

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

CURSO DE MESTRADO EM GEOTECNIA E TRANSPORTES

**TRAGÉDIA DOS BENS COMUNS NA
MOBILIDADE URBANA:
O CASO DE BELO HORIZONTE**

Ricardo Luiz Vilela de Castro

Belo Horizonte

2018

Ricardo Luiz Vilela de Castro

**TRAGÉDIA DOS BENS COMUNS NA
MOBILIDADE URBANA:
O CASO DE BELO HORIZONTE**

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.

Área de concentração: Transportes

Orientador: Prof. Dr. Antônio Artur de Souza

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2018

C355t

Castro, Ricardo Luiz Vilela de.

Tragédia dos bens comuns na mobilidade urbana [manuscrito] : o caso de Belo Horizonte / Ricardo Luiz Vilela de Castro . - 2018. xii, 160 f., enc.: il.

Orientador: Antônio Artur de Souza.

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

Bibliografia: f. 154-161.

1. Transportes - Teses. 2. Mobilidade urbana - Belo Horizonte (MG) - Teses. 3. Automóveis - Teses. 4. Ônibus - Teses. 5. Bem comum - Teses. I. Souza, Antônio Artur de. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 656(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA E TRANSPORTES



FOLHA DE APROVAÇÃO

TRAGÉDIA DOS BENS COMUNS NA MOBILIDADE URBANA: O CASO DE BELO HORIZONTE

RICARDO LUIZ VILELA DE CASTRO

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Curso de Mestrado em GEOTECNIA E TRANSPORTES, como requisito para obtenção do grau de Mestre em GEOTECNIA E TRANSPORTES, área de concentração TRANSPORTES.

Aprovada em 26 de fevereiro de 2018, pela banca constituída pelos membros:


Prof. Antonio Artur de Souza – Orientador
Universidade Federal de Minas Gerais


Prof. Leandro Cardoso
UFMG


Prof. Luiz Henrique Duczmal
DEST/UFMG

Belo Horizonte, 26 de fevereiro de 2018.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente aos meus pais, Isabel Vilela (Belinha) e José Araújo (Zezé), que me ensinaram dentre outras coisas que é importante sempre estar aprendendo e correndo atrás dos seus sonhos. E tantos foram os bons exemplos que me passaram que não cabem aqui nestas poucas linhas.

Agradeço também com muito carinho à minha esposa Luciana, que além do apoio incondicional conseguiu não surtar com todo o meu estresse durante esse mestrado.

Ao meu orientador Antônio Artur, que me deu a liberdade “criativa” que eu tanto queria, além de importantes sugestões para a guinada do tema e da metodologia, e que me pressionou de maneira saudável até que o texto ficasse pronto.

A todos os colegas e professores do Departamento de Geotecnia e Transportes, que ajudaram no meu crescimento profissional e consequentemente também nesta dissertação, mesmo que indiretamente.

Ao colega Rômulo, por me apresentar ao tema tragédia dos comuns e, que, sem saber, estava me dando não só o título como também um grande enriquecimento e direcionamento à esta dissertação.

Ao meu cunhado Pedro, por toda a ajuda e boa vontade com a revisão ortográfica.

A todos aqueles que me ajudaram na minha graduação em Estatística, em especial minha tia Elaine que me indicou o curso, além de me hospedar em sua casa, junto com meu tio Fábio.

Aos bons professores de todas escolas que estudei, do cursinho, da graduação, em especial ao Adrian Luna, meu orientador de monografia e iniciação científica. Também agradeço aos outros mestres da vida, como Faustino, Sérgio, e também a tantos outros, como por exemplo os que tentaram me ensinar a tocar violão, mas que infelizmente a falta de jeito para a coisa não me deixou aprender.

Enfim, esta dissertação não teria saído se eu não fosse a pessoa que eu me tornei por causa de todos vocês.

Deixo aqui o meu muito OBRIGADO!

“Não fique para sempre na via pública. Ocasionalmente, deixe o caminho traçado para trás e mergulhe na floresta. Você certamente encontrará algo que nunca viu antes e algo que valha a pena pensar para ocupar sua mente. Todas as grandes descobertas são o resultado do pensamento. ”

Alexander Graham Bell, apud Ralph Whiteside Kerr (1947, p.131)

“O que aprendi, acima de tudo, é a seguir em frente, pois a grande ideia é a de que, como o acaso efetivamente participa do nosso destino, um dos importantes fatores que levam ao sucesso está sob o nosso controle: o número de vezes que tentamos rebater a bola, o número de vezes que nos arriscamos, o número de oportunidades que aproveitamos. Pois até mesmo uma moeda viciada que tenda ao fracasso às vezes cairá do lado do sucesso. ”

Leonard Mlodinow (2011, p. 280)

RESUMO

Este trabalho buscou avaliar a possibilidade da *tragédia dos bens comuns na mobilidade urbana* na Cidade de Belo Horizonte, Brasil. Em resumo, esta *tragédia* ocorreria se o aumento da utilização do automóvel causasse uma piora na mobilidade, em termos de tempo despendido no trânsito. Em uma descrição mais completa, trata-se de um estudo que avalia se a escolha individual *racional* de cada cidadão, que opta pelo modo de transporte mais satisfatório para si, pode de alguma forma tornar o resultado pior para todos, caso todos os cidadãos tomem a decisão pelo mesmo critério. Este fenômeno já foi descrito a respeito do compartilhamento de pastos públicos por pastores, cujo resultado inevitável de degradação ambiental é chamado *tragédia dos bens comuns*, que é um caso especial do *Dilema do Prisioneiro*; que por sua vez, é um jogo descrito pela *Teoria dos Jogos*. Na analogia aqui proposta, os *bens comuns* seriam a malha viária de uma cidade e a decisão a ser tomada pelos indivíduos seria o dilema de utilizar o automóvel ou o ônibus como modo de transporte. O quadro de escolhas e recompensas para esta analogia, visto como um caso do *Dilema do Prisioneiro* em *mobilidade urbana*, pode ser considerado pioneiro na literatura. A revisão da bibliografia demonstrou que a utilização do ônibus como uma forma de *cooperação* – que poderia evitar tal *tragédia* – não pode ocorrer em uma cidade grande, onde os viajantes em geral não se conhecem. Utilizando a base de dados de trajetos da Pesquisa Origem e Destino da RMBH de 2012, e por meio de uma metodologia que envolveu a roteirização desses trajetos; além da estimação das velocidades e densidades de veículos nas vias; e do ajuste de um modelo macroscópico de tráfego que permitiu a previsão dos tempos de viagem em situações hipotéticas de tráfego; foi possível comparar os tempos de viagem entre a situação em que todos os viajantes usassem somente o ônibus e a situação em que todos usassem somente o carro. O tempo sob esta segunda situação foi considerado infinito, já que a densidade na região "Centro" durante o horário de pico da tarde atingiria o valor máximo possível. Logo, a conclusão final do trabalho foi a de que a *tragédia dos bens comuns* é uma possibilidade real em Belo Horizonte. Isto é, a escolha racional de se optar pelo automóvel, por ele ser mais rápido atualmente; se tomada por todos os cidadãos, pode levar paradoxalmente ao aumento do tempo médio de viagem. Isto já era uma proposição da literatura, que ainda não havia sido demonstrada quantitativamente como foi feito neste trabalho. Por conseguinte, este trabalho corroborou estudos anteriores que alertaram a sociedade a respeito dos riscos associados ao aumento do uso dos automóveis nas grandes cidades.

Palavras-chave: mobilidade urbana, tragédia dos bens comuns, automóvel, ônibus.

ABSTRACT

This work has sought to evaluate the possibility of the *tragedy of the commons in urban mobility* in the City of Belo Horizonte, Brazil. In short, this tragedy would occur if the increased car use worsen the mobility in terms of time spent in traffic. More completely, it is a study assessing whether the *rational* individual choice of each citizen choosing the most satisfactory mode of transportation for himself or herself, can somehow effect a result worse for all, that is, if all citizens make the decision by the same criterion. A similar phenomenon had formerly been described regarding the sharing of public ground pastures by certain pastoralists, a sharing whose inevitable environmental degradation result falls into the *tragedy of the commons* predicate. The latter is a special instance of the *Prisoner's Dilemma* conception, a game described in *Theory of Games*. According to the analogy or application proposed here, *commons* is the road network of a city; and the decision to be made by individuals would concern the dilemma of using either car or bus as their mode of transportation. The chart of choices and rewards for this analogy, seen as a case of the *Prisoner's Dilemma* in *urban mobility*, can be considered a pioneer in the literature. Incidentally, the literature reviewed hereby, shows that using buses as a form of *cooperation* – which cooperation if feasible could avoid the *tragedy* – cannot take place in a large city, where travelers generally do not know each other. Using the route database of the Research of Origin and Destination of RMBH 2012, and through a methodology that involved the routing of riding courses; and the estimation of road speeds and densities; the adjustment of a macroscopic traffic model allowing the prediction of traveling clocked times in hypothetical traffic situations; it was possible to compare traveling times, to compare the one situation in which all travelers used only the bus and the another situation in which everyone only used car. The time under this second situation was considered infinite, since the downtown density during afternoon rush or peak hour would reach the maximum value possible. Therefore, the final conclusion of the work is that *tragedy of common goods* is a real possibility in Belo Horizonte. That is, the rational choice to opt for car because it is faster nowadays; if taken by all citizens, can paradoxically lead to an increase in average traveling time. This has been a proposition of the source literature, but it had not yet been demonstrated quantitatively, as was done in the present work. In this way, this work corroborated previous studies warning society about the risks associated with the increasing use of automobiles in large cities.

Keywords: urban mobility, tragedy of the commons, automobile, bus.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Tema e Problema.....	1
1.2	Contextualização.....	2
1.3	Objetivos	5
1.4	Justificativa	7
2	REVISÃO DA LITERATURA	8
2.1	Mobilidade Urbana	8
2.1.1	Previsão de ocupação das vias no planejamento de transportes	8
2.1.2	Modelagem e simulação do tráfego.....	14
2.1.3	Custo do transporte e custo do congestionamento.....	22
2.2	Teoria dos jogos, Dilema do Prisioneiro e Tragédia dos Bens comuns	24
2.2.1	Teoria dos Jogos.....	24
2.2.2	Dilema do Prisioneiro	26
2.2.3	Tragédia dos Bens Comuns.....	29
2.3	Tragédia dos bens comuns na mobilidade urbana	34
2.3.1	Analogia proposta	34
2.3.2	Pesquisas já realizadas.....	38
3	METODOLOGIA DA PESQUISA.....	47
3.1	Delineamento	47
3.2	População e amostra	47
3.3	Coleta de Dados	47
3.3.1	Pesquisa Origem e Destino (OD)	48
3.3.2	Malha viária.....	49
3.3.3	Itinerários e Quadro de Horários (QH) dos ônibus.....	52
3.4	Análise de dados.....	54
3.4.1	Objetivo específico 1: Roteirização	56
3.4.2	Objetivo específico 2: Estimação da velocidade média	57
3.4.3	Objetivo específico 3: Estimação da densidade de veículos.....	63
3.4.4	Objetivo específico 4: Análise macroscópica.....	65
3.4.5	Objetivo específico 5: Comparação dos tempos de viagem	67
3.5	Pressupostos	71
3.5.1	Pressupostos para a Roteirização.....	73
3.5.2	Pressupostos para a Estimação da velocidade média.....	73

3.5.3	Pressupostos para a Estimação da densidade média de veículos	74
3.5.4	Pressupostos para a Análise macroscópica	75
3.5.5	Pressupostos para a Comparação dos tempos	76
3.6	Delimitação	77
4	ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS	79
4.1	Roteirização	80
4.2	Estimação da velocidade média	89
4.2.1	Modelos com 10 regionais e 1 tipo de via para carros.....	95
4.2.2	Modelos com 10 regionais e 1 tipo de via para ônibus	102
4.2.3	Modelos com 3 grupos de regionais e 1 tipo de via para carros	109
4.2.4	Modelos com 3 grupos de regionais e 1 tipo de via para ônibus	113
4.3	Estimação da densidade de veículos	116
4.4	Modelagem macroscópica.....	120
4.5	Comparação dos tempos de viagem sob diferentes matrizes modais	129
4.5.1	Primeiro caso, onde a matriz modal é a mesma da pesquisa OD2012.....	130
4.5.2	Segundo e terceiro casos, primeira etapa: estimação dos novos fluxos de veículos	132
4.5.3	Segundo e terceiro casos, segunda etapa: estimação das novas velocidades 133	
4.5.4	Segundo e terceiro casos, terceira etapa: cálculo dos tempos	143
5	CONCLUSÕES	145
5.1	Considerações finais a respeito dos objetivos	145
5.2	Limitações	149
5.3	Contribuições desta pesquisa	150
5.4	Sugestões para trabalhos futuros.....	152
6	REFERÊNCIAS.....	154

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BHTRANS: Empresa de Transportes e Trânsito de Belo Horizonte S/A

RMBH: Região Metropolitana de Belo Horizonte

OD: Pesquisa de Origem e Destino

UMM: Unidade de Macro Mobilidade

AH: Área Homogênea

MAD: Período da Madrugada (00:00 às 05:00)

FPM: Faixa de Pico da Manhã (05:00 às 09:00)

EPM: Entre Picos da Manhã (09:00 às 11:00)

FPA: Faixa de Pico do Almoço (11:00 às 14:00)

EPT: Entre Picos da Tarde (14:00 às 16:00)

FPT: Faixa de Pico da Tarde (16:00 às 20:00)

NOT: Período Noturno (20:00 às 00:00)

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Dilema do prisioneiro: recompensa (payoff) para cada um dos jogadores (suspeitos) em “anos de liberdade nos próximos 5 anos”.....	27
Quadro 2 – Possibilidade da tragédia dos bens comuns na mobilidade.....	34
Quadro 3 - Recompensa (payoff) para cada um dos cidadãos considerando que todos os outros moradores da cidade mantêm o mesmo comportamento.....	35
Quadro 4 – Meios e modos de transporte, segundo a Pesquisa OD 2012	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura computacional do modelo dinâmico de simulação de tráfego.....	16
Figura 2 - Exemplo de trechos de via (1) e de conversão (2).....	50
Figura 3 – Malha viária da região Central de Belo Horizonte; de verde, a Avenida do Contorno.	51
Figura 4 – Malha viária de Belo Horizonte.....	52
Figura 5 – Exemplo de rota de um trajeto de carro, entre a AH de origem (verde) e de destino (vermelho).	82
Figura 6 - Roteirização das viagens de carro, onde as linhas vermelhas e mais grossas representam maior fluxo de veículos.....	83
Figura 7 - Roteirização das viagens de carro nas faixas horárias Madrugada, Faixa de Pico da Manhã e Entre Picos da Manhã.	84
Figura 8 - Roteirização das viagens de carro nas faixas horárias Faixa de Pico do Almoço, Entre Picos da Tarde e Faixa de Pico da Tarde.....	84
Figura 9 - Roteirização das viagens de carro na faixa horária Noturno.	85
Figura 10 – Rota estimadas das linhas de ônibus 5102 (azul), 5201 (verde) e 5401 (vermelho) em 2011, com as respectivas “rabiolas” circuladas de marrom, utilizando a roteirização entre pontos de ônibus consecutivos segundo o itinerário obtido.	87
Figura 11 – Rota estimadas das 296 linhas e 696 sublinhas de ônibus de Belo Horizonte em 2011, utilizando a roteirização entre pontos de ônibus consecutivos segundo o itinerário obtido.	88

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Diagrama fundamental do tráfego, segundo Haight (1963)	15
Gráfico 2 - Relação teórica entre densidade e fluxo de veículos, segundo modelo proposto por Richards (1956).....	18
Gráfico 3 - Relação teórica entre densidade e fluxo de veículos, segundo modelo proposto por Greenberg (1959).....	19
Gráfico 4 - Modelos macroscópicos ajustados aos dados do Túnel Lincoln, em 1959, com a densidade entre 20 e 100 veículos/km.....	66
Gráfico 5 - Modelos macroscópicos ajustados aos dados do Túnel Lincoln, em 1959, com a densidade entre 0 e 200 veículos/km.	67
Gráfico 6 – Velocidades médias por faixa horária e modo de transporte.....	90
Gráfico 7 - Parâmetros do modelo MQO com intercepto e 1 tipo de via para a velocidade dos carros	96
Gráfico 8 - Parâmetros do modelo MQO com restrições com intercepto e 1 tipo de via para a velocidade dos carros	97

Gráfico 9 - Parâmetros do modelo MQP com intercepto e 1 tipo de via para a velocidade dos carros .	98
Gráfico 10 - Parâmetros do modelo MDA com intercepto e 1 tipo de via para a velocidade dos carros .	98
Gráfico 11 - Parâmetros do modelo MQO sem intercepto e 1 tipo de via para a velocidade dos carros .	100
Gráfico 12 - Parâmetros do modelo MQP sem intercepto e 1 tipo de via para a velocidade dos carros .	100
Gráfico 13 - Parâmetros do modelo MDA sem intercepto e 1 tipo de via para a velocidade dos carros .	102
Gráfico 14 - Parâmetros do modelo MQO com intercepto e 1 tipo de via para a velocidade dos ônibus .	103
Gráfico 15 - Parâmetros do modelo MQO com restrições com intercepto e 1 tipo de via para a velocidade dos ônibus .	104
Gráfico 16 - Parâmetros do modelo MDA com intercepto e 1 tipo de via para a velocidade dos ônibus .	105
Gráfico 17 - Parâmetros do modelo MQO sem intercepto e 1 tipo de via para a velocidade dos ônibus .	106
Gráfico 18 - Parâmetros do modelo MQP sem intercepto e 1 tipo de via para a velocidade dos ônibus .	107
Gráfico 19 - Parâmetros do modelo MDA sem intercepto e 1 tipo de via para a velocidade dos ônibus .	108
Gráfico 20 - Parâmetros do modelo MQO sem intercepto, 1 tipo de via e 3 agrupamentos de regionais para a velocidade dos carros .	110
Gráfico 21 - Parâmetros do modelo MQP sem intercepto, 1 tipo de via e 3 regionais para a velocidade dos carros .	111
Gráfico 22 - Parâmetros do modelo MDA sem intercepto, 1 tipo de via e 3 regionais para a velocidade dos carros .	112
Gráfico 23 - Parâmetros do modelo MQO sem intercepto, 1 tipo de via e 3 regionais para a velocidade dos ônibus .	113
Gráfico 24 - Parâmetros do modelo MQP sem intercepto, 1 tipo de via e 3 regionais para a velocidade dos ônibus .	114
Gráfico 25 - Parâmetros do modelo MDA sem intercepto, 1 tipo de via e 3 regionais para a velocidade dos ônibus .	115
Gráfico 26 – Densidade média de carros por Regional (UMM) e faixa horária.	116
Gráfico 27 – Densidade média de carros por Regional (UMM) e faixa horária, excluindo a UMM Centro.	117

Gráfico 28 – Densidade média de ônibus por Regional (UMM) e faixa horária.	118
Gráfico 29 – Densidade média de ônibus por Regional (UMM) e faixa horária, excluindo a UMM Centro.	118
Gráfico 30 – Densidade média de veículos (carros equivalentes) por Regional (UMM) e faixa horária.	119
Gráfico 31 – Densidade média de veículos (carros equivalentes) por Regional (UMM) e faixa horária, excluindo a UMM Centro.	120
Gráfico 32 – Ajuste dos modelos macroscópicos ao trânsito dos carros na Regional Centro	124
Gráfico 33 – Ajuste dos modelos macroscópicos ao trânsito dos carros nas regionais Barreiro, Norte e Pampulha.....	125
Gráfico 34 – Ajuste dos modelos macroscópicos ao trânsito dos carros nas regionais Leste, Nordeste, Noroeste, Oeste, Sul e Venda Nova.....	125
Gráfico 35 – Ajuste dos modelos macroscópicos ao trânsito dos ônibus na Regional Centro.....	127
Gráfico 36 – Ajuste dos modelos macroscópicos ao trânsito dos ônibus nas regionais Norte, Oeste e Pampulha.....	128
Gráfico 37 – Ajuste dos modelos macroscópicos ao trânsito dos ônibus nas regionais Barreiro, Leste, Nordeste, Noroeste, Sul e Venda Nova	128
Gráfico 38 – Resultados da simulação do caso 2 (somente carros) na Regional Centro	134
Gráfico 39 – Resultados da simulação do caso 2 (somente carros) nas regionais Barreiro, Norte e Pampulha.....	135
Gráfico 40 – Resultados da simulação do caso 2 (somente carros) nas regionais Leste, Nordeste, Noroeste, Oeste, Sul e Venda Nova.....	135
Gráfico 41 – Comparação dos resultados da simulação com a solução analítica das velocidades dos carros na Regional Centro.....	138
Gráfico 42 – Comparação dos resultados da simulação com a solução analítica das velocidades dos carros nas regionais Barreiro, Norte e Pampulha.....	139
Gráfico 43 – Comparação dos resultados da simulação com a solução analítica das velocidades dos carros nas regionais Leste, Nordeste, Noroeste, Oeste, Sul e Venda Nova	139
Gráfico 44 – Comparação dos resultados da simulação com a solução analítica das velocidades dos ônibus na Regional Centro	141
Gráfico 45 – Comparação dos resultados da simulação com a solução analítica das velocidades dos carros nas regionais Norte, Oeste e Pampulha.....	142
Gráfico 46 – Comparação dos resultados da simulação com a solução analítica das velocidades dos carros nas regionais Barreiro, Leste, Nordeste, Noroeste, Sul e Venda Nova	142
Gráfico 47 – Tempos de viagem de automóvel para o caso 2, em cada iteração do algoritmo de simulação	143

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Categorização dos trechos de circulação, ou arcos.....	49
Tabela 2 - Tipos de vias	51
Tabela 3 - Faixas horárias utilizadas no trabalho e na Pesquisa OD 2012.....	56
Tabela 4 – Comparação de população, frota e motorização entre as pesquisas OD de 2002 e 2012 e entre BH e RMBH.	79
Tabela 5 - Comparação da divisão modal e tempo de viagem entre as pesquisas OD de 2002 e 2012 e entre modos.....	80
Tabela 6 – Número de linhas da matriz preditora X, por faixa horária.	91
Tabela 7 –Parâmetros do modelo MQO com intercepto e 4 tipos de vias para a velocidade dos carros	93
Tabela 8 -Parâmetros do modelo MQP sem intercepto e 4 tipos de vias para a velocidade dos ônibus	94
Tabela 9 - Parâmetros do modelo MQO com intercepto e 1 tipo de via para a velocidade dos carros	95
Tabela 10 - Parâmetros do modelo MQO com restrições com intercepto e 1 tipo de via para a velocidade dos carros	96
Tabela 11 - Parâmetros do modelo MQP com intercepto e 1 tipo de via para a velocidade dos carros	97
Tabela 12 - Parâmetros do modelo MDA com intercepto e 1 tipo de via para a velocidade dos carros	98
Tabela 13 - Parâmetros do modelo MQO sem intercepto e 1 tipo de via para a velocidade dos carros	99
Tabela 14 - Parâmetros do modelo MQP sem intercepto e 1 tipo de via para a velocidade dos carros	100
Tabela 15 - Parâmetros do modelo MDA sem intercepto e 1 tipo de via para a velocidade dos carros	101
Tabela 16 - Parâmetros do modelo MQO com intercepto e 1 tipo de via para a velocidade dos ônibus	103
Tabela 17 - Parâmetros do modelo MQO com restrições com intercepto e 1 tipo de via para a velocidade dos ônibus	104
Tabela 18 - Parâmetros do modelo MQP com intercepto e 1 tipo de via para a velocidade dos ônibus	104
Tabela 19 - Parâmetros do modelo MDA com intercepto e 1 tipo de via para a velocidade dos ônibus	105

Tabela 20 - Parâmetros do modelo MQO sem intercepto e 1 tipo de via para a velocidade dos ônibus .	106
Tabela 21 - Parâmetros do modelo MQP sem intercepto e 1 tipo de via para a velocidade dos ônibus .	107
Tabela 22 - Parâmetros do modelo MDA sem intercepto e 1 tipo de via para a velocidade dos ônibus .	107
Tabela 23 - Parâmetros do modelo MQO sem intercepto, 1 tipo de via e 3 agrupamentos de regionais para a velocidade dos carros .	110
Tabela 24 - Parâmetros do modelo MQP sem intercepto, 1 tipo de via e 3 regionais para a velocidade dos carros .	110
Tabela 25 - Parâmetros do modelo MDA sem intercepto, 1 tipo de via e 3 regionais para a velocidade dos carros .	111
Tabela 26 – Erro Médio e Erro Quadrático Médio dos modelos de previsão da velocidade em carros com 3 regionais.	112
Tabela 27 - Parâmetros do modelo MQO sem intercepto, 1 tipo de via e 3 regionais para a velocidade dos ônibus .	113
Tabela 28 - Parâmetros do modelo MQP sem intercepto, 1 tipo de via e 3 regionais para a velocidade dos ônibus .	114
Tabela 29 - Parâmetros do modelo MDA sem intercepto, 1 tipo de via e 3 regionais para a velocidade dos ônibus .	114
Tabela 30 – Erro Médio e Erro Quadrático Médio dos modelos de previsão da velocidade em ônibus com 3 regionais.	115
Tabela 31 – Densidade média por faixa horária, em carros equivalentes por quilômetro	119
Tabela 32 – Descrição dos parâmetros, seus limites e valores iniciais	122
Tabela 33 – Resultados do Modelo de Underwood e Edie para carros	122
Tabela 34 – Resultados do Modelo de Greenberg e Herman para carros	123
Tabela 35 – Resultados do Modelo de May e Keller para carros	123
Tabela 36 – Resultados do Modelo de Underwood e Edie para ônibus	126
Tabela 37 – Resultados do Modelo de Greenberg e Herman para ônibus	126
Tabela 38 – Resultados do Modelo de May e Keller para ônibus	127
Tabela 39 - Densidades estimadas pela simulação para o caso 2 (somente carros nas ruas)	136
Tabela 40 - Velocidades estimadas pela simulação para o caso 2 (somente carros nas ruas)	136
Tabela 41 - Densidades estimadas via solução analítica para o caso 2 (somente carros nas ruas)	137
Tabela 42 - Velocidades estimadas via solução analítica para o caso 2 (somente carros nas ruas)	137
Tabela 43 - Densidades estimadas via simulação para o caso 3 (somente ônibus nas ruas)	140
Tabela 44 – Densidades estimadas via solução analítica para o caso 3 (somente ônibus nas ruas)	141

1 INTRODUÇÃO

1.1 Tema e Problema

O presente trabalho tem como tema central a mobilidade dos cidadãos em uma cidade, fazendo uma comparação entre a eficácia do transporte individual e a do transporte coletivo. Trata-se de um estudo que avalia se a escolha individual e racional de cada cidadão, que opta pelo modo de transporte mais satisfatório para si, pode de alguma forma tornar o resultado pior para todos, caso todos os cidadãos tomem a decisão pelo mesmo critério. Este fenômeno já foi descrito a respeito do compartilhamento de pastos públicos por pastores, cujo resultado inevitável de degradação ambiental é chamado de *tragédia dos bens comuns* (HARDIN, 1968), assim como também já foi descrito a respeito da própria mobilidade urbana (IAIONE, 2010). Segundo a literatura, a maioria dos estudos considera o conceito microeconômico de utilidade (BEN-AKIVA e LERMAN, 1985; TRAIN, 1993; SMALL, 1992) para modelar a escolha do modo de transporte pelo indivíduo, enquanto outros estudos indicam que a escolha do modo de transporte não pode ser considerada estritamente como uma escolha individual e sim como ação inserida em uma questão mais ampla, com um enfoque antropológico, político e psicológico, além do enfoque econômico (VASCONCELLOS, 2000). Mesmo tendo em vista esta falta de consenso, neste estudo optou-se por utilizar a visão microeconômica, utilizando o tempo como única variável da função utilidade.

Isto posto, deseja-se nesta dissertação comparar a eficácia do transporte individual com a eficácia do transporte coletivo considerando as viagens de porta a porta na cidade de Belo Horizonte; considerando como "eficácia" o tempo total de deslocamento das pessoas; tomando por transporte individual apenas o uso do carro privado e por coletivo apenas o uso do ônibus, uma vez que ambos são os principais modos motorizados segundo as duas últimas pesquisas de Origem e Destino (SEGEM e ADRMBH, 2013). O desafio é, portanto, investigar a possibilidade da ocorrência da *tragédia dos bens comuns* na mobilidade; ou seja, investigar se a escolha individual pelo automóvel privado, por ele em aparência ser o modo mais rápido de transporte, pode ocasionar resultado globalmente menos eficaz (maior tempo total de deslocamento). A pergunta da pesquisa é, portanto: "é possível haver *tragédia dos bens comuns* na mobilidade, ou seja, a escolha pelo carro pode ser pior, considerando que todos os habitantes tomem a mesma decisão, preterindo o ônibus?" Considerando a cidade de Belo Horizonte, o tempo total de deslocamento seria ou não menor se todos usassem o carro privado, em vez do ônibus?

1.2 Contextualização

A possibilidade de viajar maiores distâncias em menor tempo, em adição a fatores não tão objetivos, tornou o carro particular o sonho de consumo da maioria das famílias; impulsionou a indústria automobilística (VASCONCELLOS, 2000); influenciou decisões políticas de autoridades (JACKSON, 1985); e, além disso, alterou o formato das cidades, tornando-as mais dispersas (JACOBS, 1961). Vasconcellos (2000), por exemplo, afirma que na América Latina pós-Segunda Guerra Mundial o espaço urbano foi profundamente transformado para adequar-se ao crescimento do uso do automóvel. Por outro lado, o maior espaçamento das cidades tornou mais atrativa a posse de um carro particular, uma vez que a maior dispersão das periferias aumentou a distância entre origens e seus respectivos destinos, desfavorecendo o transporte público em comparação com o transporte privado (BRINCO, 1985). Com este ciclo vicioso, a proporção de viagens realizadas por um automóvel privado, dentre as viagens motorizadas, aumentou no período. Em São Paulo, por exemplo, aumentou continuamente no período de 1967 a 2012, indo de 31,9% a 45,7% (SÃO PAULO, 2013).

De fato, pelo menos desde a década de 1960 este aumento do número de automóveis e seu impacto negativo já vêm sendo indicados pelos estudiosos, como Jacobs (1961). Em seu livro *Morte e Vida nas Grandes Cidades*, por exemplo, esta autora escreveu um capítulo intitulado “Erosão das cidades ou redução dos automóveis”, no qual evidencia os impactos negativos dos automóveis na vida de uma cidade. A autora, se baseando nas grandes cidades estadunidenses, também demonstra que de fato há uma retroalimentação do problema, ou seja, o aumento do número de automóveis torna as cidades menos amigáveis aos outros modos de transporte, pressionando ainda mais o uso de automóveis. Esta retroalimentação, ou ciclo vicioso, todavia, não é objeto de análise neste trabalho.

O governo brasileiro, já no fim do século XX (ANTP, 2017) e início do século XXI (ALVARENGA *et al.*, 2010), a fim de amenizar a crise econômica, chegou a incentivar a compra de automóveis novos – e portanto, a sua produção – utilizando uma redução de impostos sobre a produção do mesmo (redução do Imposto sobre Produtos Industrializados), ou mesmo políticas de contenção do aumento do preço da gasolina (CARVALHO e PEREIRA, 2012). Coincidência ou não, a frota brasileira de veículos, entre 1996 e 2016, apresentou um aumento de cerca de 186%, indo de 17,5 milhões para 50 milhões de unidades (ANTP, 2016). Especificamente na Região Metropolitana de Belo Horizonte, o número de automóveis passou de aproximadamente um milhão (1.089.924) em 2002 para cerca de dois milhões e meio

(2.450.791) em 2012 (SEGEM e ADRMBH, 2013), representando isso um aumento de 125%. Embora este aumento possa ser explicado em parte pelo aumento da população, há um indicador que desconta este aumento da população: a taxa de motorização. Esta taxa, que é a razão entre a frota e a população, aumentou de 0,24 para 0,49 no mesmo período (2002-2012) em Belo Horizonte, representando um aumento de 104%.

Embora seja uma noção popular a de que o governo brasileiro não investiu no transporte público durante esse período, isto não é uma verdade completa. De fato, em um momento anterior aos investimentos para a Copa do Mundo de Futebol FIFA 2014, Carvalho e Pereira (2012) demonstraram que os investimentos públicos priorizaram o transporte individual em detrimento ao transporte coletivo, levando ao encarecimento da tarifa do transporte coletivo e consequentemente ao declínio no número de usuários. Após a definição do Brasil como país sede da Copa, por outro lado, foram realizados investimentos em sistemas de transporte de massa em algumas capitais, não obstante em muitos casos os sistemas não tenham sido concluídos (ULIAN e COSTA, 2016). Em Belo Horizonte, por exemplo, foi implantado em 2013 o Sistema de Transporte Rápido por Ônibus (BRT), um sistema tronco-alimentador de ônibus em parte da cidade (ULIAN e COSTA, 2016). De qualquer forma, dados do Observatório da Mobilidade Urbana de Belo Horizonte (BHTRANS, 2016), que utilizam um método diferente das Pesquisas de Origem e Destino (OD), indicam que a tendência de migração para o transporte privado individual observada nas pesquisas OD de 2002 e 2012 não foi revertida entre 2010 e 2015, uma vez que o percentual de viagens motorizadas feitas por transporte coletivo caiu de 67,9% em 2010 para 63,4% em 2015, tendo sido 67,2% em 2013.

As pesquisas OD de 2002 e de 2012, corroborando a falta de investimento pré-Copa do Mundo, mostraram um aumento na proporção de usuários do transporte individual motorizado de 18,2% para 30,7%. Aliado a esse aumento da utilização do carro, houve um aumento do tempo médio de deslocamento em ambos os modos motorizados, de 38 minutos em 2002 para 47 minutos em 2012. No entanto, os critérios utilizados nas pesquisas para a definição de viagens a pé não foram os mesmos, tendo sido menos restritivos em 2012, superestimando o modo a pé, quando comparado a 2002. Em 2002, desconsideraram-se trajetos inferiores a 500 metros a pé e de até 15 minutos de duração, enquanto que em 2012 só se desconsiderou durações inferiores a 5 minutos. Apesar desta dificuldade em se comparar as viagens não motorizadas, pode-se concluir que um grande número de usuários migrou para um modo considerado mais rápido marginalmente, o automóvel; e o tempo total de viagem, como um todo, aumentou.

Obviamente, embora pareça consequência lógica direta a partir dos resultados apresentados no parágrafo anterior, não é possível concluir de tais premissas que a *tragédia dos bens comuns* está em curso em Belo Horizonte, por alguns motivos. Primeiramente, houve um aumento do número total de viagens no período, o que pode ser uma das causas no aumento do tempo de viagem. Da mesma forma, a cidade também pode ter se tornado mais dispersa, com as origens e destinos mais distantes. De fato, é possível avaliar esta distância pelas pesquisas e, em vez de comparar o tempo médio de viagem apenas, adicionalmente comparar a velocidade média. Por outro lado, não se pode afirmar que aqueles que migraram do transporte público para o privado o fizeram necessariamente como uma escolha racional pela redução do tempo ou mesmo pelo custo. Mesmo que o tempo/custo médio de viagem em 2002 tenha sido menor para o automóvel, é possível que para alguns cidadãos o tempo/custo de ônibus fosse menor, e que a escolha pelo automóvel se tenha dado por outros motivos, como conforto ou status, ou mesmo por questões antropológicas, políticas e sociológicas alheias (VASCONCELLOS, 2000); não pelo critério econômico da redução do tempo/custo (TRAIN, 1993). Assim, embora neste trabalho seja considerada a visão macroeconômica da escolha modal, que será explicada na seção 2.1.1, não se pode concluir pela existência de uma *tragédia dos bens comuns* apenas comparando estas duas pesquisas OD. Assim, apesar deste trabalho se basear nos dados da pesquisa OD de 2012, cujos dados já estão defasados em relação à situação atual, a técnica aqui utilizada não é tão direta assim, de forma que este problema é minorado.

De qualquer forma, tem-se visto muitos estudos reportando o aumento do número de automóveis no Brasil e suas consequências negativas (ANTP, 2017, IPEA, 2010), além de estudos demonstrando que a solução para tal problema é o investimento em transporte público e não motorizado (VASCONCELLOS, 2000). Outros estudos também citam a necessidade de uma reurbanização completa das cidades, tornando as origens e destinos mais próximos, ou mais próximos de um eixo arterial de transporte coletivo de massa, a fim de tornar desnecessário o deslocamento por automóvel, como argumentado por Jabareen (2006). Por outro lado, considerando a teoria microeconômica de que as pessoas em geral fazem sua escolha modal pensando no que é melhor para si, dentre vários atributos – como tempo, conforto e segurança –; é preciso em adição avaliar se as escolhas individuais se refletirão no melhor desempenho coletivo; isto é, a proporção de cada modo de transporte na matriz modal ideal para a cidade deve refletir cada parcela de seus habitantes que escolheria seu respectivo modo de transporte por considerá-lo mais atrativo, seja qual for o atributo de escolha (tempo, conforto, segurança, dentre outros). Raciocinando de forma inversa, a cidade e seus modos de transporte devem ser

planejados de tal forma que se a maioria da população escolhe determinado modo de transporte, cada indivíduo por suas razões, é necessário que a matriz modal resultante (com a maioria utilizando tal modo), seja uma matriz modal onde os impactos negativos sejam mínimos (ou maximizando os impactos positivos), aumentando a qualidade de vida das pessoas.

Com este trabalho deseja-se avaliar se as escolhas individuais em Belo Horizonte levam a um ciclo vicioso cuja convergência é uma matriz modal ruim, no sentido de que o tempo médio de viagem seja maior com esta matriz do que com outra. É importante ressaltar que neste estudo optou-se por avaliar apenas o atributo "tempo total de viagem" como critério de escolha modal, por considerá-lo um importante critério (BRUTON, 1970); e também mais acessível, de medição, por ser um atributo quantitativo. Pode-se pensar que o fato de aqui se considerar apenas o atributo "tempo", torna o resultado artificial, longe da realidade. Todavia, é possível concluir que se por um lado isto subestima o número de usuários de automóvel, por não considerar características importantes de apelo ao uso do automóvel, como conforto, segurança e status, o fato de não considerarmos o custo de cada modo subestima o número de usuários do transporte coletivo, que é mais barato se considerarmos todos os custos envolvidos com a compra e manutenção do automóvel (custo de capital, depreciação do valor comercial, seguro obrigatório, manutenção mecânica e combustíveis, dentre outros). Segundo Brinco (1985), estes custos indiretos em geral não são contabilizados pelos "automobilistas", que acabam por isso raciocinando que a viagem de carro é mais barata que a de ônibus. Em resumo, espera-se que ambos vieses em se considerar apenas o tempo como critério de escolha se anulem parcialmente, gerando um resultado de pouco viés, perto da realidade.

Tendo sido esclarecido o assunto, e tendo em vista o possível ciclo vicioso de aumento de automóveis nas cidades brasileiras, e seus impactos negativos na vida das pessoas, deduz-se que este estudo é de extrema importância para avaliar se a nossa sociedade está caminhando para viver em uma cidade melhor ou pior, pelo menos do ponto de vista da mobilidade das pessoas.

1.3 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é analisar a possibilidade e as condições de ocorrência da *tragédia dos bens comuns* na mobilidade da cidade de Belo Horizonte (MG). A *tragédia dos bens comuns* ocorrerá se o tempo total médio despendido quando todos os cidadãos optem pelo transporte público for menor que o tempo total médio caso todos optem pelo carro; embora se apenas um cidadão mude seu modo e escolha o automóvel ele venha a gastar menos tempo que

optando pelo ônibus. Isto é, caso o tempo marginal do automóvel for menor que o do ônibus, mas globalmente o resultado seja o inverso.

Para atingir este objetivo principal, será necessário cumprir estes objetivos específicos: 1) realizar a roteirização de todos os trajetos de ônibus e de carro presentes na pesquisa OD da RMBH de 2012; 2) ajustar e escolher um modelo de regressão linear para estimar a velocidade média de ônibus e de carro de cada trecho de via em cada faixa horária; 3) estimar a densidade de veículos média de cada trecho de via em cada faixa horária; 4) ajustar e escolher um modelo macroscópico de tráfego, relacionando-o a cada modo de transporte e ao gráfico de densidade-velocidade para cada trecho de via; e 5) comparar os tempos médios de viagem para o caso em que a distribuição modal é idêntica à atual, para aquele em que todos usem o ônibus, e para o caso em que todos usem o automóvel.

Os objetivos estão ordenados em ordem de execução, ou seja, cada objetivo, a partir do segundo, utiliza os resultados obtidos no anterior. Por exemplo, a partir da roteirização, e conseqüentemente do cálculo da distância percorrida por cada viajante em cada trecho de via; juntamente com a utilização estatística do tempo despendido pelo viajante; conforme a pesquisa OD, é possível realizar o segundo objetivo, que é estimar a velocidade média em cada trecho de via em cada faixa horária, para cada modo de transporte (ônibus e carro). Tendo em mãos esta velocidade média de cada modo e o número de veículos (fluxo), torna-se viável calcular a densidade de veículos (soma ponderada da densidade de ônibus e carro) estimada nos mesmos locais e nos respectivos horários, que é o terceiro objetivo. A estimativa das velocidades e das densidades em cada trecho de rua viabiliza o ajuste do modelo macroscópico de tráfego para cada trecho de via e para cada modo, que é o quarto objetivo. De fato, os quatro primeiros objetivos podem ser descritos como etapas do modelo dinâmico de simulação de tráfego, que será melhor explicado na seção 2.1.3.

A partir deste modelo, será possível realizar o quinto e último objetivo, que é comparar os tempos simulados de viagem considerando três casos: um em que ambos os modos são utilizados, na proporção observada pela pesquisa OD; outro em que todos os indivíduos usam automóveis; e um terceiro em que todos utilizam o ônibus; a fim de avaliar a possibilidade da *tragédia dos bens comuns*. Esta será possível quando o tempo de viagem for menor em situação em que todos utilizam o ônibus em comparação com situação em que todos utilizam o automóvel, embora quando a proporção de viajantes seja igual à proporção observada pela OD (primeiro dos três casos), o viajante de carro faça sua viagem mais rápido que o de ônibus. O

objetivo principal será atingido com a interpretação deste último objetivo específico, ou seja, será possível responder se estamos caminhando ou não para a *tragédia*. Uma melhor exemplificação destes objetivos, incluindo seus pressupostos, etapas e técnicas está detalhada no capítulo da metodologia.

1.4 Justificativa

Embora o aumento do uso de automóveis privados em detrimento do uso do transporte coletivo já tenha sido bastante discutido na literatura (JACOBS, 1961, CARVALHO e PEREIRA, 2012); tomando em consideração estudos a respeito das faixas de eficiência de densidade de pessoas e também estudos da eficiência de viagens de cada modo de transporte (BRINCO, 1985), a literatura ainda carece de um estudo que avalie estes fatos conjuntamente. Mesmo que haja diversos estudos sobre como taxar os automóveis pelo congestionamento que causam, ou seja, efetuar indiretamente uma correção ou forma de evitar a *tragédia dos bens comuns*, não há nesses mesmos estudos nada a respeito de como avaliar se realmente o uso do automóvel em uma cidade leva à *tragédia*. Os estudos sobre a faixa de eficiência de cada modo, indiretamente levam a esta reflexão, contudo os mesmos não são claros a respeito da *tragédia dos bens comuns*. Além do mais, a faixa de eficiência de cada modo pode variar de cidade para cidade, e de país para país, de acordo com os parâmetros de desempenho de cada modo e dos parâmetros de preferência dos moradores de cada local. Com isto, conclui-se a favor da importância desta dissertação como uma maneira de preencher uma lacuna na literatura.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A revisão bibliográfica foi dividida em três partes. A primeira discorre sobre a mobilidade urbana, indo desde as teorias de escolha modal, modelagem e simulação do tráfego, até o custo dos congestionamentos para a sociedade. A segunda procura trazer ao leitor, talvez menos familiarizado com conceitos econômicos, uma explicação coesa acerca da *tragédia dos bens comuns*. Todavia, primeiro é necessário explicar melhor a teoria da qual ela faz parte, a *Teoria dos Jogos*, bem como um exemplo análogo à *tragédia dos bens comuns*, de maior fama que esta: o *Dilema do Prisioneiro*. Por último, detalha-se o que tem sido estudado até hoje a respeito da *tragédia dos bens comuns* especificamente na mobilidade urbana.

