da RMBH, com exceção de Belo Horizonte, os resultados indicam que a variabilidade da frota de utilitários aumentou em 211%. Portanto, os resultados mostraram que, de forma geral, as variabilidades mensais das frotas de utilitários foram respostas causais, nas cidades analisadas, das restrições à circulação dos veículos de carga em Belo Horizonte.

Na RMSP foi identificado que os menores valores de variabilidade dos caminhões, considerando o cenário real de restrições, são observados em São Caetano do Sul (-88 veículos/mês) e Ribeirão Pires (-13 veículos/mês). Assim, estas cidades tiveram as menores variabilidades causadas pela restrição à circulação destes veículos em São Paulo. Por outro lado, os maiores valores de variabilidade dos caminhões, considerando o cenário real, são observados

em São Paulo (160 veículos/mês) e Guarulhos (11 veículos/mês). Portanto, estas cidades tiveram as maiores variabilidades causadas pela restrição à circulação destes veículos em São Paulo. Quando são analisados os cenários fictícios (sem restrições à circulação de veículos) na RMSP, os menores valores de variabilidade dos caminhões ocorreram em São Paulo (-358 veículos/mês) e Pirapora do Bom Jesus (1,1 veículos/mês). Logo, essas cidades tiveram as menores variabilidades da frota de caminhões causadas pela restrição à circulação dos veículos de carga em São Paulo quando analisado um cenário sem restrição. Por outro lado, Guarulhos (106 veículos/mês) e Osasco (57 veículos/mês) teriam as maiores variações na frota de caminhões, caso a restrição de circulação destes veículos em São Paulo não tivesse ocorrido. Além disso, foi possível verificar que, em São Paulo, a variabilidade da frota de caminhões reduziu em 213%. Quando são analisadas todas as cidades da região metropolitana de São Paulo, os resultados indicam que a variabilidade da frota de caminhões reduziu em 64%. Observando apenas as cidades da RMSP, com exceção de São Paulo, os resultados indicam que a variabilidade da frota de caminhões reduziu em 80%. Portanto, os resultados mostraram que, de forma geral, as variabilidades mensais das frotas de caminhões foram respostas causais, nas cidades analisadas, das restrições à circulação dos veículos de carga em São Paulo.

Quando são analisados os resultados das variabilidades dos utilitários na RMSP, é possível verificar que os menores valores, considerando o cenário real de restrições na RMSP, são observados em Pirapora do Bom Jesus (0,25 veículos/mês) e Salesópolis (0,65 veículos/mês). Logo, estas cidades tiveram as menores variabilidades de utilitários causadas pela restrição à circulação dos veículos de carga em São Paulo, enquanto São Paulo (1.107 veículos/mês) e Guarulhos (51 veículos/mês) tiveram as maiores variabilidades de utilitários causadas pela restrição à circulação dos veículos de carga em São Paulo. Quando analisado o cenário fictício (sem restrições à circulação de veículos), os menores valores de variabilidade dos utilitários são observados em Biritiba Mirim (0,09 veículos/mês) e Francisco Morato (0,17 veículos/mês), enquanto as maiores variações ocorreram em São Paulo (645 veículos/mês) e São Bernardo do Campo (28 veículos/mês). Além disso, foi possível verificar que, em São Paulo, a variabilidade da frota de utilitários aumentou em 72%. Quando são analisadas todas as cidades da região metropolitana de São Paulo, os resultados indicam que a variabilidade da frota de utilitários aumentou em 80%. Observando apenas as cidades da RMSP, com exceção de São Paulo, os

resultados indicam que a variabilidade da frota de utilitários aumentou em 106%. Portanto, os resultados mostraram que, de forma geral, as variabilidades mensais das frotas de utilitários foram respostas causais, nas cidades analisadas, das restrições à circulação dos veículos de carga em São Paulo.