2.1 Mobilidade Urbana

O objetivo principal desta seção é revisar os conceitos de simulação de tráfego. Na primeira seção são apresentadas as quatro etapas do planejamento tradicional de transportes; na segunda, como o tráfego é modelado por equações matemáticas, considerando algumas relações entre volume, densidade e velocidade dos veículos, e como é possível, através destas relações, realizar simulações computacionais desta movimentação dos veículos (ou das pessoas); e na última, como a literatura tem mensurado o custo social e individual dos congestionamentos. Desse modo, esta seção foi dividida em três subseções, conforme explicado acima.

2.1.1 Previsão de ocupação das vias no planejamento de transportes

Nesta seção são apresentadas quatro importantes etapas de previsão da ocupação das vias tradicionalmente utilizadas no planejamento de transportes (BRUTON, 1970), que são: 1) a geração de viagens; 2) a distribuição das viagens; 3) a divisão modal; e 4) a atribuição das rotas. De fato, será dada ênfase às duas últimas etapas, que serão mais utilizadas neste trabalho.

2.1.1.1 Geração e distribuição de viagens

Segundo Bruton (1970), a geração de viagens é a primeira etapa do planejamento de transportes, na qual são feitas previsões sobre o número de viagens realizadas em determinadas áreas no futuro. Para isto são considerados fatores como as leis de uso e ocupação do solo, atuais e futuras, as características *sociodemográficas* da população da região em questão e a capacidade, atual e futura, do sistema de transporte da mesma área. O autor sugere a aplicação de regressão linear ajustada aos dados atuais, nos quais as variáveis *preditoras* são variáveis associadas aos fatores descritos acima e a variável resposta é o número de viagens realizadas. Por conseguinte, partindo do pressuposto de que os parâmetros da regressão se manterão constantes ao longo do

tempo, faz-se suposições – ou previsões – acerca destas variáveis *preditoras* no futuro, e assim é possível prever o valor da variável resposta (número de viagens) no futuro. No presente estudo, contudo, não será considerada qualquer alteração na demanda por transporte, seja aumento ou redução. Será considerado o ano de 2012 como base, e para isto será utilizado o resultado da pesquisa Origem e Destino de 2012 da Região Metropolitana de Belo Horizonte.

A segunda etapa do planejamento, ainda segundo Bruton (1970), é a distribuição das viagens entre subdivisões da região considerada, separando tais viagens em origens e destinos. Assim sendo, é possível estimar o número de viagens geradas e atraídas por cada zona em questão. Os métodos utilizados para a distribuição de viagens podem ser divididos em basicamente dois tipos: os de fator de crescimento e os sintéticos. Os primeiros se baseiam na ideia de que as viagens geradas e atraídas por cada zona podem ser previstas diretamente a partir do número de viagens geradas e atraídas no presente. Tal autor cita o fator uniforme, o fator médio, o método de Fratar e o de Detroit como exemplos de cálculos com fatores de crescimento. Já os métodos sintéticos consideram que é necessário conhecer os fatores que causam as viagens e que estes relacionamentos podem ser melhor entendidos por meio de analogias com certas leis da física. São exemplos destes métodos o modelo gravitacional, o de campo eletrostático, o modelo de regressão múltipla e o modelo de oportunidades. Contudo, assim como na etapa da geração de viagens, este passo não será realizado nesta dissertação, que se baseará nas origens e destinos registrados na pesquisa OD RMBH 2012.

2.1.1.2 Divisão modal e atribuição de rotas

Antes de se prosseguir detalhando a divisão modal e a atribuição de rotas das viagens, serão mostradas a seguir as características dos principais modos de transporte, dado que suas características influenciam a divisão modal. Em seguida, serão apresentados os métodos agregado e desagregado de previsão, e mostrado como e porque se utiliza a teoria microeconômica da escolha racional neste último, e também porque este (desagregado) é preferível ao primeiro (agregado). Por último, nesta seção, serão mostrados os métodos existentes para se fazer a atribuição de rotas, nos casos em que o modo de transporte escolhido for o automóvel particular.

Os modos podem ser divididos quanto a vários fatores: quanto à propriedade (públicos ou privados), quanto ao número de indivíduos transportados (individual ou coletivo), quanto ao material rodante (sobre trilhos, com pneus ou hidroviação), ou mesmo quanto ao motor (motorizado ou não motorizado). Os motorizados podem ser ainda divididos quanto à propulsão

(motor a combustão ou motor elétrico, por exemplo), e os não motorizados podem ser separados em ativos (a pé ou bicicleta) e não ativos (tração animal) (FERRAZ e TORRES, 2004). Em geral, há uma correlação entre a propriedade e o número de indivíduos. Com isto, alguns autores simplesmente classificam os modos entre individual privado e público coletivo, ora chamado apenas público ou apenas coletivo.

Destas qualificações dos modos, as mais importantes no planejamento de transportes são as que dividem os modos em “motorizados ou não motorizados” e em “públicos coletivos ou privados individuais”. Por exemplo, em Belo Horizonte, a última pesquisa Origem e Destino 2012 (SEGEM e ADRMBH, 2013) mostrou que 37,8% das viagens diárias são não motorizadas (transporte ativo), contra 62,2% motorizadas (transporte coletivo e individual). Da mesma forma, a pesquisa mostrou que 31,4% são viagens por transporte coletivo, contra 68,6% individual (motorizado e não motorizado). Apesar da grande participação do transporte ativo (37,8%), a mesma pesquisa mostrou que a distância percorrida pelos mesmos é menor que a média percorrida pelos outros. Desse modo, como a maioria dos deslocamentos, e também os mais longos, são motorizados, optou-se por considerar apenas os motorizados. Destes, como sumarização do transporte coletivo, foi escolhido o transporte coletivo por ônibus, por ser o mais frequente nas grandes cidades do Brasil (VASCONCELLOS, 2000). Assim, a comparação foi feita entre o ônibus coletivo e o automóvel privado.

Estes dois modos de transporte possuem características opostas, em geral. Por exemplo, pendem para o lado do automóvel o maior conforto, a flexibilidade de horário e de rota, a privacidade, a rapidez (caso as pistas sejam compartilhadas por ambos os modos), a segurança em relação à violência urbana) e o status, enquanto para o lado do ônibus pendem o menor custo (desconsiderando o custo do tempo e considerando os custos de capital relativos à propriedade do automóvel) e a segurança viária (FERRAZ e TORRES, 2004). Todos estes fatores estão sendo considerados marginalmente. Por exemplo, o menor tempo que foi atribuído ao automóvel ocorre caso uma única pessoa escolha viajar de automóvel em vez de ônibus, não se todas as pessoas optem conjuntamente por alterar seu modo de viagem, cuja comparação do tempo – entre ônibus e automóvel – é o principal objetivo desta dissertação.

Tendo sido apresentadas as qualidades dos modos, ônibus e carro, a seguir são apresentadas as técnicas de previsão de demanda por modo de transporte – chamada de divisão modal – tal qual descrito na literatura. A literatura de planejamento de transportes cita basicamente dois métodos de previsão de demanda por um determinado modo de transporte: o agregado e o desagregado

(SMALL, 1992). Nos modelos agregados são utilizados dados socioeconômicos de um grupo de pessoas de maneira agrupada, geralmente moradores de uma mesma área, como um setor censitário, bairro ou mesmo município, conjuntamente. Em geral estes dados são extraídos de grandes pesquisas, como censos demográficos. Small (1992) cita como exemplo que a demanda total pelo transporte público pode ser relacionada ao desenvolvimento industrial da cidade, ao preço da tarifa, aos custos dos modos alternativos, à renda média e a algumas medidas simples de qualidade do serviço. A análise, em geral com o uso de regressão logística, pode então ser feita utilizando dados de várias cidades (ou regiões, por vezes dentro de uma mesma cidade), ou mesmo analisando dados de apenas uma mesma cidade (ou qualquer região) ao longo do tempo.

Contudo, são os modelos desagregados que têm gozado de maior sucesso entre os pesquisadores, talvez por serem mais eficientes quando é possível realizá-los (SMALL, 1992). Tais modelos, também chamados de comportamentais, utilizam os chamados *microdados* da pesquisa, ou seja, os dados a nível individual, e estudam quais fatores levam cada pessoa a tomar uma decisão a respeito do modo de viagem (escolha modal). Small (1992) mostra que por trás deste modelo está a teoria microeconômica da escolha racional, onde cada indivíduo é guiado pela motivação de maximização de sua satisfação (utilidade). Segundo Train (1993), um dos fatores que torna o modelo desagregado mais eficiente que o modelo agregado é que em si as estimativas dos parâmetros são mais precisas. A justificativa é que a variância das variáveis entre os indivíduos é maior que entre os grupos agregados, e a covariância entre estas variáveis é menor a nível individual que a um nível agregado, o que torna o modelo de regressão mais preciso.

Train (1993) encaixa o modelo desagregado na classe de análise de escolhas qualitativas, que ele define da seguinte forma. Toda situação em que uma pessoa (chamada tomador de decisão) faz uma escolha entre alternativas disponíveis pode ser analisada como uma escolha discreta ou qualitativa, desde que satisfaça as seguintes condições: 1) o número de alternativas deve ser finito; 2) elas devem ser mutuamente exclusivas, ou seja, não se pode optar por duas alternativas ao mesmo tempo; e 3) o conjunto de alternativas deve ser exaustivo, isto é, deve conter todo o espaço amostral. Assim, seja P_{in} a probabilidade de que o indivíduo (tomador de decisão) n escolha a alternativa i do conjunto de possibilidades J_{in} , a qual depende das características da opção i (z_i) comparada com todas as outras j (z_j), para todo j em J_n e $j \neq i$, e das características do próprio indivíduo s_n . Mais formalmente,

$$P_{in} = f(z_{in}, z_{jn} \forall j \in J_n \text{ e } j \neq i, s_n, \beta), \quad (1)$$

Onde f é uma função a ser definida e β é um vetor de parâmetros a ser estimado. Para a escolha da função f , o autor justifica o uso da teoria microeconômica da maximização da utilidade, ou escolha racional, como especificação dos modelos de escolha qualitativa por três razões. A primeira é que a *função utilidade* traz uma interpretação mais clara do conceito de probabilidade, ao contrário da visão *frequentista* da probabilidade (quantas vezes um evento ocorre quando submetido a um grande número de testes, sendo que este número de tentativas deve convergir para o infinito). A segunda é que os próprios modelos de maximização da utilidade já propõem modelos para a função P_{in} , como os modelos *logit* ou *probit*. A terceira, que é consequência das duas primeiras, é que como esta relação já é bem aceita pelos pesquisadores, toda a literatura já a considera adequada, logo é mais fácil pensar desta forma.

Train (1993) então define a função utilidade U_{in} da opção i para a pessoa n como uma função das características r_n da pessoa n e das características x da opção i para a pessoa n :

$$U_{in} = U(x_{in}, r_n). \quad (2)$$

Onde U é uma função a ser definida. Como o tomador de decisão escolhe a opção que resulta em maior utilidade, ele escolhe a opção $i \in J_n$ se e somente se valor de

$$U(x_{in}, r_n) > U(x_{jn}, r_n), \forall j \in J_n, j \neq i. \quad (3)$$

Logo, segundo Train (1993) o processo de escolha pelo indivíduo é um processo determinístico, não estocástico. Contudo, o interesse é sobre a escolha do indivíduo do ponto de vista do pesquisador, já que o mesmo não conhece exatamente os valores de x_{in} e r_n . Assim, o autor separa o vetor x_{in} em dois componentes, um que representa as características da opção i pelo indivíduo n que são conhecidas por ele, chamada de z_{in} , e outro que representa características desconhecidas. Da mesma forma o vetor r_n também é decomposto em dois: um com as características do indivíduo que são conhecidas pelo pesquisador, s_n , e outro com características desconhecidas. Essas duas partes desconhecidas são então chamadas de erro aleatório, ou ruído, e representadas simplesmente por ε_{in} .

McFadden (1973) utiliza o mesmo raciocínio e chama isto de modelo aditivo de utilidade aleatório, onde a função utilidade U_{in} seria a soma de outra função sistemática de utilidade e um erro aleatório independentemente distribuído, $V(z_{in}, s_n, \beta) + \varepsilon_{in}$. O conceito de utilidade aleatória, segundo Ben-Akiva e Lerman (1985), remete a estudo de psicologia de Thurston

(1927), de forma que a probabilidade de que uma alternativa seja escolhida é a probabilidade de que sua utilidade seja maior que as utilidades das outras alternativas.

Bruton (1970), por sua vez, afirma que os fatores que influenciam na escolha modal podem ser divididos em três grupos, incluindo no primeiro item um vetor de atributos da viagem:

- 1) características da viagem, como distância da viagem, motivo e horário;
- 2) características do viajante, como renda, posse de veículo e posição social;
- 3) características dos modos, como tempo de viagem, custo, acessibilidade e conforto.

Isto posto, o método de Bruton (1970) difere do método de McFadden (1973) e Ben-Akiva e Lerman (1985) em relação à característica da viagem, que só é considerado por Bruton. Contudo, conforme já foi adiantado, este trabalho se concentrará apenas no terceiro grupo de Bruton, ou o vetor z de McFadden, mais especificamente no tempo de viagem, conforme será justificado mais adiante.

Bruton (1970) também separa os viajantes entre os cativos e os com escolha. Os cativos, por exemplo, são aqueles que só possuem uma forma de realizar sua viagem, independentemente do modo. Podem ser aqueles que não possuem veículo privado cuja origem e destino são tão distantes que a única opção que lhes resta é o transporte público, ou aqueles proprietários de carro cuja origem ou cujo destino – também distantes entre si de forma que os meios não motorizados também sejam inviáveis –, ao viajar, não são servidos pelo transporte público. Os outros usuários, que não são cativos, são chamados de usuários com escolha. São estas as pessoas (com escolha) que este trabalho está considerando, como se elas fossem a totalidade dos moradores da cidade.

Após ter sido descrita a teoria microeconômica por trás do cálculo da escolha modal – cuja importância será enfatizada mais à frente, na seção que trata da *teoria dos jogos* – apresenta-se a seguir a descrição das metodologias utilizadas na atribuição das rotas. A atribuição de rotas às viagens é utilizada para estimar o volume de tráfego em cada instante, para cada trecho da malha urbana, dadas a geração, a distribuição de viagens e a escolha modal, executadas nos passos anteriores. Segundo Bruton (1970), alguns dos procedimentos para isto são os métodos do tudo ou nada e da curva de divergência. No método do tudo ou nada, todos os indivíduos de mesma origem e destino tomam a mesma decisão, ou seja, optam pelo caminho mais curto, mais rápido ou de menor custo. Segundo Gazis (1974), não houvera até então evidências contra

esta afirmação, exceto talvez para viagens recreativas, em que o tempo, a distância ou o custo podem não ser considerados.

O inconveniente desta metodologia é que seu resultado é irreal, já que na prática alguns indivíduos com mesma origem e mesmo destino podem escolher trajetos diferentes. Contudo, é possível utilizar o método do tudo ou nada com restrição de capacidade, que considera que a ocupação da via interfere no tempo e conseqüentemente no custo de utilização da mesma. Para chegar a este resultado, Gazis (1974) sugere utilizar um método interativo semelhante ao método descrito acima, mas que após a atribuição da rota de cada indivíduo, recalcula as ocupações das vias utilizadas pelo indivíduo; de forma que tal método torna possível atualizar a estimativa do tempo (custo) gasto em cada via, e a rota do próximo viajante levará em consideração estes valores atualizados. Este procedimento de estimar a rota de todos os viajantes deve ser repetido até que haja convergência nos resultados. Neste trabalho, conforme será melhor detalhado no capítulo da "Metodologia", contudo, o procedimento não foi repetido devido ao grande tempo gasto com o procedimento.

Já no método das curvas de divergência, por meio de pesquisas prévias, são estimadas as proporções de pessoas que optam por um caminho em detrimento a outro, dado que o primeiro possui uma ligeira vantagem de ser um pouco mais curto, por exemplo (BRUTON, 1970). De fato, este percentual não será 100% para uma rota e 0% para a outra, como o método anterior considera. Apesar deste segundo método ser mais realista, pelo fato de não serem conhecidas as curvas de divergência para a cidade de Belo Horizonte, será utilizado neste trabalho o método do tudo ou nada. Da mesma forma, como não são conhecidas *a priori* as capacidades das vias, não haverá restrições em relação a isto. Isto será mais esclarecido no capítulo 3.

2.1.2 Modelagem e simulação do tráfego

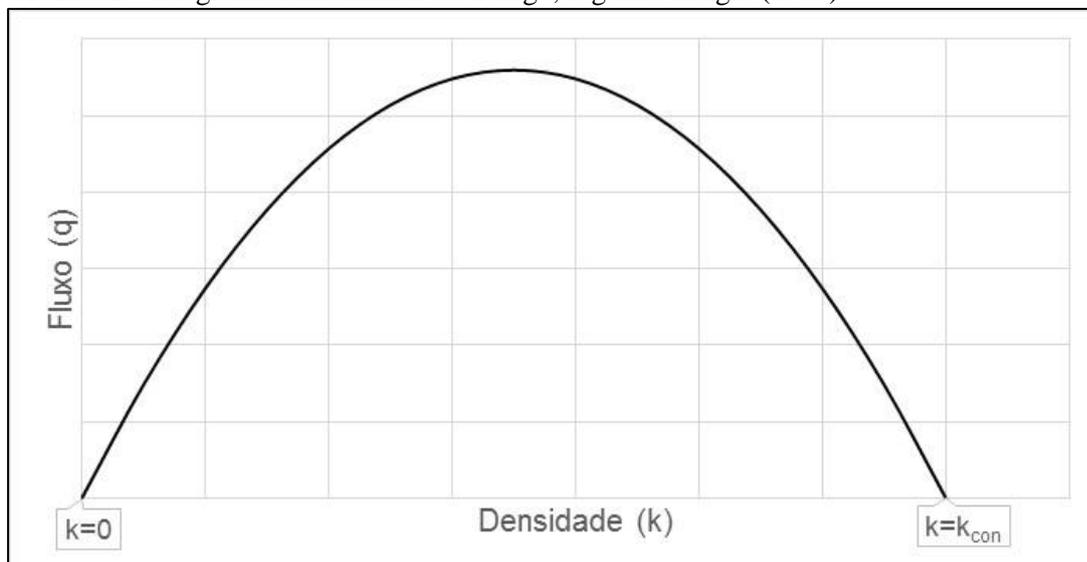
Gazis (1974) define que a modelagem de tráfego busca encontrar uma fórmula matemática que descreva as interações entre automóveis, ônibus e caminhões percorrendo ruas e rodovias; ou, seguindo uma descrição mais tradicional, a teoria de tráfego lida com a interação motorista-veículo-rua. Contudo, em geral não se está interessado na relação motorista-veículo, mas na de vários homens e veículos se movendo ao mesmo tempo em uma rua ou rodovia. De fato, uma das principais variáveis com que todos se preocupam é a densidade, também chamada *concentração*, de veículos em um trecho da via. Isto é, é importante analisar vários veículos, e não só um. As outras duas variáveis importantes são o fluxo (ou volume) de veículos e a velocidade dos mesmos. A relação entre estas três variáveis é a seguinte: $q = uk$, onde q é o

fluxo, em veículos por hora, u a velocidade, em quilômetros por hora, e k a densidade de veículos, em veículos por quilômetro. A validade da relação das unidades da equação $q = uk$ pode ser verificada pela substituição dos valores de q , u e k pelas suas respectivas unidades:

$$\frac{\text{veículos}}{\text{hora}} = \frac{\text{km}}{\text{hora}} \frac{\text{veículos}}{\text{km}}$$

De maneira similar, é possível trabalhar com as variáveis inversas destas; que são o *headway* (h), que é o intervalo de tempo entre dois veículos consecutivos; o espaçamento entre veículos (s), que é a distância entre as traseiras de dois veículos consecutivos; e o ritmo (f), que é o tempo por quilômetro. De fato, o *headway* é o inverso do fluxo, ou seja, $h=1/q$, o espaçamento é o inverso da densidade, ou seja, $s=1/k$, e o ritmo é o inverso da velocidade, isto é, $f=1/u$. A relação mais conhecida entre todas estas seis variáveis (três variáveis principais e seus respectivos inversos) é a k - q , ou seja, densidade-fluxo, também chamada por Haight (1963) de *diagrama fundamental do tráfego*. Wohl e Martin (1967) explicam porque esta curva deve ser côncava: o volume deve ser 0 quando a densidade é 0 (quando não há nenhum veículo na via, o fluxo de veículos é 0) e quando a densidade é máxima (quando os veículos ocupam completamente a via, eles não se movimentam); e, obviamente, o volume será positivo para valores intermediários da densidade.

Gráfico 1 – Diagrama fundamental do tráfego, segundo Haight (1963)



Fonte: adaptado de Haight (1963).

Segundo Barceló (2010), a literatura descreve principalmente duas maneiras de se analisar as relações entre estas variáveis. Uma delas é a modelagem macroscópica, em que se analisa vários veículos conjuntamente em um mesmo trecho de via, utilizando as variáveis de densidade, fluxo e velocidade, e a outra é a microscópica, que foca em cada veículo/motorista separadamente.

Em geral, se utiliza a analogia da teoria dos fluidos em hidrodinâmica para o modelo macroscópico; enquanto que na modelagem microscópica se utiliza os chamados modelos de perseguição, que analisam o comportamento individual de cada motorista ou veículo, supondo que o motorista é influenciado pelo veículo à sua frente. A simulação de tráfego, portanto, pode ser executada considerando qualquer um dos modelos, e leva o nome do modelo escolhido: "simulação microscópica" ou "simulação macroscópica".

A seguir, apresenta-se um modelo dinâmico de simulação de tráfego, que possui a seguinte estrutura conceitual, adaptada de Barceló (2010):

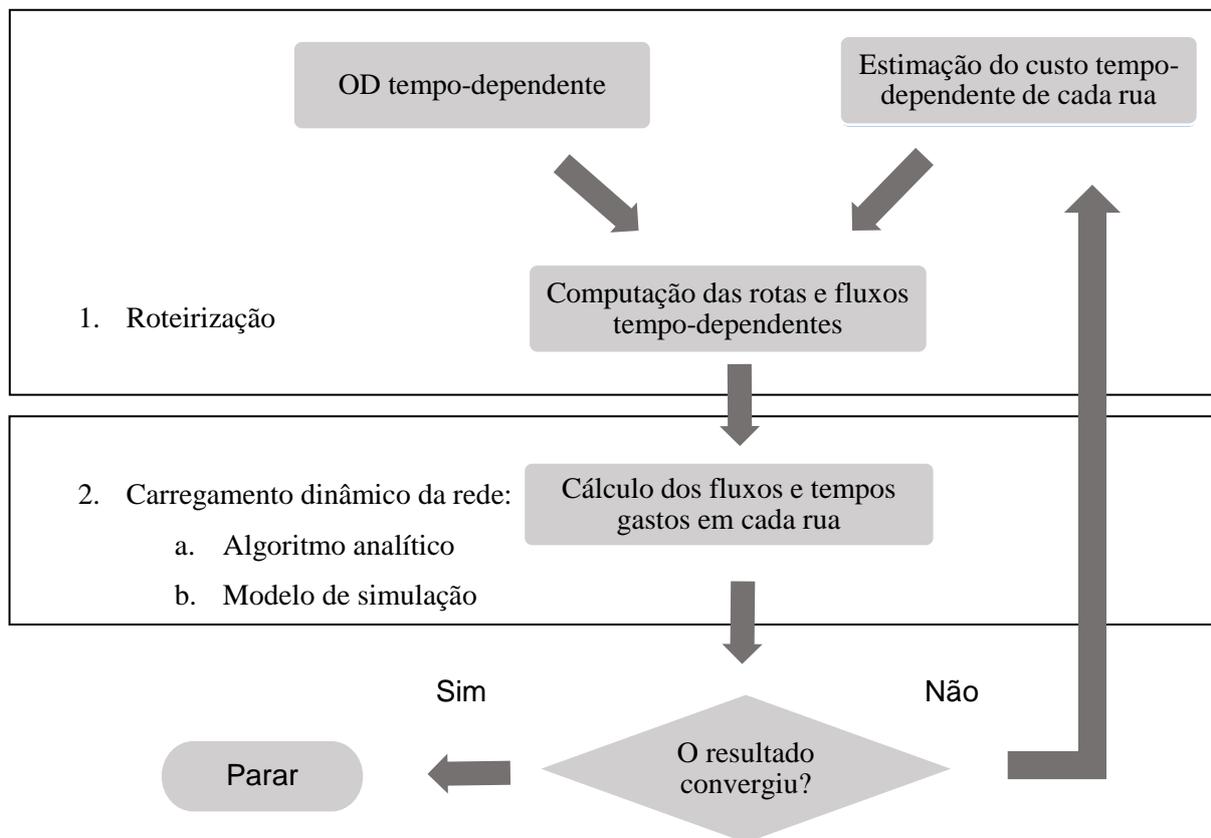


Figura 1 – Estrutura computacional do modelo dinâmico de simulação de tráfego

Fonte: adaptado de Barceló (2010)

Barceló (2010) explica como avaliar se houve ou não convergência do resultado. Uma vez que neste trabalho será utilizado o tempo como *proxy* do custo; conforme será explicado na seção 2.1.3, onde está escrito "custo de cada (trecho de) rua" leia-se "tempo gasto em cada (trecho de) rua". Na seção de "Análise de dados" (seção 3.4) do capítulo da "Metodologia" (capítulo 3) será explicada a adaptação desta estrutura para o presente trabalho. A seguir apresenta-se o modelo macroscópico que é inserido no passo 2a do fluxograma acima (Figura 1).

2.1.2.1 Análise macroscópica

Sob a analogia da hidrodinâmica, os carros se movem na via como um líquido em uma tubulação e, portanto, podem ser modelados da mesma forma. Outra característica deste modelo é que o mesmo considera o tempo e o espaço contínuos, isto é, a análise é feita através de taxas instantâneas de variação das variáveis, como a aceleração, que é a taxa de variação da velocidade. Supondo que o número de veículos que entram e saem de uma via é o mesmo, a relação entre fluxo, velocidade e densidade segue a equação de continuidade (GERLOUGH e HUBER, 1975; KÜHNE *et al.*, 1992):

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial k}{\partial t} = 0, \quad (4)$$

onde x é a posição espacial do veículo, t é o tempo, $\partial q/\partial x$ é a taxa de variação (infinitesimal) espacial do fluxo e $\partial k/\partial t$ é a variação (infinitesimal) temporal da densidade. Significa que se o fluxo aumenta espacialmente, a densidade diminui temporalmente, na mesma magnitude. Considerando que este modelo considera o tempo t e o espaço x contínuos, as relações entre o fluxo, a densidade e a velocidade são descritas como funções do tempo e do espaço:

$$q(x, t) = k(x, t)u(x, t). \quad (5)$$

Por outro lado, estas relações acima somente são válidas em um estado de equilíbrio. Caso se considere que o número de veículos entrando na via seja diferente do número saindo, a equação pode ser generalizada para:

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial k}{\partial t} = g(x, t). \quad (6)$$

Vários autores têm proposto equações para resolver a relação acima, cada um de acordo com uma suposição de como é a propagação do distúrbio no tráfego; isto é, de como a onda do engarrafamento se move ao longo do espaço e do tempo, se é proporcional ao espaçamento, à densidade ou ao fluxo (GAZIS, 1974). Para cada metodologia, é possível descrever as relações entre as variáveis "fluxo", "densidade" e "velocidade". Apesar de já ter sido apresentado o diagrama fundamental do tráfego, o que interessa neste trabalho não é estimar o fluxo, e sim a velocidade, com a qual é possível estimar o tempo gasto em uma viagem. Por isto, torna-se importante conhecer as relações teóricas entre a densidade e a velocidade (k - u). Uma generalização da maioria dos modelos foi proposta por May e Keller (1967):

$$u = u_l \left[1 - \left(\frac{k}{k_c} \right)^{\alpha\beta} \right], \quad (7)$$

onde u_l é a velocidade em fluxo livre, k_c é densidade de congestionamento, valor máximo de densidade no qual os carros não se movem, e α e β são parâmetros a serem estimados de acordo com os dados empíricos, ou mesmo postulados previamente. Richards (1956), por exemplo, propõe $\alpha=1$ e $\beta=1$, simplificando a relação acima em uma relação linear:

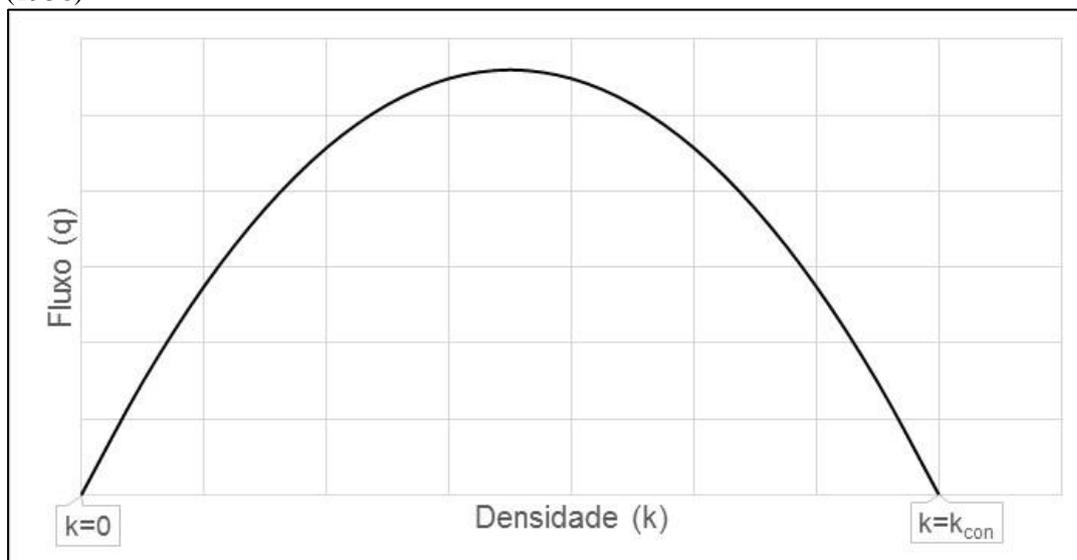
$$u = u_l \left[1 - \left(\frac{k}{k_c} \right) \right]. \quad (8)$$

Este modelo leva à uma relação quadrática entre o fluxo e a densidade semelhante ao *Diagrama fundamental do tráfego* de Haight (1963), dado que $q=uk$:

$$q = u_l \left[k - \left(\frac{k^2}{k_c} \right) \right], \quad (9)$$

que pode ser vista no gráfico abaixo:

Gráfico 2 - Relação teórica entre densidade e fluxo de veículos, segundo modelo proposto por Richards (1956)



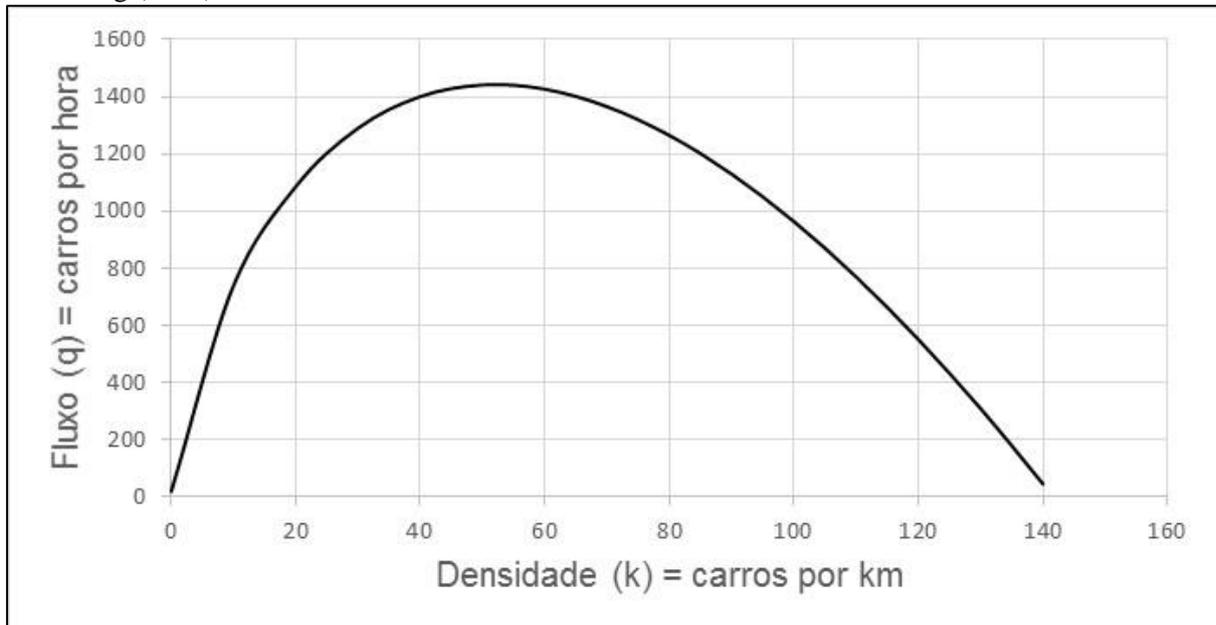
Fonte: elaborado pelo autor.

Outros autores propuseram modelos diferentes da generalização de May e Keller (1967), como Greenberg (1959), que propôs a seguinte relação não linear para $q-k$:

$$q = u_o k \ln \left(\frac{k_c}{k} \right), \quad (10)$$

em que u_0 é a velocidade ótima da via (velocidade que maximiza o fluxo). Esta relação leva ao seguinte gráfico assimétrico, cujos parâmetros foram estimados com dados experimentais no *Túnel Lincoln* em Nova York (GREENBERG, 1959); encontrando parâmetros de densidade de congestionamento de 141 carros por quilômetro e de velocidade ótima de 28 km/h:

Gráfico 3 - Relação teórica entre densidade e fluxo de veículos, segundo modelo proposto por Greenberg (1959)



Fonte: elaborado pelo autor utilizando os parâmetros e o modelo do trabalho de Greenberg (1959).

Em todos os modelos, contudo, pode-se identificar dois estados diferentes do fluxo de veículos. O primeiro, considerado "tráfego livre ou pouco intenso", ocorre enquanto a curva encontra-se na fase crescente, ou seja, antes de chegar ao seu fluxo máximo. A partir de determinado valor de densidade, para o qual o fluxo máximo é atingido, à medida que a densidade aumenta, o fluxo passa a diminuir. Este estado é interpretado como de fluxo intenso ou de congestionamento. Outra observação importante é que dados empíricos têm mostrado que na região de fluxo máximo há uma variabilidade maior no fluxo, gerando maior incerteza sobre seu valor. Small (1992) mostra isto e dá possíveis explicações para este fenômeno.

Voltando ao modelo de Greenberg e utilizando a relação $q=uk$, é possível descrever a relação densidade-velocidade de tal modelo:

$$u = u_0 \ln \left(\frac{k_c}{k} \right). \quad (11)$$

Este modelo, assim como o de Richards, se baseia na relação entre a densidade atual e a densidade de congestionamento (máxima), esta como fator redutor da velocidade em trânsito

livre, para prever a velocidade atual. Gazis (1974), que denomina o modelo aqui apresentado como de Richards, modelo Greenshields-Richards, e o aqui apresentado como de Greenberg, modelo Greenberg-Herman, apresenta ainda o modelo Underwood-Edie, que é conceitualmente diferente dos anteriores:

$$q = u_l k_o \ln\left(\frac{u_l}{u}\right). \quad (12)$$

Este modelo, diferentemente dos anteriores, relaciona o fluxo com o logaritmo da razão entre a velocidade com trânsito livre e a velocidade atual, no lugar de utilizar a razão entre as densidades. Para este modelo, a relação entre densidade e velocidade (k-u) fica:

$$u = u_l \exp\left(-\frac{k}{k_o}\right). \quad (13)$$

Tendo sido apresentados alguns modelos macroscópicos, a seguir são apresentados modelos para a análise microscópica, a qual, por meio de uma analogia completamente diferente da macroscópica, chega a resultados semelhantes.

2.1.2.2 Análise microscópica (perseguição)

Enquanto os modelos macroscópicos fazem uma analogia do tráfego com os fluidos, e a partir do conhecimento da dinâmica dos últimos faz-se suposições em relação ao tráfego, os modelos microscópicos focam no comportamento de cada motorista, tendo sido propostos inicialmente por Reuschel (1950) e Pipes (1953). São também chamados "modelos de perseguição", ou em inglês *car-following*. Dentre os estudiosos que ampliaram os conceitos destes modelos, encontram-se Herman *et al.* (1959), em cujo trabalho se definiu que as decisões tomadas por um motorista, como acelerar ou desacelerar, são uma resposta a um ou mais estímulos que o motorista recebe do ambiente, e que na sua forma mais simples diz respeito ao carro à sua frente. De uma maneira geral,

$$\text{resposta (agora)} = \text{sensibilidade} \times \text{estímulo (prévio)} \quad (14)$$

Como a fórmula acima indica, a resposta é tomada com um pequeno atraso em relação ao estímulo, e a magnitude deste atraso depende; da sensibilidade do motorista em perceber o que está acontecendo, tomar a atitude de acelerar ou desacelerar; e de sua sensibilidade em executar tal decisão, do veículo em promover a aceleração após o motorista pisar no acelerador, e até mesmo da via, cujo pavimento pode alterar o atrito e, conseqüentemente, este tempo de aceleração.

Por exemplo, Herman et al. (1959) propôs que, dada a posição de um carro líder e de seu perseguidor, a aceleração futura do perseguidor é função das diferenças de velocidade (estímulo) atuais dos dois veículos e de um coeficiente de sensibilidade λ :

$$\ddot{x}_{n+1}(t + T) = \lambda[\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)], \quad \lambda > 0. \quad (15)$$

Onde $n+1$ é o número do carro de trás (perseguidor), n é o número do carro da frente (líder), \ddot{x}_{n+1} é a aceleração do carro perseguidor, $\dot{x}_n(t)$ é a velocidade do carro líder, λ é uma constante de sensibilidade (positiva) e T é o intervalo de tempo. A interpretação direta desta equação é que se o veículo da frente está mais rápido que o de trás, a diferença no segundo termo do lado direito da equação é positiva, e, portanto, o veículo de trás decide acelerar. A magnitude desta aceleração é, contudo, função da sensibilidade do complexo motorista-carro-via, e aqui tal sensibilidade é representada pela constante λ .

É possível, a partir deste modelo, e com auxílio de equações diferenciais, encontrar as relações $u-k$, $u-q$ e $q-k$, e compará-las com aquelas propostas pelos modelos macroscópicos. O modelo acima, por exemplo, gera a seguinte relação

$$q = \lambda \left[1 - \left(\frac{k}{k_c} \right) \right], \quad (16)$$

que não se mostrou adequada a pesquisas com dados reais (GERLOUGH e HUBER, 1975; ROTHERY, 1992). Para sobrepor este problema, Gazis, Herman e Potts (1959) propõem definir a constante λ do modelo como sendo inversamente proporcional à distância entre os veículos:

$$\lambda = \frac{c_1}{x_n(t) - x_{n+1}(t)}, \quad (17)$$

onde c_1 é uma constante a ser definida/estimada. Barceló (2010) mostra que integrando a equação acima com respeito a t e conhecendo a relação $q=uk$, é possível chegar à seguinte relação, que coincide com o modelo macroscópico de Greenberg (1959):

$$q = u_o k \ln \left(\frac{k_c}{k} \right). \quad (18)$$

Está então justificado porque Gazis (1974) chamou tal modelo de Greenberg-Herman, uma vez que ambos os pesquisadores chegaram ao mesmo resultado partindo de modelos completamente diferentes.

De fato, apesar das analogias completamente diferentes, existem muitas similaridades entre os modelos macroscópico e microscópico de tráfego, de forma que qualquer um dos dois poderia, em tese, ser utilizado neste trabalho. Entretanto, aconselha-se decidir de acordo com o foco do trabalho, e o próprio nome das metodologias ajuda a escolher. Se, por exemplo, o foco for encontrar o fluxo máximo em uma determinada microrregião de uma cidade, como um cruzamento, a análise microscópica é a mais indicada. Por certo, esta metodologia permite trabalhar com diferenças de comportamento entre motoristas, tornando possível atingir um resultado mais exato, mas a um alto custo de modelagem e computacional. Por outro lado, se o objetivo for, por exemplo, estimar a velocidade média em determinada região ou mesmo em toda a cidade, o mais indicado é utilizar a análise macroscópica, por sua simplicidade. Com isto, optou-se nesta dissertação pela modelagem macroscópica.

2.1.3 Custo do transporte e custo do congestionamento

Até agora, em alguns momentos este trabalho se alternou entre citar o tempo ou o custo como critério de escolha modal pelos cidadãos. De fato, em econometria o correto ou convencional a se utilizar seria mesmo o custo, uma vez que o tempo seria um dos termos do custo. Contudo, optou-se por utilizar apenas o tempo como proxy do custo. Mesmo assim a seguir apresenta-se os custos marginais e totais do automóvel e do ônibus, bem como uma justificativa pela escolha desta proxy.

O custo marginal do deslocamento pelo automóvel privado, como o nome do modo já sugere, é pago totalmente pelo proprietário do veículo; diferentemente do transporte coletivo, cujo custo marginal é o valor da tarifa, que é uma fração do custo total do sistema, custo que inclui a remuneração dos operadores. Em ambos os casos há ainda os custos que não são pagos totalmente pelos usuários, conhecidos como custos sociais, como o custo da poluição; o custo dos estacionamento nas ruas; os custos de acidentes; e os custos de serviços públicos, como a própria fiscalização do trânsito (SMALL, 1992), que em geral são agravados pelos congestionamentos. Por não serem pagos pelos usuários, estes custos sociais não interferem na tomada de decisão do cidadão, e por isto não serão considerados neste trabalho.

No caso do automóvel, o custo não social pode ser separado em custos fixo, relativo à aquisição e à propriedade do automóvel; e variável, proporcional à utilização do veículo (distância percorrida). Os custos fixos são, portanto; o custo de oportunidade de capital; a depreciação; e as taxas relativas à propriedade do automóvel. Os custos variáveis são custos de combustíveis, lubrificantes, material rodante, manutenção, além do custo do tempo gasto no deslocamento.

Segundo Small (1992), uma maneira de dar um valor a esse tempo é considerá-lo como sendo a metade do salário horário médio da cidade em questão. Este autor também cita o custo do atraso (tempo gasto além do esperado), que segundo seu estudo foi equivalente aproximadamente à metade do custo do tempo de viagem, ou um quarto do salário horário médio da região. Já os estacionamentos e os acidentes são pagos parcialmente pelos usuários, uma vez que o sistema público de saúde (SUS, no caso do Brasil) e a maioria das vagas de estacionamento nas ruas não são cobrados diretamente dos usuários.