De forma global, os resultados apontaram que as restrições à circulação de veículos de carga contribuíram para o aumento da variabilidade das frotas de caminhões e utilitários nas cidades das regiões metropolitanas de Belo Horizonte e São Paulo. Os resultados também indicaram potenciais impactos negativos, visto o aumento significativo no número de veículos. Entretanto, o aumento do efeito relativo das restrições, quando analisado de forma global, ocorreu exclusivamente para as frotas de veículos utilitários. Na RMBH foi identificada uma redução de -19% do efeito relativo dos caminhões, enquanto para os utilitários houve um aumento de 147%. Na RMSP foi identificada uma redução de -64% do efeito relativo dos caminhões, enquanto para os utilitários houve um aumento de 80%.

6 CONCLUSÃO

Este estudo estimou o efeito causal das medidas de restrição aos veículos de carga na frota de caminhões e utilitários nas cidades das regiões metropolitanas de Belo Horizonte e São Paulo, através da estimativa dos efeitos causais em um modelo bayesiano estrutural de séries temporais, utilizando as variações dos perfis de veículos de janeiro/2006 a dezembro/2022.

A implantação de políticas públicas de restrição à circulação de veículos de carga com o objetivo de reduzir os congestionamentos é uma medida amplamente utilizada em grandes centros urbanos. No entanto, os resultados deste estudo mostraram um efeito contrário ao de redução de congestionamentos, uma vez que foram observados aumentos nas frotas analisadas. Logo, esta dissertação evidenciou o potencial de análise dos efeitos causais, em um modelo bayesiano estrutural de séries temporais, para apoiar decisões práticas de mobilidade urbana em cidades de grandes regiões metropolitanas, as quais foram escolhidas pelo histórico de implantação de medidas restritivas aos veículos de carga.

Os resultados permitem concluir que as variabilidades mensais das frotas de caminhões e utilitários foram respostas causais das restrições à circulação dos veículos de carga das cidades analisadas. Logo, confirmam a hipótese de que as restrições à circulação de veículos de carga contribuíram para o aumento da variabilidade das frotas de caminhões e utilitários nas cidades das regiões metropolitanas de Belo Horizonte e São Paulo. Além disso, indicam potenciais impactos negativos das medidas de restrição na mobilidade urbana, visto o aumento significativo do número de veículos nas frotas municipal, e que os veículos de carga de menor capacidade não contribuíram para reduzir o congestionamento e poluição, uma vez que o aumento das frotas nas áreas analisadas foi verificado.

Este estudo se limitou a considerar apenas as restrições à circulação de veículos de carga nas capitais Belo Horizonte e São Paulo. No entanto, é comum que cidades de menor porte também implementem restrições à circulação de veículos de carga, muitas das vezes com o objetivo de reduzir acidentes, congestionamentos e outros impactos na mobilidade urbana. Além disso, o número de utilitários também foi afetado por outros fatores, tais como o crescimento global do e-commerce por exemplo.

Devido não se conhecer estudos que analisam a efetividade desta política de mobilidade urbana, conforme exposto aqui, para futuros trabalhos sugere-se expandir as análises para as restrições já implantadas nas demais cidades das regiões metropolitanas, das quais fazem parte Belo Horizonte e São Paulo, e seus respectivos impactos à mobilidade urbana destas cidades.

Tendo em vista a importância da criação de medidas para minimizar os efeitos de congestionamentos, poluição do ar e acidentes, sendo estes fatores motivadores para a restrição de veículos de carga em diversas cidades, são cada vez mais necessárias ações assertivas que venham ao encontro do objetivo comum da sociedade de buscar cada vez mais qualidade de vida e segurança. Logo, estudos como este visam contribuir para que sejam ampliadas as avaliações já realizadas com este objetivo e, de forma indireta, fomentar mais pesquisas na área de logística urbana e definir diretrizes para apoiar restrições na mobilidade urbana que de fato sejam eficazes na busca de um propósito tão nobre.