No caso dos usuários do ônibus, o cálculo da fração do custo paga por eles não é direto, possuindo algumas peculiaridades. Por exemplo, segundo Ferraz e Torres (2004), no Brasil, em geral, o valor da tarifa é fixo por viagem, independentemente da distância percorrida, o que torna a viagem por quilômetro mais cara para aqueles que fazem a viagem em curtas distâncias. Da mesma forma, há vários indivíduos que possuem o benefício da gratuidade, o que faz com que o custo seja nulo para eles e aumentado para os demais (IPEA, 2013). Outro fator a se considerar é se há ou não subsídio governamental para o investimento ou operação do serviço, ou mesmo se há alguma outra fonte de arrecadação para as empresas operadoras, como publicidade nos veículos; ou se a única fonte é a tarifa paga pelos usuários (pagantes). Considerando que não haja subsídio e desconsiderando a arrecadação por publicidade, pode-se concluir que a tarifa paga pelos usuários por viagem é a razão entre o custo total do sistema, incluindo o custo de operação e a remuneração por investimentos feitos pelas empresas operadoras, e o número total de passageiros pagantes transportados no mesmo período relativo a tal custo total (SILVA, 2015). O custo da viagem por ônibus, entretanto, assim como no caso do automóvel, possui ainda as parcelas relativas ao tempo de viagem e ao atraso da viagem. Logo, esses dois tempos deveriam ser considerados na equação de custos da viagem por ônibus.

Contudo, foi considerado inviável utilizar estas últimas variáveis no cálculo do custo da viagem, tanto de carro quanto de ônibus, nesta dissertação. Por outro lado, a variável tempo, que é uma parcela importante do custo variável em ambos os modos e, além disso, altamente correlacionada à distância percorrida – que é a matéria prima de todos os outros custos marginais – é uma variável existente na pesquisa OD e, portanto, viável e proveitosa para este trabalho. Por conseguinte, o tempo de viagem foi considerado como *proxy* do custo da viagem. Este tempo é iniciado desde o momento em que o usuário sai de sua origem (casa, por exemplo) até o momento em que chega a seu destino (trabalho, por exemplo), contando também o "modo ônibus" com o tempo de caminhada (da origem ao ponto de embarque e do ponto de desembarque até o destino), e com o tempo de espera no ponto, além do tempo de viagem.

Dada esta importância do tempo nos custos da viagem, deduz-se que o congestionamento, que aumenta os tempos de viagem e de atraso, pode ser interpretado como um fator que inflaciona os custos de viagem. Conforme demonstrado na seção 2.1.3, a ocupação de uma via possui uma relação não linear com o fluxo e a velocidade dos veículos, ou seja, a partir de determinado valor de ocupação de uma via, os tempos de viagem aumentam bruscamente com o aumento de apenas um automóvel no mesmo trecho da via. Desse modo, até certo grau de ocupação, abaixo da ocorrência do congestionamento, o aumento do custo marginal a partir do aumento marginal do número de veículos na via pode ser desconsiderado, diferentemente de quando há o congestionamento (parte decrescente da função desenhada no Gráfico 1), onde o custo marginal aumenta abruptamente. A partir desta análise, e partindo do pressuposto de que os automóveis causam mais congestionamentos que o ônibus – devido ao espaço ocupado por passageiro transportado –; vários trabalhos buscam uma forma de taxar ou tributar o uso dos automóveis por causa do congestionamento por eles gerados, conforme será demonstrado na seção 2.3.2.

Tendo sido discorrido o custo do transporte e do congestionamento, e finalizada a seção sobre a mobilidade urbana, a seção a seguir busca elucidar o significado da *tragédia dos bens comuns* do ponto de vista das ciências econômicas.

2.2 Teoria dos jogos, Dilema do Prisioneiro e Tragédia dos Bens comuns

Esta seção explica o que é a *tragédia dos bens comuns*, tratando-a como um exemplo de aplicação da Teoria dos Jogos, assim como o *Dilema do Prisioneiro*, também a ser explicado a seguir.

2.2.1 Teoria dos Jogos

Esta teoria busca nos ajudar a entender situações em que há interação entre tomadores de decisão, uma vez que apesar da palavra “jogos”, o principal foco de tal teoria é esclarecer problemas econômicos, políticos e fenômenos biológicos de cunho comportamental (OSBORNE, 1995). Neumann e Morgenstern (1944) apresentaram, segundo eles próprios, um tratamento matemático diferenciado da teoria (na opinião deste autor, mais rigoroso) para lidar com problemas econômicos, pelo menos em relação a como eles eram tratados até então. Em suas opiniões, o principal obstáculo de sua teoria seria conceitual, a respeito do comportamento das pessoas e do que as motiva, e não técnico/matemático. Tradicionalmente, este obstáculo fora ultrapassado com a suposição (Teoria da Escolha Racional) de que os indivíduos/consumidores se motivam pela maximização de sua satisfação (utilidade, no caso de consumidores) e os empresários pela maximização de seus lucros. Osborne (1995) descreveu

formalmente esta escolha racional da seguinte forma: seja A um conjunto de ações possíveis para cada indivíduo (consumidor) e sejam a e $b \in A$, a função utilidade u representa a preferência do indivíduo se, para qualquer ação a e b ,

$$u(a) \geq u(b) \text{ se e somente se o indivíduo prefere } a \text{ a } b. \quad (19)$$

Ou ainda: “uma ação escolhida por um tomador de decisão é no mínimo tão boa, de acordo com suas preferências, quanto qualquer outra ação disponível” (OSBORNE, 1995, p. 6).

De fato, segundo Osborne (1995), essa teoria ainda não havia sido desafiada por nenhuma outra e, nessa esteira, ainda é a mais aceita em Economia. Esta tentativa dos indivíduos de obter este valor máximo da utilidade é chamada atitude "racional", embora segundo Neuman e Morgenstern (1944), até a época da publicação do seu livro não houvera êxito em tentar demonstrar quantitativamente como esta atitude racional se manifesta, uma vez que pode existir mais de uma maneira de alcançar a utilidade máxima. Da mesma forma, há dificuldade em tentar quantificar esta utilidade, transformando-a em um número. Assim, os autores fazem uma revisão teórica a respeito da mensuração da utilidade. Embora haja consenso sobre a *ordinalidade* e *unidimensionalidade* da preferência – por exemplo, se alguém prefere A a B e B a C, esse mesmo alguém prefere A a C –, o mesmo não se pode dizer da escala quantitativa desta preferência. Não há, portanto, consenso em um caso em que se postule que alguém prefere algo duas vezes mais que outra coisa. Isto posto, dada a característica qualitativa da preferência, não seria correto definir uma função utilidade quantitativa. De toda forma, em uma adicional analogia com a física, Neuman e Morgenstern (1944) mostraram que no estudo do calor, embora a princípio pareça uma variável exclusivamente qualitativa, foi possível chegar a medições quantitativas, medições do calor (em calorias) e da temperatura. A primeira forma de medição, baseada na energia mecânica, pôde ser considerada puramente quantitativa, forma de medição que nos dias de hoje é chamada "nível de razão". Já a segunda, mesmo não sendo quantitativa racional, é considerada "quantitativa intervalar". A diferença entre os dois tipos de variável pode ser explicada da seguinte forma (TRIOLA, 1999): ambas são quantitativas, pois podem ser exibidas como um número; mas apenas "a nível racional" é possível dizer que um valor é o dobro do outro. Como uma temperatura, por exemplo, nunca pode ser o dobro da outra, a mesma é classificada como quantitativa intervalar. Por fim, Neumann e Morgenstern (1944) usam de um artifício engenhoso para demonstrar como a utilidade pode ser vista de forma quantitativa racional com o auxílio do conceito de probabilidade (NEUMANN e MORGENSTERN, 1953, p. 17).

Uma suposição importante para o presente trabalho é a respeito da motivação das pessoas. Em relação a isto, o pressuposto assumido por Neumann e Morgenstern (1944) é que a motivação de todos os participantes de um sistema econômico é o dinheiro. De todo modo, uma vez que o presente trabalho não lida com um sistema econômico, é possível flexibilizar esta suposição e admitir alguma outra forma direta de satisfação que não o dinheiro. Na seção 2.2.3 serão apresentados alguns pontos de vistas a respeito do tema, em notando que pensadores em geral defendem a ocorrência da racionalidade “egoísta” das pessoas em suas tomadas de decisão, que são guiadas pela maximização de sua renda (WEBER, 1947), recompensa (PARSONS e SMELSER, 1954), e não só por motivos ideológicos (OLSON, 1965).

Outro ponto interessante é que Neumann e Morgenstern (1944) afirmam que apesar de muitos dos resultados de sua teoria já serem conhecidos, mesmo anteriormente, pelos economistas; isto não torna sua teoria inútil, já que a mesma embasa estes resultados. Citam como exemplo o movimento dos planetas, que já era conhecido mesmo antes da lei de gravitação de Newton. Apesar da discussão conceitual e da possível falta de ineditismo dos resultados, o trabalho de Neumann e Morgenstern (1944) é muito valorizado até os dias de hoje, sendo que o novo campo em Economia que criaram, a Teoria dos Jogos, levou alguns pesquisadores a serem agraciados com o Prêmio Nobel, como John Nash, que também foi homenageado com a denominação de uma característica de alguns tipos de jogos, conforme será explicado mais à frente.

Os jogos, segundo Osborne (1995), podem ser classificados em três tipos: jogos estratégicos, jogos extensivos e jogos de coalizão, que se diferem em duas dimensões. Os jogos estratégicos e extensivos focam nas ações individuais, diferentemente dos jogos de coalizão, que focam nas atitudes de grupos de pessoas. Por outro lado (dimensão), tanto os jogos estratégicos quanto os de coalizão são realizados uma única vez, enquanto os jogos extensivos são repetidos e em cada repetição os jogadores tomam conhecimento das ações tomadas pelos outros jogadores nas jogadas anteriores.

2.2.2 Dilema do Prisioneiro

Segundo Axelrod (1984), um dos jogos estratégicos mais conhecidos da teoria é o Dilema do Prisioneiro, criado nos anos 1950 por Merrill Flood e Melvin Drescher. Apesar do mesmo possuir várias versões, cada uma deve possuir características que a distingam dos outros jogos. Estas características não serão descritas por ora. Por enquanto, seu escopo apenas será descrito

da seguinte forma¹: suponha que dois suspeitos de um crime são interrogados individualmente (e simultaneamente, de forma que um não sabe da resposta do outro) e cada um deles possui duas opções: acusar o colega ou cooperar e não o acusar (assumir a culpa está fora de cogitação). Para cada combinação entre as opções individuais, cada um é recompensado ou punido de alguma forma. Por exemplo, caso ambos cooperem e não se acusem, eles ficam presos por 2 anos, afinal, há provas suficientes contra eles, embora não se saiba ao certo qual dos dois executou o crime. Caso apenas um entregue o colega, o delator é beneficiado com a liberdade imediata, enquanto o acusado pega 5 anos de prisão. Por último, caso os dois acusem um ao outro, ambos são condenados a 3 anos de prisão.

Axelrod (1984) classifica as recompensas em quatro tipos, sendo: *R* para *recompensa* pela cooperação, quando ambos se calam; *T* para *tentação* de acusar o colega e obter o valor máximo da utilidade (ficar livre), quando um acusa e o outro se cala (coopera); *O* para o *otário* que coopera enquanto o outro o acusa; e *P* para *punição* para ambos quando caem na tentação de acusar o outro e acabam pegando 3 anos de prisão. Dessa forma, pode-se construir o quadro abaixo, considerando cada uma das possibilidades para cada suspeito – os suspeitos são chamados "jogadores" – e que o ganho (ou *payoff*) de cada um deles é medido em “anos de liberdade nos próximos 5 anos”:

		Suspeito 2	
		Coopera (se cala)	Acusa o colega
Suspeito 1	Coopera (se cala)	(R = 3, R = 3)	(O = 0, T = 5)
	Acusa o colega	(T = 5, O = 0)	(P = 2, P = 2)

Quadro 1 – Dilema do prisioneiro: recompensa (*payoff*) para cada um dos jogadores (suspeitos) em “anos de liberdade nos próximos 5 anos”.

Fonte: adaptado de Axelrod (1984).

De fato, o Dilema do Prisioneiro pode ser representado de uma forma mais simplificada, apenas ordenando as funções utilidade para o suspeito 1 (OSBORNE, 1995):

$$u_1(acusa, coopera) > u_1(coopera, coopera) > u_1(acusa, acusa) > u_1(coopera, acusa). \quad (20)$$

Da mesma forma, usando a nomenclatura de Axelrod (1984) para o suspeito 1:

¹ Algumas referências trocam os termos "cooperar" por "negar"; ou "silenciar" e "acusar" por "dedurar" ou "confessar", mas é preciso ter em mente apenas que o mais importante são as recompensas e punições por cada combinação de atitudes tomadas pelos suspeitos (jogadores).

$$u_1(T) > u_1(R) > u_1(P) > u_1(O). \quad (21)$$

Com estas definições, não importa a história por trás do dilema/problema – se a mesma descreve suspeitos de um crime ou pessoas decidindo de sentam ou ficam em pé no ônibus, por exemplo –, sempre que esta relação for satisfeita, e todas as demais condições do dilema, o problema em questão pode ser considerado uma versão do Dilema do Prisioneiro.

Tendo sido descrito o problema, pode-se agora pensar nos critérios racionais para tomada de decisão. Considerando as possibilidades do ponto de vista do suspeito 1, sua decisão seria melhor tomada caso ele pudesse saber qual foi/será a decisão tomada pelo suspeito 2, contudo esta comunicação não é permitida pelas regras do jogo. Ele só pode, portanto, supor qual será a decisão tomada pelo colega, e para cada suposição, avaliar qual a melhor escolha para si. Caso o suspeito 2 coopere e se cale, a atitude que maximiza seu tempo de liberdade é acusar o colega, já que neste caso ele ficaria solto enquanto o suspeito 2 amargaria 5 anos na prisão. Da mesma forma, caso o suspeito 2 o entregue, a melhor escolha a ser feita também é acusar o outro suspeito, já que assim ele é condenado a 3 anos, em vez de 5, isto é, caso ele (suspeito 1) coopere. Assim sendo, independente da escolha do suspeito 2, a melhor escolha para o suspeito 1 é acusar o colega. Como o mesmo raciocínio vale para o suspeito 2, a melhor atitude a ser tomada pelo mesmo é também acusar o colega. Desse modo, quando ambos os suspeitos tomam suas decisões seguindo a teoria da escolha racional, de forma que busquem maximizar apenas sua própria utilidade (satisfação), ambos irão acusar o colega e ficarão 3 anos presos (2 anos em liberdade nos próximos 5 anos). O interessante neste resultado é que este resultado é pior para ambos do que se os dois decidissem cooperar e não acusar o outro, de forma que ficariam presos por apenas 2 anos (3 anos em liberdade).

Neste caso, a solução em que ambos se acusam ($P = 2, P = 2$), que é um resultado em que ambos utilizaram a escolha racional; como nenhum jogador tem a ganhar mudando unilateralmente sua estratégia, pode ser chamada de "equilíbrio de Nash" (OSBORNE, 1995). Na prática, é como se em jogos com este equilíbrio, caso seja apenas um², este resultado seja o único a ocorrer caso as regras do jogo sejam seguidas à risca; conforme a escolha racional, a não comunicação entre os jogadores e o jogo ser jogado apenas uma vez (já que este jogo não é extensivo). De fato, a ação de acusar o outro é a escolha racional para cada um dos jogadores independente da

²Podem haver um, vários ou mesmo nenhum equilíbrio de Nash em um jogo estratégico (OSBORNE, 1995).

escolha tomada pelo outro, ou seja, não é necessário supor que o outro jogador também fez sua escolha racionalmente.

Por outro lado, Axelrod (1984) estudou como a cooperação pode surgir neste tipo de jogo sob certas circunstâncias, e concluiu que a possibilidade de cooperação ($R = 3, R = 3$) no dilema do prisioneiro ocorre quando o jogo é repetido um número indefinido de vezes e os jogadores podem se reconhecer e saber a ação tomada pelo outro (AXELROD, 1984). Olson (1965), em seu livro *Lógica da Ação Coletiva*, também lidou com problemas de cooperação, de uma maneira diferente, considerando um grupo de pessoas que se envolvessem simultaneamente, não apenas duas, de forma que concluiu que para que a cooperação como a descrita por Axelrod (1984) ocorresse, o tamanho dos grupos deveria ser pequeno. De fato, quanto menor o grupo (Axelrod trabalhou com o tamanho do grupo igual a 2 em cada jogada), maior a possibilidade de cooperação.

2.2.3 Tragédia dos Bens Comuns

O trabalho original de Hardin (1968) é considerado por muitos um artigo seminal no campo de gerenciamento de recursos naturais (CORKER, 2011). Além disso, Corker (2011), em uma excelente releitura da obra, considera que com as referências quais o *crescimento populacional* de Malthus (1798), a *mão invisível* de Smith (1776) e a *teoria dos jogos* de Neumann e Morgenstern (1944), Hardin teria cruzado limites entre disciplinas transcendendo-as, misturando pensamentos econômicos com estudos sobre ecologia.

Segundo Corker (2011), o estudo de Hardin (1968) é mais um estudo sobre os problemas mundiais discutidos pelos acadêmicos de sua época, como o “problema dos alimentos” e o “problema da segurança”, além do próprio “problema da população” do trabalho de Hardin (CORKER, 2011). Hardin (1968), por sua vez, enquadra o “problema da população” no grupo dos problemas “sem solução técnica”, assim como foi descrito por Wiesner e York (1964) a respeito do futuro das guerras nucleares, no qual os autores afirmavam que, ao menos pelo seu julgamento profissional, o dilema entre ampliar ou não o poderio nuclear com fins de aumentar a segurança nacional não teria solução técnica. Um exemplo dado por Hardin (1968) de problema sem solução técnica é o do “jogo da velha”, no caso em que ambos os jogadores entendem perfeitamente o jogo (informação perfeita, segundo a Teoria dos Jogos). Neste caso, é impossível ganhar, e isto torna este problema um problema sem solução técnica. A única forma de ganhar, seria uma maneira diferente de interpretar a palavra “ganhar”, ou seja, usando alguma trapaça.

Segundo Hardin (1968), o termo *tragédia* segue o significado dado pelo filósofo Whitehead (1948, p. 17): “A essência da tragédia dramática não é a infelicidade. Reside na solenidade do funcionamento sem remorso das coisas”. Conforme melhor explicou Corker (2011), o termo de Hardin (1968) não significa uma catástrofe súbita, mas sim uma inevitável consequência das ações.

O termo *comuns*, por outro lado, é usado no sentido de bens comuns, como os recursos naturais da terra, ou como os oceanos utilizados para pesca descritos por Gordon (1954). Cornes e Sandler (1986) definem os conceitos de “rivalidade” e “exclusividade” dos bens, de forma a discernir entre bens privados, públicos e comuns. De acordo com os autores, bens rivais são bens cujo consumo de cada unidade os torna indisponíveis para outro consumidor, como um produto na prateleira do supermercado. Alguns exemplos de bens não rivais são as ondas de rádio e a luz de um farol na margem de um oceano, que podem ser consideradas como de pouquíssima rivalidade. Já a exclusividade se refere à possibilidade de se excluir algum consumidor específico da possibilidade de possuir algum bem, como por exemplo algum consumidor que “não pagou por isto”. A contemplação de fogos de artifício em um espaço aberto, por exemplo, é um exemplo de bem não exclusivo. Por conseguinte, os bens privados são bens rivais e exclusivos, bens comuns são bens rivais e não exclusivos e os bens públicos são não rivais e exclusivos. Assim, a *tragédia dos bens comuns* só pode ocorrer em bens rivais e não exclusivos, uma vez que este é o perfil dos bens comuns.

Segundo Hardin (1968), embora não tenha utilizado o termo “tragédia dos bens comuns”³ (ou “tragédia dos comuns”, do inglês *tragedy of commons*), Lloyd (1833) o descreveu anteriormente quando analisava o problema do crescimento populacional descrito por Malthus (1798). Portanto, sua ideia não era nova, apenas sua denominação. Vargas e Herscovici (2017) também atribuem a autoria da ideia a Tucídides (460 a.C. – 395 a.C.) e Aristóteles (384 a.C – 322 a.C), que referiram o problema de que quando muitos são responsáveis por um bem comum, cada um acaba deixando para o outro fazer o que ele acredita que é o certo, e por fim, ninguém o faz. De fato, este conceito pode, de certa forma, ser interpretado como uma versão da *tragédia dos bens comuns* na visão atual.

A *tragédia dos bens comuns* será melhor explicada por meio de exemplos, de onde fica claro que trata-se de um caso especial do Dilema do Prisioneiro e, por conseguinte, da Teoria dos

³ Embora a tradução direta seja “tragédia dos comuns”, conforme foi explicado, o contexto da palavra *commons* significa bens comuns, ou propriedade comum a todos.

Jogos (NEUMANN e MORGENSTERN, 1944). Por exemplo, o primeiro exemplo citado por Hardin (1968) para explicar a *tragédia dos bens comuns* na questão da população e recursos naturais do planeta é o exemplo do *dilema do pastor*, que sempre tem a escolha de adicionar ou não um animal ao seu rebanho, rebanho que utiliza um pasto comunitário (*common*). Cada animal, obviamente, gera um retorno financeiro positivo para seu proprietário quando o mesmo o vende; bem como um retorno negativo pelo seu consumo dos recursos naturais que, entretanto, atinge todos os pastores que partilham o mesmo terreno, não só o seu proprietário. Mais tecnicamente, a função utilidade neste caso, tem dois componentes:

1. O positivo, que é igual a +1, dado que o proprietário recebe todo o valor da venda do animal, sem dividir com os outros pastores.
2. O negativo, que é apenas uma fração de - 1, considerando que os efeitos negativos do sobre-pastoreio sobre os recursos naturais (como erosão do solo), seriam divididos entre todos os pastores.

Outra citação importante no trabalho de Hardin (1968) é a da *mão invisível* de Adam Smith (1776), segundo a qual cada pessoa busca seus próprios ganhos, mas é levada por uma mão invisível a promover o interesse público. Embora Hardin (1968) admita que Smith (1776) não afirmara que esta era uma verdade universal, tal teoria teria contribuído para o pensamento dominante de que decisões tomadas racionalmente e individualmente são as melhores decisões tomadas para a sociedade como um todo. O dilema (problema) do pastor, logo, seria um contraexemplo da teoria da mão invisível de Smith, cujo resultado em que todos os pastores adquirem mais animais é um equilíbrio de Nash, e algo obviamente catastrófico para o grupo de pastores simultaneamente. Similar ao dilema do pastor, o mesmo problema também pode ocorrer com a pesca em rios, lagos ou mares (HSU, 2005).

Hardin (1968) também cita o problema da poluição das águas e da atmosfera como exemplo de *tragédia*, mesmo que pelo sentido contrário. Isto é, não se trata de retirar algo do bem comum, como alimento no caso das pastagens, mas sim de despejar algo que seja nocivo a este bem comum. Caso não haja um sistema público de coleta e aterro ou reciclagem do lixo, para um indivíduo seria mais caro tratar o seu próprio lixo que despejá-lo em local qualquer. Como o mesmo raciocínio é válido para todos, é fácil ver que mesmo tendo um comportamento racional e independente, a comunidade em questão está presa em um sistema que "suja o próprio ninho". Este caso seria ainda pior, segundo o autor, já que diferentemente do caso das pastagens, no

qual a *tragédia* pode ser evitada por meio de tornar o bem comum privado, ou algo parecido, o ar e as águas não podem ser cercados.

O autor menciona que no passado, quando a densidade demográfica era baixa, não havia muito problema em um norte-americano do período da *corrida para o oeste* matar um bisão e descartar quase toda a carne. Ou mesmo, como dizia seu avô, não havia muito problema com a tese de que “a cada 10 milhas as águas de um rio se tornam automaticamente limpas novamente”. Ele conclui que esta frase poderia ser verdade em um ambiente com baixa população, como no passado de seu avô, mas não na maioria dos lugares na atualidade. Desse modo, a ocorrência da *tragédia* estaria intimamente ligada à alta densidade populacional. Isto então o leva a entrar em um ponto de vista polêmico, desde o qual prega o controle de natalidade, na seção “Liberdade para reproduzir é intolerável”. Este ponto de vista por si esposado sobre o controle de natalidade – indo contra a Declaração Universal dos Direitos Humanos de 1948 –, tendo em vista, além, o papel do Estado na política interna e externa, gerou uma grande controvérsia em relação às liberdades individuais (CORKER, 2011). Provavelmente a interpretação de que parte da culpa pela *tragédia* é a tomada de decisão individual, coincidindo a controvérsia com o período da Guerra Fria, período de contraste entre sociedade liberal e estatista, contribuiu para tal controvérsia.

Ao analisar a questão do controle de natalidade, Hardin entra na discussão a respeito das leis e da moralidade: “*a moralidade de um ato é função do estado do sistema na época em que ele foi realizado*” (FLETCHER, 1966, apud HARDIN, 1968, p. 114). Logo, o ato do norte-americano caçador seria imoral apenas nos dias de hoje, não no passado. Por outro lado, continua Hardin (1968), nossas leis seguem conceitos de ética e moralidade do passado e, portanto, não estão preparadas para um mundo superpovoado e complexo. Além disso, apesar de ser fácil legislar proibições, isto não garante que o comportamento seja evitado. Isto posto, a sociedade não pode confiar somente nas leis para garantir o controle populacional. No mesmo sentido, Malthus (1798) anteriormente já afirmara que o maior fator preventivo ao crescimento populacional seria a restrição moral. A opinião de Malthus, entretanto, pode ser relativizada devido à sua convicção religiosa, sendo ele um pastor da igreja anglicana.

Lloyd (1833), por sua vez, usa um conceito um pouco diferente da moralidade ao lidar com o controle populacional. Ele apresenta um exemplo sobre a questão da natalidade, em que considera o caso de um americano e sua família tendo uma vida confortável, de forma que o chefe da família pensaria não só na comida para alimentar mais um filho, mas também na sua

qualidade de vida como um todo. Mesmo que não fosse “moral”, este seria um motivo que naturalmente reduziria a natalidade, independentemente de leis ou proibições.

A respeito da tese de que as pessoas de modo geral tomam decisões considerando a moral ou mesmo uma conscientização do bem coletivo, Olson (1965) discorda. Ele mostra que nenhum Estado consegue sobreviver apenas com doações e contribuições espontâneas, mesmo com toda a ideologia do patriotismo e nacionalismo ao seu lado. Isto porque o grupo de pessoas em um país é tão grande que o impacto da ação de um cidadão ao não fazer a sua parte (doação) é insignificante para os demais. Assim, a receita arrecadada não serviria nem mesmo para realizar suas funções mais básicas e primordiais, como segurança, leis e ordem. Olson (1965, pag. 13) também afirma que tanto sociólogos quanto economistas concordam que motivos ideológicos sozinhos não são suficientes para induzir o esforço das massas. Na mesma linha, mas considerando mais especificamente a atividade econômica, Weber *et al.* (1947) afirmam que "toda atividade econômica em uma economia de mercado é empreendida e realizada pelos indivíduos para seus próprios ideais ou interesses materiais. (...) Em uma economia de mercado o interesse na maximização da renda é necessariamente a força motora de toda atividade econômica." (OLSON, 1965, p. 13). Parsons e Smelser (1954) vão além e postulam que até mesmo o desempenho de uma sociedade é proporcional às recompensas e sanções envolvidas.

Olson (1965) prossegue demonstrando que os serviços prestados pelos governos são em geral disponíveis para todos, como o de segurança por exemplo. Conforme já foi demonstrado, estes benefícios ou produtos acessíveis a todos, por serem não exclusivos, são chamados em economia de bens públicos ou *bens comuns*, dependendo da rivalidade entre eles (CORNES e SANDLERS, 1986). De fato, como é quase impossível para o Estado oferecer seus serviços apenas para aqueles que contribuíram, a taxa compulsória é utilizada, incluindo alguma sanção para os não contribuintes.

A teoria da *tragédia dos bens comuns*, como quase todas as teorias, possui alguns críticos. Axelrod (1984), por exemplo, argumenta que mesmo indivíduos interessados apenas em seu próprio bem-estar irão encontrar formas de cooperar, uma vez que o autocontrole coletivo serve tanto aos interesses do indivíduo quanto aos do grupo. Por outro lado, Olson (1965) tem demonstrado que esta cooperação só pode ocorrer em grupos pequenos. Ostrom *et al.* (1999) critica que embora haja evidências de que a *tragédia* já ocorreu, também é óbvio que por milhares de anos as pessoas têm se auto-organizado para gerenciar recursos comuns. Este contraexemplo, entretanto, não se sustenta pelo argumento de Hardin (1968), de que a *tragédia*

não ocorreria em situações de baixa densidade demográfica, conforme provavelmente ocorreu nos milhares de anos citados por Ostrom *et al.* (1999).

2.3 Tragédia dos bens comuns na mobilidade urbana

2.3.1 Analogia proposta

Tendo sido apresentadas as características da mobilidade urbana e a teoria da *tragédia dos bens comuns*, a ligação da mesma com a presente dissertação se torna óbvia, uma vez que os bens comuns seriam a malha viária de uma cidade; e a decisão a ser tomada pelos indivíduos seria o dilema de comprar/utilizar ou não um automóvel (utilizar ônibus caso não utilizem o carro). Como motivação que guia as pessoas será considerada apenas a economia de tempo, que também pode ser vista como economia de dinheiro, se considerarmos o valor monetário do tempo (SMALL, 1992). Ou seja, a *função utilidade* a ser calculada seria a economia de tempo de viagem. Entretanto, independente da forma de se calcular a função utilidade, a *tragédia* está associada à diferença entre as eficiências marginais e globais de cada modo de transporte. O quadro abaixo exemplifica isto, onde fica claro que somente os quadrados fora da diagonal principal representam, em tese, a possibilidade da tragédia, embora o caso em que o ônibus é mais eficaz marginalmente, porém menos eficaz globalmente à primeira vista, só pode existir na teoria, jamais na prática (situação irreal). Dessa forma, deve-se concentrar no caso em que o ônibus é mais eficaz apenas globalmente (situação possível), que é o caso em que a tragédia torna-se possível.

		Custo Global	
		Ônibus é mais eficaz	Automóvel é mais eficaz
Custo Marginal	Ônibus é mais eficaz	Não há tragédia.	Tragédia dos bens comuns (situação irreal)
	Automóvel é mais eficaz	Tragédia dos bens comuns (situação possível)	Não há tragédia

Quadro 2 – Possibilidade da *tragédia dos bens comuns* na mobilidade.

Fonte: elaborado pelo autor

O quadro 2, por fazer uma ligação entre o Dilema do Prisioneiro e uma importante classificação do transporte urbano (privado e público), pode ser considerado como pioneiro na literatura, e é uma das importantes contribuições deste trabalho. Assim como no Dilema do Prisioneiro, onde

a solução acusar/acusar é um equilíbrio de Nash, também é possível encontrar um equilíbrio de Nash no caso do exemplo acima (Quadro 2), fazendo algumas suposições. Assumindo que o tempo de viagem (marginalmente) de carro é menor que o tempo de viagem de ônibus, mas que globalmente o ônibus é mais eficaz (caso todos os cidadãos escolham o ônibus, a viagem fica mais rápida do que caso todos escolham o automóvel), pode-se considerar que a situação carro/carro também é tal equilíbrio. Isto ocorre porque nenhum dos "dois jogadores" (usuários) pode aumentar seu ganho marginal (reduzir o tempo de viagem) dada a escolha do outro (carro). Assim sendo, assumindo as eficácias marginais e globais citadas, caso o jogo “viagem ao trabalho” fosse jogado por duas pessoas e apenas uma vez, e ambas tomassem sua decisão baseada unicamente no menor tempo de viagem, a situação carro/carro seria um resultado inevitável, mesmo que a situação ônibus/ônibus resulte em um maior valor para a função utilidade (viagem mais rápida) em relação a ambos.

		Cidadão 2	
		Ônibus	Automóvel
Cidadão 1	Ônibus	(R, R)	(O, T)
	Automóvel	(T, O)	(P, P)

Quadro 3 - Recompensa (payoff) para cada um dos cidadãos considerando que todos os outros moradores da cidade mantêm o mesmo comportamento.

Fonte: elaborado pelo autor, baseado em Axelrod (1984)

O Quadro 3 ilustra como poderia ocorrer a *tragédia dos bens comuns* na mobilidade; ou seja, se a tentação para utilizar o carro, desde que o outro use o ônibus, trouxer um benefício marginal maior que a recompensa por ambos utilizarem o ônibus; que, por sua vez, traga maior benefício que ambos utilizarem automóvel; e que o pior *payoff* seja obtido quando se escolha o ônibus e o colega opte pelo automóvel. Em termos técnicos, a tragédia é possível se $u_1(T) > u_1(R) > u_1(P) > u_1(O)$.

Contudo, a cooperação (ônibus/ônibus) poderia ocorrer já que as viagens se repetem diariamente em um número indefinido de vezes, segundo a teoria da cooperação de Axelrod (1984). O resultado de Olson (1965), contudo, demonstra que mesmo assim, como não são apenas dois cidadãos que fazem suas viagens todos os dias e sim um grupo grande de pessoas, de forma que a maioria delas não se conhece, é pouco provável que a cooperação possa ocorrer.

Tentando raciocinar sobre isto de uma forma mais prática e direta, pode-se imaginar o caso do dilema de escolher fazer a viagem de carro ou de ônibus considerando um grupo grande de

pessoas (uma cidade); e que façam tais viagens todos os dias. Para cada carro a mais nas ruas, a pessoa que o está utilizando tem uma economia média de X minutos em relação à viagem de ônibus. Entretanto, em média, todos os outros viajantes (de carro ou de ônibus), têm um aumento médio de uma pequena fração destes X minutos (X/A), uma vez que o trânsito ficará ligeiramente mais congestionado com um carro a mais. Logo, a decisão racional para todos os indivíduos (que tiverem condições financeiras para isto), levando em conta o atributo "tempo de viagem", será comprar um automóvel e utilizá-lo no dia-a-dia. Esta decisão tomada individualmente pode levar à "tragédia do máximo congestionamento de uma cidade", onde no final de contas todos os viajantes passam a gastar mais tempo que antes se todos eles comprarem um automóvel. Isto ocorrerá quando a o produto da fração de X (X/A) com o número de novos motoristas de carro (N) for maior que estes X minutos de economia de tempo marginal, ou seja, quando $N > A$. Mesmo que esta situação se repita todos os dias, a cooperação descrita por Axelrod (1984) não deve ocorrer porque o número de habitantes de uma cidade é muito grande, de forma que eles não se reconhecem quando estão no tráfego.

Um fator que poderia ocorrer para tornar possível a cooperação seria a consciência das pessoas, segundo descreveu Hardin (1968), isto é, caso as mesmas não sejam guiadas pela escolha racional da ciência econômica. Assim, juntando a definição de moralidade de Fletcher (1966), na qual a moralidade depende da época em questão, com a opinião de Jaime Lerner⁴ (TREFAUT, 2016): “o carro é o cigarro do futuro”, a possibilidade de cooperação e utilização do ônibus no lugar do carro por uma questão moral torna-se possível. Além disso, há ainda a visão de Vasconcellos (2000), na qual a opção pelo automóvel não pode ser considerada uma decisão individual, mas sim uma decisão que possui outros enfoques sociais, como o antropológico, político e psicológico, além do econômico. Por exemplo, para Whitelegg (1981): “(o) carro molda todo o estilo de vida (e)... cria uma dependência sutil de si próprio.” Todavia, estes pontos de vista não são considerados na metodologia deste trabalho, que optou pela *escolha racional*. Esta escolha foi adotada seguindo o que foi apresentado na seção anterior, que as pessoas em suas tomadas de decisão são guiadas pela maximização de sua renda (WEBER, 1947), e pela recompensa (PARSONS e SMELSER, 1954), e não só por motivos ideológicos (OLSON, 1965). Apesar dos dois primeiros trabalhos estarem se referindo a atividades econômicas e não à mobilidade das pessoas, e Olson (1965) a pagamento voluntário

⁴ Arquiteto e Urbanista, ex-prefeito de Curitiba e pioneiro no Brasil na implantação do sistema de ônibus tronco-alimentador. Proferiu esta frase recentemente em vários congressos e entrevistas, sendo uma delas à Revista Valor Econômico, em 2016, conforme referência bibliográfica citada.

de taxas pela população, não deixa de ser válida a analogia com a ideia de que as pessoas poderiam deixar de utilizar o carro por uma questão de ideologia. Ou seja, isto seria, embora possível, pouco provável segundo o pensamento econômico vigente.

Muitos estudiosos veem o problema da possibilidade da ocorrência da *tragédia* como um problema causado pelo Estado não cobrar suficientemente dos usuários do carro para usar as vias públicas (comuns) (BRINCO, 2014; VASCONCELLOS, 2000; IAIONE, 2000; FERRAZ e TORRES, 2004). Do ponto de vista da mobilidade e do bem comum que é o próprio espaço urbano, ou mais especificamente a malha viária, estas cobranças compulsórias podem ser impostos (como IPVA), taxas (como licenciamento de veículos) ou pedágios, sendo que em todos estes casos é possível cobrar mais daqueles que mais utilizam este bem comum, que são os usuários de automóvel. Da mesma forma, as sanções podem ser a proibição de dirigir ou o recolhimento do veículo para aqueles que não pagarem o valor cobrado, ou mesmo a restrição do espaço do automóvel na malha viária, com a criação de corredores e faixas exclusivas para ônibus, e proibições de estacionamento. Algumas destas propostas e estudos serão apresentados na próxima seção.

É importante esclarecer também que apesar de ser fato conhecido que as pessoas estão migrando do transporte público para o privado, e que mesmo assim o tempo médio de viagem está aumentando, isto não torna esta analogia com a *tragédia dos bens comuns* um trabalho inútil. Neumann e Morgenstern (1944), por exemplo, afirmaram que toda nova teoria possui três estágios de comparações práticas. O primeiro deles é quando a teoria é aplicada a problemas muito simples cujos resultados são óbvios e nunca foram postos em dúvida. Este estágio serve para corroborar a teoria. No segundo estágio, a teoria é confrontada com casos menos triviais, cujos resultados vão além do óbvio e do familiar. Neste estágio há uma corroboração mútua entre teoria e aplicação. O terceiro estágio é o real campo do sucesso da teoria: a predição genuína. Eles se referiram especificamente à *teoria dos jogos*, mas é factível estender tal raciocínio à aplicação da teoria dos jogos, ou mais especificamente à *tragédia dos bens comuns* na mobilidade. Neste caso, esta analogia estaria entre o primeiro e segundo estágio, dependendo do quão trivial seja o entendimento do ciclo vicioso de perda de usuários do transporte público (BRINCO, 2014). Por isso, entende-se que apesar de parecer óbvia a ocorrência deste ciclo vicioso, com este trabalho e com estudos complementares a ele, pode ser demonstrado porque isto ocorre, em quais casos, em quais casos é um fato ruim, e até mesmo como tentar evitar o resultado, no caso de ser ruim.

Esta analogia entre a *tragédia dos bens comuns* e a mobilidade, obviamente, necessita de "parênteses". Por exemplo, no problema de Hardin (1968), cada pastor poderia e gostaria sempre de comprar mais um animal, não havendo um limite para o tamanho do seu rebanho. No caso dos cidadãos, embora seja possível alguém adquirir vários automóveis, este provavelmente não é o desejo e muito menos a realidade financeira da maioria. Cada viajante, pelo desejo de realizar sua viagem em menos tempo, vai escolher possuir um único automóvel. Esta diferença, entretanto, tampouco torna a analogia inválida, desde que seja demonstrado que mesmo com somente um automóvel para cada cidadão, a mobilidade da cidade é pior assim do que com nenhum carro. Além disso pode-se considerar a possibilidade de o usuário utilizar a via por mais vezes, mesmo que com apenas um carro.

2.3.2 Pesquisas já realizadas

De fato, esta analogia da mobilidade urbana com a *tragédia* já foi descrita na literatura nacional, como por Santos (2010) e Souza (2017), e internacional, como em Belbute (2008) e Iaione (2010), mesmo que em geral os estudos apenas avaliem medidas de solução da *tragédia*, e não esclareçam como avaliar a possibilidade da própria *tragédia*.

O trabalho de Belbute (2008) é uma exceção a esta regra, já que esclarece o problema do congestionamento do ponto de vista dos economistas e afirma que dependendo do grau de congestionamento de uma via sem pedágio, a mesma pode ser considerada um bem rival ou não. Quanto mais congestionada, maior a rivalidade. Ou: a não rivalidade depende do não congestionamento, e vice-versa. Ou seja, assinala Belbute indiretamente que a *tragédia* poderia ocorrer apenas em regiões congestionadas, corroborando a ideia de Hardin (1968) de que a *tragédia* ocorreria apenas em um ambiente superpovoado. Os outros estudos, contudo, se atêm à proposição e à avaliação de medidas de restrição de tráfego, ou seja, como evitar a *tragédia*, partindo do pressuposto que a mesma já está em curso.

Souza (2017), em sua dissertação de mestrado, avaliou a aceitabilidade de um possível pedágio urbano em Belo Horizonte pela população, através de uma pesquisa com especialistas e com a população. A conclusão final do trabalho foi que a implantação do pedágio urbano na Área Central de Belo Horizonte pode estimular a migração de 51,4% dos usuários de automóveis para outros modos de transporte. Entre outras perguntas feitas na pesquisa de Souza (2017), foi apresentado aos entrevistados três situações: a primeira, considerada mais restritiva, haveria a cobrança de pedágio (com tarifa única) para carros e motocicletas que acessassem o centro de Belo Horizonte de segunda a sexta de 06h às 20h; a segunda, considerada menos restritiva, foi

idêntica à primeira, exceto no horário de cobrança, que seria de 06h às 09h e de 17h às 20h, com meia tarifa no intervalo de 09h às 17h; e a terceira em que seria mantido o *status quo* atual, ou seja, sem cobrança de pedágio. Os entrevistados deveriam escolher uma das três opções.

Em relação às outras perguntas, a grande maioria dos entrevistados, tanto especialistas quanto a população em geral, se mostrou conscientizada a respeito dos transtornos provenientes dos congestionamentos e, por isso, da importância de se direcionar mais investimentos para reduzi-los. Também houve concordância de ambas as maiorias que a medida mais efetiva para reduzir a circulação de veículos na área central, dentre cinco apresentadas, seria a implantação de vias ou faixas exclusivas para o transporte público e a menos efetiva seria a implantação de rodízio de veículos. As outras três alternativas foram ordenadas de maneira inversa pelos especialistas e população comum. O pedágio urbano foi ordenado como segunda opção mais efetiva, pela população, e em quarto lugar pelos especialistas; a transformação de área de estacionamento em infraestrutura para ciclistas, calçadas e *parklets* foi considerada a terceira opção por ambos os grupos; e a restrição e controle de vagas de estacionamento foi considerada a segunda melhor opção pelos especialistas e a quarta melhor pelo público em geral. Apesar da concordância em relação às faixas exclusivas serem a medida mais efetiva, houve discordância entre os especialistas e os representantes da população no que diz respeito à priorização dos investimentos: se em ônibus (conforme opinião da maioria dos especialistas) ou em transporte sobre trilhos (conforme opinião dos representantes da população).

A maioria dos especialistas entrevistados por Souza (2017) afirmou acreditar que o pedágio urbano seria mais útil na redução dos congestionamentos que na redução da poluição. A maioria também concordou com a afirmação de que o pedágio poderia funcionar como um sistema econômico de redistribuição do espaço viário, em que o valor pago pelos usuários de automóvel seria revertido em receita a ser aplicada em melhorias da mobilidade urbana, de forma a diminuir o tempo de deslocamento dos usuários do ônibus.

Os membros da população geral entrevistados por Souza (2017), por sua vez, em sua maioria afirmaram que reduziriam a utilização do carro e da motocicleta se o transporte coletivo lhes atendessem melhor, e que o centro das cidades deveria ser destinado prioritariamente para os pedestres e para o transporte coletivo. Em relação à aceitabilidade do pedágio, 78,7% (somando as opções mais e menos restritivas) da população entrevistada consideraram que as opções de cobrança de taxa, associadas às aplicações de receitas, são boas para a cidade. Por outro lado, os outros 21,3% preferiram a situação atual, sem pedágio urbano. Em relação à escolha modal,

23,8% do total dos entrevistados declararam que buscariam outros modos de transporte e 32,1% afirmaram que pagariam o valor de até R\$ 10,00 pelo pedágio. Considerando apenas os usuários de automóveis, 51,4% deles declararam que migrariam para outros meios de transporte, diferentemente do restante (48,6%) que pagaria para acessar a região. Por sua vez, dentre os usuários de automóvel, 75,5% consideram que o instrumento seria desvantajoso para eles.

A monografia de Santos (2010), que também define de maneira sucinta a *tragédia dos bens comuns* e sua analogia com a mobilidade, analisa o caso específico de Salvador. O autor cita como exemplo de bem comum uma avenida, e a maximização da utilidade buscada pelos motoristas (racionalmente) seria utilizar ao máximo tal bem, diminuindo o benefício daquele que não maximiza sua utilidade (limita seu próprio uso da via). Pode-se dizer que o uso do ônibus, mesmo que às vezes apenas, seja uma forma de uso limitada da via, embora Santos não tenha usado estes termos. Santos argumenta que sendo a via um bem comum, não há restrição de entrada, o que nas grandes metrópoles conduz à *tragédia*. “A razão para esta tragédia é que, quando o motorista decide trafegar na via, seu benefício aumenta, mas o benefício de todos os outros diminui.” (Santos, 2010, p.13). Esta frase é uma maneira mais elegante e simples de explicar o que foi escrito na seção anterior.

Santos (2010) também tenta definir e estudar de maneira mais ampla o conceito de "congestionamento" e suas causas. Por exemplo, afirma ele que segundo estudo do Programa Nacional de Pesquisa Colaborativa de Rodovias da França (NCHRP, 2007) as causas do congestionamento podem ser divididas em três tipos, sendo eles: problemas de controle de tráfego; conflito entre modos; e deficiência das vias. Dentre as oito causas do tipo “deficiência das vias”, apenas uma explicita a demanda: “Espaço insuficiente nas vias para acomodar a demanda”. Esta causa é a que este presente trabalho está considerando, embora com o raciocínio invertido: o problema não seria da via, que não se adequa à demanda, e sim da demanda, que não se adequa à via. Corroborando esta opinião, Santos também cita o boletim da *European Conference of Ministers of Transport* (EMCT, 1999), que coloca o veículo como causa do congestionamento, ou mesmo Downs (2004), que afirma que os congestionamentos só existem porque existem pessoas dispostas a enfrentá-los, e que o custo de deslocamento deveria ser alto o suficiente para que esta demanda fosse desencorajada.

Contudo, sem dúvida a parte mais interessante do trabalho de Santos é a Pesquisa de Preferência Declarada que o mesmo aplicou a motoristas de Salvador. A pesquisa quis saber dos motoristas, além do grau de exposição dos mesmos aos congestionamentos, suas flexibilidades a respeito

de políticas de gerenciamento da mobilidade e da demanda. Um dentre os resultados importantes, além do já esperado de que a maioria dos respondentes está sempre exposta aos congestionamentos; foi a resposta sobre o que eles fazem para evitar estes transtornos, onde a maioria escolheu mudar o horário, ou seja, sair mais cedo (51,43%) ou voltar mais tarde (31,27%); ou mesmo mudar a rota (37,3%). Apenas 8,57% responderam usar o ônibus, valor abaixo até mesmo da resposta “nada”, em que os soteropolitanos aceitam o problema e não o evitam. Na mesma linha de respostas, os mesmos motoristas em sua maioria (46,19%) disseram que não fazem nada para contribuir com a redução dos congestionamentos. Em segundo lugar ficou a resposta "carona" (dar ou pegar), com 22,85%, seguida de “direção atenta”, com 19,36% e “uso de ônibus”, com 9,68%. Aparentemente os motoristas, além de já estarem acostumados ao problema, também não se esforçam para contribuir para evitá-lo, muito menos se tiverem que utilizar o ônibus para isto.

A pesquisa também perguntou qual seria a maior e a menor deficiência no transporte público dentre as opções “segurança”, “atrasos”, “conforto”, “tarifa”. A resposta mais votada como maior deficiência foi "atraso" (falta de pontualidade) e a mais votada como menor deficiência foi o preço da tarifa. Em vista da associação entre a pontualidade e o tempo total de viagem, isto corrobora a metodologia deste presente trabalho, que visa supor que a principal característica que leva um cidadão a escolher seu modo de viagem, dado que o mesmo possui um automóvel, é o tempo da viagem, e não o custo diretamente envolvido no transporte. Na verdade, segundo a pesquisa acima, ao menos no caso de Salvador e para os motoristas de carro, os fatores "segurança" e "conforto" ainda seriam mais importantes que o custo da tarifa.

Por fim, o pesquisador avaliou o grau de impacto e aceitação de três propostas para redução de congestionamentos: uma proposta que aumenta e melhora a oferta do transporte público (implantação do sistema de BRT e do metrô) e outras duas que propõem restringir o uso do automóvel (taxas de estacionamentos e pedágios urbanos). Para cada proposta, foram listadas quatro opções, que expressam uma ordem de aceitação da não utilização do automóvel, que são: “deixaria o automóvel imediatamente”, “usaria menos o carro”, “após comprovar a eficiência” e “jamais deixaria de usar o carro”.

A terceira opção, para ser mais específica com a cobrança pelos estacionamentos e com o pedágio, foi alterada para “continuar a usar caso reduzissem os congestionamentos” nestes casos. Embora a princípio possa ser confusa a interpretação desta resposta e seu impacto, é possível provar que ela pode realmente ser avaliada como um meio termo entre as respostas

“usaria menos o carro” e “jamais deixaria de utilizar o carro”. A confusão está na interpretação de que esta atitude de usar o carro somente se houver redução de congestionamento aparentemente não leva à convergência dos resultados, nem para uma redução do uso do automóvel e nem para a manutenção. Isto ocorre se pensarmos que todos os usuários de automóvel pensam desta forma. Por exemplo, caso todos pensem desta forma, no primeiro dia todos deixariam o carro em casa, e assim o fariam até que observem que os congestionamentos diminuíssem. Como isto já seria observado no primeiro dia, no segundo dia todos voltariam a usar o automóvel, o que levaria todos a deixar o carro em casa no terceiro dia, e assim por diante. Desse modo, haveria congestionamentos e trânsito livre em dias alternados. É possível até mesmo analisar esta dinâmica do ponto de vista da *teoria dos jogos*, por exemplo. Este raciocínio só vale, contudo, caso todos os motoristas pensem desta forma, o que de fato não ocorreu com os resultados da pesquisa. Uma vez que uma parcela dos usuários respondeu que deixaria de utilizar o carro, seja totalmente (“imediatamente”) ou parcialmente (“usaria menos o carro”), dependendo da fração destes usuários o impacto na redução dos congestionamentos poderia ser perceptível ou não pelos usuários que responderam “continuará a usar caso reduzissem os congestionamentos”. Da mesma forma, esta percepção de redução de congestionamento também é individual e, portanto, alguns interpretariam como uma redução dos congestionamentos e outros não. Esta resposta pode, portanto, ser tratada como um meio termo entre as respostas “usaria menos o carro” e “jamais deixaria de utilizar o carro” e, portanto, uma resposta equivalente à resposta “após comprovar a eficiência”, no caso da pergunta sobre a melhoria do sistema de transporte público. Esta interpretação, de fato, foi a que Santos utilizou.

Em relação à possibilidade de os motoristas de automóveis migrarem para um novo sistema de ônibus, como BRT, a maioria respondeu que migraria após ser comprovada a eficiência do sistema (54,60%), seguida pela resposta “usaria menos o carro” (21,75%), “jamais deixaria de usar o carro” (16,82%) e “imediatamente” migraria para o transporte público (6,83%). Focando na maior frequência pode-se concluir que, caso o novo sistema seja mesmo eficiente, a maioria dos usuários de carro migraria para o novo modal, pelo menos segundo a resposta dada. Por outro lado, esta mudança aparentemente seria lenta, uma vez que os respondentes disseram esperar pela comprovação da eficiência, seja lá quanto tempo seja necessário para isto. Santos conclui com isto que um novo sistema de ônibus não pode ser pensado como uma solução a curto prazo para o problema dos congestionamentos.

Diferentemente da opinião acerca do novo sistema de transporte público, a maioria dos motoristas (56,82%) respondeu que usaria menos o carro caso houvesse cobrança de tarifas de estacionamento em shoppings, edifícios comerciais, faculdades e estádios. Em segundo lugar ficou a resposta “continuaría a usar caso reduzissem o congestionamento” (20,95%), seguida de “jamais deixaria de usar o carro” (16,36%) e “deixaria de usar o carro imediatamente” (5,87%). Na mesma linha, as respostas dadas à possibilidade de cobrança de pedágios urbanos em Salvador foram semelhantes. A única diferença na ordem foi uma mudança entre a segunda e terceira posição: “usaria menos o carro” (60,48%), “jamais deixaria de usar o carro” (20,47%), “continuaría a usar caso reduzissem o congestionamento” (15,24%) e “deixaria de usar o carro imediatamente” (3,81%). Por conseguinte, estas duas medidas aparentemente poderiam ter um impacto quase que imediato na restrição do uso do automóvel nas vias sendo, portanto, diferentemente da melhoria no transporte público, uma solução a curto prazo para o congestionamento.

Contudo, estas duas propostas de restrição ao automóvel foram mal recebidas pelos motoristas, já que 84,60% deles se mostraram contrários à taxaço dos estacionamentos e 66,19% contrários ao pedágio urbano. Por outro lado, a maioria dos motoristas respondeu que a melhor solução para os congestionamentos é o (a melhoria/ampliação/priorização do) “transporte público”, tanto a curto (66,98%) quanto a longo prazo (76,67%). Embora a solução a longo prazo pareça coerente com a espera para verificar a eficiência do novo transporte público antes de deixar o carro em casa, a resposta a curto prazo é de certa forma contraditória. Esta contradição talvez venha do fato de que muitos motoristas podem estar pensando que com a melhoria do transporte público, muitos outros motoristas deixariam o carro em casa, deixando as ruas livres para ele próprio e outros, que continuariam a usar o carro.

A principal conclusão que Santos (2010) extrai desta pesquisa é que o poder público deveria implantar tanto as soluções de restrição aos automóveis a curto prazo, quanto a melhoria do sistema de transporte público a longo prazo. Outra interpretação possível de ser feita é que, dada a diferença de interpretação de algumas respostas para diferentes pessoas, como “continuaría a usar até que reduzissem o congestionamento” ou “deixaria de usar o carro após a comprovação da eficiência do transporte público”; juntamente com a grande variabilidade de respostas nas três perguntas; pode-se concluir que a migração de um modo para o outro é um fenômeno difícil de ser generalizado, tendo que ser analisado do ponto de vista individual, ou microscópico. Esta interpretação está alinhada com a visão de Small (1992) a respeito da heterogeneidade dos motoristas. Isto, juntamente com o fato de que a eficiência do transporte

público e a redução do congestionamento dependem do número de pessoas que deixam o carro em casa; justifica a visão de que tal problema pode ser tratado como um exemplo da *teoria dos jogos*, uma vez que a decisão tomada por um influencia o resultado do outro.

Iaione (2010) cita Olson (1965) para definir a *tragédia dos bens comuns* como um problema da ação coletiva em que um recurso comum é sujeito a sobre-exploração e degradação, e desta forma o congestionamento do tráfego é um caso perfeito desta *tragédia*. Além disso, cita que o espaço das vias são bens rivais e não exclusivos, e que isto gera a *tragédia*, que é definida também como um problema das externalidades dos grandes grupos, sendo que o que a diferencia dos outros problemas de grandes grupos é a autodestruição, que só é presente na *tragédia*. No caso do tráfego, como cada usuário de automóvel fica com todo o benefício de utilizar as vias urbanas e com apenas uma pequena parte dos custos de sua atitude associada ao congestionamento – que ela ajuda a causar –, a *tragédia dos bens comuns* torna-se um resultado possível de ocorrer. Como as negociações entre os viajantes são consideradas impossíveis de ocorrer, a solução não coerciva é inviável. Assim, propõe-se a regulação pela utilização das ruas como a única maneira de evitar a *tragédia*, já que o autor considera a privatização uma forma de regulação, diferentemente de Hardin (1968), que separa a privatização da regulação.

Iaione (2010) também afirma que, ao contrário, a solução usualmente tomada pelo poder público para os congestionamentos é o alargamento das vias ou mesmo a expansão da rede viária. Para mostrar que tal solução não funciona a médio e longo prazos, faz uma analogia com a *tragédia dos bens comuns* e cita Hsu (2005); que analisa o caso da pesca e conclui que o lançamento de mais peixes nos oceanos somente atrairia mais pescadores, não resolvendo o problema da sobre-exploração do recurso e consequente escassez do mesmo. No caso da mobilidade, o fato de estarmos discutindo o problema dos congestionamentos na segunda década do século XXI; sendo que esta discussão era já bem vívida na década de 1950 do século passado (BECKMANN *et al.*, 1955); e o fato de que mesmo com a solução tomada pelo poder público desde então (alargamento e expansão das vias), o problema se agravou no mesmo período; corroboram o argumento de Hsu (2005). É importante ressaltar que o argumento de Hsu, de certa forma, fora demonstrado anteriormente por Jacobs (1961), que mostra a retroalimentação do problema, ou seja, que o alargamento das vias tende a atrair mais veículos, não resolvendo o problema para o qual foi planejado.

O estudo de Iaione (2010) ainda compara algumas soluções que têm sido propostas pelos economistas teóricos, e aplicadas em algumas cidades, para a solução do problema dos

congestionamentos. Estas soluções são técnicas de regulação da utilização das ruas que consideram o chamado “custo do congestionamento”, conforme definido na seção 2.1.4. Isto posto, propõe uma cobrança pela utilização das ruas, em que o preço da utilização seja igual ao “custo do congestionamento”. O autor afirma que dentre os instrumentos de regulação, aqueles baseados no mercado são considerados superiores aos de comando e controle (CROPPER e OATES, 1992). Dentre as formas de regulação de mercado, uma é pelo preço (taxas e impostos) e outra pela quantidade (permissões e créditos). No primeiro caso se determina *a priori* - arbitrariamente ou não - o valor das taxas, mas o impacto no congestionamento vai depender da aceitação dos usuários em pagar tais taxas. Assim, não é possível saber de antemão o impacto no congestionamento. No segundo caso, se define *a priori* a frota que se deseja permitir para obter a redução desejada no congestionamento, e então é permitido que as taxas variem para atingir este objetivo. De forma análoga, não é possível saber com certeza quais serão as taxas finais cobradas.

Iaione (2010) argumenta que a definição de qual método de regulação é o melhor ainda é um assunto muito discutido, com grandes defensores de ambos os lados. Contudo, seu artigo defende a implantação da regulação pela quantidade. Um argumento a favor desta conclusão é a regra de Weitzman (1974), onde em um mundo de incertezas, a incerteza sobre o impacto da escalada do congestionamento é mais preocupante que ao escalada dos custos. Conforme foi explicado na seção 2.1.4, o custo marginal cresce abruptamente a partir de certo valor de densidade dos automóveis, geralmente a capacidade da via. Logo, é preferível que haja uma limitação da quantidade de veículos antes de atingir este ponto crítico. Da mesma forma, conforme também já foi mostrado na seção 2.1.3, mesmo que as relações de fluxo/velocidade/densidade sejam conhecidas, a incerteza sobre o fluxo de veículos aumenta ainda mais nesta região crítica de congestionamento (máximo fluxo); e além disso o valor do tempo é incerto e variável entre os cidadãos e também entre motivos de viagem (SMALL, 1992).

Pelo lado da regulação pela quantidade, Iaione (2010) cita a questão da desigualdade social, mesmo entre usuários de automóveis. Afirma ele que a regulação pelo preço obrigaria a maioria dos motoristas a migrarem para sistemas piores, mas ao mesmo tempo melhorando o trânsito nas ruas para uma minoria com maior poder aquisitivo. Apesar de muito interessantes, os trabalhos de Souza (2017) e Santos (2010), por exemplo, não estudaram a associação entre a aceitabilidade do pedágio urbano pelos motoristas e a renda ou classe social dos mesmos. Isto poderia ajudar a esclarecer este ponto de vista de Iaione (2010).

Raux (2008) propõe um sistema de comércio de permissões para emissões de gases de efeito estufa, ou simplesmente *comércio de permissões* (*Tradable Permits*, em inglês), para resolver o problema, pelo menos do ponto de vista ecológico. Ele afirma se basear no trabalho de Coase (1960) sobre os custos externos e no trabalho de Dales (1968) acerca da regulação do consumo de água e da formalização do mercado de permissões de poluição, proposto por Montgomery (1972). Raux (2008) propõe criar permissões comercializáveis de direitos de consumo de combustível para automóveis privados e transportes de carga, e direito de utilização de automóveis em áreas urbanas. O autor argumenta que é possível, através de estratégias inteligentes, realizar tal sistema de permissões a um custo mais baixo do que aquele geralmente considerado. De fato, a proposição de Raux (2008) se enquadra no caso de regulação pela quantidade, descrita por Iaione (2008).

Em resumo, as pesquisas realizadas já partem do pressuposto de que o carro deve ter sua utilização reduzida, e discutem métodos de se efetuar isto, bem como a aceitação da população a estes métodos. O que se propõe aqui é avaliar se realmente o uso dos automóveis deve ser reduzido, que é o que se sugere caso a *tragédia* esteja em curso. O próximo capítulo apresenta a metodologia utilizada para se atingir tal objetivo.

3 METODOLOGIA DA PESQUISA

3.1 Delineamento

Este estudo pode ser tratado como um estudo quantitativo, exploratório e experimental. Quantitativo por utilizar dados quantitativos de demanda de viagens como dados de entrada na simulação; e por gerar como resposta outros dados quantitativos como "tempo" e "velocidade". O caráter exploratório, pelo fato de que se trata até certo ponto de um estudo pioneiro no que propõe – analisar a eficiência dos modos de transporte em relação à mobilidade de uma cidade, e associar o resultado observado à possibilidade de ocorrência da tragédia – e por isso não ter outros estudos para comparação. E experimental, pelo fato de se usar simulação de tráfego, assim como em um experimento de laboratório, com dados de uma cidade real, amparada em dados declarados sobre o comportamento das pessoas e do tráfego.

3.2 População e amostra

A população alvo da pesquisa são os habitantes da cidade de Belo Horizonte do ano de 2012, embora as conclusões sejam extrapoladas para a população da mesma cidade em um futuro próximo. A escolha de 2012 ocorreu pelo fato de que este é o ano com a pesquisa Origem e Destino da Região Metropolitana de Belo Horizonte mais recente, cuja pesquisa domiciliar gerou uma amostra coletada e validada de 30.786 domicílios da região. Como algumas bases de dados complementares à pesquisa OD – como a malha viária em arquivo vetorizado e o quadro de horários e itinerários dos ônibus – só foram obtidas para o município de Belo Horizonte; optou-se por selecionar apenas os dados da pesquisa que se referiam à mobilidade interna da cidade de Belo Horizonte, desconsiderando-se os municípios vizinhos. Ou seja, foram selecionados apenas trajetos que se originaram e destinaram no município de Belo Horizonte, reduzindo a amostra para 15.855 domicílios. De fato, 14.849 domicílios foram pesquisados e validados, localizados em Belo Horizonte, mas há domicílios de cidades vizinhas, cujos moradores realizaram algum trajeto iniciando e terminando em Belo Horizonte, fazendo parte da pesquisa.

3.3 Coleta de Dados

Conforme adiantado no parágrafo anterior, a principal fonte de dados é a pesquisa Origem e Destino (OD) de 2012 da Região Metropolitana de Belo Horizonte (SEGEM e ADRMBH, 2013). Também foram utilizados os itinerários e quadro de horários das linhas de ônibus de Belo Horizonte à época da pesquisa, bem como a malha viária vetorizada de Belo Horizonte. A

seguir descreve-se sucintamente estas três bases, bem como as variáveis extraídas de cada uma delas.

3.3.1 Pesquisa Origem e Destino (OD)

A "Pesquisa OD da RMBH" é um termo generalizado para um conjunto de quatro levantamentos – pesquisa domiciliar, pesquisa nos terminais de transporte, na linha de contorno da região e na linha de travessia – realizados com o intuito de se conhecer os padrões de deslocamento da população e de carga na Região Metropolitana de Belo Horizonte (BHTRANS, 2016). Este trabalho utilizou apenas a pesquisa domiciliar, que pergunta a cada morador quais viagens o mesmo realizou no dia útil anterior – se houve alguma viagem –, coletando de forma georeferenciada os locais de origem e destino de cada trajeto da viagem. O georeferenciamento, contudo, ocorre de forma aproximada, uma vez que só foi registrado um polígono geográfico ao qual faz parte cada ponto, e não exatamente a latitude e a longitude do local. Este polígono geográfico chama-se Área Homogênea.

As Áreas Homogêneas (AH) são conjuntos de setores censitários em cujo interior assemelham-se o uso do solo; as condições socioeconômicas; e a hierarquização viária; isto é, há homogeneidade em uma mesma AH. Além disso, na divisão das AHs procura-se observar barreiras físicas, como sub-bacias hidrográficas; além de elementos tais quais topografia e sistema rodoviário e ferroviário (SEGEM e ADRMBH, 2013). A partir da delimitação das AHs é possível calcular os fatores de expansão de cada indivíduo entrevistado, uma vez que as mesmas contêm um número inteiro de setores censitários, que são as menores áreas amostrais do Censo Brasileiro (IBGE, 2010). Desse modo, a partir dos 7.776 setores censitários da RMBH (Região Metropolitana de Belo Horizonte) e dos 3.936 de Belo Horizonte, foram definidas 1.289 AH para a RMBH e 554 para o município de Belo Horizonte.

Os Campos, os Subcomplexos de Campo, os Complexos de Campo e as Unidades de Macro Mobilidade (UMM); são agregações geradas a partir das AH, criando áreas não tão homogêneas, mas também não tão pequenas. O Campo é definido como a unidade territorial na escala da vida cotidiana das pessoas, ou alguma região próxima do conceito de "bairro ideal". Estes Campos são agregados em Subcomplexos de Campo, Complexos de Campo e UMM, que por sua vez são as maiores áreas da pesquisa. De fato, em Belo Horizonte as UMM coincidem com as nove "Regionais de Planejamento" da prefeitura: Barreiro, Centro-Sul, Leste, Nordeste, Noroeste, Norte, Oeste, Pampulha e Venda Nova. Este trabalho irá focar na menor e na maior área territorial da pesquisa, que são as AH e as UMM. As AH possuem a virtude de se aproximar

ao máximo da verdadeira localização dos pontos de origem e destino dos viajantes, enquanto as UMM possuem a qualidade de agregar um grande número de pessoas, possibilitando análises consolidadas mais confiáveis.

Conforme já foi indicado de maneira implícita, uma viagem pode conter mais de um trajeto e, de fato, é importante analisar cada trajeto separadamente, principalmente para as viagens de ônibus, nas quais cada trajeto significa uma linha diferente.

Outras perguntas também foram feitas na pesquisa domiciliar, sendo elas sobre a viagem (como motivo, modo, horário de início e fim); a pessoa (como instrução, renda e idade); e o domicílio (localização geográfica, tipo de domicílio, veículos e quantidade de membros da família); embora este trabalho tenha utilizado apenas o modo de cada trajeto, a hora de início e de fim do trajeto, o tempo total do trajeto (subtração das duas variáveis anteriores), a Área Homogênea de origem e de destino, a Unidade de Macro Mobilidade de origem e de destino.

3.3.2 Malha viária

A malha viária vetorizada de Belo Horizonte no formato *shapefile* (ESRI, 1998), foi obtida junto à prefeitura de Belo Horizonte, através do portal de Infraestrutura de Dados Espaciais (IDE), no endereço eletrônico <https://geodadosbh.pbh.gov.br/>. Este arquivo vetorizado pode ser explicado como sendo um grafo direcional dos trechos de circulação (conversões, ruas, avenidas, rodovias etc.) e cruzamentos da cidade, com suas respectivas coordenadas geográficas. Especificamente, este arquivo contém um conjunto de cerca de 230 mil arcos (tecnicamente chamados "arestas"), que representam os trechos de vias da cidade; e contém aproximadamente o mesmo número de nós (tecnicamente chamados de vértices), que representam os cruzamentos entre estas ruas. Em geral, o trecho de via representa a porção de uma via que está localizada entre uma esquina e a seguinte. Cada arco da malha viária, ou trecho de circulação, é categorizado em cinco tipos: “via”, “conversão”, “pista exclusiva de ônibus”, “estação de ônibus” e “rotatória”, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Categorização dos trechos de circulação, ou arcos

ID_TP_TRCI	CD_TP_TRCI	DC_TP_TRCI
1	VIA	Trecho de via.
2	CON	Trecho de conversão.
3	BUS	Trecho de pista exclusiva de ônibus.
4	EST	Trecho de estação de ônibus.
5	ROT	Trecho de rotatória.

Fonte: arquivo *shapefile* do portal de Infraestrutura de Dados Espaciais (IDE).

Apesar dos cinco tipos de trecho de circulação, este trabalho focou toda a sua análise nos trechos do tipo "via" e "conversão". Os trechos do tipo "de conversão" são os chamados arcos de ligação, e possuem a função de conectar dois trechos de rua (arcos) do tipo "via". A Figura 2 apresenta um cruzamento entre uma rua de mão única (aproximadamente na vertical) com uma rua de mão dupla (aproximadamente na horizontal), e são exibidos para cada trecho o ID_TP_TRCI, ou seja, 1 representa os trechos de via e 2 os trechos de conversão.

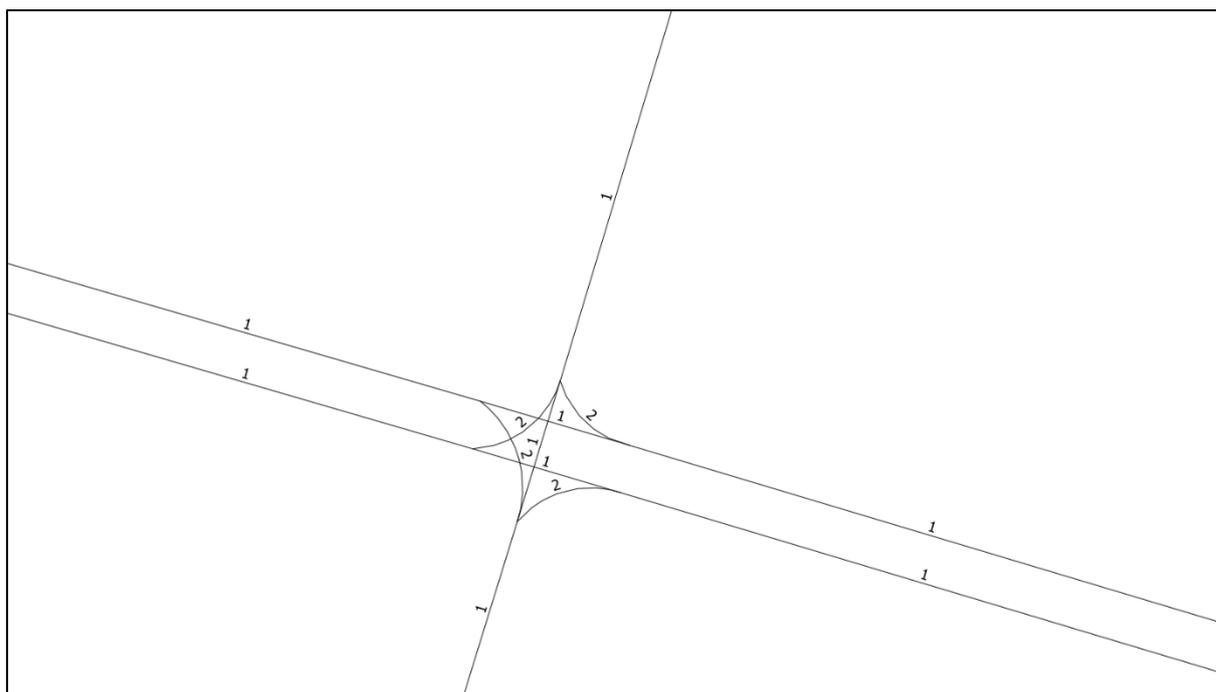


Figura 2 - Exemplo de trechos de via (1) e de conversão (2).

Fonte: elaborado pelo autor a partir do arquivo *shapefile* do portal de Infraestrutura de Dados Espaciais (IDE).

A Figura 2 deixa claro que o grafo da malha viária é direcional, ou seja, cada arco possui uma direção que representa o sentido de circulação da via. Isto é, se uma via possui mão dupla, é representada por dois arcos, como a rua na direção sudeste-noroeste da Figura 2. Na linguagem dos grafos, este sentido é representado como o nó (vértice ou cruzamento) inicial e o nó final do arco. Isto é de extrema importância para diferenciar o fluxo de veículos observados em cada um dos sentidos de algumas avenidas radiais, causado pelo movimento pendular das viagens (no início da manhã a maioria vai para o centro, e ao final da tarde a maioria retorna do centro).

Os trechos do tipo "via" ainda foram subdivididos em 27 tipos de logradouro diferentes, conforme a Tabela 2 lista.

Tabela 2 - Tipos de vias

SIGLA_TIPO	DESCRICA0
PDC	PISTA DE COOPER
ACS	ACESSO
ALA	ALAMEDA
AVE	AVENIDA
BEC	BECO
BR	RODOVIA FEDERAL
CAM	CAMINHO
ELP	ESPACO LIVRE DE USO PUBLICO
ELV	ELEVADO
EST	ESTRADA
LRG	LARGO
MAR	MARGINAL
PCA	PRACA
QTF	QUARTEIRAO FECHADO
RDP	RUA DE PEDESTRE
RMA	REDE DE MANILHAS
ROD	RODOVIA
RTN	RETORNO
RUA	RUA
TRE	TREVO
TRI	TRINCHEIRA
TRV	TRAVESSA
TUN	TUNEL
VDP	VIA DE PEDESTRE
VDT	VIADUTO
VIA	VIA
PAS	PASSARELA

Fonte: arquivo *shapefile* do portal de Infraestrutura de Dados Espaciais (IDE).



Figura 3 – Malha viária da região Central de Belo Horizonte; de verde, a Avenida do Contorno.
Fonte: elaborado pelo autor a partir do arquivo *shapefile* do portal IDE.

A Figura 3 apresenta a malha viária circunscrita pela Avenida do Contorno, enquanto que a Figura 4 mostra a mesma malha, circunscrita pelos limites do município de Belo Horizonte.

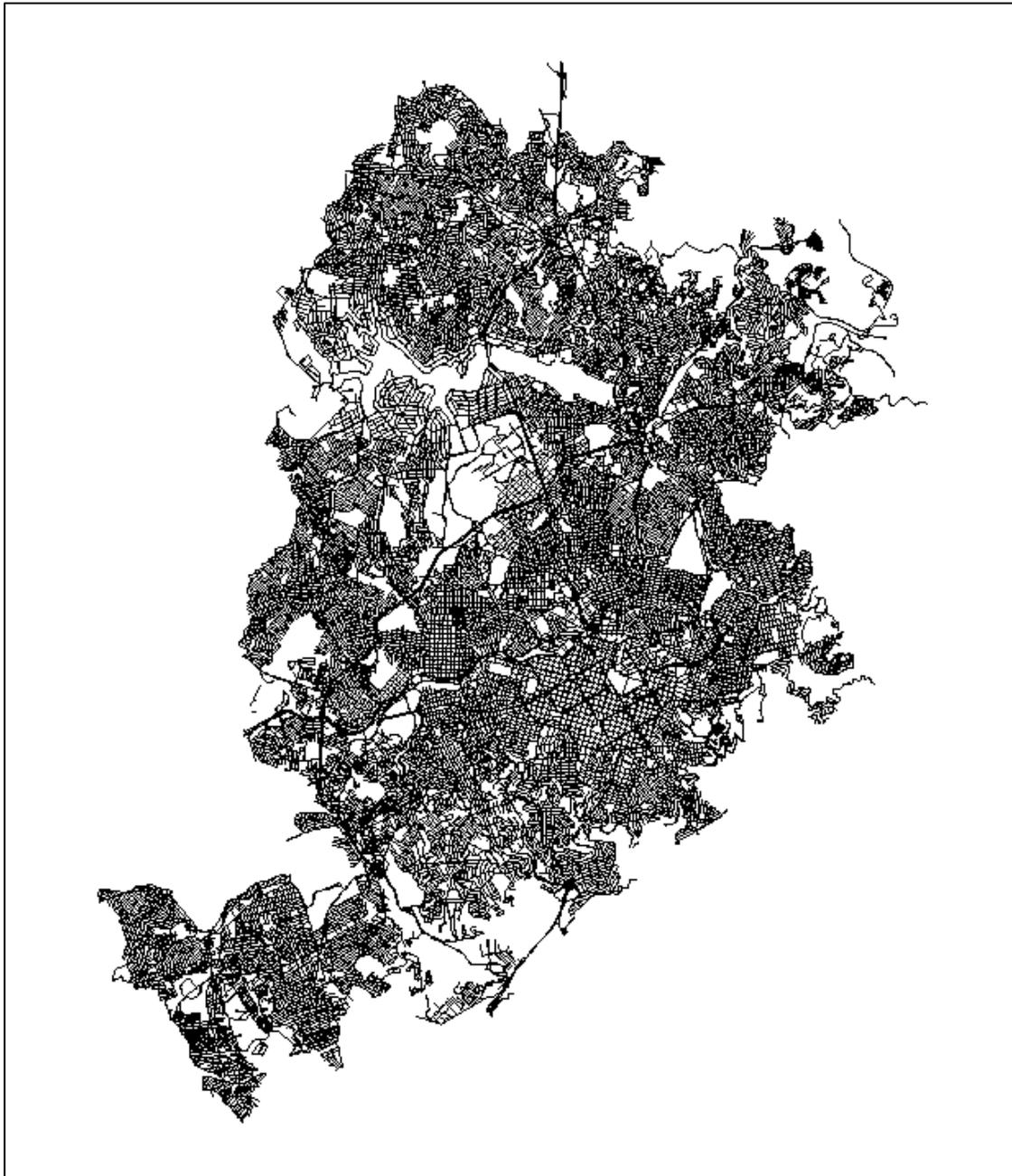


Figura 4 – Malha viária de Belo Horizonte

Fonte: elaborado pelo autor a partir do arquivo *shapefile* do portal de Infraestrutura de Dados Espaciais (IDE).

3.3.3 Itinerários e Quadro de Horários (QH) dos ônibus

O plano inicial era obter os itinerários e QHs das linhas de ônibus no formato *Especificação Geral de Feeds de Trânsito*, da sigla em inglês GTFS, que é disponibilizado ao público pela BHTRANS por meio do endereço eletrônico <https://transitfeeds.com/p/bhtrans/640?p=1>. O formato GTFS é um formato público de arquivos relativos ao transporte público, criado pela Google em parceria com a agência de transporte público de Oregon, EUA (FORTIN, 2016), e muito utilizado nos dias de hoje, possibilitando muitos estudos, inclusive a comparação do

transporte público entre diferentes cidades ao redor do mundo (BOK e KWON, 2016). Neste formato, as empresas reguladoras ou mesmo operadoras, disponibilizam de forma padronizada os dados relativos ao transporte público; como itinerário; horário; calendário; localização geográfica dos pontos (paradas⁵) de ônibus; e os horários esperados de parada de cada ônibus em cada ponto; tarifas e suas regras etc. Há ainda o formato GTFS em tempo real, que além das informações tradicionais do GTFS, informa a localização exata de cada ônibus em tempo real. Em consulta feita pelo autor, verificou-se que no Brasil apenas as agências de Curitiba e São Paulo fornecem publicamente os dados neste formato (GTFS em tempo real).

Além de não disponibilizar o GTFS em tempo real, a data mais antiga de disponibilização do GTFS pela BHTRANS é maio de 2016. Nesta época, já ocorrera uma importante mudança estrutural no transporte por ônibus na cidade: a implantação do sistema BRT, chamado localmente de MOVE (ULIAN e COSTA, 2016). Dessa forma, foram obtidos os itinerários e Quadro de Horários (QH) das linhas de ônibus de Belo Horizonte no ano de 2011 – ano imediatamente anterior à pesquisa OD – no formato de planilha do Excel (.xlsx), por meio de solicitação à BHTRANS. Os arquivos de itinerário informam o logradouro de cada ponto de cada linha e sublinha de ônibus, bem como os trechos anterior e posterior do logradouro, com o intuito de possibilitar descobrir a quadra exata de localização do ponto, bem como o lado da rua do mesmo. Ao todo, a base de dados contém dados de 696 linhas (e sublinhas) de ônibus, 817 pontos de controle (PC) e 46.607 pontos de embarque e desembarque (PED).

Com esta metodologia, foi possível encontrar a localização de 85% dos pontos de ônibus. Um dos fatores preponderantes para que o número de pontos localizados não fosse 100% foi o fato de que a identificação, por códigos dos logradouros, não era a mesma entre o arquivo da malha viária e o do itinerário. Logo, o cruzamento foi feito pelo nome do logradouro, e o percentual de concordância entre as duas bases foi de 99%. Tendo sido encontrados os trechos de rua em que se localizam os pontos, foi possível estimar a rota de cada linha, como sendo a rota que minimiza a distância entre cada par de pontos consecutivos, ou seja, uma rota mínima que liga todos os pontos, conforme a ordem do itinerário.

⁵ Neste trabalho, sempre será utilizado o termo “ponto” de ônibus para se referir a uma “parada” de ônibus, uma vez que o autor está mais acostumado ao uso do primeiro termo.

3.4 Análise de dados

Considerando que sob a matriz modal atual o tempo de viagem de carro é inferior ao do ônibus, as hipóteses a serem testadas são as seguintes:

- 1 Se todos os cidadãos utilizassem carro, o tempo médio de deslocamento seria menor do que se todos utilizassem ônibus.
- 2 Se todos os cidadãos utilizassem ônibus, o tempo médio de deslocamento seria menor do que se todos utilizassem carro.

Para isto, a análise foi feita seguindo em ordem os cinco objetivos específicos: 1) realizar a roteirização de todos trajetos de ônibus e de carro presentes na pesquisa OD da RMBH de 2012; 2) ajustar e escolher um modelo de regressão linear para estimar a velocidade média de ônibus e de carro de cada trecho de via em cada faixa horária; 3) estimar a densidade de veículos média de cada trecho de via em cada faixa horária; 4) ajustar e escolher um modelo macroscópico de tráfego de ônibus e de carro ao gráfico de densidade-velocidade para cada trecho de via; 5) comparar os tempos médios de viagem para os casos em que a distribuição modal é idêntica à atual; para aquela em que todos usam o ônibus; e para aquela em que todos usam o automóvel.

Contudo, antes deste prosseguimento, convém que seja mostrado como a pesquisa OD fora analisada até aqui pela literatura. Quando a Agência Metropolitana publicou, em 2013, o relatório de resultados da Pesquisa OD 2012, bem como quando a BHTRANS publicou suas análises baseadas na mesma pesquisa, em 2016; ambos os trabalhos apresentaram interessantes análises descritivas e vastos resultados sobre a mobilidade dos moradores da RMBH. Como de praxe, estes resultados vieram comparados com os mesmos indicadores de pesquisa OD anterior (2002), sempre que possível. A principal estatística apresentada, assinalando talvez uma característica de toda pesquisa OD, foi aquela relativa a divisão modal, que mostra a proporção de utilização de cada modo de transporte. Os modos de transporte foram classificados entre coletivos; individuais; não motorizados; e outros; conforme o Quadro 4, retirado da pesquisa OD 2012. Este trabalho, todavia, ateve-se apenas aos modos “Automóvel dirigindo” e “Ônibus coletivo urbano”, ou seja, motoristas de carro e passageiros de ônibus, que foram chamados "usuários de carro" e "usuários de ônibus", embora alguns usuários de carro e de ônibus não tenham sido considerados.

Quadro 4 – Meios e modos de transporte, segundo a Pesquisa OD 2012

Meio de Transporte⁶	Modo Principal
Avião	
Metrô / Trem Metropolitano	
Ônibus rodoviário	
Ônibus coletivo urbano	
Ônibus fretado convencional	Modo coletivo
Ônibus fretado escolar	
Perua ou van fretado convencional	
Perua ou van fretado escolar	
Trem Regional (EFVM)	
Automóvel carona	
Automóvel dirigindo	
Caminhão	
Moto carona	Modo individual
Moto pilotando	
Perua ou van dirigindo	
Táxi	
Táxi lotação	
A pé	Modo não motorizado
Bicicleta	
Outros	Outros

Fonte: Pesquisa de Origem e Destino da RMBH de 2012 (SEGEM e ADRMBH, 2013).

Outro indicador importante analisado foi a taxa de motorização; que divide o número de veículos pelo número de domicílios; indicador que também foi comparado à pesquisa anterior. Também foram feitas inúmeras análises a respeito do número de viagens por horário do dia, por município e região de origem e destino, por sexo, idade, renda e outras variáveis. Além disso, foram estimadas as velocidades médias lineares para cada horário e modo de transporte; ou seja, a velocidade considerando que a distância percorrida entre a origem e o destino é uma linha reta (distância euclidiana), desconsiderando a malha viária e a topografia da região.

Em ambos os relatórios supramencionados, as agências dividiram as 24 horas do dia em sete intervalos de tempo, de acordo com a característica dos motivos da viagem, o número de viagens e a taxa de congestionamento nos intervalos. A descrição da sigla, do nome do período e da faixa de horários que cada um designa estão Tabela 3.

⁶ Manteve-se aqui a denominação original de “Meios de Transporte” do relatório, embora tenha sido considerado em todo este trabalho o termo “Modos de Transporte”.

Tabela 3 - Faixas horárias utilizadas no trabalho e na Pesquisa OD 2012

Sigla	Nome	Início	Fim	Duração
MAD	Período da Madrugada	00:00	05:00	5 horas
FPM	Faixa Pico Manhã	05:00	09:00	4 horas
EPM	Entre Pico Manhã	09:00	11:00	2 horas
FPA	Faixa Pico Almoço	11:00	14:00	3 horas
EPT	Entre Pico Tarde	14:00	16:00	2 horas
FPT	Faixa Pico Tarde	16:00	20:00	4 horas
NOT	Período Noturno	20:00	00:00	4 horas

Fonte: elaborado pelo autor com base nos critérios da Pesquisa OD 2012 (SEGEM e ADRMBH, 2013)

3.4.1 Objetivo específico 1: Roteirização

A roteirização foi feita considerando a pesquisa OD e a malha viária (*shapefile*) de Belo Horizonte. Foram sorteados aleatoriamente – com auxílio da função *sample* do software R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2016) – os trechos de via de partida e de chegada, a partir dos conjuntos de trechos de via das Áreas Homogêneas (menor área de agregação da pesquisa) de origem e de destino dos trajetos de cada viajante, independentemente do modo de transporte. O número total de trajetos sorteados ("reamostrados") foi o somatório da coluna "Fator trajeto", que representa o fator de expansão de cada trajeto; ou seja, o número de trajetos sorteados buscou representar o total de trajetos realizados em um dia útil na cidade de Belo Horizonte. Obviamente, a probabilidade de sorteio de um trajeto específico foi a razão entre o seu próprio fator de expansão e o somatório de tal coluna, para que o resultado final fosse não viesado. Cabe aqui um esclarecimento sobre a diferença entre viagem e trajeto, segundo a pesquisa OD: uma viagem pode ser composta por mais de um trajeto: por exemplo, em geral a viagem de ônibus é separada em três ou mais trajetos: sendo o primeiro e o último a pé, e o(s) intermediário(s) de ônibus. Nestes casos, para nosso propósito foi feita a roteirização apenas do trajeto de ônibus em si, desconsiderando-se os trajetos a pé.