REFERÊNCIAS

- AL EISAEIA, M.; MORIDPOURB, S.; TAY, R. Heavy Vehicle Management: Restriction Strategies, v. 21, p. 18–28, 2017.
- BONTEMPO, A. P. et al. Evaluating Restrictions on the Circulation of Freight Vehicles in Brazilian Cities, v. 125, p. 275–283, 2014.
- BRASIL. Código de Trânsito Brasileiro. . 1997.
- BRASIL. **Estatísticas Frota de Veículos - SENATRAN**. Disponível em: <<https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transito/conteudo-Senatran/estatisticas-frota-de-veiculos-senatran>>.
- BRODERSEN, K. H. et al. Inferring causal impact using bayesian structural time-series models, v. 9, n. 1, p. 247–274, 2015.
- CRUZ, C.; MONTENON, A. Implementation and Impacts of Low Emission Zones on Freight Activities in Europe: Local Schemes Versus National Schemes v. 12, p. 544–556, 2016.
- DE OLIVEIRA, G. F.; DE OLIVEIRA, L. K. Stakeholder’s perception about urban goods distribution solution: exploratory study in Belo Horizonte (Brazil)., v. 25, p. 942–953, 2017.
- DE OLIVEIRA, L. K. et al. Evaluating problems and measures for a sustainable urban freight transport in Brazilian historical cities, v. 69, p. 102806, 2021.
- EREN AKYOL, D.; DE KOSTER, R. B. M. Determining time windows in urban freight transport: A city cooperative approach., v. 118, p. 34–50, 2018.
- FONSECA, P. H. F.; SERAFIM, E. Z. C.; OLIVEIRA, L. K. DE. Análise do Efeito Causal das Restrições aos Veículos de Carga na Frota de Caminhões e Utilitários em Cidades Brasileiras, 2023.
- HU, S.; CHEN, P. Who left riding transit? Examining socioeconomic disparities in the impact of COVID-19 on ridership. v. 90, p. 102654, 2021.
- INMET. **Normais climatológicas do Brasil**. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br>>.
- JOUBERT, J. W. Using MATSim to test sensitivity towards vehicle ban enforcement, v. 151, p. 794–799, 2019.
- KOHNS, D.; BHATTACHARJEE, A. Nowcasting growth using Google Trends data: A Bayesian Structural Time Series model, v. 39, n. 3, p. 1384–1412, 2023.
- LYONS, L. et al. Impacts of time restriction on heavy truck corridors: The case study of Mexico City, v. 102, p. 119–129, 2017.

MECHAI, N.; WICAKSONO, H. Causal Inference in Supply Chain Management: How Does Ever Given Accident at the Suez Canal Affect the Prices of Shipping Containers?, v. 232, p. 3173–3182, 2024.

Política Nacional de Mobilidade Urbana. 12.587. 2012.

QUAK, H. J.; DE KOSTER, M. B. M. Exploring retailers' sensitivity to local sustainability policies, v. 25, n. 6, p. 1103–1122, 2007.

RUSSO, F.; COMI, A. A classification of city logistics measures and connected impacts, v. 2, n. 3, p. 6355–6365, 2010.

TANIGUCHI, E. et al. Public Sector Governance to Implement Freight Vehicle Transport Management, v. 125, p. 345–357, 2014.

THI, B. N.; THI THU, H. T. Impact of Decisions in Freight Transport Management on Rice Logistics in the Mekong Delta of Vietnam, v. 48, p. 540–554, 2020.

XI, H. et al. Evaluating travel behavior resilience across urban and Rural areas during the COVID-19 Pandemic: Contributions of vaccination and epidemiological indicators, v. 180, p. 103980, 2024.

ZHANG, Y.; FRICKER, J. D. Quantifying the impact of COVID-19 on non-motorized transportation: A Bayesian structural time series model, v. 103, p. 11–20, 2021.