A rota estimada para cada um desses indivíduos foi calculada de forma diferente para motoristas de carro – não foram considerados aqueles que fizeram seu trajeto com o modo "Automóvel carona", e sim apenas os que usaram o modo "Automóvel dirigindo" – em relação aos usuários de ônibus. No caso dos automóveis, a rota prevista foi a rota mais curta entre as vias de origem e de destino – escolhidas conforme explicado no parágrafo anterior –, considerando o tempo esperado para percorrer cada via como peso dos arcos (conforme explicado na seção 4.1). No caso dos passageiros de ônibus, foi primeiramente definido o ponto de ônibus de origem e de destino. Para isto, foram considerados os pontos mais próximos (pela distância euclidiana) das vias de origem e de destino sorteadas conforme descrito anteriormente. Por conseguinte, a rota

entre o ponto de origem e o ponto de destino foi estimada como sendo a rota da linha de ônibus – descrita na seção 3.3.3 – entre o ponto de ônibus de origem e o ponto de ônibus de destino. O algoritmo para calcular tanto as rotas de carro quanto as rotas dos itinerários dos ônibus (considerando a combinação das rotas mais curtas entre todos os pares de pontos consecutivos) foi construído no software R utilizando a função *shortest_paths* do pacote *igraph* (CSARDI e NEPUSZ, 2006), que utiliza o algoritmo de *Dijkstra* para a roteirização (WEST, 1996).

3.4.2 Objetivo específico 2: Estimação da velocidade média

Após concluída a etapa de roteirização descrita anteriormente, pôde-se passar para a etapa de se estimar a velocidade média em cada trecho de via, a cada hora e para cada modo de transporte. Todavia, como a variável velocidade não foi perguntada aos entrevistados da pesquisa OD – e nem deveria ser, já que dificilmente uma pessoa saberia responder qual foi a velocidade média com a qual viajou na véspera –, foi preciso trabalhar com a variável análoga existente, que é o tempo total gasto em cada trajeto. Logo, primeiramente foi preciso estimar o tempo gasto por uma pessoa para viajar de uma determinada origem até determinado destino em um horário específico do dia, considerando o modo de transporte utilizado. Após ser feita esta estimativa, a estimativa da velocidade foi obtida de maneira direta, já que a velocidade é a razão entre a distância – obtida após a roteirização – e o tempo.

Podem ser propostos vários modelos para a realização desta estimativa, dependendo do grau de individualização dos parâmetros para cada trecho de via e para cada momento do dia. Além disso, para cada modelo é possível avaliar a qualidade do seu ajuste aos dados da pesquisa OD, por meio da comparação entre o tempo previsto (\hat{t}_i) e o tempo declarado (t_i) na pesquisa. Esta comparação pode ser feita utilizando o Erro Quadrático Médio:

$$EQM = \sum_{i=1}^N (\hat{t}_i - t_i)^2 \quad (22)$$

Onde N é o número total de trajetos em um dia útil, que é o somatório da coluna de fator de expansão da OD. De fato, segundo a OD 2012, este valor foi de 1.341.535 trajetos de automóvel e 1.577.483 trajetos de ônibus por dia. Obviamente, quanto menor o EQM, melhor o modelo.

Dentre os modelos possíveis, pode-se construir o seguinte modelo simplista:

$$t_i = f_i \sum_{j=1}^r c_j I_{ij}, \quad (23)$$

Onde t_i é o tempo total gasto pelo indivíduo i , f_i é o ritmo (inverso da velocidade) implementado pelo indivíduo i (considerando que ele percorre todas as vias à mesma velocidade, independentemente da via e da hora do dia), r é o número total de trechos de vias, c_j é o comprimento do trecho de via j e I_{ij} é a variável Indicadora (recebe os valores 0 ou 1) que informa se o trecho j faz parte da rota do indivíduo i . Ou seja, este modelo afirma que o tempo gasto por um indivíduo é o produto entre a distância por ele percorrida ($\sum_{j=1}^r c_j I_{ij}$) e o ritmo desempenhado na viagem (f_i). Como não se conhece o ritmo de cada motorista, pode-se estimar o ritmo de cada um como sendo o ritmo médio entre todos os motoristas (\hat{f}), a fim de se obter uma estimativa do tempo total gasto pelo indivíduo i (\hat{t}_i), possibilitando o cálculo do EQM:

$$\hat{t}_i = \hat{f} \cdot \sum_{j=1}^r c_j I_{ij}. \quad (24)$$

Desse modo, o tempo gasto seria uma função apenas da distância total percorrida ($\sum_{j=1}^r c_j I_{ij}$). Neste caso, para se estimar o ritmo médio entre todos os motoristas seria necessário apenas calcular o somatório da distância percorrida por todos eles e dividir pelo somatório do tempo gasto por todos. O numerador é obtido por meio da roteirização descrita no início desta seção, enquanto o denominador é calculado diretamente da pesquisa OD (Hora de chegada menos a Hora de início).

Este modelo, contudo, provavelmente não resultaria em bons resultados (EQM), por considerar que as velocidades imprimidas em todas as vias são as mesmas; por considerar que também são as mesmas estas velocidades em qualquer hora do dia; além de também supor que todos os motoristas dirigem à mesma velocidade. De fato, os modelos seguintes tentaram contornar os primeiros dois problemas, da generalização das vias e do horário, mas não o terceiro, o da generalização dos motoristas. A justificativa para isto é verificada na descrição do "objetivo específico 4", no qual pretende-se prever o tempo gasto pelos atuais usuários de ônibus caso os mesmos optem pelo carro, isto é, como prever o comportamento (velocidade média) destes novos motoristas? Assim, o comportamento dos motoristas foi considerado como sendo igual ao comportamento médio dos mesmos.

Logo, a fim de reduzir a generalização da velocidade em cada via, poderia ser criado um modelo que considera cada trecho de via separadamente, onde \hat{f}_j representa o ritmo médio, dentre todos os motoristas, da via j :

$$t_i = \sum_{j=1}^r f_{ij} c_{ij} I_{ij} \quad (25)$$

$$\hat{t}_i = \sum_{j=1}^r \hat{f}_j c_{ij} I_{ij} \quad (26)$$

Ou ainda poder-se-ia considerar que cada trecho de via possui um comportamento médio diferente de acordo com a hora do dia:

$$t_i = \sum_{j=1}^r \sum_{m=1}^{24} f_{ijm} c_j I_{ijm} \quad (27)$$

$$\hat{t}_i = \sum_{j=1}^r \sum_{m=1}^{24} \hat{f}_{jm} c_j I_{ijm} \quad (28)$$

Onde r é o número total de trechos de vias, m representa as horas do dia, f_{ijm} é o ritmo dispendido pelo indivíduo i no trecho de via j na hora m , e c_j é o comprimento do trecho de rua j e I_{ij} é a variável Indicadora que informa se o trecho j faz parte da rota do indivíduo i na hora m .

De fato, a diferença entre o tempo total estimado e o tempo real gasto é o erro $\varepsilon_i = t_i - \hat{t}_i$, também chamado de resíduo. É possível demonstrar que estes resíduos serão independentes entre os indivíduos, porém não serão identicamente distribuídos; uma vez que indivíduos com trajetos mais longos possuirão tempos reais e estimados maiores, indicando um erro de magnitude maior que indivíduos de trajeto curto, não cumprindo o requisito de serem *iid* (independentes e identicamente distribuídos), necessário ao ajuste de uma análise de regressão linear. Contudo, como o principal foco de uma análise de regressão é testar a significância estatística dos parâmetros, o que não é o objetivo aqui, neste modelo deseja-se apenas estimar parâmetros de ritmos médios de cada trecho de rua. Assim, chamando os tempos de viagem t de Y , os comprimentos dos trechos de rua c multiplicados pela variável Indicadora I de matriz de dados X , e os ritmos f de vetor de parâmetros β a serem estimados, pode-se tratar tal problema como uma análise de regressão linear múltipla, cuja estimativa de mínimos quadrados para os parâmetros é dada pela fórmula:

$$\hat{\beta} = (X'X)^{-1}X'Y, \quad (29)$$

ou

$$\hat{f} = [(cI)'(cI)]^{-1}(cI)'t. \quad (30)$$

Onde o sobrescrito “'” indica o transposto e o “-1” indica o inverso da matriz. A matriz X possui um tamanho de n linhas e p colunas, sendo p também o comprimento dos vetores Y e $\hat{\beta}$, e representa o número de parâmetros a serem estimados. Já n representa o número de participantes da pesquisa (viagens de automóvel ou de ônibus) já corrigido pelo fator de expansão; que se afirmou ter sido de 1.341.535 e 1.577.483, respectivamente. Por sua vez, p é produto entre o número de trechos de vias selecionados pela roteirização e o número de horas (24). O principal problema neste caso é que podem haver mais parâmetros que observações, caso o produto entre o número de trechos de vias selecionadas na roteirização e o número de horas (24) seja superior ao número de viagens, o que permite infinitos resultados da equação e inviabiliza a aplicação do método. Por exemplo, o *shapefile* utilizado possui cerca de 230 mil trechos de via, o que, se for multiplicado pelas 24 horas do dia resulta em mais de 5 milhões de parâmetros, valor muito superior ao número de observações.

Para evitar este problema do excesso de parâmetros, foram propostas algumas soluções, todas elas envolvendo algum tipo de agrupamento dos parâmetros conforme semelhança entre si. Por exemplo, é possível agrupar os trechos de ruas dentro de um mesmo logradouro, partindo do pressuposto de que trechos de um mesmo logradouro possuem velocidades médias semelhantes. Isto posto, o número de trechos de rua seria reduzido para cerca de 11 mil. Também é possível agrupar os trechos de via de acordo com o tipo da via, ou seja, se é uma rua, uma avenida ou uma rodovia, por exemplo, assumindo que vias de mesmo tipo possuem semelhança maior que vias de tipo diferente. Outra opção é o tipo de trecho de circulação, que é dividido entre “via” e “conversão”, ou mesmo por Área Homogênea (AH) ou Unidade de Macro Mobilidade (UMM). Também é possível agrupar os trechos de acordo com a frequência na roteirização, partindo do princípio de que vias com pouco fluxo não estão sujeitas ao congestionamento, o que permite tratá-las da mesma forma. Ainda há o critério do comprimento de cada trecho, caso seja considerado que há perda de velocidade nos cruzamentos, de forma que vias curtas serão mais afetadas pelos cruzamentos do que vias longas, onde os carros podem desenvolver sua velocidade por mais tempo.

Um problema presente em todos estes modelos de agrupamento é que o sentido da via não é levado em consideração, o que faz com que o movimento pendular das viagens – observado principalmente na ocupação das principais avenidas – tenha sua caracterização prejudicada. Estas avenidas, por exemplo, teriam suas velocidades médias consideradas como sendo a média das velocidades em cada lado da via, ou seja, a velocidade não seria nem tão lenta quanto no sentido principal do fluxo e nem tão rápida quanto no sentido oposto. De qualquer forma, optou-

se em um primeiro momento por desconsiderar este problema, embora o mesmo seja reconhecido aqui.

Por ora, deixando de lado este problema do movimento pendular, escolheu-se utilizar o critério da UMM e ajustar um modelo de regressão para cada hora do dia separadamente. Por UMM, optou-se pelo critério utilizado pela BHTRANS (2016) em sua análise da OD 2012, no qual foi sugerida uma pequena alteração das Unidades de Macro Mobilidade (UMM) presentes na pesquisa OD. As UMMs originais coincidem com as nove Regionais Administrativas da prefeitura de BH: Barreiro, Centro-Sul, Leste, Nordeste, Noroeste, Norte, Oeste, Pampulha e Venda Nova. A BHTRANS, por outro lado, utilizou uma subdivisão das UMMs, das quais se conta nove em número, em dez regionais, que aqui também serão chamadas doravante UMMs. Neste caso, a UMM Centro-Sul é dividida entre Centro e Sul, usando como critério a localização geográfica interna à Avenida do Contorno. Tal avenida possui a característica de realmente separar a área mais movimentada da cidade das demais, o que torna tal separação da Regional Centro-Sul útil e proveitosa.

Com este critério simplista, considera-se que em uma determinada hora do dia, todas as vias de uma mesma Regional possuem a mesma velocidade média, embora vias de regionais diferentes possam possuir diferentes velocidades. Sendo assim, para cada hora do dia será ajustado um modelo de regressão, considerando as matrizes Indicadoras I_{kj} e I_{ij} , que indicam se a UMM k contém a via j e se o indivíduo i passou pela via j :

$$t_i = \sum_{k=1}^{10} f_{ik} \sum_{j=1}^r I_{kj} c_j I_{ij} \quad (31)$$

$$\hat{t}_i = \sum_{k=1}^{10} \hat{f}_{.k} \sum_{j=1}^r I_{kj} c_j I_{ij}. \quad (32)$$

Cuja solução de Mínimos Quadrados Ordinários é

$$\hat{f}_{.k} = \left[(I_{kj} c_j I_{ij})' (I_{kj} c_j I_{ij}) \right]^{-1} (I_{kj} c_j I_{ij})' t. \quad (33)$$

Há, contudo, algumas ressalvas à solução de Mínimos Quadrados Ordinários. Uma delas é que ela dá a mesma importância para todas as observações, quando algumas podem ter uma importância maior que outras. Por exemplo, quanto maior a distância percorrida, maior será o tempo esperado, e conseqüentemente, maiores os resíduos absolutos em magnitude, conforme

já explicado anteriormente. Uma das soluções descritas na literatura é a utilização dos Mínimos Quadrados Ponderados; utilização que minimiza a soma de quadrados; em que cada termo quadrático é ponderado por um determinado valor; e aconselha-se neste caso a usar alguma variável inversamente proporcional à magnitude do erro, por exemplo, o inverso do próprio tempo t_i ou do quadrado dele (t_i^2). Esta técnica possibilita chegar a um ajuste do modelo em que os resíduos sejam identicamente distribuídos, além de ser distribuídos como resíduos independentes. Por outro lado, é provável que imprecisões potenciais relativas ao tempo de viagem declarado pelo viajante, bem como à roteirização (que não é necessariamente a rota feita pelo viajante), sejam mais evidentes em viagens mais curtas; tornando necessário dar maior confiabilidade às viagens mais longas, nas quais tais imprecisões teriam menor efeito. Logo, decidiu-se por testar diferentes ponderações para o modelo de Mínimos Quadrados Ponderados.

Outra crítica a ambos modelos de mínimos quadrados (MQO e MQP), é que os dois permitem que as estimativas assumam valores irreais para o ritmo e, conseqüentemente, para a velocidade, como por exemplo, valores de velocidade negativos, ou mesmo valor superior a 200 km/h. Logo, uma maneira proposta para sobrepor tal problema foi a inclusão de restrições à minimização da função soma de mínimos quadrados. Tal modelo restritivo pode ser executado no R, por exemplo, com a utilização da função *solve.QP* do pacote *quadprog* (TURLACH, 2013). Decidiu-se pela utilização também deste modelo, considerando como limites de velocidade os valores de 1 km/h e de 100 km/h, ou seja, valores do ritmo (h/km) do inverso disto: entre 0.01 e 1.

Entretanto, outro problema ainda pode afetar todos estes modelos, tornando as estimativas de baixa qualidade e confiabilidade. Este problema é a presença de *outliers*; embora tal probabilidade tenha sido reduzida com a aplicação de filtros de seleção referentes ao tempo total do trajeto – entre 5 minutos e 2 horas –, eles ainda são possíveis de ocorrer. Uma maneira útil, embora pouco conhecida, de sobrepor tais problemas é a utilização de uma técnica descrita como "regressão robusta". Em regressão robusta, outras funções de minimização dos erros são utilizadas, no lugar dos mínimos quadrados. Uma destas funções, por exemplo, é a função que minimiza a soma dos desvios absolutos (Mínimos Desvios Absolutos), também chamada de função LAD (*Least Absolute Deviations*). Neste trabalho, entretanto, utilizou-se a sigla em português (MDA). Tal regressão é executada no R sob a função *lfit* do pacote *Llpack* (OSORIO e WOŁODZKO, 2017).

Os resultados de todos estes quatro modelos descritos acima – Mínimos Quadrados Ordinários, Mínimos Quadrados Ponderados, Mínimos Quadrados Ordinários com Restrição e Mínimos Desvios Absolutos, – foram comparados entre si em relação ao Erro Quadrático Médio de suas estimativas. No final, optou-se pelo modelo que informou menores valores de EQM (critério objetivo), bem como estimativas de velocidades médias mais realistas (critério subjetivo, a cargo do autor).

Na verdade, além dos quatro modelos acima que consideram como variável independente apenas a UMM onde o trecho de rua está localizado, decidiu-se também testar outros modelos. Desse modo, foram testados 16 modelos, de acordo com a combinação dos seguintes fatores: 1) Tipo de regressão: MQO, MQP, MQO com restrições e MDA (4 opções); 2) se o modelo possui ou não intercepto (2 opções); e 3) separando ou não as vias em quatro tipos: avenidas, ruas movimentadas, ruas pouco movimentadas e trechos de conversão (2 opções). O produto entre este número de opções ($4 \times 2 \times 2 = 16$) totaliza 16 modelos testados.

A justificativa para o ajuste e teste de todos estes modelos é a seguinte: espera-se, por exemplo, que conversões apresentem uma velocidade média muito inferior à de avenidas. Da mesma forma, espera-se que ruas pouco movimentadas e avenidas apresentem velocidades superiores às ruas muito movimentadas. A definição do critério "rua pouco movimentada" foi arbitrária, classificando as ruas com menos de 1.000 viagens por dia como pouco movimentadas. Os modelos com intercepto podem até fazer sentido para os carros (tempo para estacionar ou tirar o carro da garagem), mas não fazem sentido para o ônibus, já que o trajeto de ônibus não inclui o tempo esperando o ônibus, por exemplo. Contudo, apesar de não se justificarem, os modelos com intercepto foram testados como uma tentativa segura de se garantir um modelo não viesado, diferentemente dos modelos sem intercepto.

3.4.3 Objetivo específico 3: Estimação da densidade de veículos

Apesar de que já havia em 2011 algumas faixas e corredores exclusivos para ônibus, como esta era a exceção e não a regra, a densidade de veículos foi calculada considerando os carros e os ônibus conjuntamente. Além disso, é importante salientar que por motivo de indisponibilidade de informação, não foram consideradas as larguras ou o número de faixas das vias nos denominadores dos cálculos de densidade. Assim, as densidades foram estimadas em termos de veículos por quilômetro linear de via. Com isto, os valores de densidade não são comparáveis entre diferentes agrupamentos de vias.

O método de cálculo do numerador e do denominador da densidade foi o seguinte: ele consistiu em considerar no numerador o espaço ocupado por carros e por ônibus presentes nas ruas ao mesmo tempo, enquanto que o denominador deveria representar o espaço disponível nas mesmas ruas. Como a densidade foi calculada para toda uma faixa horária e não apenas para um instante, a mesma representa na verdade a densidade média durante todo este período. Assim sendo, a maneira de se fazer isto é usar no numerador o produto entre o espaço ocupado pelos veículos e o tempo que os mesmos gastam para percorrer as ruas em questão, e no denominador o produto do espaço disponível e o tempo total do período. Por exemplo, o valor do denominador da densidade de veículos em uma determinada UMM na faixa horária da Madrugada (entre 0h e 5h) é equivalente a 5 vezes o comprimento total, em quilômetros, das vias da respectiva UMM.

Já o cálculo do numerador não é tão trivial quanto o do denominador. Assim, para o cálculo da densidade, foi preciso construir um algoritmo de simulação, que consiste resumidamente nas seguintes etapas: a) cálculo do momento em que cada carro troca de via, considerando os trajetos de carro da OD (objetivo 1) e as velocidades estimadas (objetivo 2); b) soma dos tempos gastos pelos carros em cada agrupamento de vias e cada faixa horária (primeira parcela do numerador da densidade); c) cálculo do momento que os ônibus trocam de via considerando o QH e o itinerário dos ônibus (vide seção 3.3.3) ; d) soma dos tempos gastos pelos ônibus em cada agrupamento de vias e faixa horária (segunda parcela do numerador da densidade); e) cálculo do denominador da faixa horária, como sendo o produto entre soma do comprimento das vias de um mesmo agrupamento e a amplitude de tempo da referida cada faixa horária; e f) cálculo da densidade= $(b + 2d)/e$.

É importante justificar o porquê de se multiplicar por dois o valor da parcela do numerador que representa os ônibus. Wohl e Martin (1967) sugerem uma regra de bolso para a equivalência entre veículos comerciais (ônibus e caminhões) e automóveis, que varia de acordo com o terreno, no cálculo da capacidade/fluxo (q) de uma via. No caso de um terreno plano, um ônibus equivaleria a dois automóveis - em terreno ondulado, a quatro, e em um terreno montanhoso, a oito. O valor mediano desta regra, de quatro para um, poderia ser utilizado neste trabalho, uma vez que o terreno de Belo Horizonte pode ser considerado ondulado.

Entretanto, há uma importante diferença entre o que esses autores propuseram e o que está sendo feito aqui. O fluxo (q) é o produto entre a velocidade (v) e a densidade (k), e no presente caso, a diferença de velocidade dos veículos já está sendo considerada quando os tempos de

viagem são somados em b e d . Sendo assim, faltava comparar apenas a diferença do espaço ocupado entre eles, já que a densidade (k) é o inverso do espaçamento (s), conforme foi explicado na seção 2.1.2. Foi então considerado que o comprimento do ônibus (cerca de 13 metros) é aproximadamente a distância ocupada por dois carros (contando a distância entre eles). Caso os carros estejam parados, é provável que a distância ocupada pelo ônibus seja superior. Contudo, caso estejam em movimento, ambos ocuparão uma distância maior que o ônibus. Assim, foi escolhido o simples valor de dois para tentar corrigir a diferença de espaço ocupado pelo ônibus e pelo carro.

3.4.4 Objetivo específico 4: Análise macroscópica

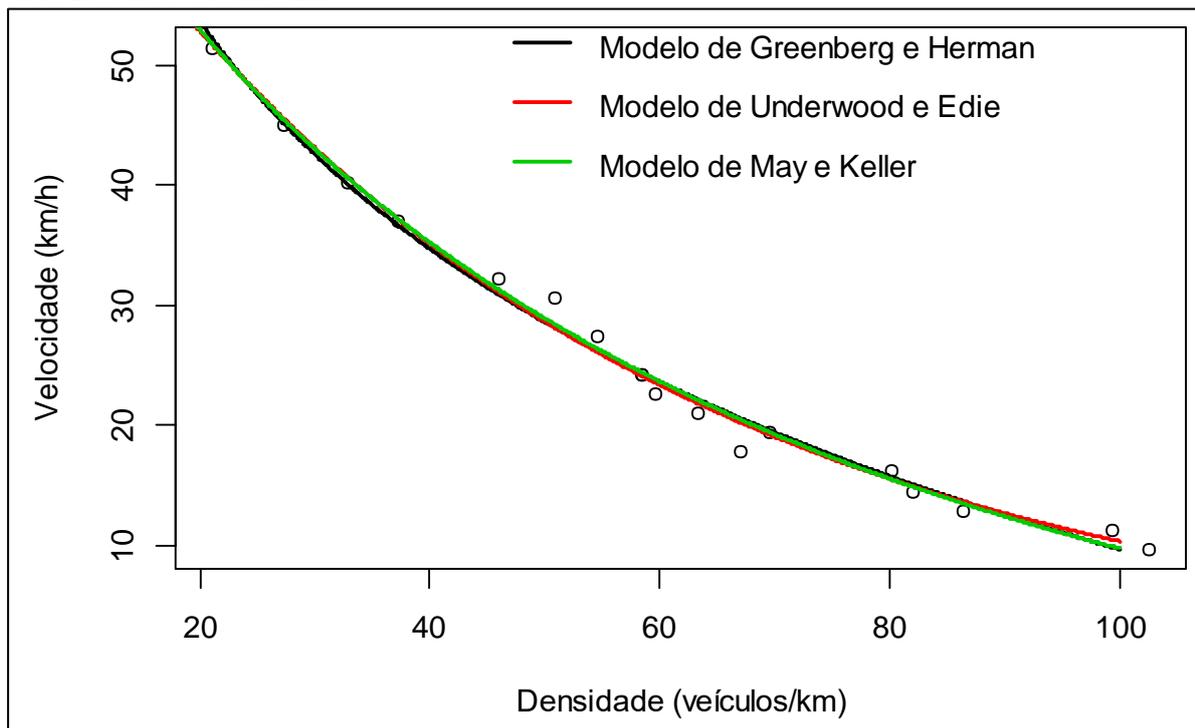
Com o resultado dos 3 objetivos específicos anteriores, cada trecho de via possui sete valores estimados de velocidade e densidade, com os quais é possível caracterizar o tráfego em cada trecho de via, tornando possível prever a velocidade, mesmo para diferentes valores da densidade de veículos. Para fazer esta caracterização foram testados os modelos Greenberg e Herman; de Underwood e Edie; e de May e Keller; conforme foram apresentados na revisão bibliográfica (seção 2.1.2.1). É possível compará-los quanto ao ajuste aos dados desta pesquisa da mesma forma que é possível compará-los quanto ao ajuste aos dados experimentais no Túnel Lincoln, em Nova York, coletados por Greenberg (1959), conforme exibidos no Gráfico 4.

O Gráfico 4 contém 18 pontos, cada um representando um momento diferente em uma mesma rua. A diferença para o presente trabalho, é que neste serão obtidos sete pontos, cada um representando uma faixa horária de um conjunto de ruas. O ajuste dos modelos a estes sete pontos será feito com a funcionalidade *solver* do software Excel, que escolhe os valores dos parâmetros do modelo de forma a minimizar o Erro Quadrático Médio. A escolha do melhor modelo, dentre os três acima citados, se dará pelo critério do menor EQM. Além deste critério, caso o modelo escolhido não se mostre adequado para a convergência da velocidade estimada no próximo objetivo específico, outro modelo macroscópico – em ordem crescente de EQM – poderá ser testado. Esta convergência será melhor explicada na próxima seção.

Uma análise visual do Gráfico 4 mostra que os modelos apresentaram resultados muito semelhantes para o intervalo de densidade dos dados. Contudo, é possível que os modelos se diferenciem bastante se alterarmos a escala do eixo X (densidade), conforme pode ser visto no Gráfico 5. O que torna as curvas diferentes entre os modelos são justamente os parâmetros de velocidade de trânsito livre (u_l) e a densidade de congestionamento (k_{con}), que são representadas em ambas as figuras pelos pontos de intercepção das curvas aos eixos y (velocidade quando a

densidade é zero) e x (densidade quanto a velocidade é zero). Dessa forma, fica clara a importância da escolha do modelo com o melhor ajuste, principalmente porque na execução dos próximos objetivos específicos as densidades serão superiores e inferiores às densidades atuais. Nos casos em que todos usam o automóvel e em que todos usam o ônibus, o número de veículos na rua será maior no primeiro caso e menor no segundo, quando comparados à situação atual.

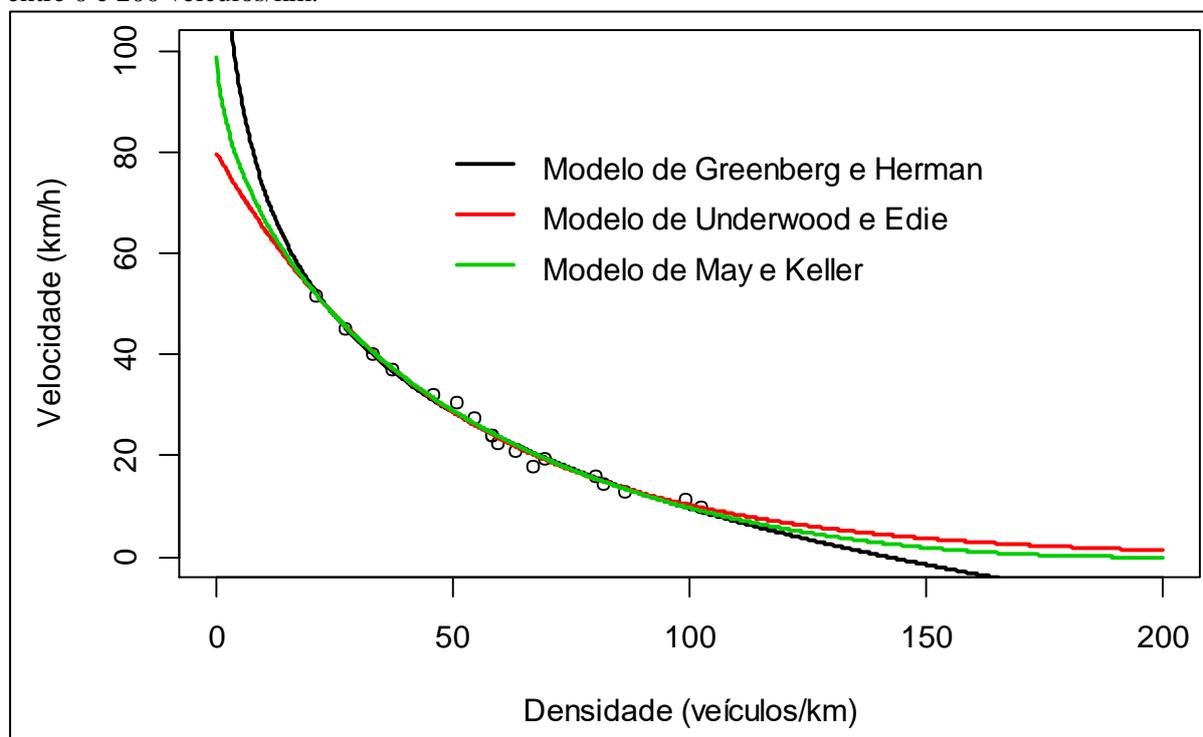
Gráfico 4 - Modelos macroscópicos ajustados aos dados do Túnel Lincoln, em 1959, com a densidade entre 20 e 100 veículos/km



Fonte: elaborado pelo autor a partir dos dados de Greenberg (1959).

É importante explicar aqui, no fim do objetivo específico quatro, que a roteirização, a estimação das velocidades, a estimação das densidades e a modelagem macroscópica, quando executadas de maneiras iterativas e repetidas até que haja convergência dos resultados, compõem o chamado modelo dinâmico de simulação de tráfego (Barceló, 2010). Contudo, com a limitação do tempo disponível – considerando que etapas como a roteirização das viagens de automóvel e a construção da matriz de distâncias gastam cada uma cerca de 24 horas de execução –, foi assumido que com apenas uma iteração destas etapas a convergência já foi alcançada. Por conseguinte, o mais correto seria afirmar que foi feito um modelo de simulação de tráfego, e não um modelo dinâmico de simulação de tráfego.

Gráfico 5 - Modelos macroscópicos ajustados aos dados do Túnel Lincoln, em 1959, com a densidade entre 0 e 200 veículos/km.



Fonte: elaborado pelo autor a partir dos dados de Greenberg (1959).

3.4.5 Objetivo específico 5: Comparação dos tempos de viagem

Com os dados de tempo gasto em cada viagem, considerando os três casos de distribuição modal previamente descritos, foi possível avaliar a possibilidade da *tragédia dos bens comuns*. A tragédia pode ser exemplificada da seguinte forma: em uma situação em que ambos os modos estão competindo entre si (OD real), um viajante que opta pelo carro gasta menos tempo, em média, que um viajante que usa o ônibus. Neste caso, pensando apenas em si, todo viajante, se puder, vai optar individualmente pelo carro, até o momento em que todos utilizem o automóvel. Por outro lado, o tempo gasto na situação em que todos utilizariam o ônibus seria inferior ao tempo na situação em que todos utilizariam o carro. Logo, concluir-se-ia neste caso que a tendência é que haja uma convergência na matriz modal com apenas o modo carro, condizendo com a *tragédia dos bens comuns*.

Saber qual o tempo gasto por cada viajante/modo em cada uma das duas novas situações propostas, contudo, não é um cálculo trivial. Esta tarefa foi dividida em três etapas, e realizada de duas maneiras, a fim de uma validar a outra. A primeira, via simulação, e a segunda analiticamente. A primeira etapa é igual nas duas metodologias, que consiste em calcular

diretamente qual seria o fluxo (q) total de veículos a cada hora e Regional na nova situação (apenas carros ou apenas ônibus). A segunda etapa consiste em estimar quais serão as velocidades e densidades para cada faixa horária e Regional que permitirão atingir o fluxo calculado anteriormente, e isto foi feito de maneiras distintas de acordo com a metodologia (simulação ou solução analítica). A terceira etapa foi responsável por calcular o tempo gasto por cada indivíduo, de acordo com a Regional de cada rua que o mesmo percorreria e a densidade prevista para hora em que percorreria cada rua. Esta etapa foi novamente igual nas duas metodologias, e foi feita por meio de um algoritmo direto de simulação.

A primeira etapa, embora igual em ambas as metodologias, foi diferente para cada nova situação (só carros ou só ônibus). Para o caso em que todos usassem o ônibus, foi considerado que o número de viagens de ônibus aumentaria conforme a mesma proporção que os recém-usuários de ônibus (antigos motoristas e viajantes de carona de carro) representam em relação aos atuais viajantes de ônibus. Com isto, a taxa de ocupação dos ônibus (passageiros por veículo) seria a mesma que a atual. No caso em que todos utilizassem o automóvel, foi preciso considerar que a proporção de viajantes recebendo carona dentre os atuais usuários do automóvel seria a mesma que entre os atuais viajantes de ônibus (futuros viajantes de automóveis). Isto é, o número de pessoas por carro, ou taxa de ocupação dos veículos, seria o mesmo que o atual. Com estas duas suposições, foi possível estimar o fluxo de veículos para cada situação proposta.

A partir destes valores de fluxo de carros e de ônibus, pôde-se executar a segunda etapa, que consiste em estimar as velocidades e densidades que atendem ao critério do fluxo. A simulação foi feita por um algoritmo iterativo para se chegar a estes valores de densidade e velocidade, enquanto a solução analítica utilizou a própria equação do fluxo ($q=ku$) para estimar estes valores de densidade e velocidade que atendem à esta igualdade.

Na simulação, o primeiro passo do algoritmo consiste em estimar a densidade de veículos em cada situação, dado o novo fluxo, e considerando a princípio que a velocidade seria a mesma que aquela observada com o fluxo original de veículos. Este pedaço do algoritmo, de fato, se assemelha ao algoritmo executado no objetivo 3, de se estimar a densidade de veículos. A diferença é que aqui os valores de a e b , que são as parcelas do numerador que representam o tempo dispendido por cada modo de transporte, se alternariam entre valores nulos para cada uma das situações: quando a situação envolver apenas viagens de carro, $b=0$, e quando o contrário, $a=0$. Tendo em mãos os novos valores de densidade, que nesse primeiro caso será aumentada ou diminuída na mesma proporção da variação do fluxo, uma vez que as velocidades

foram consideradas as mesmas, é possível atualizar os valores das velocidades a cada horário do dia. Este é o segundo passo do algoritmo. A partir daí, os primeiro e segundo passos se alternam em execução, até que seja considerado que houve convergência das velocidades estimadas entre duas iterações consecutivas.

É preciso ter em mente que, com uma maior densidade, as velocidades serão menores. E com menores velocidades, as densidades serão ainda maiores, e assim por diante. É esperado, contudo, que haja convergência dos valores da velocidade, e para isto é necessário que os valores de densidade e de velocidade aumentem cada vez menos, a cada passo do algoritmo. Caso não houvesse convergência, outro modelo macroscópico, dentre os ajustados no objetivo anterior, poderia ser testado e todo o processo repetido, até que houvesse convergência dos resultados.

Para se chegar à solução analítica ($q=ku$), primeiramente é preciso considerar que segundo o modelo macroscópico do objetivo específico 4 a velocidade é uma função da densidade. Assim, é possível reescrever o fluxo apenas como função quadrática da densidade ($q=f(k)$). Como é o fluxo que está definido como função da densidade, e não o contrário, para cada valor de fluxo, pode existir mais de um – de fato 2 – valor de densidade que atende à solução. Entretanto, apenas um desses valores da densidade foi considerado viável. Por exemplo, no caso da situação de apenas carros nas ruas, o fluxo de veículos iria aumentar em relação à pesquisa OD 2012 e, portanto, foi considerada apenas a solução que gerou um aumento maior ainda da densidade, uma vez que a velocidade neste caso diminuiria, e o fluxo deve ser o produto entre a velocidade e a densidade. No caso de se ter apenas ônibus nas ruas, por outro lado, o fluxo de veículos (carros equivalentes) diminuiria, fazendo com que se considere a solução que diminua a densidade ainda mais, já que os ônibus trafegariam em maior velocidade que atualmente (desde que não trafegassem todos pelas mesmas vias, como é o caso do BRT).

Contudo, ainda se tornou preciso resolver um problema em relação à diferença entre o fluxo médio de uma rua (modelo macroscópico) e o fluxo médio de uma Regional (calculado pela etapa anterior). A equação do modelo macroscópico do objetivo específico 4 descreve a velocidade média (como função da densidade média) das ruas de uma mesma UMM, e seu produto com a própria densidade representará o fluxo do mesmo local e horário. Contudo, quando se considera o fluxo de viajantes de uma determinada Regional, se considera o número de veículos que entraram (ou saíram) dela no período em questão, e isto é bastante diferente dos valores médios de cada rua. De fato, como cada veículo passa por um número diferente de

ruas em cada Regional, seria preciso contar este número médio de ruas percorridas, e então o fluxo total da Regional, calculado na etapa anterior, deveria ser dividido por este número médio, para se chegar ao fluxo médio por rua. Este valor seria então ajustado à equação $q=ku$, ou como já foi explicado, $q=f(k)$, e seria possível prever um valor da densidade associado a tal fluxo. Com este valor de densidade, seria possível prever a respectiva velocidade, uma vez que a velocidade também é uma função da densidade ($u=f(k)$).

Uma outra forma de se resolver este problema do fluxo, entretanto, foi utilizada. Em vez de se contar o número de ruas que os veículos percorrem em cada Regional e dividir o fluxo calculado pela etapa anterior por este valor, optou-se por utilizar a seguinte lógica: apenas foi necessário supor que o aumento proporcional do fluxo total na Regional seria observado na mesma proporção em todas as ruas. Assim, o fluxo médio de cada rua também aumentaria na mesma proporção. Por exemplo, se existe um fluxo médio de X veículos por rua associado à densidade observada na OD, e a etapa anterior indicou que deve haver um aumento de Y% do fluxo total de veículos na Regional no caso de todos utilizarem o carro, o fluxo médio em cada rua descrito pelo modelo macroscópico deve ser de $X(100+Y)/100$. Esta opção foi escolhida por ser considerada de maior facilidade de execução, uma vez que seu resultado estaria tão correto quanto o da opção anterior.

Este resultado analítico, entretanto, serviu apenas como uma validação do resultado obtido pela simulação, uma vez que tal solução não considera a dinâmica entre a localização do veículo e a hora do dia. Por exemplo, o aumento do fluxo se daria pelo aumento de viagens no momento da partida, e não necessariamente este mesmo aumento seria observado em todas as regionais e em todas horas do dia. Em outras palavras, se a primeira etapa indicar que o número de viagens de carro deve ser superior em 50% ao número atual, provavelmente, o aumento do fluxo de veículos em cada Regional e em cada hora do dia seria um pouco diferente deste valor, podendo ser inferior ou superior a 50%, já que alguns veículos podem passar a concluir a sua viagem em uma faixa horária diferente da usada anteriormente, quando haveria menos veículos nas ruas e as velocidades eram maiores. Por isto, a solução analítica é apenas aproximada, servindo apenas como uma confirmação do resultado da simulação.

Por último, na terceira etapa, foi preciso somar o tempo gasto por cada pessoa em cada trecho de via, considerando a velocidade estimada pela respectiva metodologia (segunda etapa) para os respectivos modos, faixa horária e Regional, sob o novo fluxo de veículos. Por exemplo, um indivíduo começa a sua viagem de carro às 08:59 na UMM Pampulha. Com base no resultado

anterior, é possível saber a velocidade esperada em que o mesmo trafegaria e, portanto, o tempo gasto em cada trecho de via. Contudo, um minuto após a sua saída, seria preciso atualizar os valores da velocidade com a qual ele trafega, uma vez que já serão 09:00 e sua velocidade seria a velocidade média da Regional Pampulha para a faixa horária "Entre Picos da Manhã". Da mesma forma também seria necessário atualizar sua velocidade e consequentemente seu tempo gasto quando – e se – o mesmo passasse a trafegar em outra UMM. Com isto, o somatório do tempo gasto por este viajante em todas as vias seria o seu tempo estimado de viagem. Isto foi feito com todos os viajantes e o tempo médio do trajeto foi calculado como a média destes valores.

Estas etapas acima detalham como foi o cálculo dos tempos médios de trajeto, tanto para motoristas e caronas quanto para passageiros de ônibus. O objetivo, entretanto, é comparar os tempos de viagem, que podem englobar mais de um trajeto. Basicamente, consiste o cálculo em somar os tempos de trajetos contidos em uma mesma viagem. Os detalhes desta soma, todavia, estão apresentados diretamente na seção 4.5, de resultados. Entre os resultados, além disso, também são apresentados os resultados do tempo médio estimado para o caso atual, segundo a pesquisa OD 2012. Isto é, para efeito de validação da metodologia, foram calculados o tempo médio de viagens de ônibus e o de carro segundo o fluxo de veículos apresentado na pesquisa OD 2012.

3.5 Pressupostos

Todas as análises realizadas por cada objetivo específico possuem, é claro, algum pressuposto específico. Já outros pressupostos são necessários a todo o trabalho. Por exemplo, é preciso assumir que a pesquisa OD é uma amostra não viciada das viagens em dias úteis em Belo Horizonte. Isto é, é preciso considerar que os problemas com a coleta de dados, listados no Relatório da Pesquisa, não enviesaram significativamente a amostra. Por exemplo, um dos principais problemas relatados no Anexo VI do relatório (SEGEM e ADRMBH, 2013) foi o seguinte:

“O não alcance da amostragem prevista para essa AH se deve ao fato de haverem muitos estabelecimentos comerciais na AH, ao alto índice de recusa dos moradores e à dificuldade de contatar aqueles que residem em prédios. Equipes de "pente-fino" retornaram à AH em datas e turnos diferentes, tentaram esgotar as possibilidades de entrevistar o morador sorteado e de substituir por outro domicílio, e ainda assim não conseguiram alcançar a amostra prevista.”

Este problema foi apontado como causa do não atingimento da amostra planejada em 39 Áreas Homogêneas da Regional Centro-Sul, de um total de 83 AHs da região. Ou seja, a coleta da amostra não atingiu o esperado em 47% da região. Mesmo que esta baixa representação da região tenha sido corrigida com o aumento do fator de expansão de cada entrevistado, ainda assim não é possível afirmar que não tenha havido viés de seleção neste caso. Por outro lado, não é possível saber exatamente a forma ou sentido deste viés, por exemplo, se a proporção de usuários de ônibus entre os entrevistados da Regional Centro-Sul é maior ou menor que a proporção de usuários de ônibus entre os não entrevistados da mesma região. Como não é possível responder a esta pergunta, não é possível corrigir tal viés, e como a pesquisa OD é a única base de dados probabilística⁷ do município que se possui, resolveu-se por assumir que a amostra é não viciada.

A suposição mais importante deste trabalho é, contudo, a respeito da escolha modal e a avaliação de sua função *utilidade*. É preciso supor que a escolha do modo de transporte, bem como a avaliação da sua utilidade, se dá apenas pelo atributo do tempo de viagem, e não pelos demais atributos do modo (custo, acessibilidade, status, segurança e conforto, por exemplo), do viajante (renda, posse de veículo e posição social, por exemplo) e da viagem (distância, motivo e horário, por exemplo) (BRUTON, 1970). Isto é, para que a conclusão com relação à ocorrência ou não da tragédia dos bens comuns na mobilidade possa ser atingida, é preciso que o critério da função *utilidade* seja o mesmo tanto para cada indivíduo em tomar sua decisão quanto para se avaliar o resultado final do *jogo*. A *utilidade* aqui assumida é, portanto, apenas o tempo de viagem.

Estes pressupostos acima são os pressupostos gerais do trabalho. Já os pressupostos específicos de cada um dos outros objetivos específicos estão apresentados nas seções a seguir. Conforme já foi dito na Introdução, os objetivos específicos estão ordenados em ordem de execução, ou seja, cada objetivo utiliza os resultados obtidos no anterior. Desse modo, fica subentendido que cada objetivo específico possui o pressuposto de que a execução do objetivo anterior do qual ele depende obteve um resultado satisfatório.

⁷ Outras pesquisas, como a do Observatório da Mobilidade Urbana de Belo Horizonte (BHTRANS, 2016), não possuem o caráter probabilístico da pesquisa Origem e Destino. Com a OD é possível, por meio do fator de expansão, saber o peso que cada observação da amostra possui na população e desta forma construir, pelo menos em tese, uma estatística não viciada de toda a população. Estas outras pesquisas são autodeclaradas, não possuindo esta qualidade.

3.5.1 Pressupostos para a Roteirização

Para a roteirização foi necessário também pressupor que a distribuição das ruas de origem e de destino dos trajetos de carro é uniformemente aleatória dentro das AHs de origem e de destino. No caso do ônibus, os pontos de ônibus são os pontos das linhas informadas que se encontram em distância euclidiana mais próxima das ruas distribuídas aleatoriamente dentro das AHs de origem e destino. Também foi necessário considerar que os motoristas de carro escolhem suas rotas pelo critério do menor tempo, o que nem sempre é verdade, já que outros fatores, sejam eles objetivos, como a distância, ou subjetivos, como a paisagem, por exemplo, podem influenciar a escolha.

Foi considerado que a velocidade – a priori, apenas para a roteirização – de todas as ruas é 40 km/h, das avenidas, 60km/h e das rodovias, 80km/h (valores semelhantes aos propostos pelo Código de Trânsito Brasileiro de 1997). Assim, mesmo que as velocidades médias reais sejam bem inferiores a estes valores, há o pressuposto de que ao menos proporcionalmente as velocidades sigam esta hierarquia, ou seja, a velocidade nas ruas seja cerca da metade da velocidade nas rodovias, e a das avenidas seja 50% superior à velocidade das ruas. Como estes valores só foram usados para estimar o caminho que cada carro percorreu, é como se o pressuposto fosse de que esta proporção ocorresse pelo menos na cabeça dos motoristas, mesmo que não fosse a relação real entre as velocidades. Desde que os motoristas acreditem que a velocidade nas rodovias seja o dobro da velocidade nas ruas, o mesmo escolherá passar por um trecho de rodovia de até o dobro de comprimento, que pelo trecho de ruas. Em suma, este foi o pressuposto utilizado na roteirização dos automóveis.

Diferentemente do pressuposto da roteirização dos carros, os pressupostos da roteirização dos usuários de ônibus são mais simples de explicar. Basta ser aceito que o cruzamento da base de dados contendo a localização dos pontos de ônibus, em forma de tabela, com a malha viária em formato vetorizado; bem como a construção do itinerário a partir da sequência desses pontos, tenham sido exitosos. Entretanto, a construção do itinerário foi considerada menos exitosa que a localização dos pontos de ônibus, conforme será demonstrado no próximo capítulo.

3.5.2 Pressupostos para a Estimação da velocidade média

Foi assumido que o tempo gasto (informado na OD) é a soma do tempo gasto em cada trecho de via, embora seja possível que os usuários de automóvel, por exemplo, tenham incluído o tempo gasto para retirar o carro da garagem ou para estacionar dentro do tempo do trajeto. Isto posto, seria necessário incluir um termo (intercepto) na equação da regressão. O problema é

que no caso dos usuários de ônibus, isto não faz sentido. Em virtude de se desejar utilizar o mesmo modelo para ambos os modos, optou-se por assumir que o tempo é a soma dos tempos em cada via. De qualquer forma, foram testados também modelos com intercepto, a fim de garantir o ajuste de ao menos um modelo não viciado. Além disso, o tempo gasto foi estimado como sendo a soma dos tempos médios gastos – entre todos os outros usuários do mesmo modo – em cada trecho de vias por todos os veículos que passaram por tais vias na mesma faixa horária. Com isto, assume-se que há homogeneidade da velocidade média de uma rua durante uma mesma faixa horária. De fato, como nem todos os motoristas dirigem à mesma velocidade, as diferenças entre eles entram como resíduos da regressão, ou como erros não explicados pelo modelo.

Em relação às faixas horárias, também há outra importante suposição feita neste trabalho. Como uma mesma viagem pode começar em uma faixa horária e terminar em outra, e para cada faixa horária foi ajustado um modelo de regressão específico, foi preciso definir apenas uma faixa horária para cada trajeto. Este critério para definição da faixa horária foi o horário mediano entre o início e o fim do trajeto. Por exemplo, se um trajeto se iniciou às 08:30 e terminou às 09:10, o horário mediano do mesmo foi 08:50. Logo, tal trajeto consta como observação da regressão da faixa horária da "Faixa de Pico da Manhã" (05:00 – 09:00).

Por último, também se assume que há homogeneidade de velocidade média para vias próximas geograficamente, como por exemplo, de uma mesma Regional, ou do mesmo tipo, como avenida, conversão, ruas com pouco ou muito tráfego, dependendo do modelo adotado. Estas suposições de homogeneidade, tanto a geográfica quanto a horária, têm como objetivo aumentar a robustez das estimativas, já que desse modo o número de casos utilizados para o cálculo da velocidade média é maior do que quando não há agregação.

3.5.3 Pressupostos para a Estimação da densidade média de veículos

Assim como foi feito com a velocidade, neste trabalho assumiu-se que a densidade de veículos é a mesma durante toda a faixa horária, e em todas as ruas agrupadas. Esta suposição de homogeneidade das densidades parece, à primeira vista, muito mais frágil que a de homogeneidade das velocidades, pois mesmo ruas vizinhas apresentam taxas de ocupação muito diferentes em um mesmo momento: pode-se encontrar trechos de via anteriores a um semáforo – com sinal vermelho – quase completamente ocupados enquanto um trecho posterior ao semáforo pode apresentar uma via completamente vazia. Neste caso, as densidades instantâneas destes trechos de via seriam completamente diferentes. Contudo, como a densidade

calculada aqui não é a instantânea, mas sim a densidade média ao longo de uma faixa horária, e supondo que os carros anteriores ao semáforo – ou oriundos de outra via no mesmo cruzamento –, na sequência do ciclo do semáforo, passariam pela via atualmente vazia, é mais fácil ver que a suposição de homogeneidade de densidades não é tão frágil assim.

Outro fator importante a ser lembrado, embora não seja um pressuposto em si, mas que gera outros, é que não foram consideradas as larguras ou número de faixas das vias no cálculo das densidades. Dessa forma, as densidades foram medidas em termos de veículos por km linear de via. A primeira consequência que isto gera é que os valores de densidade não são comparáveis entre diferentes agrupamentos de vias. A segunda, mas não menos importante, é que é preciso fazer outras suposições no momento da análise macroscópica. Por exemplo, os modelos de May e Keller e de Greenberg-Herman possuem em sua equação o valor da densidade de congestionamento (k_c), e com o cálculo da densidade feito acima, k_{con} pode assumir diferentes valores para cada Regional, dependendo do número médio de faixas de cada uma.

3.5.4 Pressupostos para a Análise macroscópica

Como nos objetivos anteriores foram feitas as suposições de homogeneidade das velocidades e das densidades, os gráficos de densidade-velocidade de todas os trechos de via de uma mesma Regional e num mesmo horário se tornam idênticos. Com isto, em vez de se ajustar um modelo macroscópico para cada trecho de via, como de fato tais modelos foram originalmente construídos, pode-se construir um único modelo que serve para todas as vias daquela Regional naquele horário. Pode parecer que se está assumindo que os modelos macroscópicos, modelos que em suas formulações se aplicam à movimentação em uma única via separadamente, servem também para a movimentação média em um grupo de vias. Mas na verdade, como foi dito acima, esta não é a suposição feita aqui. As suposições foram feitas anteriormente, a respeito da homogeneidade das densidades e das velocidades. Se elas forem verdadeiras, os modelos macroscópicos dessas vias seriam idênticos e, portanto, só precisariam ser ajustados uma única vez, e já valeriam para todas as vias.

Em relação à densidade linear de veículos discutida na seção anterior, os valores utilizados foram os obtidos por Greenberg (1959), de 227 veículos por faixa por milha. Estes valores foram transformados em veículos por quilômetro por faixa, e em seguida foram considerados prováveis valores médios do número de faixas das vias de cada Regional. Na Regional "Centro" foi assumido, diferentemente das demais, o valor médio de 2,5 faixas por via. Nas demais regionais foi utilizado o valor de 1,5. Estes valores, que foram deduzidos hipoteticamente, a

partir da experiência do autor, e não por evidências científicas, foram, por sua vez, pressupostos do modelo, da mesma forma que o valor de 227 veículos por milha também foi um pressuposto. Com isto, os valores máximos da densidade de congestionamento (densidade máxima), ou seja, da densidade de quando os carros estão todos parados e praticamente encostados uns nos outros, foram de $k_c = 353$ ($2,5 \cdot 227 / 1609 = 353$) para a Regional Centro e $k_c = 212$ ($1,5 \cdot 227 / 1609$) para as demais.

3.5.5 Pressupostos para a Comparação dos tempos

Antes de mais, é necessário aceitar que uma extrapolação das densidades – para o caso B, em que todos usam o carro – utilizadas no ajuste dos modelos macroscópicos, não afeta o resultado da previsão. Em análise de regressão, por exemplo, é sabido que os intervalos de confiança para as previsões só se aplicam a valores da variável independente que não extrapolam os observados no ajuste do modelo (MONTGOMERY e PECK, 1992). Assim, sendo a densidade a variável independente no modelo macroscópico adotado no presente trabalho, apesar de não fazer parte do objetivo construir intervalos de confiança para os tempos/velocidades previstos (variável dependente), fica evidente que o próprio valor previsto do tempo é menos confiável quanto maior for a extrapolação da densidade na situação hipotética futura. Contudo, em análise de regressão, o formato da curva de regressão em geral é escolhido apenas empiricamente. Já o formato da curva do modelo macroscópico não é um formato que foi escolhido meramente para se adequar aos dados (densidade \times velocidade). A forma desta relação, independentemente do modelo escolhido; é uma relação teórica já comprovada empiricamente com dados de movimentação dos veículos. Com isto, é provável que a curva possua o mesmo comportamento para valores extrapolados da densidade.

Outro pressuposto importante é em relação ao número de viagens em cada situação hipotética. Primeiro, que as proporções de viajantes de carona entre os novos usuários de automóvel (atuais passageiros de ônibus) seria a mesma que a proporção atual de caronas entre os usuários do carro. Embora um fator que provavelmente influencia o número de viagens de carona seja a renda do cidadão, e esta está associada ao modo atual de transporte, isto não está sendo levado em conta neste trabalho.

Em segundo lugar, no caso de viagens apenas de ônibus, é necessário supor que a taxa de ocupação dos ônibus se manteria a mesma, e para isto, o número de viagens de ônibus deveria aumentar na mesma proporção que os novos usuários de ônibus (todos os atuais de automóvel, motoristas ou não) representam em relação aos atuais passageiros de ônibus. Na realidade, é

possível que sob uma menor densidade de veículos nas vias (desde que os ônibus não utilizassem todas as mesmas vias, como no caso do BRT), a velocidade dos ônibus seja maior, possibilitando que um mesmo número de veículos realizasse um número maior de viagens. Com isto, seria possível, com um mesmo valor da passagem, que o número de viagens fosse ainda maior que o número aqui proposto. Este cálculo, que levaria em conta os custos fixos e variáveis do transporte por ônibus, todavia, seria demasiado complexo e fugiria do escopo deste trabalho. Logo, optou-se por não considerar este fato e simplesmente considerar que a taxa de ocupação seria a mesma, e não o preço da passagem. Considerando a mesma taxa de ocupação, este preço provavelmente seria menor, devido, por exemplo, a um menor consumo de combustível e a uma maior velocidade média dos veículos.

Também é preciso assumir que as características das vias (geométricas ou legislativas), dos automóveis (capacidades tecnológicas) e dos ônibus (capacidades tecnológicas e itinerários), se manteriam as mesmas para os casos das simulações do segundo e terceiro casos, em um futuro próximo onde todos usariam o carro ou o ônibus. Por certo, o próprio acontecer de todos os usuários usarem o mesmo modo já é bastante improvável. Assim sendo, não parece ser um problema presumir que as vias continuariam as mesmas em uma situação hipotética futura pouco provável, que é a situação em que todos os cidadãos optassem pelo mesmo modo.

3.6 Delimitação

O tema central deste trabalho é a mobilidade dos cidadãos em uma cidade. Contudo, conforme já descrito na seção 3.2, a população alvo da pesquisa é composta pelos habitantes da cidade de Belo Horizonte do ano de 2012. Além disso, todo o trabalho focou apenas nos principais modos motorizados, que são o ônibus e o carro, segundo a pesquisa OD de 2012. Com isto, os viajantes não motorizados, além dos moradores não viajantes, também não fazem parte da população alvo. Por último, como a pesquisa OD só diz respeito às viagens nos dias de semana, o resultado também só pode ser considerado para viagens realizadas em tais dias. Por conseguinte, todas as conclusões aqui tiradas dizem respeito apenas aos usuários de transporte motorizado de Belo Horizonte de 2012, durante os dias de semana, e não em relação a todos os moradores da cidade, e ao trânsito dos finais de semana.

Em relação ao ano de 2012, entretanto, acredita-se que as conclusões possam ser extrapoladas para um futuro próximo, desde que os pressupostos de estabilidade das características das vias e dos veículos, listadas no último parágrafo da seção 3.5.5, sejam satisfeitos. Da mesma forma, como os moradores que utilizam o transporte motorizado são a maioria, assim como a maioria

das viagens são realizadas em dias úteis, a conclusão do trabalho diz respeito à maioria dos moradores e viagens da cidade.

4 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

Os resultados serão apresentados na seguinte ordem. Antes de ser apresentados os resultados dos objetivos específicos, será feita uma análise descritiva das pesquisas OD de 2002 e de 2012, em que fica claro o aumento da utilização dos automóveis em Belo Horizonte, concomitantemente ao aumento do tempo de viagem. Nesta análise, também são feitas caracterizações das viagens por cada modo, como tempo médio e localização geográfica, por exemplo.

Em seguida, serão apresentados os resultados da metodologia proposta, seguindo os objetivos específicos: 1) realizar a roteirização de todos trajetos de ônibus e de carro presentes na pesquisa OD da RMBH de 2012; 2) ajustar e escolher um modelo de regressão linear para estimar a velocidade média de ônibus e de carro de cada trecho de via em cada faixa horária; 3) estimar a densidade de veículos média de cada trecho de via em cada faixa horária; 4) ajustar e escolher um modelo macroscópico de tráfego de ônibus e de carro ao gráfico de densidade-velocidade para cada trecho de rua; 5) comparar os tempos médios de viagem dos casos em que a distribuição modal é idêntica à atual, em que todos usam o ônibus e em que todos usam o automóvel.

Conforme descrito anteriormente, os dados utilizados nesta seção são os dados da Pesquisa Domiciliar, integrante da Pesquisa de Origem e Destino da RMBH de 2012 (SEGEM e ADRMBH, 2013). Uma das principais estatísticas descritivas extraídas das pesquisas de 2002 e 2012 é a evolução da frota e da taxa de motorização.

Tabela 4 – Comparação de população, frota e motorização entre as pesquisas OD de 2002 e 2012 e entre BH e RMBH.

Município/Região	2002			2012		
	População Estimada	Frota	Taxa de Motorização	População Estimada	Frota	Taxa de Motorização
Belo Horizonte	2.271.255	751.085	33%	2.395.785	1.519.438	63%
RMBH	4.517.559	1.089.924	24%	4.962.820	2.450.791	49%

Fonte: elaborado pelo autor com dados das pesquisas OD RMBH de 2002 e 2012.

A Tabela 4 deixa claro, sem sombra de dúvidas, que a capital, Belo Horizonte, bem como a região metropolitana na qual ela está inserida, passou por um processo de motorização no período de 10 anos entre as pesquisas. A taxa de motorização praticamente dobrou em Belo Horizonte e mais que dobrou na RMBH. No mesmo período, também houve grande alteração

da divisão modal e do tempo de viagem na região metropolitana, como pode ser visto na Tabela 5.

Tabela 5 - Comparação da divisão modal e tempo de viagem entre as pesquisas OD de 2002 e 2012 e entre modos.

Modo de transporte	Proporção de viagens		Tempo Médio (hh:mm)	
	2002	2012	2002	2012
Coletivo	44,2%	31,4%	00:46	01:02
Individual motorizado	18,2%	30,7%	00:21	00:32
Motorizado	62,4%	62,1%	00:38	00:47
Não motorizado	37,6%	37,9%	-	00:17

Fonte: elaborado pelo autor com dados das pesquisas OD RMBH de 2002 e 2012.

Cardoso (2007) observou que entre as pesquisas OD de 1991 e 2002 houve uma migração do transporte público para o transporte não motorizado na RMBH. A Tabela 5 mostra, contudo, que entre 2002 e 2012, não obstante a proporção de viagens motorizadas ter se mantido constante, houve uma clara migração do transporte coletivo para o individual na região. Concomitantemente a esse aumento da participação do automóvel na divisão modal, o tempo médio de viagem aumentou entre 2002 e 2012. A despeito da maior velocidade atingida pelo automóvel em relação ao transporte coletivo, provavelmente houve um aumento do congestionamento das vias, causando o aumento do tempo de viagem, tanto para os carros quanto para os ônibus. Como já foi dito na Introdução, isto por si só não comprova a ocorrência da *tragédia dos bens comuns*, uma vez que no mesmo período o número de viagens aumentou consideravelmente. Isto é, se o número total de viagens fosse o mesmo, e considerando que a distância média viajada também não tivesse se alterado, um aumento da utilização do automóvel, que é marginalmente mais eficaz que o ônibus, associado a um aumento do tempo de viagem, praticamente comprovaria a *tragédia*. Contudo, como de fato o número de viagens aumentou, não é possível saber se este tempo aumentou porque a utilização do carro também aumentou ou se foi por causa do aumento do número total de viagens, ou se pelas duas coisas. As seções a seguir tentam responder tal pergunta da maneira correta.

4.1 Roteirização

Apesar do objetivo principal da roteirização ser a preparação do terreno (construção da matriz X de distâncias percorridas) para a estimação das velocidades médias dos ônibus e dos carros, ela torna também possível calcular estatísticas descritivas diferentes das calculadas nos relatórios da OD. A principal diferença é que com a roteirização foi possível construir a

estimativa da distância real percorrida (somando o comprimento das ruas utilizadas nas rotas), e não a distância em linha reta entre um ponto e outro.

Antes da execução do algoritmo de roteirização, é preciso selecionar os trajetos, por meio do filtro e da replicação pelo fator de expansão. Primeiro foi preciso filtrar apenas os trajetos que se iniciaram e terminaram no município de Belo Horizonte, cujo modo de transporte era “automóvel dirigindo” ou “ônibus coletivo urbano”. É preciso desconsiderar as viagens feitas “de carona” para que a mesma viagem não seja roteirizada duas vezes. Na execução do objetivo 5, quando deseja-se considerar o caso em que todos os usuários atuais de carro usariam o ônibus, é preciso contar os viajantes de carona, mas não nessa etapa de roteirização das viagens.

Em seguida, cada trajeto filtrado foi *reamostrado* (replicado) n vezes, sendo n o fator de expansão da observação. Quando se diz que um trajeto que foi *reamostrado*, significa que as variáveis que o caracterizam foram *reamostradas* conjuntamente. E estas variáveis são: *modo*, *AH de origem*, *AH de destino*, *Horário de início* e *Horário final*. Assim, como a partir de uma mesma AH de origem, em cada roteirização, é sorteada aleatoriamente uma rua dentre as ruas inseridas em tal AH, mesmo que um trajeto tenha sido replicado, as rotas do mesmo trajeto serão diferentes umas das outras. Com isto reduz-se o risco da frequência de algumas ruas serem superestimadas na roteirização.

A filtragem de dados reduziu bastante o tamanho da amostra, mas a replicação dos dados o aumentou significativamente. A base de dados de trajetos da Pesquisa OD de 2012 é composta por 205.365 mil trajetos. Contudo, após aplicados os filtros, restaram 14.114 trajetos de carro e 15.128 de ônibus. A seleção dos trajetos de carro e de ônibus foi feita pela variável “meio de transporte” (TP_MEIO_TRANSPORTE), cujos valores 3 e 11 representam “automóvel dirigindo” e “ônibus coletivo urbano”. Por outro lado, após serem multiplicados pelos respectivos fatores de expansão, totalizaram 1.341.535 trajetos de carro (motoristas) e 1.577.483 de ônibus. Isto é, em média, cada motorista pesquisado representou 95 motoristas na população, e cada passageiro de ônibus da amostra representou 104 passageiros.

Após as etapas de filtro e expansão, a rota de cada trajeto de carro foi estimada no software R utilizando a função *shortest_paths* do pacote *igraph* (CSARDI e NEPUSZ, 2006), que utiliza o algoritmo de *Dijkstra* para a roteirização (WEST, 1996). De acordo com a explicação já feita na seção 3.4.1, foi considerado como custo de cada grafo o tempo estimado para percorrê-lo. Como *a priori* não se conhecia qualquer informação sobre o nível de congestionamento das vias e seu impacto na velocidade dos veículos, considerou-se que a velocidade das ruas seria de

40 km/h, das avenidas, de 60 km/h, e das rodovias, de 80 km/h. Para isto, dividiu-se o comprimento de cada via por 60, 80 ou 40, dependendo se a mesma era uma avenida, rodovia ou qualquer outro tipo de via, respectivamente.

A Figura 5 apresenta o resultado da roteirização de um único trajeto de carro, em azul, que começa em uma Área Homogênea da Regional (UMM) Pampulha, em verde, e termina em uma AH da Regional (UMM) Centro-Sul, em vermelho. As linhas na cor cinza representam a malha viária de Belo Horizonte, e em preto estão os limites das UMMs da cidade.

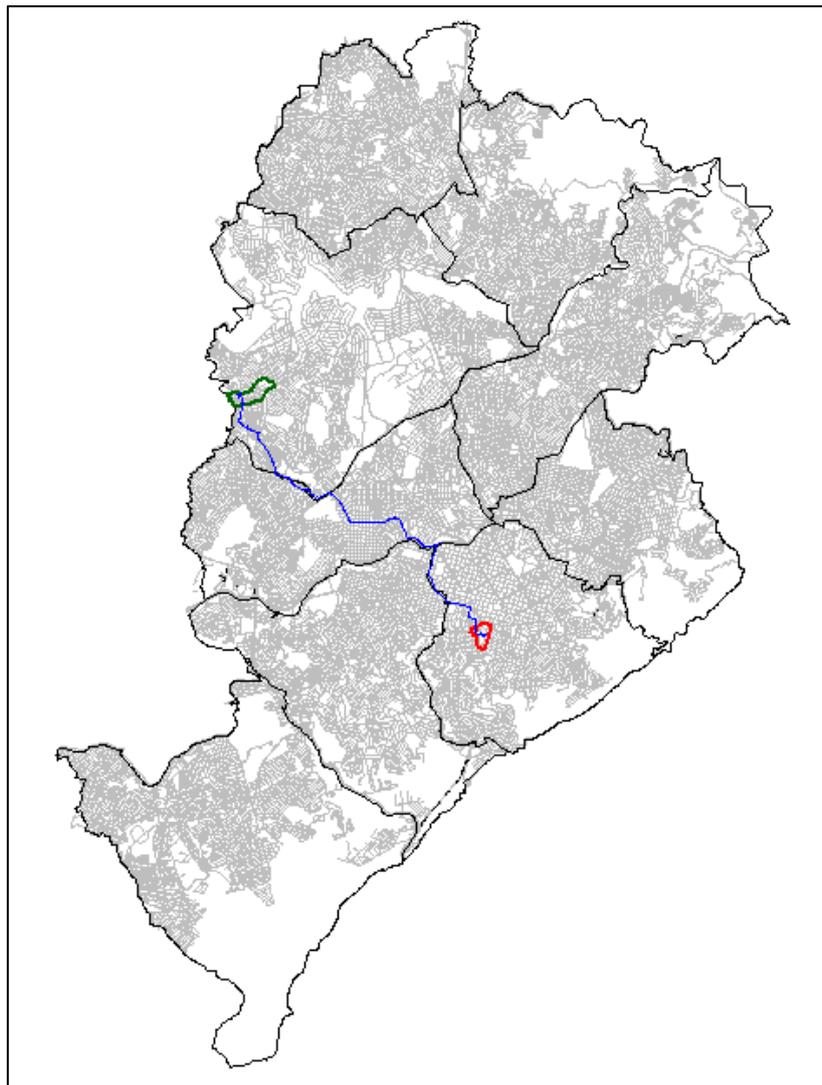


Figura 5 – Exemplo de rota de um trajeto de carro, entre a AH de origem (verde) e de destino (vermelho).

Fonte: elaborado pelo autor.

Mesmo tendo disso reduzido o risco da superestimação da frequência de algumas ruas em detrimento da subestimação em outras por meio do sorteio aleatório de ruas dentro das AH de origem e de destino, havia ainda o risco de que este viés ocorresse por outra causa. Por exemplo,

como provavelmente as velocidades nas vias não seguem estritamente esta relação de 40 km/h, 60 km/h e 80 km/h, era possível que a ocorrência de alguns destes tipos de vias na roteirização ficasse superestimada ou subestimada. No entanto, a Figura 6 mostra que aparentemente o fluxo de veículos, segundo a roteirização, seguiu o padrão esperado, em que as principais avenidas e rodovias da cidade apresentam maior número de viagens.

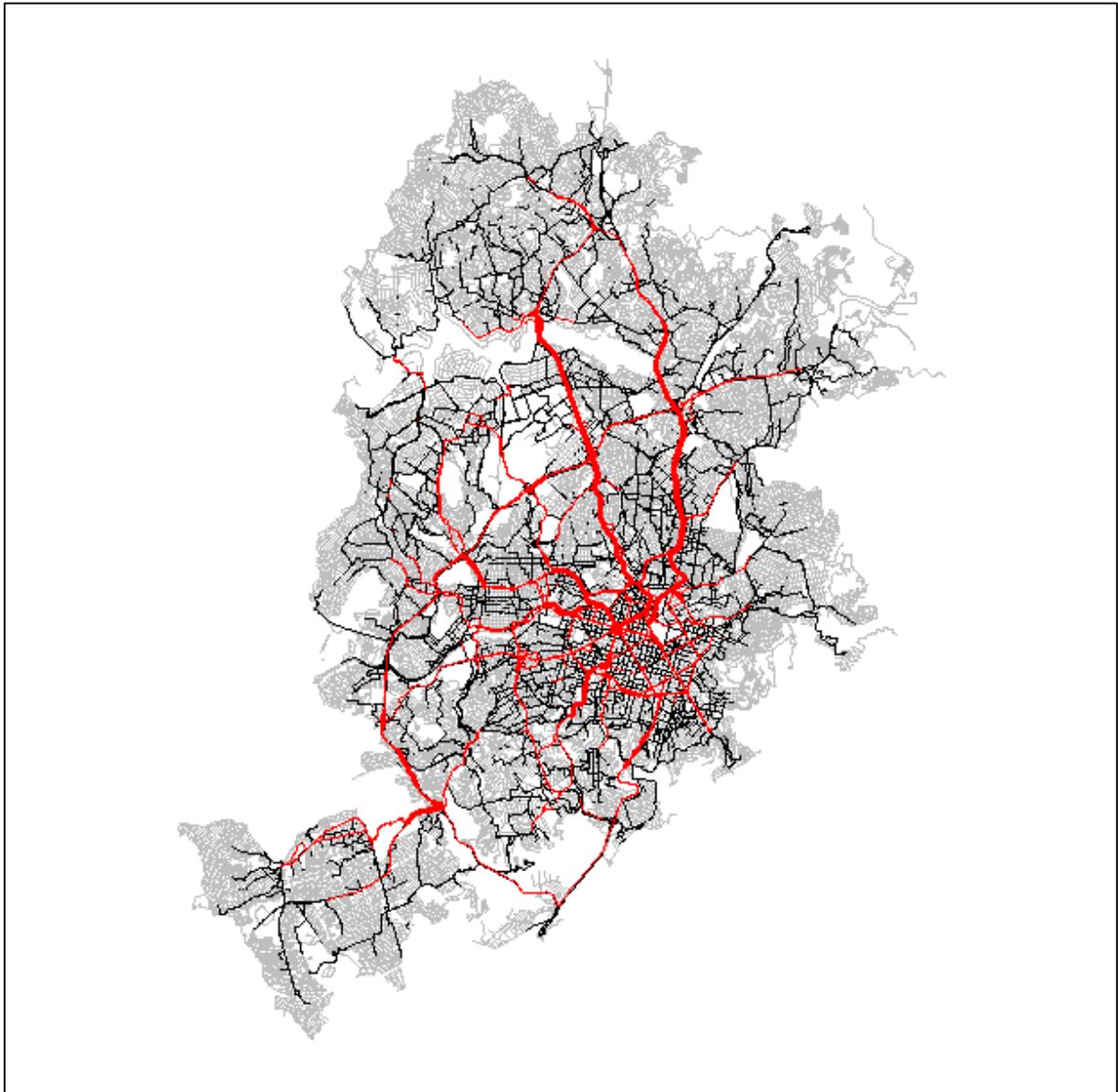


Figura 6 - Roteirização das viagens de carro, onde as linhas vermelhas e mais grossas representam maior fluxo de veículos.

Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 6 mostra que as principais vias foram as mais utilizadas; entretanto, é preciso também que mesmo as ruas pouco movimentadas tenham sido utilizadas. Para demonstrar isto, foram construídas as figuras a seguir, que mostram todas as rotas estimadas por faixa horária, mas

desta vez sem dar ênfase ao maior fluxo, como na figura anterior. A única exceção foi observada no horário da madrugada, onde o número de viagens foi tão pequeno que um grande número de ruas não apareceu na roteirização. Os outros horários, contudo, demonstraram que praticamente todas as ruas fizeram parte de ao menos uma rota no período.

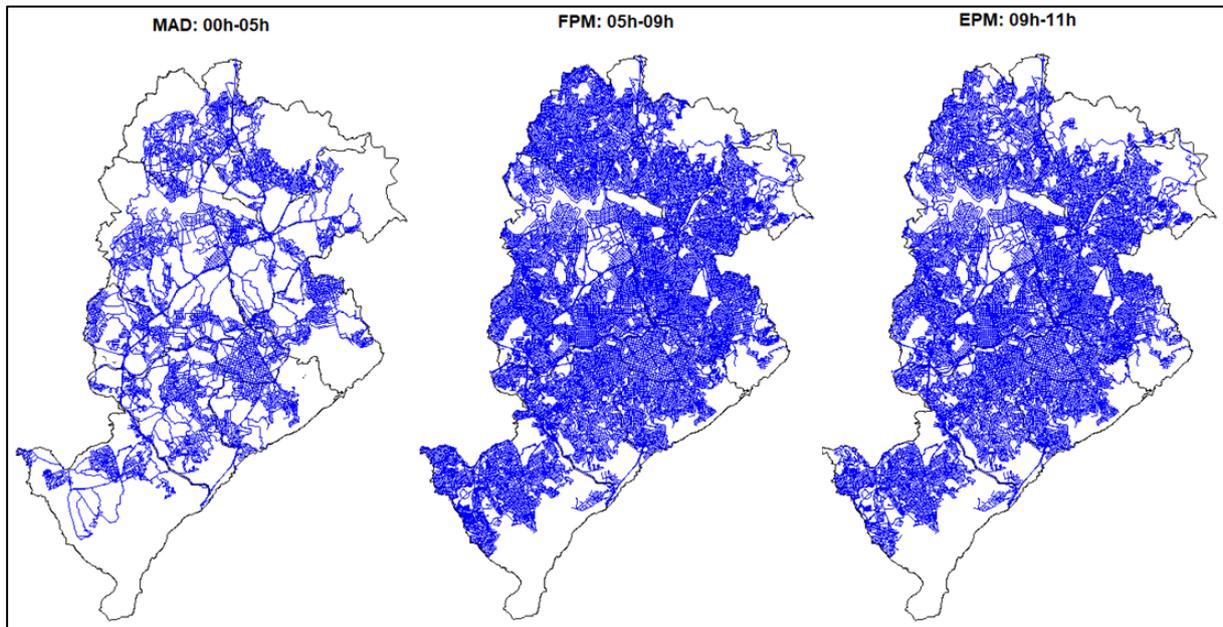


Figura 7 - Roteirização das viagens de carro nas faixas horárias Madrugada, Faixa de Pico da Manhã e Entre Picos da Manhã.

Fonte: elaborado pelo autor.

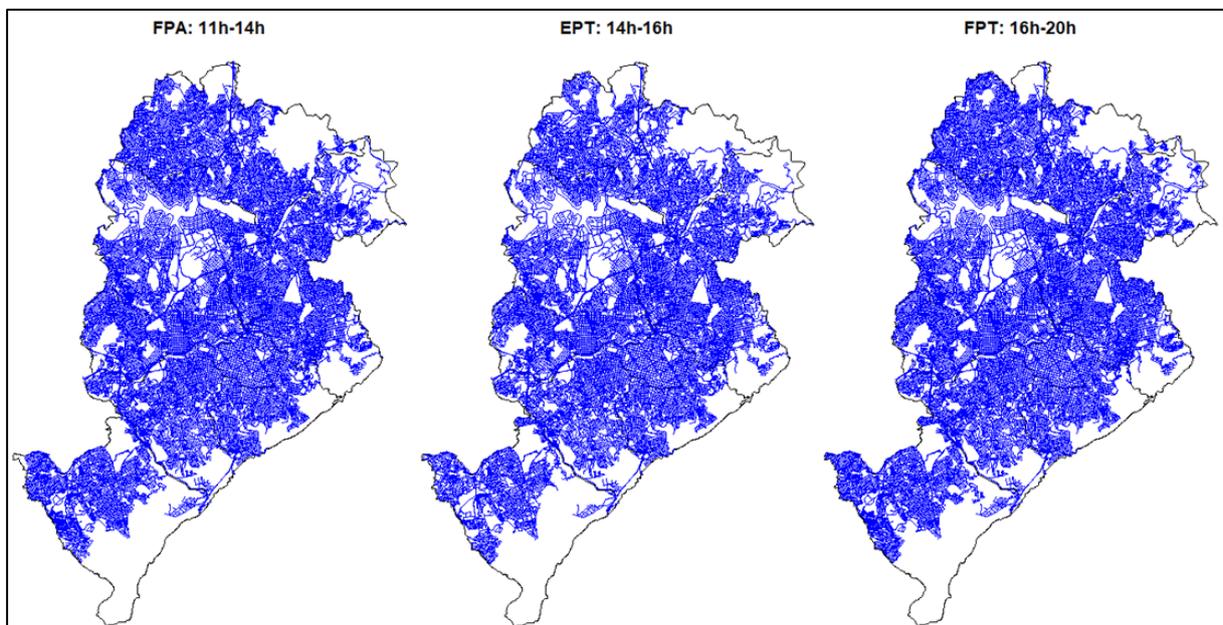


Figura 8 - Roteirização das viagens de carro nas faixas horárias Faixa de Pico do Almoço, Entre Picos da Tarde e Faixa de Pico da Tarde.

Fonte: elaborado pelo autor.

A faixa horária da Madrugada, representada pela primeira imagem à esquerda na Figura 7, mostrou que muitas vias geograficamente próximas não foram selecionadas pela roteirização no período. Mesmo que não seja de se esperar um grande fluxo pela madrugada, o fato de que várias ruas vizinhas não foram selecionadas indica um problema, provavelmente causado pelo baixo número de observações originais na base de dados para o horário. Entretanto, como a representatividade de tal faixa horária é baixa quando se a compara com o número total de trajetos, tal problema foi desconsiderado neste trabalho. As demais faixas horárias, representadas nas Figuras 7, 8, e 9, por outro lado, mostraram que quase todas as ruas foram percorridas por ao menos um trajeto no respectivo período.

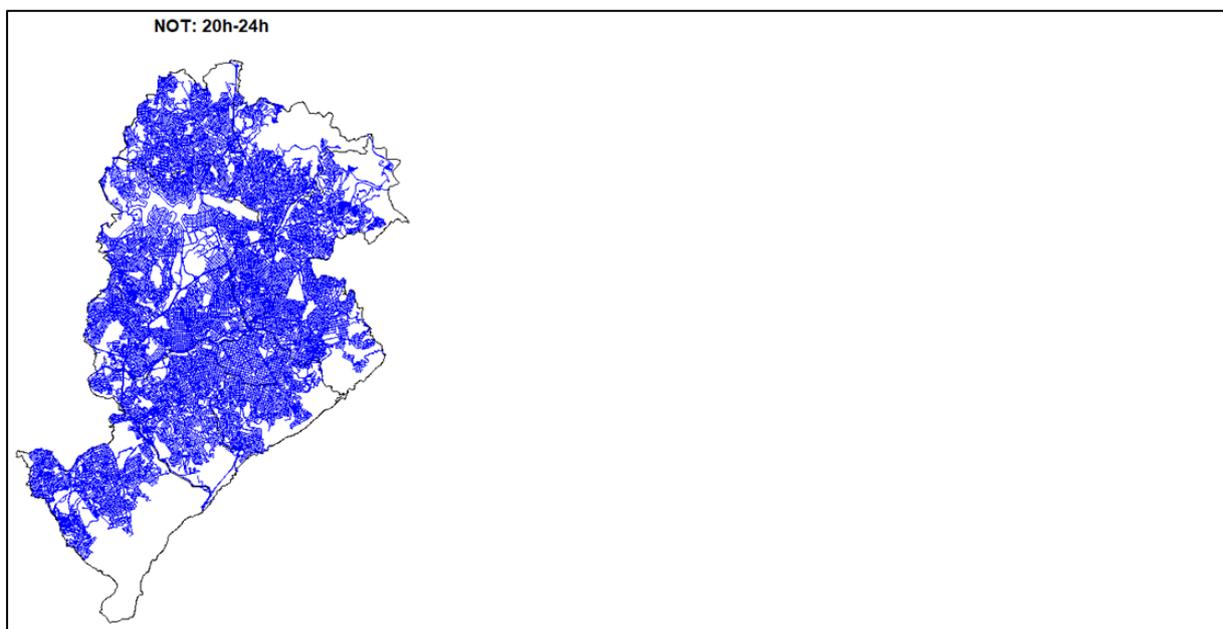


Figura 9 - Roteirização das viagens de carro na faixa horária Noturno.
Fonte: elaborado pelo autor.

No caso dos trajetos de ônibus, o problema não foi assim tão simples de resolver. Primeiramente, foi feita a roteirização dos itinerários das linhas de ônibus com os respectivos pontos, e em seguida estimados quais destes pontos seriam os pontos de origem e de destino do passageiro. Depois, a partir das AH de origem e destino, foi sorteada aleatoriamente uma via em cada uma destas AH e escolhidos como pontos de ônibus de origem e de destino os pontos mais próximos – em linha reta – a estas ruas. A rota do passageiro foi, portanto, um trecho da rota inteira da linha, sendo compreendida entre os pontos de ônibus de origem e de destino.

De acordo com o que foi explicado na seção 3.3.3, a roteirização dos itinerários (linhas) foi feita em partes, mais precisamente pela agregação das roteirizações entre dois pontos de ônibus consecutivos. O algoritmo para esta roteirização entre os dois pontos consecutivos foi o mesmo

utilizado na roteirização dos carros (*shortest_paths*). Todavia, não foi trivial encontrar os trechos de ruas onde se localizavam os pontos, pois foi preciso comparar os nomes das ruas nas duas bases de dados (malha viária e a planilha de itinerários), que nem sempre coincidiam. De qualquer forma, em geral, a rota aparentemente coincidiu com o itinerário real em quase todo o percurso, com exceção de alguns pequenos trechos, onde a rota estimada *percorreu* um caminho muito mais longo que o real. Quando se diz que a rota “aparentemente” coincidiu, se quer dizer que esta comparação foi feita apenas visualmente, e foi de maior proveito quando o autor conhecia o itinerário real da linha.

A razão pela qual alguns pequenos trechos ficaram mais longos do que deveriam, não está clara para o autor. Provavelmente o fato da malha viária ser direcional, ou seja, proibir a viagem em alguns sentidos, juntamente com a provável imprecisão da quadra exata de localização dos pontos⁸, influenciou este resultado ruim. Com isto, a rota de algumas linhas de ônibus apresentou esta imprecisão, fazendo com que a rota dos passageiros que utilizaram a linha relativa a essa imprecisão tivesse o mesmo problema. Apesar de este ser um problema possível de se resolver manualmente (corrigindo linha por linha), o grande número de linhas e sublinhas (696), contudo, dificultou a análise por completo de todas as rotas em tempo hábil. A Figura 10 apresenta as rotas de algumas linhas de ônibus onde pode ser observado que há algumas “rabiolas” irreais em alguns trechos (dentro dos círculos de cor marrom).

Apesar de que aparentemente a diferença entre a rota estimada e a rota real do itinerário seja pequena, não é possível saber o impacto disto na estimação das velocidades. Por exemplo, para passageiros com trajetos longos, praticamente não haveria diferença, mas isto não seria verdade para aqueles com trajetos pequenos que contenham justamente o trecho com problema de roteirização. Para estes passageiros, a superestimação da velocidade seria alta, já que a análise de regressão iria considerar que ele percorreu uma média distância em pouquíssimo tempo.

A Figura 11 exhibe todas as rotas de todas as 296 linhas de ônibus de BH em 2011 e suas 696 sublinhas, na qual, com um olhar cuidadoso, é possível observar alguns destes trechos “a mais” no itinerário. Pelo menos isso é o que se pode interpretar pelo fato de que os reais itinerários não cobrem tantas vias quanto estes itinerários exibidos em tal figura.

Assim, esta não confiabilidade das rotas de algumas linhas de ônibus acabou sugerindo que a roteirização das viagens de ônibus deveria ser feita de outra forma. Com isto, as rotas dos

⁸ Vide a explicação sobre o cruzamento dos nomes das ruas entre as duas bases de dados, e não pelos IDs das mesmas, que não eram os mesmos entre as duas bases.

passageiros foram também estimadas como sendo as rotas mais curtas entre os pontos de ônibus de origem e de destino de cada passageiro. Os pontos de ônibus de origem e de destino, por sua vez, foram estimados da mesma forma, como sendo os pontos (obtidos pelo itinerário) mais próximos dos trechos de rua sorteados aleatoriamente dentre os trechos das AHs de origem e de destino. Isto posto, as distâncias percorridas pelos usuários de ônibus ficariam subestimadas, ao contrário da superestimação com a roteirização pelo itinerário. Da mesma forma, as velocidades estimadas para cada trecho de rua ficariam subestimadas com a roteirização pela menor distância assim como as velocidades ficariam superestimadas pela roteirização pelo itinerário.

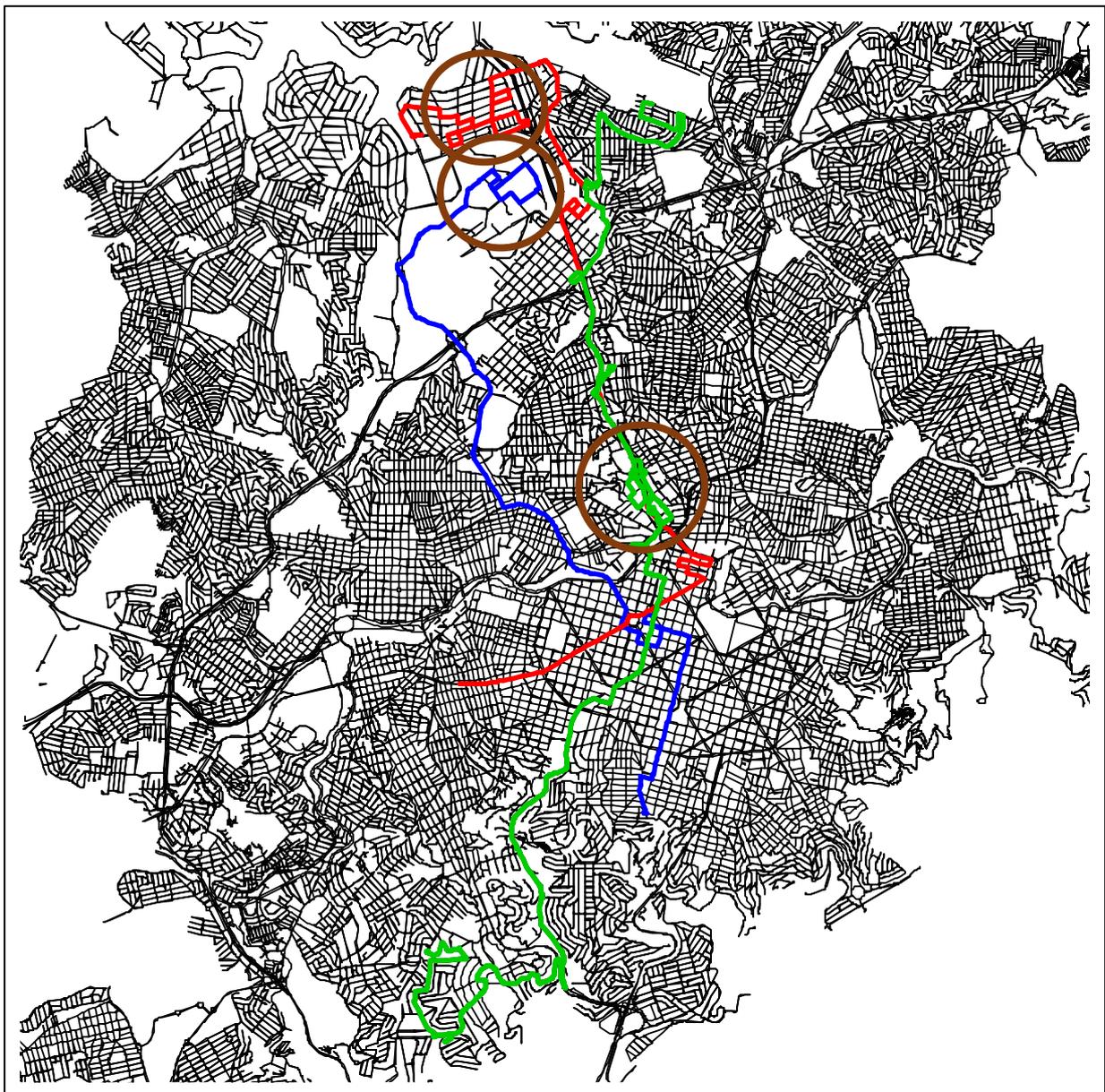


Figura 10 – Rota estimadas das linhas de ônibus 5102 (azul), 5201 (verde) e 5401 (vermelho) em 2011, com as respectivas “rabiolas” circuladas de marrom, utilizando a roteirização entre pontos de ônibus consecutivos segundo o itinerário obtido.

Fonte: elaborado pelo autor.

Com isto, haveria duas maneiras de se roteirizar os trajetos dos passageiros de ônibus que tornariam possível estimar as velocidades médias em cada via, sendo que cada maneira teria um viés (uma majorando a velocidade e outra minorando). O problema que inviabiliza a metodologia que utiliza a roteirização pela menor distância é que no momento de se estimar a densidade de veículos nas vias, não se pode utilizar os trajetos de cada passageiro, porque seria como se cada indivíduo viajasse em um ônibus separadamente. Desse modo, é necessário utilizar o quadro de horários e um itinerário único para cada viagem de ônibus. Com isto, optou-se pela roteirização pelo itinerário, como explicado nas seções 3.3.3 e 3.4.3.

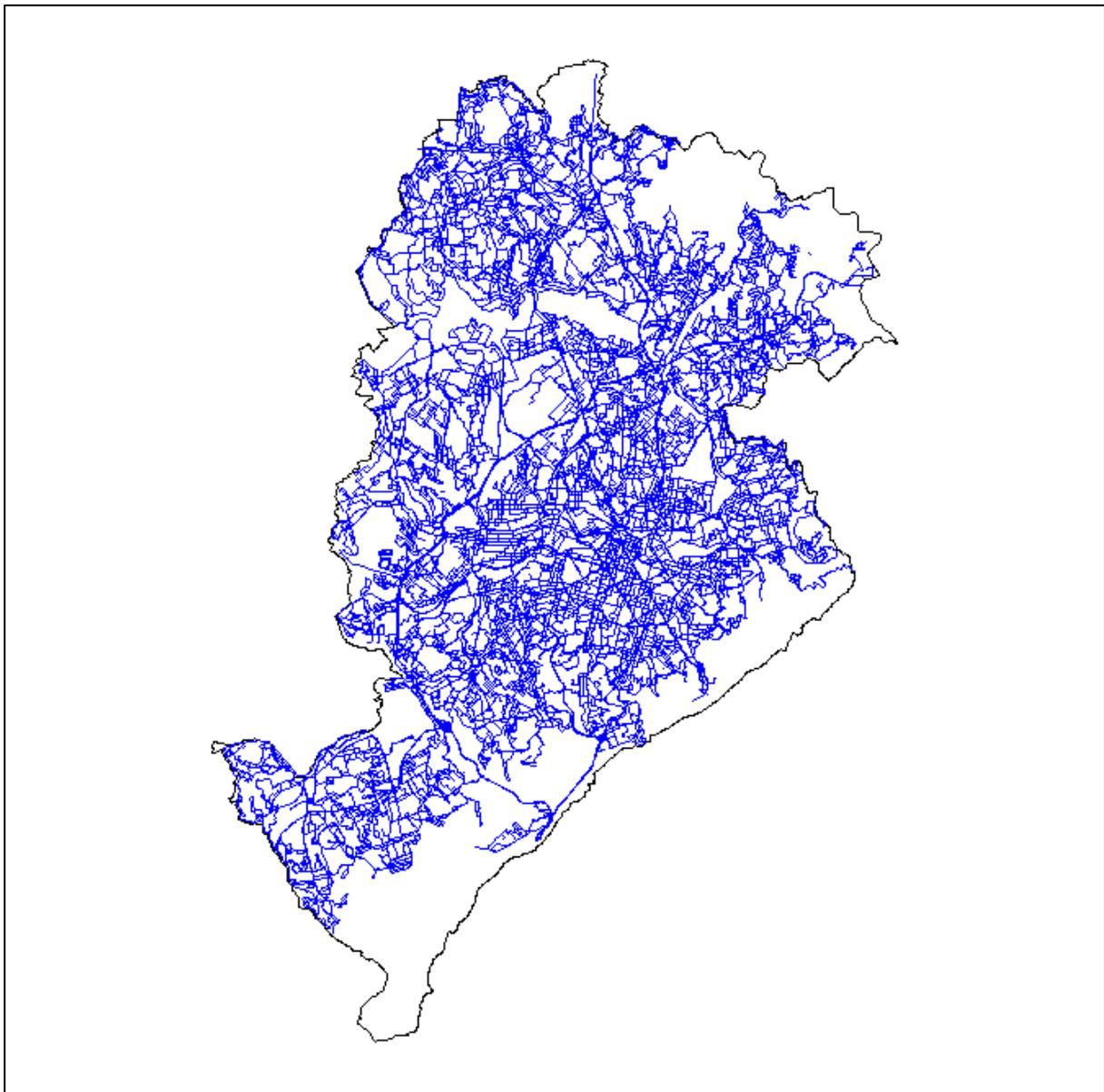


Figura 11 – Rota estimadas das 296 linhas e 696 sublinhas de ônibus de Belo Horizonte em 2011, utilizando a roteirização entre pontos de ônibus consecutivos segundo o itinerário obtido.
Fonte: elaborado pelo autor.

Apesar de aparentemente este cálculo da rota afetar de maneira significativa o resultado da simulação, não é o que de fato ocorre. Como foi dito acima, com esta metodologia, realmente a velocidade em cada trecho de via fica superestimada. Mas como o número de trechos de via utilizados pelo passageiro também fica superestimado, e o tempo final declarado do trajeto é o mesmo, uma subestimação anula a outra no ato da estimação do tempo de viagem/trajeto (tempo = distância / velocidade). O fato de que os modelos de regressão utilizados agrupem as vias por Regional também ajuda, uma vez que não faz diferença se a rota real passa por uma rua e a rota estimada passa pela rua vizinha. O resultado é o mesmo, já que ambas fazem parte da mesma Regional.

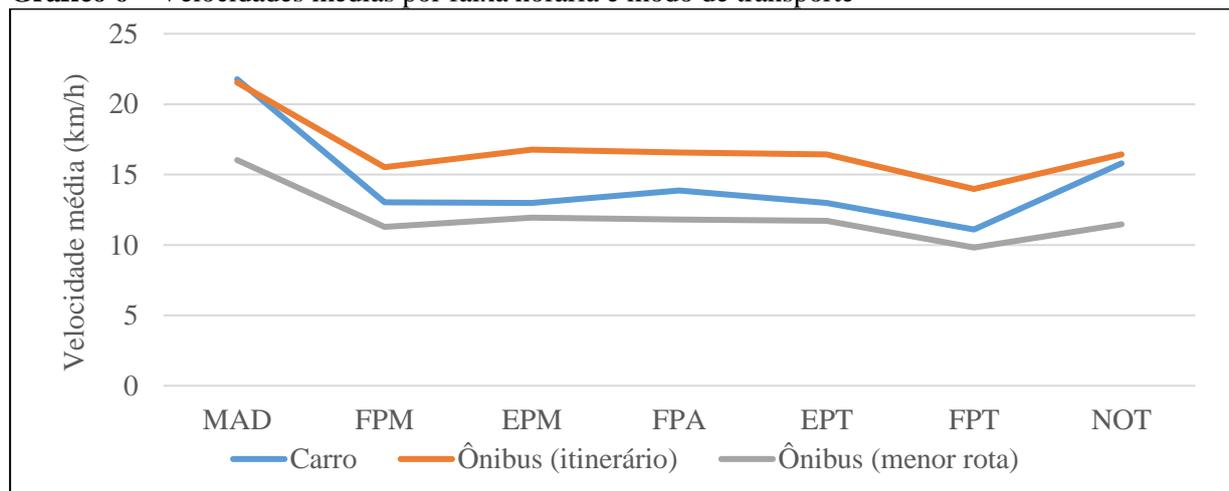
No caso do cálculo das densidades das vias, também não há problema algum. Como o denominador é constante (produto entre o comprimento das vias e a duração da faixa horária) e o numerador é a soma dos tempos gastos/estimados de cada trajeto, que não sofrem alteração alguma, a densidade estimada não é afetada. Sendo assim, a única diferença no modelo macroscópico é que o eixo Y (velocidade) fica em uma escala diferente, ou seja, com uma velocidade superior à real. O modelo então passa a prever também uma velocidade superior à real. Mas como o objetivo final do trabalho é estimar o tempo gasto, e não a velocidade, e o tempo é a razão entre a velocidade e a distância, o tempo estimado seria o mesmo, já que tanto a velocidade quanto a distância são superestimadas na mesma proporção. Assim sendo, pode-se assumir que não há problema em utilizar a roteirização que superestimou o comprimento dos trajetos das linhas de ônibus, bem como a rota percorrida pelos passageiros.

4.2 Estimação da velocidade média

Antes de ser apresentado o resultado da análise de regressão, serão aqui exibidas algumas simples estatísticas obtidas com a roteirização. Estas estatísticas são relativas à distância real percorrida e à velocidade média real por modo, que não estavam presentes nos relatórios da pesquisa OD. Como tais relatórios não fizeram a roteirização das viagens, não era possível saber, nem mesmo estimar, qual era a distância percorrida pelos cidadãos. Apenas se calculava a distância em linha reta entre a origem e o destino, subestimando a distância realmente percorrida, assim como a velocidade média. Com a roteirização aqui realizada, foi possível calcular que os trajetos de carro – com tempo de duração entre 5 minutos e 2 horas – totalizaram uma distância percorrida de 8.385.003 km (em um dia útil), e um tempo total de deslocamento de 660.792 horas, resultando em uma velocidade média de 12,69 km/h.

No caso dos ônibus, foram consideradas as duas roteirizações: uma pelo itinerário, que superestima a distância percorrida, e a outra pelo menor caminho, que subestima a distância. Em ambos os casos, contudo, foram consideradas as distâncias percorridas pelos passageiros, e não pelos ônibus. Logo, embora a velocidade média seja igual entre passageiros e ônibus, os tempos e distâncias totais serão muito maiores para os passageiros. Considerando o itinerário, a distância total percorrida – pelos passageiros cujo trajeto demorou entre 5 minutos e 2 horas – foi de 13.002.496 km. Como o tempo gasto pelos mesmos passageiros foi de 845.133 horas, a velocidade média estimada desses passageiros foi de 15,39 km/h. Por outro lado, considerando a roteirização das viagens pela rota mais curta entre os pontos de ônibus de origem e destino, a distância total percorrida pelos mesmos passageiros foi de 9.271.975 km. Como o tempo gasto para percorrer tal distância foram as mesmas 845.133 horas, a velocidade média estimada neste caso foi de 10,97 km/h. Abaixo são apresentadas estas velocidades calculadas por faixa horária e por modo.

Gráfico 6 – Velocidades médias por faixa horária e modo de transporte



Fonte: elaborado pelo autor.

Comparando tanto as velocidades médias gerais quanto analisando o Gráfico 6, é possível chegar à mesma conclusão sobre os métodos de roteirização das viagens de ônibus. As velocidades gerais foram de 12,69 km/h para o automóvel; de 15,39 km/h para o ônibus, considerando o itinerário estimado; e de 10,97 km/h para o ônibus, considerando o caminho mais curto. Como era de se esperar que a velocidade média do ônibus fosse inferior à do automóvel, aparentemente a roteirização pela rota mais curta apresentou um resultado mais realista. Contudo, como seria impossível estimar a densidade de ônibus se não fosse utilizada a roteirização pelo itinerário, e como esta superestimação da velocidade não causa impacto no resultado final (tempo estimado), conforme explicado na seção anterior, foi utilizada a

roteirização pelo itinerário, mesmo que ela tenha superestimado a velocidade média dos ônibus (15,39km/h).

O objetivo desta seção, contudo, é estimar a velocidade média por via, além de considerar também o modo e a hora do dia. Para isto foram ajustados aos dados vários modelos de regressão, e independentemente do modelo, foi preciso construir uma matriz de distâncias X . Com esta matriz é possível prever o tempo Y , por meio do seu produto com o vetor de parâmetros β , seguindo a famosa equação $Y = \beta X + \varepsilon$ (MONTGONERY e PECK, 1992). Segundo a equação apresentada na seção 3.4.2, no presente trabalho, X é calculada pelo produto $I_{kj}c_jI_{ij}$, onde I_{kj} é a variável indicadora que assume o valor 1 se o trecho de via j estiver contido na UMM k e 0 caso contrário, onde I_{ij} é a variável indicadora que assume o valor 1 se o trecho de via j fizer parte da rota do indivíduo i e 0 caso contrário, e c_j é o comprimento da via j .

Desse modo, para cada uma das sete faixas horárias consideradas, existe uma matriz X de n linhas e p colunas, onde n é o número de trajetos da faixa horária e p representa o número de parâmetros do modelo. O modelo mais simples – sem intercepto e somente classificando as vias de acordo com a UMM – possui 10 parâmetros, cada um representando o ritmo de uma UMM. Cada faixa horária apresentou um número variável de trajetos, com um número muito mais elevado nos horários de pico (FPM e FPT), como era de se esperar. Assim, a Tabela 6 apresenta o número de linhas das matrizes X para cada faixa horária:

Tabela 6 – Número de linhas da matriz *preditora* X , por faixa horária.

Faixa horária	Período	Trajetos de carro	Trajetos de ônibus
MAD	00h-05h	9.634	11.827
FPM	05h-09h	339.380	477.401
EPM	09h-11h	99.555	102.288
FPA	11h-14h	233.198	254.311
EPT	14h-16h	97.261	122.638
FPT	16h-20h	426.107	472.369
NOT	20h-24h	136.400	136.649

Fonte: elaborado pelo autor.

Tendo sido demonstrado o tamanho das matrizes de cada regressão, pode-se apresentar os resultados de cada um dos 16 modelos citados no capítulo anterior. Lembrando que estes modelos foram construídos como a combinação de três fatores: Tipo de regressão; se possuem ou não intercepto; e se foi ou não utilizada uma classificação diferente para cada tipo de via.

As tabelas e gráficos desta seção apresentam as velocidades médias imprimidas nas vias das respectivas regionais. Estas velocidades médias foram calculadas como sendo o inverso dos respectivos ritmos, que de fato foram os parâmetros β estimados pelos modelos. Alguns modelos apresentaram resultados extremamente ruins, como muitas velocidades médias superiores a 100 km/h ou mesmo negativas (em negrito nas tabelas). Os modelos com quatro tipos de vias (conversões, ruas pouco movimentadas, ruas muito movimentadas e avenidas) apresentaram tais estimativas de parâmetros, tanto nos modelos para carros e quanto para ônibus. Isto pode ser confirmado nas Tabelas 7 e 8, que apresentam os modelos MQO e MQP, com e sem intercepto, para carro e ônibus respectivamente.

Tabela 7 –Parâmetros do modelo MQO com intercepto e 4 tipos de vias para a velocidade dos **carros**.

Tipo de via e Regional	MAD	FPM	EPM	FPA	EPT	FPT	NOT
Conversão: Centro	25,4	14,0	16,1	6,2	4,0	2,9	9,4
Conversão: Oeste	4,9	5,3	8,7	9,6	8,8	8,5	21,1
Conversão: Barreiro	1,9	9,5	2,8	7,4	6,9	-4,2	-3,8
Conversão: Noroeste	-4,4	58,1	5,1	9,8	9,5	19,4	13,7
Conversão: Pampulha	-3,1	-10,8	12,1	23,4	8,5	59,2	30,5
Conversão: Venda Nova	-16,5	28,0	-70,0	4,2	13,4	7,0	3,4
Conversão: Norte	171,1	-19,9	-3,1	-4,2	10,6	-11,1	-3,6
Conversão: Nordeste	-3,0	127,6	312,2	8,1	4,9	6,4	6,6
Conversão: Leste	-4,4	8,7	7,7	15,6	4,1	13,6	27,3
Conversão: Sul	1,5	3,6	4,8	11,1	-51,4	2,5	-37,3
Ruas pouco movimentadas: Centro	-93,0	16,4	16,1	15,0	20,1	12,2	32,6
Ruas pouco movimentadas: Oeste	22,9	30,9	18,5	36,8	23,8	18,3	37,7
Ruas pouco movimentadas: Barreiro	118,3	45,8	114,2	67,0	74,6	66,8	18,9
Ruas pouco movimentadas: Noroeste	26,5	68,4	23,9	47,2	40,2	22,9	50,5
Ruas pouco movimentadas: Pampulha	45,0	15,7	29,4	59,9	33,4	41,6	120,5
Ruas pouco movimentadas: Venda Nova	53,8	26,0	78,9	127,3	74,3	24,1	63,1
Ruas pouco movimentadas: Norte	19,4	20,9	16,2	69,6	28,2	27,1	33,5
Ruas pouco movimentadas: Nordeste	33,1	30,9	30,0	29,7	108,7	45,3	59,1
Ruas pouco movimentadas: Leste	-201,7	-491,2	146,3	45,8	-81,6	18,6	28,0
Ruas pouco movimentadas: Sul	-229,9	66,7	31,6	34,2	20,7	23,4	77,4
Ruas muito movimentadas: Centro	35,6	8,6	12,9	9,7	254,6	10,3	-26,9
Ruas muito movimentadas: Oeste	-9,1	9,1	9,7	19,7	91,1	9,5	12,4
Ruas muito movimentadas: Barreiro	574,7	-445,0	-30,2	10,5	20,1	2,7	-51,7
Ruas muito movimentadas: Noroeste	18,4	5,4	-48,8	101,7	120,7	58,4	145,3
Ruas muito movimentadas: Pampulha	3,7	66,2	48,0	19,3	13,4	8,3	79,0
Ruas muito movimentadas: Venda Nova	-20,4	119,8	4,2	7,1	12,2	14,6	-8,4
Ruas muito movimentadas: Norte	-3,6	-20,0	164,2	613,8	29,0	-18,9	6,8
Ruas muito movimentadas: Nordeste	14,3	-267,8	53,2	-14,0	-36,8	9,5	39,0
Ruas muito movimentadas: Leste	11,3	18,8	5,9	58,3	10,8	-39,7	-18,7
Ruas muito movimentadas: Sul	13,8	20,5	7,7	9,8	25,8	13,6	6,8
Avenidas: Centro	3,3	14,0	16,3	40,8	15,2	-194,9	9,3
Avenidas: Oeste	-10,1	52,0	-18,3	70,8	-59,2	33,8	78,3
Avenidas: Barreiro	-5,2	19,2	-19,7	116,6	-9,5	-110,0	-4,4
Avenidas: Noroeste	9,4	8,5	20,6	14,6	25,1	13,9	14,1
Avenidas: Pampulha	133,2	-159,8	57,3	35,2	84,3	14,6	18,9
Avenidas: Venda Nova	30,4	91,2	4,8	24,5	6,4	-13,7	22,5
Avenidas: Norte	-10,5	-97,0	-11,5	12,3	22,6	10,7	16,1
Avenidas: Nordeste	3,7	8,1	7,9	-98,5	27,3	11,8	10,5
Avenidas: Leste	6,1	5,9	7,7	12,3	4,5	-23,4	-12,0
Avenidas: Sul	17,7	19,9	13,0	-377,1	46,5	-68,1	39,9

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 8 -Parâmetros do modelo MQP sem intercepto e 4 tipos de vias para a velocidade dos ônibus.

Tipo de via e Regional	MAD	FPM	EPM	FPA	EPT	FPT	NOT
Conversão: Centro	-1,3	-1,8	-1,1	-1,9	-1,7	-1,1	-1,3
Conversão: Oeste	1,6	-5,2	28,4	-2,4	-4,6	-2,9	-4,0
Conversão: Barreiro	5,3	21,3	-5,2	-3,5	-6,6	-1,2	-3,2
Conversão: Noroeste	0,6	-10,4	-4,4	22,8	-5,0	-16,2	22,7
Conversão: Pampulha	1,7	2,4	57,6	5,0	3,7	13,0	-1,4
Conversão: Venda Nova	-2,3	0,2	-21,8	0,3	0,3	0,2	0,0
Conversão: Norte	-1,2	11,0	16,2	4,0	6,6	0,8	0,7
Conversão: Nordeste	-0,7	-2,2	-86,3	-22,0	-12,5	7,7	5,2
Conversão: Leste	-1,5	-15,6	-20,4	-19,8	-3,3	-6,6	-10,3
Conversão: Sul	-0,3	4,6	2,9	9,3	-2,0	-19,6	0,8
Ruas pouco movimentadas: Centro	5,1	9,0	19,8	5,6	19,2	6,5	12,2
Ruas pouco movimentadas: Oeste	27,4	-61,8	-28,1	22,4	104,6	81,8	-22,8
Ruas pouco movimentadas: Barreiro	-124,8	12,6	11,8	10,9	14,5	7,7	9,3
Ruas pouco movimentadas: Noroeste	-17,1	16,4	15,4	58,3	11,7	11,7	6,7
Ruas pouco movimentadas: Pampulha	3,7	25,7	13,0	71,7	30,8	13,4	14,2
Ruas pouco movimentadas: V. Nova	15,5	-2,8	26,9	-4,9	-4,9	-2,2	-0,6
Ruas pouco movimentadas: Norte	2,8	-208	19,5	17,4	-26,2	-3,7	-5,1
Ruas pouco movimentadas: Nordeste	2,2	5,9	12,6	7,5	5,4	6,1	9,5
Ruas pouco movimentadas: Leste	11,1	6,5	5,3	4,9	8,4	4,6	4,4
Ruas pouco movimentadas: Sul	5,2	17,1	11,3	14,2	9,5	13,0	20,1
Ruas muito movimentadas: Centro	5,9	12,3	5,7	-5,4	-25,7	71,0	-5,6
Ruas muito movimentadas: Oeste	-3,1	2,3	3,4	4,3	3,7	2,7	2,6
Ruas muito movimentadas: Barreiro	0,9	54,4	12,0	338,6	9,3	-5,4	-14,9
Ruas muito movimentadas: Noroeste	7,1	3,1	3,7	2,6	4,2	5,2	-7,1
Ruas muito movimentadas: Pampulha	16,9	14,4	9,7	8,1	13,7	12,5	5,3
Ruas muito movimentadas: Venda Nova	9,5	1,4	3,4	1,6	2,4	1,4	0,6
Ruas muito movimentadas: Norte	-1,2	19,2	9,2	-57,0	2,9	1,3	1,9
Ruas muito movimentadas: Nordeste	-0,7	-4,2	27,3	-5,8	-2,1	-2,6	-5,2
Ruas muito movimentadas: Leste	5,3	-12,8	-2,5	-2,9	-354,7	-3,1	-2,4
Ruas muito movimentadas: Sul	6,1	5,5	9,8	3,3	3,3	2,7	-5,0
Avenidas: Centro	-2,4	4,0	1,8	-1751	1,9	5,2	1,9
Avenidas: Oeste	17,0	8,0	10,6	-63,8	63,3	8,2	3,5
Avenidas: Barreiro	4,7	-18,1	16,9	223,2	8,6	-27,4	6,8
Avenidas: Noroeste	-6,8	23,5	7,5	7,7	61,2	-326,8	-3,6
Avenidas: Pampulha	-1,8	118,9	-7,0	22,0	-98,9	-16,8	-21,6
Avenidas: Venda Nova	0,9	0,9	2,5	1,6	1,6	0,8	0,8
Avenidas: Norte	-0,6	24,1	-11,2	-4,2	-17,5	2,5	30,6
Avenidas: Nordeste	-1,0	-4,3	-10,7	-3,1	-2,7	-3,0	-3,9
Avenidas: Leste	3,8	-2,2	-2,5	-3,4	-19,6	-2,3	-2,7
Avenidas: Sul	-2,2	-21,1	-36,0	-8,4	-13,4	-24,4	-3,8

Fonte: elaborado pelo autor.

Uma possível explicação para estes resultados tão ruins nestas Tabelas 7 e 8 é o excesso de parâmetros de tais modelos. De qualquer forma, todos os oito modelos para cada modo com 4 tipos de vias foram descartados e não mais analisados daqui em diante. Outros modelos, por sua vez, apresentaram apenas alguns valores irrealistas ou mesmo nenhum. De fato, tanto para carros quanto para ônibus, todos os modelos com intercepto e 1 tipo de via apresentaram ao menos um valor irreal, enquanto que nos modelos sem intercepto e 1 tipo de via não apresentaram valores com esta característica. Nas duas seções a seguir são exibidos os resultados dos modelos com 10 regionais e 1 tipo de via, primeiramente para os carros e em seguida para os ônibus.

4.2.1 Modelos com 10 regionais e 1 tipo de via para carros

Abaixo são exibidos tais resultados em formato de tabela, e na sequência de cada uma, estão os respectivos gráficos associados às mesmas, com a supressão dos valores considerados irrealistas, que, por sinal, estão marcados em **negrito** nas tabelas. Em ambos os modos, os resultados dos modelos com intercepto precedem os resultados dos modelos sem intercepto.

Tabela 9 - Parâmetros do modelo MQO com intercepto e 1 tipo de via para a velocidade dos **carros**.

Regional	MAD	FPM	EPM	FPA	EPT	FPT	NOT
Centro	18,9	13,1	14,8	15,0	16,3	12,2	21,7
Oeste	83,6	22,9	21,5	33,8	29,5	19,0	34,7
Barreiro	37,5	41,6	63,0	45,8	67,3	85,2	41,7
Noroeste	30,9	26,3	23,4	32,9	33,2	21,9	36,3
Pampulha	43,1	27,3	34,2	44,9	30,9	24,4	47,6
Venda Nova	77,8	27,3	19,9	30,4	27,6	28,4	42,9
Norte	96,3	32,4	52,7	62,1	25,2	27,7	34,4
Nordeste	32,9	22,4	21,8	34,8	40,6	27,8	32,2
Leste	135,3	36,0	22,9	33,9	28,1	26,7	53,0
Sul	26,1	37,8	22,6	32,1	24,5	20,0	50,8

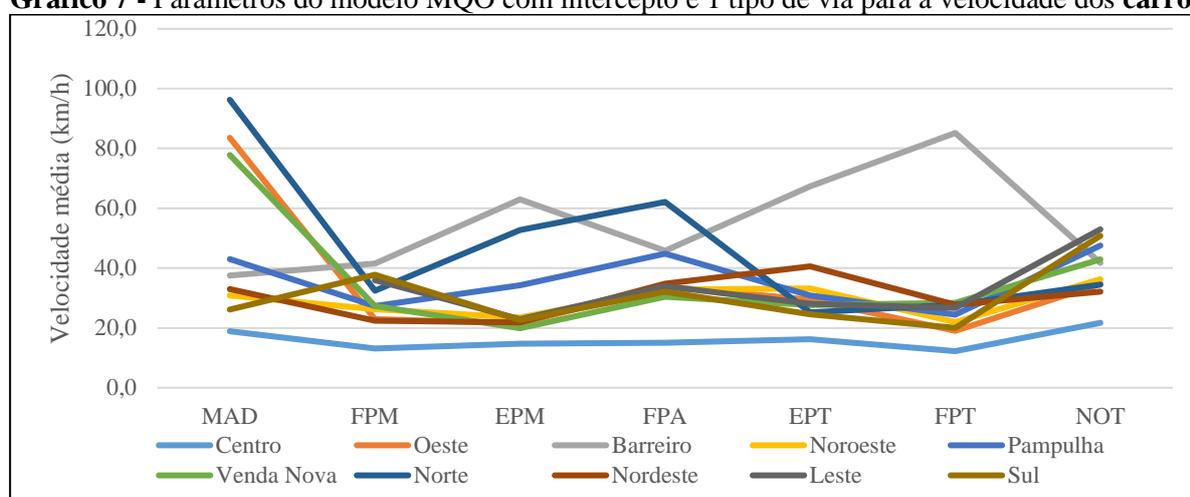
Fonte: elaborado pelo autor.

O modelo de Mínimos Quadrados Ordinários, com intercepto e 1 tipo de via, apresentou um valor considerado impossível, de 135,3 km/h (Tabela 9), pela Madrugada, na Regional Leste. Uma maneira de limitar estes valores impossíveis do modelo MQO é utilizar o MQO com restrições. Como há todo um rearranjo dos parâmetros, as velocidades de outras regionais em uma mesma faixa horária podem ser alteradas, mesmo que suavemente. Entretanto, a Tabela 10 e o Gráfico 6 mostram que não houve alteração destes outros parâmetros.

O valor de 135,3 km/h na Regional Leste não foi exibido no Gráfico 7, que apresentou os resultados do modelo de Mínimos Quadrados Ordinários com intercepto e 1 tipo de via. O gráfico, porém, deixa claro que a Regional com menor velocidade média foi a Regional Centro,

enquanto que as regionais com as maiores velocidades foram Barreiro e Norte, seguidas pela Pampulha. Não foram encontradas explicações conclusivas sobre a causa das velocidades mais altas nessas regionais. Mais estranho ainda foi o resultado da Regional Barreiro, que apresentou seu pico de velocidade justamente na Faixa de Pico da Tarde, horário em que a velocidade deveria ser mínima. É mais provável que tenha havido um erro amostral, juntamente com o problema da estimação baseada em poucos dados, ou dados correlacionados⁹. Isto é, devido a um certo “azar” da amostra escolhida, isto é, por acaso, os - relativamente poucos - entrevistados da Regional Barreiro que viajaram na FPT, viajaram a uma alta velocidade, por algum motivo desconhecido.

Gráfico 7 - Parâmetros do modelo MQO com intercepto e 1 tipo de via para a velocidade dos **carros**.



Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 10 - Parâmetros do modelo MQO com restrições com intercepto e 1 tipo de via para a velocidade dos **carros**.

Regional	MAD	FPM	EPM	FPA	EPT	FPT	NOT
Centro	19,0	13,1	14,8	15,0	16,3	12,2	21,7
Oeste	82,7	22,9	21,5	33,8	29,5	19,0	34,7
Barreiro	37,5	41,6	63,0	45,8	67,3	85,2	41,7
Noroeste	30,7	26,3	23,4	32,9	33,2	21,9	36,3
Pampulha	42,9	27,3	34,2	44,9	30,9	24,4	47,6
Venda Nova	76,3	27,3	19,9	30,4	27,6	28,4	42,9
Norte	98,4	32,4	52,7	62,1	25,2	27,7	34,4
Nordeste	33,4	22,4	21,8	34,8	40,6	27,8	32,2
Leste	100,0	36,0	22,9	33,9	28,1	26,7	53,0
Sul	26,1	37,8	22,6	32,1	24,5	20,0	50,8

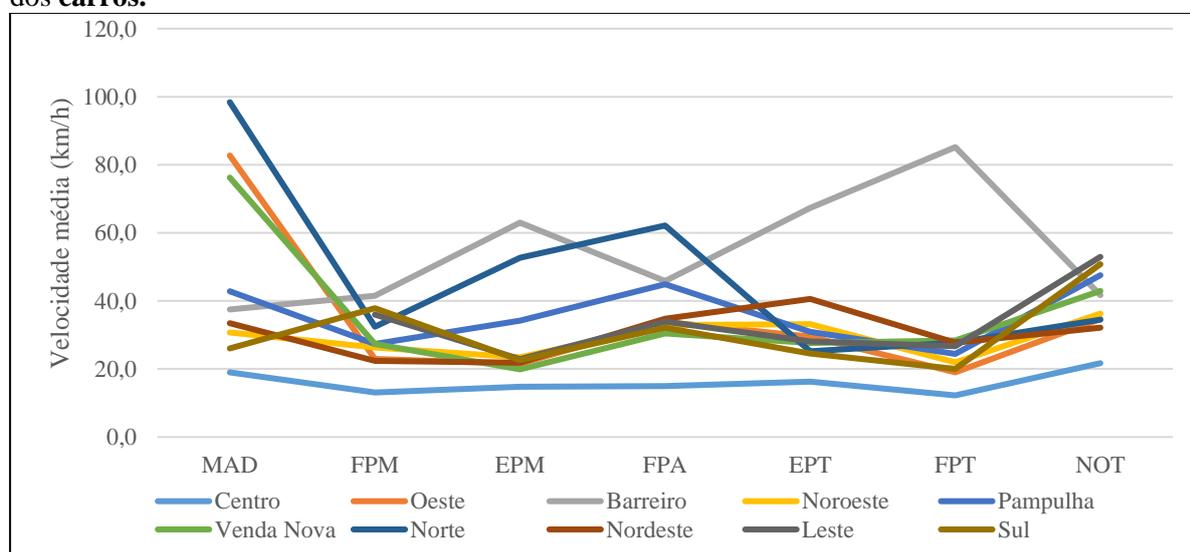
Fonte: elaborado pelo autor.

⁹ Como os dados das viagens foram sorteados com repetição, embora as origens e os destinos das viagens não sejam exatamente os mesmos, as viagens repetidas possuem mesmas AHs de origem e de destino. Isto torna os dados altamente correlacionados, e faz com que a amostra se comporte como se fosse menor do que ela realmente é.

Como era de se esperar, o modelo de Mínimos Quadrados Ordinários com restrições trocou o valor de 135,3 km/h na Madrugada da Regional Leste pelo valor máximo, de 100km/h (Tabela 10). As outras regionais, e mesmo a Regional Leste em outras faixas horárias, apresentaram os mesmos resultados. Com isto, o Gráfico 8 (Mínimos Quadrados Ordinários com restrições) ficou idêntico ao Gráfico 7 (Mínimos Quadrados Ordinários), já que os valores de 100km/h ou mais não foram exibidos em nenhum dos dois.

O modelo com pesos diferentes para cada observação, o de Mínimos Quadrados Ponderados (MQP), por sua vez, também produz valores um pouco diferentes do MQO, como pode ser visto na Tabela 11.

Gráfico 8 - Parâmetros do modelo MQO com restrições com intercepto e 1 tipo de via para a velocidade dos carros.



Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 11 - Parâmetros do modelo MQP com intercepto e 1 tipo de via para a velocidade dos carros.

Regional	MAD	FPM	EPM	FPA	EPT	FPT	NOT
Centro	24,5	13,5	15,3	13,2	16,3	11,8	24,5
Oeste	90,5	21,9	20,0	33,9	27,1	18,5	32,8
Barreiro	35,3	36,4	38,9	46,0	40,2	53,1	42,9
Noroeste	53,4	26,9	24,0	38,3	32,9	22,9	42,3
Pampulha	36,1	29,5	36,8	46,3	30,4	26,8	47,4
Venda Nova	-44,0	36,6	27,9	37,7	31,3	28,5	79,1
Norte	-401,8	38,5	66,5	163,0	21,5	35,7	53,7
Nordeste	31,3	22,8	22,3	37,3	37,8	25,8	32,7
Leste	243,6	44,5	25,0	37,4	26,7	32,2	60,5
Sul	33,7	34,4	18,5	34,3	21,0	18,1	54,1

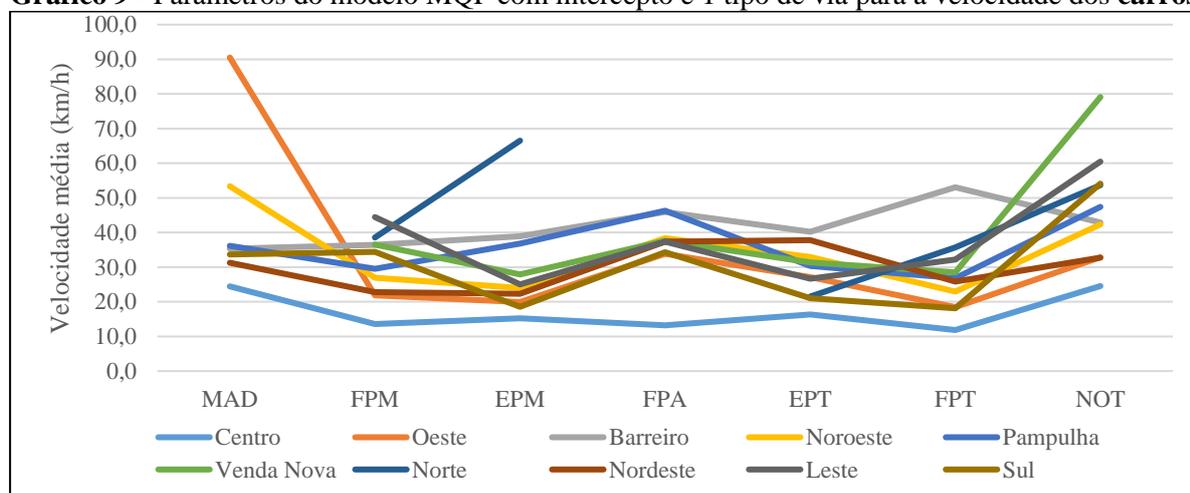
Fonte: elaborado pelo autor.

Como a Tabela 11 apresentou alguns valores impossíveis, e os mesmos não foram exibidos no Gráfico 9, este último ficou segmentado para a Regional Norte. De semelhança marcante com

os modelos de Mínimos Quadrados Ordinários, o MQP apresentou apenas a Regional Centro como aquela que possui as menores velocidades médias. Outra semelhança, embora não tão marcante, é que mais uma vez a Regional Barreiro estranhamente apresentou seu pico de velocidade justamente na Faixa de Pico da Tarde. Por outro lado, as regionais Norte e Pampulha não apresentaram velocidades tão altas quanto nos modelos MQO.

Por último, apresenta-se na Tabela 12 e no Gráfico 10 o modelo que minimiza a soma dos valores absolutos dos desvios (erros ou resíduos). Isto serve para evitar que valores discrepantes da variável "resposta" (tempo do trajeto) afetem consideravelmente o resultado.

Gráfico 9 - Parâmetros do modelo MQP com intercepto e 1 tipo de via para a velocidade dos **carros**.



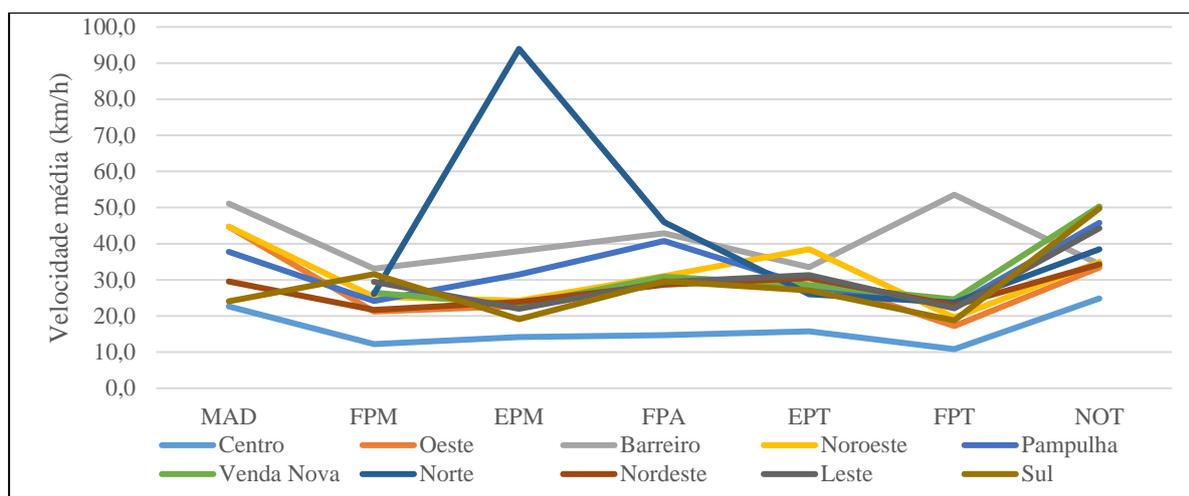
Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 12 - Parâmetros do modelo MDA com intercepto e 1 tipo de via para a velocidade dos **carros**.

Regional	MAD	FPM	EPM	FPA	EPT	FPT	NOT
Centro	22,7	12,2	14,2	14,7	15,8	10,8	24,9
Oeste	44,7	21,2	22,7	28,9	30,5	17,2	33,5
Barreiro	51,1	33,1	37,9	42,9	33,5	53,6	34,3
Noroeste	44,7	25,3	24,3	31,0	38,5	19,6	34,9
Pampulha	37,7	24,2	31,5	40,8	28,2	23,0	45,8
Venda Nova	110,7	26,5	23,0	30,9	28,6	24,6	50,3
Norte	179,8	26,1	93,9	46,0	26,0	23,7	38,4
Nordeste	29,6	21,7	23,9	28,6	30,5	22,9	34,3
Leste	131,0	29,4	22,0	29,4	31,3	22,1	44,3
Sul	24,1	31,6	19,1	29,6	27,0	18,8	49,8

Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 10 - Parâmetros do modelo MDA com intercepto e 1 tipo de via para a velocidade dos **carros**.



Fonte: elaborado pelo autor.

Mais uma vez a faixa horária da Madrugada apresentou alguns valores impossíveis (Tabela 12). Já o Gráfico 10 mostra que a Regional Norte, de forma inesperada, apresentou seu pico de velocidade na faixa Entre Picos da Manhã. Além disso, mais uma vez a velocidade máxima na Regional Barreiro foi atingido na Faixa de Pico da Tarde. Esses dois resultados estranhos mais uma vez podem ter sido fruto da combinação entre o amostral e o problema da estimação baseada em poucos dados, ou dados correlacionados. Por outro lado, a Regional Centro apresentou os menores valores de velocidade média, em todas as horas do dia, assim como era esperado.

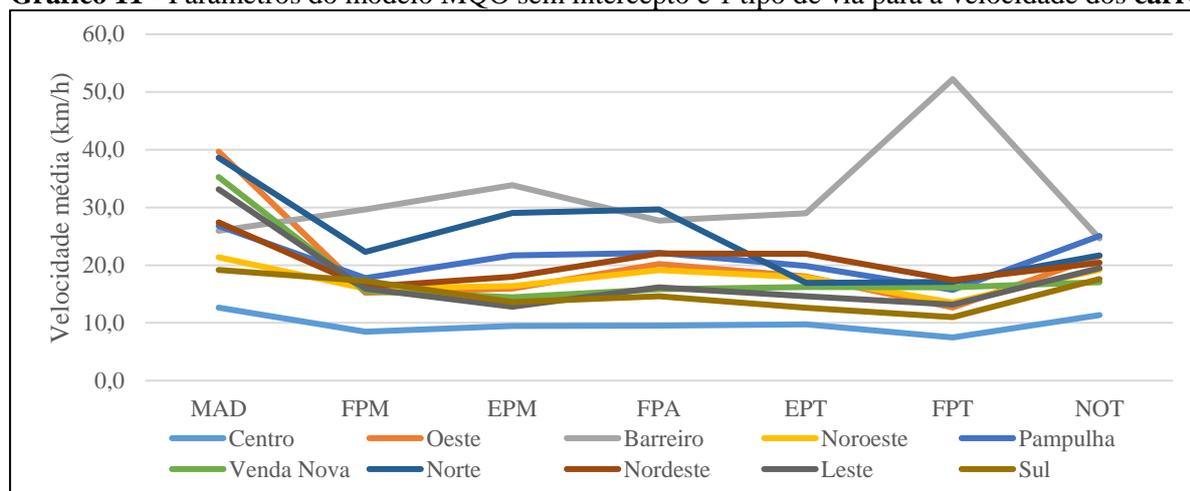
Apresentam-se a seguir os modelos sem intercepto. Como já foi adiantado alguns parágrafos acima, estes modelos não apresentaram estimativas irreais da velocidade média.

Tabela 13 - Parâmetros do modelo MQO sem intercepto e 1 tipo de via para a velocidade dos **carros**.

Regional	MAD	FPM	EPM	FPA	EPT	FPT	NOT
Centro	12,6	8,5	9,5	9,5	9,7	7,5	11,3
Oeste	39,7	15,2	15,9	20,2	18,0	12,7	21,6
Barreiro	26,0	29,7	33,9	27,7	29,0	52,2	24,6
Noroeste	21,4	16,0	16,4	19,2	17,9	13,5	19,2
Pampulha	26,8	17,8	21,7	22,1	19,9	15,7	25,1
Venda Nova	35,3	15,5	14,4	15,8	16,2	16,1	17,0
Norte	38,6	22,3	29,0	29,6	16,9	17,1	21,7
Nordeste	27,4	16,2	18,0	22,0	21,9	17,4	20,4
Leste	33,2	16,0	12,8	16,2	14,6	13,2	19,5
Sul	19,2	17,3	13,6	14,6	12,6	11,0	17,6

Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 11 - Parâmetros do modelo MQO sem intercepto e 1 tipo de via para a velocidade dos **carros**.



Fonte: elaborado pelo autor.

O Gráfico 11, do modelo MQO sem intercepto e com 1 tipo de via, assim como o modelo MQO com intercepto e 1 tipo de via (Gráfico 7), apresentou as regionais Barreiro e Norte como as de maior velocidade, e a Regional Centro como a de menor. Além disso, outra vez a Regional Barreiro apresentou sua velocidade máxima na Faixa de Pico da Tarde. Como o modelo MQO não apresentou nenhuma estimativa de velocidade impossível, é inútil exibir o resultado do modelo MQO com restrições, uma vez que seus resultados seriam idênticos ao MQO sem restrições. Assim, a Tabela 14 e o Gráfico 12 exibem os resultados do ajuste do modelo MQP aos dados da velocidade dos carros.

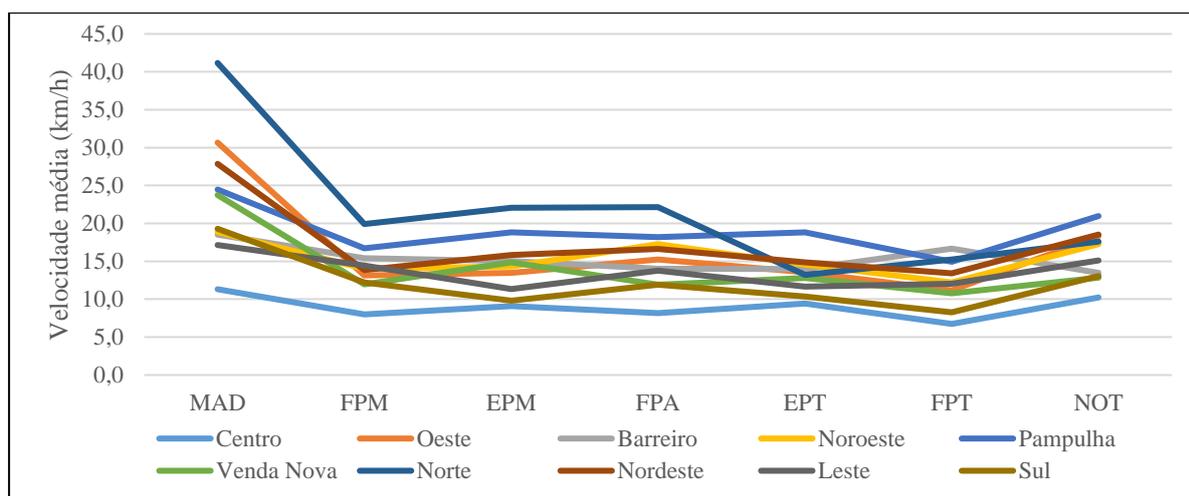
Tabela 14 - Parâmetros do modelo MQP sem intercepto e 1 tipo de via para a velocidade dos **carros**.

Fonte: elaborado pelo autor.

Regional	MAD	FPM	EPM	FPA	EPT	FPT	NOT
Centro	11,3	8,0	9,1	8,2	9,4	6,7	10,2
Oeste	30,7	13,1	13,5	15,2	13,6	11,2	18,3
Barreiro	18,5	15,4	15,0	14,0	14,0	16,7	13,5
Noroeste	18,9	14,0	14,3	17,3	14,6	12,2	17,3
Pampulha	24,5	16,7	18,8	18,2	18,8	14,9	21,0
Venda Nova	23,7	12,0	14,8	11,9	12,8	10,8	12,8
Norte	41,2	19,9	22,1	22,1	13,2	15,2	17,6
Nordeste	27,9	13,8	15,8	16,6	14,9	13,4	18,5
Leste	17,1	14,4	11,3	13,8	11,6	12,0	15,1
Sul	19,3	12,2	9,8	11,9	10,4	8,3	13,0

Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 12 - Parâmetros do modelo MQP sem intercepto e 1 tipo de via para a velocidade dos **carros**.



Fonte: elaborado pelo autor.

Embora, segundo o Gráfico 12, do modelo MQP, a velocidade no Centro continuou sendo inferior à velocidade das demais regionais, a Regional Barreiro não se destacou como a de maior velocidade. Esta característica ficou para as regionais Norte e Pampulha.

A seguir, na Tabela 15 e no Gráfico 13, estão exibidos os ajustes dos modelos de Mínimo Desvio Absoluto (MDA). Este modelo apresentou resultados muito semelhantes ao modelo MQO, onde a Regional Centro se destacou pela baixa velocidade, enquanto as regionais Norte e Pampulha se destacaram pelos altos valores de velocidade. Além disso, mais uma vez o valor mais alto da velocidade no Barreiro foi observado na Faixa de Pico da Tarde.

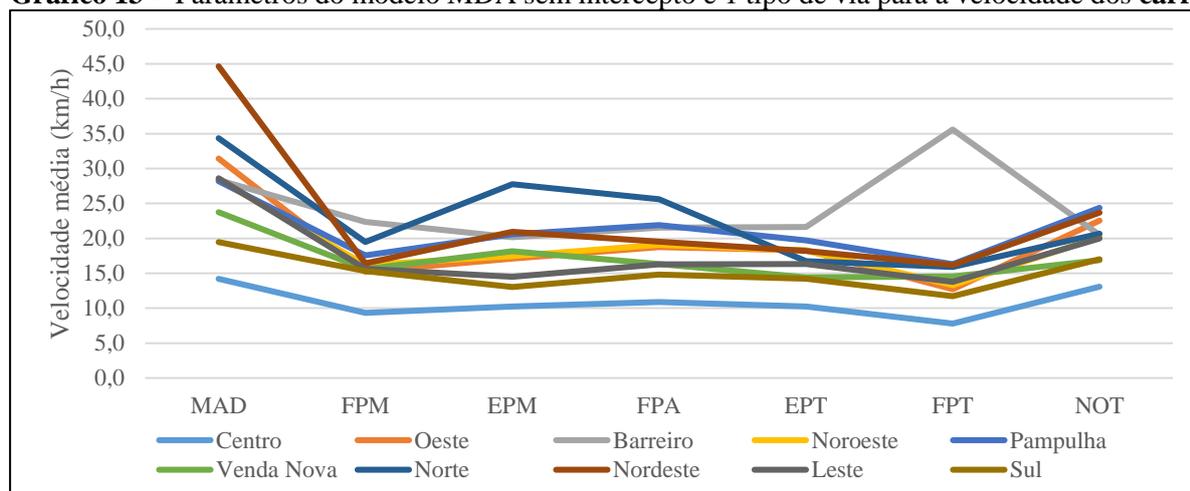
Um fato importante de se notar nestes resultados é que os modelos sem intercepto tendem a estimar uma velocidade média muito inferior aos modelos com intercepto. Isto ocorre porque os modelos com intercepto calculam que parte do tempo do trajeto é fixo para todos os usuários, então o tempo restante tem que servir para percorrer todo o caminho. E isto só pode ser feito mediante o empreendimento de uma velocidade maior.

Tabela 15 - Parâmetros do modelo MDA sem intercepto e 1 tipo de via para a velocidade dos **carros**.

Regional	MAD	FPM	EPM	FPA	EPT	FPT	NOT
Centro	14,2	9,3	10,2	10,9	10,2	7,8	13,1
Oeste	31,4	15,2	17,1	18,7	18,3	12,7	22,6
Barreiro	28,4	22,4	20,2	21,5	21,6	35,6	20,5
Noroeste	28,4	16,2	17,5	19,1	18,3	13,3	20,1
Pampulha	28,2	17,5	20,6	21,9	19,7	16,3	24,4
Venda Nova	23,7	15,6	18,2	16,3	14,4	14,5	16,9
Norte	34,3	19,5	27,8	25,6	16,7	15,9	20,7
Nordeste	44,6	16,4	21,0	19,5	18,2	16,2	23,7
Leste	28,6	15,6	14,5	16,3	16,3	13,8	20,0
Sul	19,5	15,3	13,0	14,8	14,2	11,7	17,0

Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 13 - Parâmetros do modelo MDA sem intercepto e 1 tipo de via para a velocidade dos **carros**.



Fonte: elaborado pelo autor.

Além disso, avaliando os modelos sem intercepto, pode-se concluir que de uma maneira geral eles foram satisfatórios em relação aos valores dos parâmetros. Contudo, outras conclusões podem ser tiradas dos gráficos e tabelas acima. Por exemplo, o que chama a atenção em todos os gráficos é que a velocidade do Centro é inferior à velocidade das outras regiões em todas as faixas horárias, o que já era esperado. As outras regionais (UMM), por sua vez, apresentam valores mais misturados ou menos destacados entre si, com alternância de posições entre um modelo e outro ou mesmo dentro de um mesmo modelo. Contudo, Barreiro, Norte e Pampulha em geral apresentam picos de velocidade ou valores acima das demais regionais. Por isto, decidiu-se por testar o ajuste dos modelos considerando um agrupamento de regionais. Um grupo seria formado unicamente pela Regional Centro, o outro pelas três citadas acima e o outro pelas seis regionais restantes. Estes modelos serão apresentados na seção 4.2.3. Por enquanto, apresentam-se a seguir os resultados dos mesmos modelos aqui já apresentados, mas desta vez ajustados aos trajetos dos passageiros de ônibus.

4.2.2 Modelos com 10 regionais e 1 tipo de via para ônibus

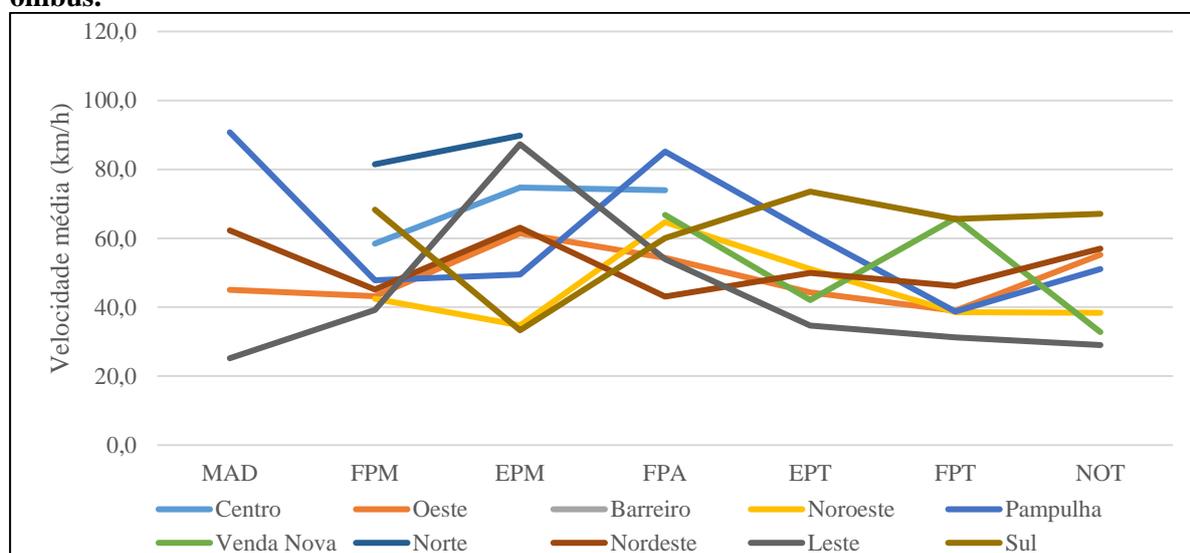
A seguir são apresentados os resultados dos ajustes dos modelos à movimentação dos ônibus. Eles serão apresentados de maneira análoga à seção anterior: primeiro os modelos com intercepto e depois os sem intercepto.

Tabela 16 - Parâmetros do modelo MQO com intercepto e 1 tipo de via para a velocidade dos **ônibus**.

Regional	MAD	FPM	EPM	FPA	EPT	FPT	NOT
Centro	-43,2	58,5	74,7	73,9	136,5	84,6	106,4
Oeste	45,1	43,2	61,4	54,3	44,3	39,0	55,3
Barreiro	-40,4	434,2	235,4	-483,4	-3916,8	-150,1	129,1
Noroeste	136,9	42,5	34,7	64,7	51,1	38,6	38,4
Pampulha	90,8	47,8	49,5	85,1	61,4	38,7	51,0
Venda Nova	811,1	40,9	446,8	66,8	42,1	65,8	32,8
Norte	236,3	81,5	89,8	116,0	138,0	99,7	216,1
Nordeste	62,3	45,1	63,1	43,1	49,9	46,1	57,0
Leste	25,2	39,2	87,3	53,9	34,7	31,2	29,0
Sul	105,1	68,3	33,3	60,1	73,5	65,6	67,1

Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 14 - Parâmetros do modelo MQO com intercepto e 1 tipo de via para a velocidade dos **ônibus**.



Fonte: elaborado pelo autor.

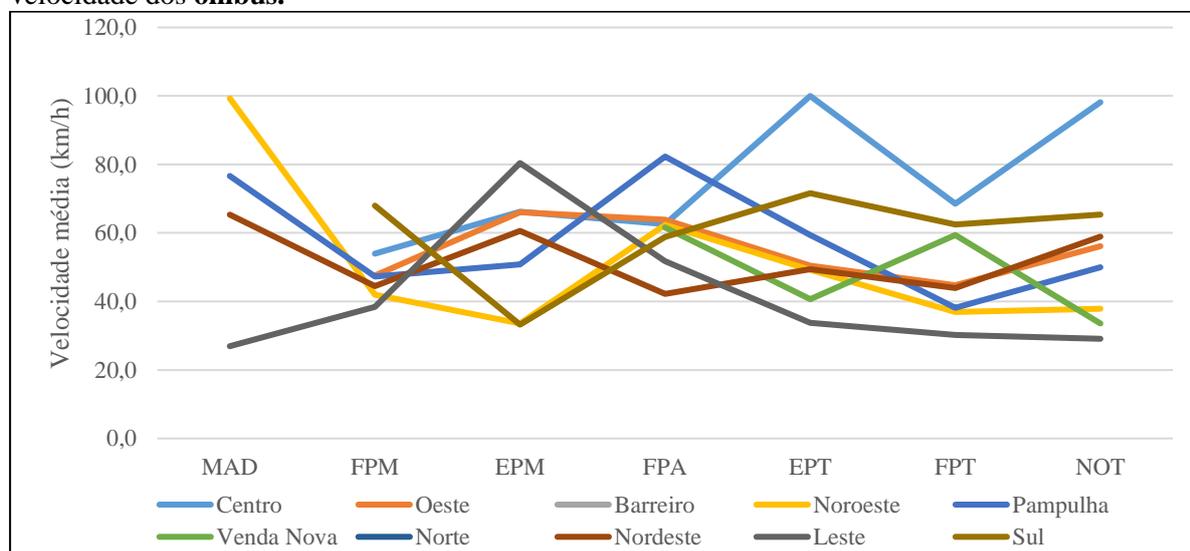
A Tabela 16 mostrou que o modelo MQO apresentou vários valores impossíveis, de forma que o Gráfico 14 foi construído com sequências segmentadas para três regionais. De fato, a Regional Barreiro, que apresentou todos os seus valores considerados impossíveis (negativos ou de pelo menos 100km/h) nem mesmo apareceu no Gráfico 14. Com isto, o modelo MQO com restrições foi ajustado e seu resultado está exibido na Tabela 17 e no Gráfico 15 a seguir.

Tabela 17 - Parâmetros do modelo MQO com restrições com intercepto e 1 tipo de via para a velocidade dos ônibus.

Regional	MAD	FPM	EPM	FPA	EPT	FPT	NOT
Centro	100,0	54,0	66,2	62,5	100,0	68,5	98,2
Oeste	100,0	47,6	66,1	63,9	50,5	44,7	56,1
Barreiro	100,0						
Noroeste	99,3	42,0	33,6	62,4	49,2	36,9	37,9
Pampulha	76,6	47,2	50,8	82,3	59,4	38,1	50,0
Venda Nova	100,0	39,9	100,0	61,6	40,6	59,4	33,6
Norte	100,0	78,5	100,0	100,0	100,0	90,3	100,0
Nordeste	65,3	44,5	60,6	42,2	49,4	43,9	58,9
Leste	26,9	38,4	80,4	51,7	33,8	30,2	29,1
Sul	100,0	68,0	33,2	58,8	71,6	62,5	65,4

Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 15 - Parâmetros do modelo MQO com restrições com intercepto e 1 tipo de via para a velocidade dos ônibus.



Fonte: elaborado pelo autor.

O Gráfico 15 deixa claro que as restrições não foram suficientes para melhorar de forma considerável o modelo MQO. A Tabela 18, a seguir, apresenta os resultados do modelo MQP ajustados aos deslocamentos dos ônibus.

Tabela 18- Parâmetros do modelo MQP com intercepto e 1 tipo de via para a velocidade dos ônibus.

Regional	MAD	FPM	EPM	FPA	EPT	FPT	NOT
Centro	-10,6	-24,3	-327,1	-39,9	-27,6	-33,4	-39,9
Oeste	1095,3	53,0	49,1	63,6	58,1	60,2	80,2
Barreiro	-10,8	-19,4	-73,3	-29,7	-23,2	-18,4	-27,8
Noroeste	-50,1	779,2	50,9	-1679,3	1651,3	258,2	72,5
Pampulha	-796,8	149,8	64,6	172,7	158,6	54,0	75,6
Venda Nova	-20,6	-45,4	-94,2	-50,7	-62,5	-32,3	709,9
Norte	-160,9	-45,2	-347,3	-95,3	-78,3	-34,9	-62,3
Nordeste	2071,2	96,6	74,8	59,6	112,6	114,5	358,9
Leste	83,5	-73,9	-184,3	543,0	-243,9	123,2	44,7
Sul	-84,3	-83,1	177,7	158,9	-213,5	-144,8	-374,1

Fonte: elaborado pelo autor.

Os valores deste modelo, exibidos na Tabela 18, foram considerados tão ruins que nem foi feito um gráfico com estes resultados.

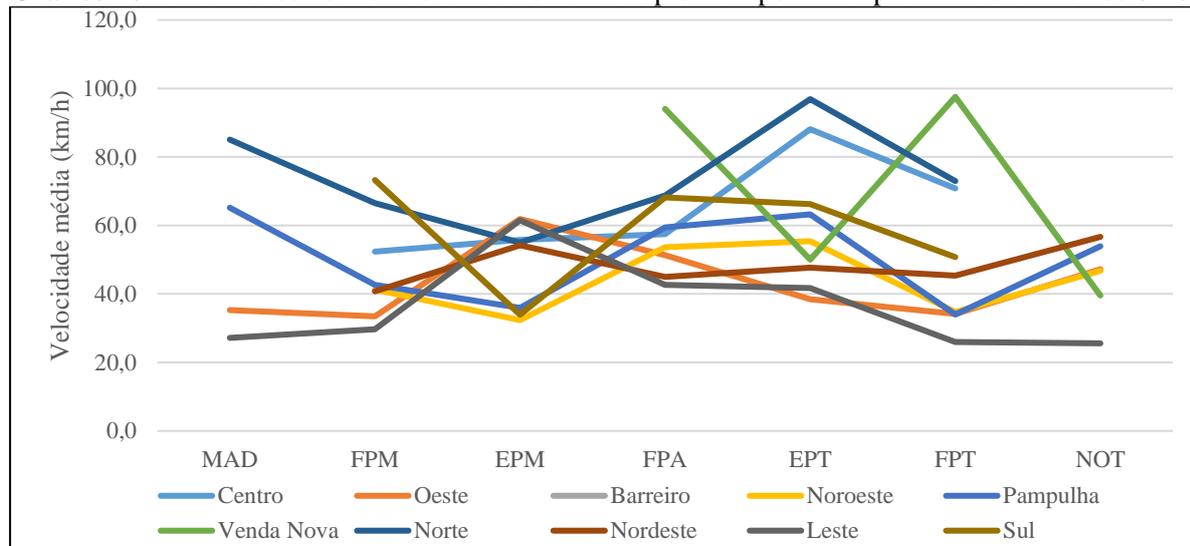
Por último, dentre os modelos com intercepto, foi ajustado o modelo MDA, cujo resultado está exibido na Tabela 19 e no Gráfico 16.

Tabela 19 - Parâmetros do modelo MDA com intercepto e 1 tipo de via para a velocidade dos **ônibus**.

Regional	MAD	FPM	EPM	FPA	EPT	FPT	NOT
Centro	-81,3	52,4	55,8	57,5	88,1	70,8	133,6
Oeste	35,3	33,5	61,9	51,3	38,5	34,2	47,2
Barreiro	-60,3	279,7	98,9	511,8	1254,9	-225,8	167,6
Noroeste	104,9	41,3	32,4	53,6	55,4	34,7	46,8
Pampulha	65,2	42,7	35,9	59,5	63,3	34,0	54,0
Venda Nova	143,2	56,4	-498,5	94,0	50,0	97,6	39,5
Norte	85,0	66,5	55,0	68,7	96,9	73,0	182,6
Nordeste	101,7	40,8	54,2	45,0	47,7	45,3	56,7
Leste	27,2	29,7	61,5	42,6	41,8	25,9	25,6
Sul	-149,4	73,3	33,9	68,2	66,3	50,8	120,0

Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 16 - Parâmetros do modelo MDA com intercepto e 1 tipo de via para a velocidade dos **ônibus**.



Fonte: elaborado pelo autor.

Assim, como com o modelo MQO e o MQO com restrições, não foi possível descobrir qualquer padrão do modelo MDA, conforme análise feita no Gráfico 16. Aliás, comum a todos os modelos acima é o aparente baixo ajuste dos modelos, uma vez que há uma improvável e aparentemente aleatória variação de velocidade de um horário para o outro em uma mesma Regional.

Na sequência, são exibidos os mesmos modelos acima, mas sem o intercepto do modelo, ou seja, com o tempo total do trajeto sendo previsto exclusivamente pela soma dos tempos gastos

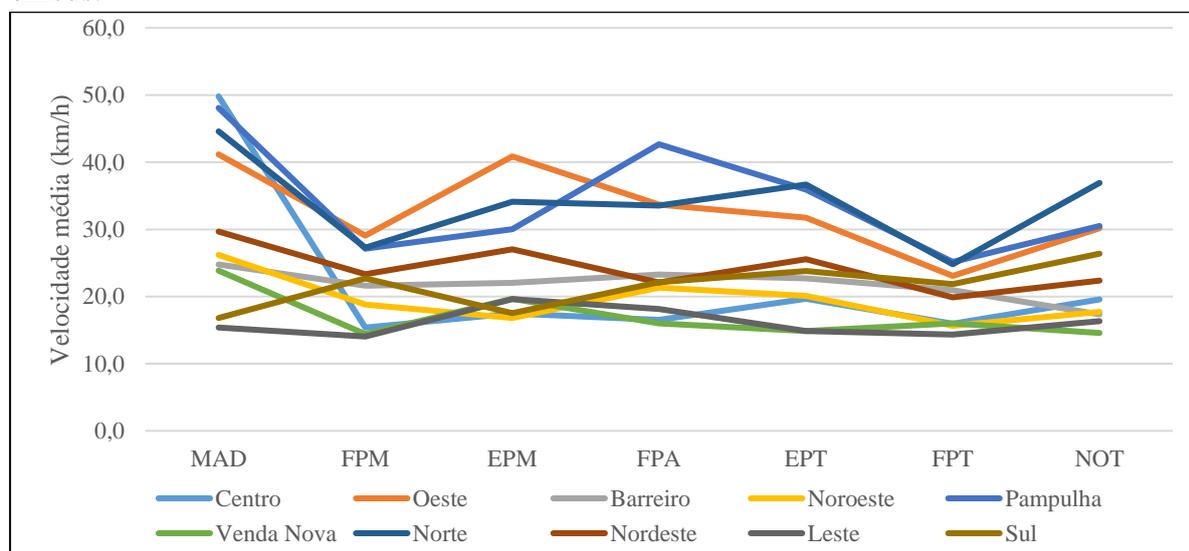
em cada trecho de via. Com isto, como já foi dito para os modelos relativos aos automóveis, os modelos sem intercepto apresentam velocidades médias inferiores aos modelos com intercepto.

Tabela 20 - Parâmetros do modelo MQO sem intercepto e 1 tipo de via para a velocidade dos ônibus.

Regional	MAD	FPM	EPM	FPA	EPT	FPT	NOT
Centro	49,8	15,4	17,5	16,5	19,6	15,9	19,6
Oeste	41,2	29,1	40,9	33,7	31,7	23,1	30,2
Barreiro	24,8	21,6	22,0	23,3	22,7	20,9	17,3
Noroeste	26,2	18,8	16,8	21,3	20,1	15,7	17,7
Pampulha	48,1	27,1	30,0	42,6	35,9	25,2	30,5
Venda Nova	23,9	14,4	19,6	16,0	14,9	16,0	14,6
Norte	44,6	27,3	34,1	33,5	36,7	24,8	36,9
Nordeste	29,7	23,3	27,0	22,1	25,5	19,9	22,4
Leste	15,4	14,0	19,6	18,1	14,8	14,3	16,3
Sul	16,8	22,7	17,5	22,1	23,8	21,8	26,4

Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 17 - Parâmetros do modelo MQO sem intercepto e 1 tipo de via para a velocidade dos ônibus.



Fonte: elaborado pelo autor.

Comparado ao modelo MQO com intercepto (Gráfico 14), o Gráfico 17 apresentou resultados muito melhores. Entretanto, não foi possível perceber nenhuma Regional se destacando como de menor velocidade, embora para a avaliação da maior velocidade, as regionais Oeste, Pampulha e Norte possam ser assim categorizadas.

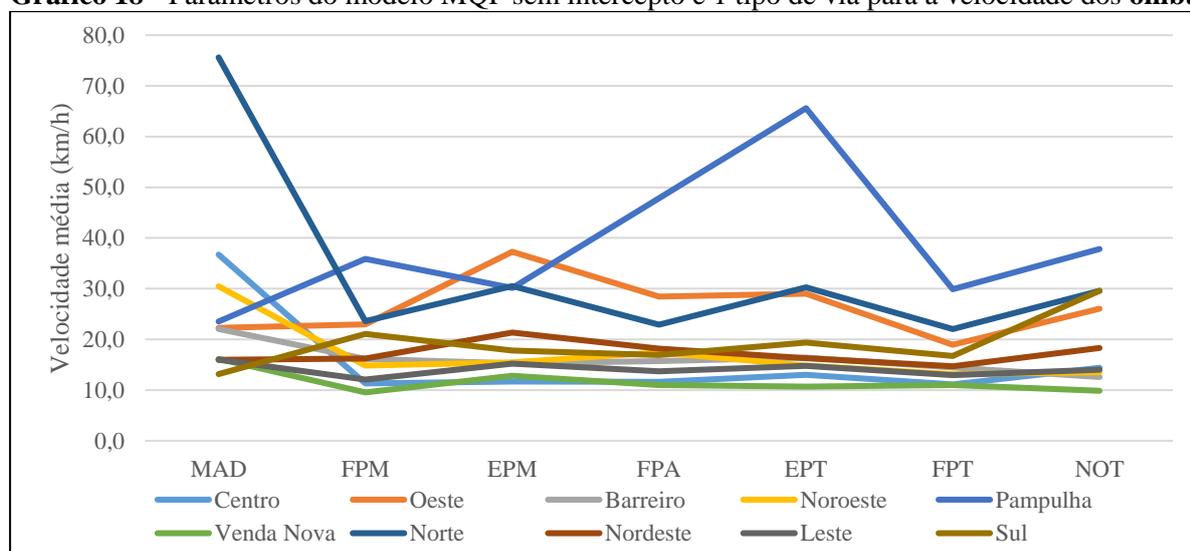
Uma vez que não houve nenhuma velocidade negativa nem superior a 100 km/h, não foi necessário ajustar o modelo restritivo, e já são apresentados na Tabela 21 e no Gráfico 18 o modelo de Mínimos Quadrados Ponderados.

Tabela 21 - Parâmetros do modelo MQP sem intercepto e 1 tipo de via para a velocidade dos ônibus.

Regional	MAD	FPM	EPM	FPA	EPT	FPT	NOT
Centro	36,7	11,3	11,7	11,6	13,0	11,1	14,4
Oeste	22,3	23,0	37,3	28,4	29,0	18,9	26,1
Barreiro	22,0	16,2	15,3	15,7	16,4	14,5	12,6
Noroeste	30,5	14,8	15,4	17,4	14,9	13,1	13,5
Pampulha	23,5	35,9	30,1	47,8	65,6	29,9	37,8
Venda Nova	16,1	9,6	12,8	11,0	10,7	11,0	9,8
Norte	75,6	23,6	30,5	22,9	30,2	22,0	29,6
Nordeste	16,0	16,2	21,3	18,2	16,3	14,7	18,3
Leste	16,0	12,1	15,2	13,7	14,8	12,9	14,0
Sul	13,2	21,1	17,8	16,9	19,4	16,7	29,6

Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 18 - Parâmetros do modelo MQP sem intercepto e 1 tipo de via para a velocidade dos ônibus.



Fonte: elaborado pelo autor.

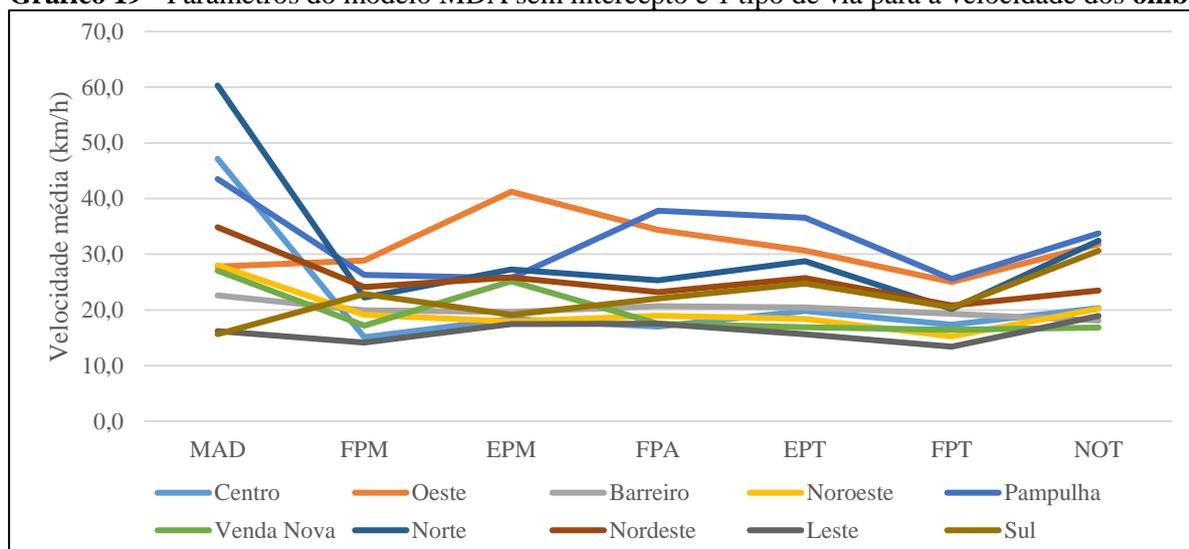
Mais uma vez, analisando o resultado do modelo MQP sem intercepto e com 1 via, não foi possível perceber nenhuma Regional se destacando como de menor velocidade, embora as regionais Oeste, Pampulha e Norte tenham sido identificadas como as de maior velocidade. Por último, é exibido o resultado do modelo que minimiza a soma dos desvios absolutos (MDA).

Tabela 22 - Parâmetros do modelo MDA sem intercepto e 1 tipo de via para a velocidade dos ônibus.

Regional	MAD	FPM	EPM	FPA	EPT	FPT	NOT
Centro	47,1	15,1	18,4	17,0	19,8	17,4	20,3
Oeste	27,8	28,9	41,2	34,4	30,7	25,0	31,8
Barreiro	22,6	19,9	19,6	20,6	20,4	19,3	18,1
Noroeste	28,0	19,1	17,9	18,9	18,4	15,2	20,2
Pampulha	43,5	26,3	25,7	37,8	36,6	25,6	33,7
Venda Nova	27,1	17,2	25,1	17,5	16,9	16,4	16,8
Norte	60,3	22,2	27,3	25,3	28,8	20,2	32,4
Nordeste	34,9	24,1	25,9	23,2	25,7	20,8	23,5
Leste	16,2	14,1	17,4	17,5	15,6	13,4	18,9
Sul	15,6	22,8	19,1	22,0	24,7	20,5	30,6

Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 19 - Parâmetros do modelo MDA sem intercepto e 1 tipo de via para a velocidade dos **ônibus**.



Fonte: elaborado pelo autor.

É possível concluir ao analisar o Gráfico 19 – ajustado segundo o modelo MDA sem intercepto e com 1 via – que as regionais Oeste e Pampulha possuem as maiores velocidades, e que, em geral, o gráfico parece mais "bem-comportado" que os anteriores.

Analisando todos os gráficos desta seção, é possível perceber que os modelos sem intercepto apresentaram estimativas muito mais estáveis para a velocidade. Os gráficos dos modelos com intercepto mostram linhas se misturando, trocando de posições a todo momento, e isto não era de se esperar. As velocidades dos ônibus até poderiam mudar bruscamente em uma Regional, de uma faixa horária para a seguinte, mas quando isto ocorre é de se esperar que as outras regionais registrem comportamento semelhante; mas não é isto que ocorre. Aliás, muitas vezes ocorre o contrário: a velocidade aumenta muito em uma Regional ao mesmo tempo que reduz muito em outra; e, no próximo horário, ela reduz (acentuadamente) onde havia aumentado e aumenta onde tinha diminuído. Este comportamento é estranho e pouco provável. Os modelos sem intercepto, como já foi dito acima, apresentaram resultados muito mais regulares quanto a isto.

Assim como ocorreu nos modelos para as velocidades dos carros, cerca de três regionais apresentaram os valores mais altos para a velocidade. Estes valores podem ser considerados também como pouco prováveis, por causa de sua oscilação estranha. Estas regionais foram: Oeste, Norte e Pampulha. Em relação à Regional Centro, entretanto, o resultado foi um pouco diferente do resultado dos modelos para os carros. Desta vez, em nenhum modelo a velocidade da Regional Centro foi inferior às outras regiões, como naqueles casos. Poderia até se discutir que a Regional Venda Nova apresentou resultados semelhantes à Regional Centro. Todavia,

em virtude da caracterização única da região central de Belo Horizonte, com suas vias largas, planejadas, *semaforizadas* e congestionadas, e do caráter radial de um grande número de linhas de ônibus, optou-se por analisar a Regional Centro separadamente das demais, assim como para os carros. Assim, o agrupamento testado foi: a Regional Centro como um grupo sozinho, as regionais Oeste, Norte e Pampulha, como um segundo grupo, e as demais como um terceiro grupo.

Há ainda um outro fato, a princípio curioso, notado ao se observar as tabelas dos modelos dos ônibus e dos carros, mas que ajuda a justificar o agrupamento das regionais: as tabelas anteriores que apresentam valores irreais, valores que extrapolaram (ou quase) a amplitude de “velocidade razoável”, geralmente apresentaram tais valores no horário da madrugada. Isto é sugestivo e de grande importância para a continuidade da análise. Como foi neste período que ocorreu o menor número de viagens, isto sugere que pode estar ocorrendo algum problema de estimação devido ao pequeno número de observações.

Apesar da Tabela 6 mostrar que existem 9.634 linhas de dados representando os trajetos de carro e 11.827 representando os trajetos de ônibus, na verdade, estas observações são altamente correlacionadas. Como estas cerca de 10 mil observações foram obtidas por reamostragem (replicação) dos cerca de 100 trajetos originais de carro e de ônibus (lembrando que o valor médio do fator de expansão foi aproximadamente 100); mesmo que a rua exata de localização da origem e destino sejam diferentes de uma replicação para a outra, as regionais pelas quais a rota do veículo passa são praticamente as mesmas e, principalmente, as distâncias percorridas nestas regionais também são muito próximas. Com isto, na verdade, é como se a base de dados fosse aproximadamente 100 vezes menor que o tamanho das matrizes X . Como nas outras faixas horárias as matrizes X são muito maiores, mesmo com esta redução o número de observações ainda fica muito grande, não afetando as estimativas dos parâmetros nestes casos.

Com isto, escolheu-se por ajustar os quatro modelos acima, com 1 tipo de via e sem intercepto, tanto para ônibus quanto para carros, mas considerando 3 grupos de regionais.

4.2.3 Modelos com 3 grupos de regionais e 1 tipo de via para carros

A seguir, na Tabela 23 e no Gráfico 20, são mostrados os resultados do modelo MQO sem intercepto e com 1 tipo de via e 3 agrupamentos de regionais, segundo a divisão justificada no último parágrafo da seção 4.2.1.

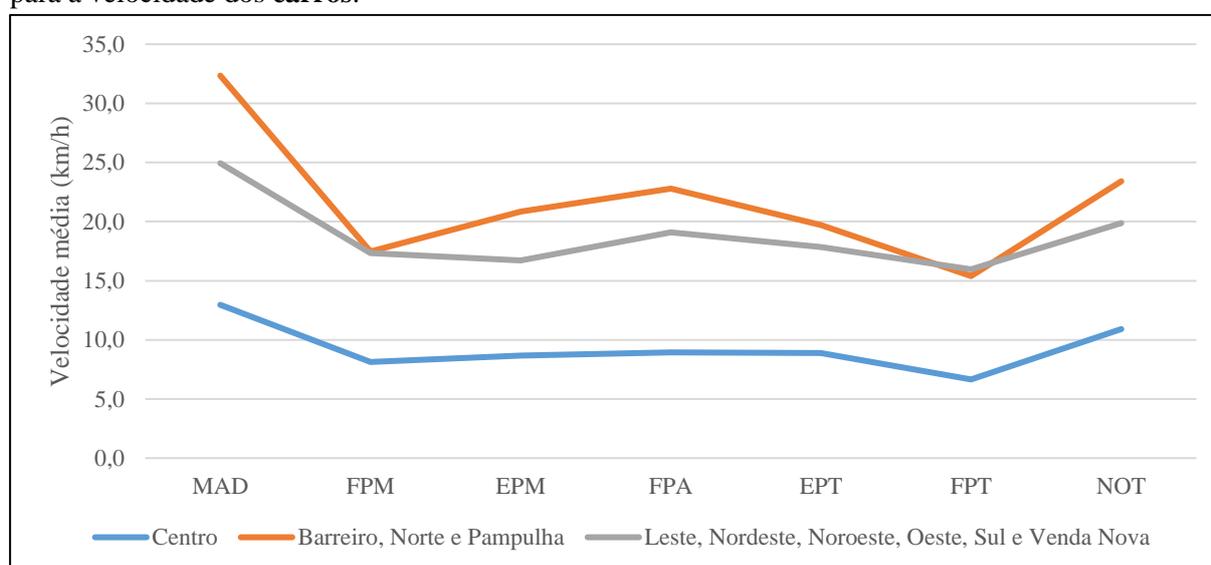
Tabela 23 - Parâmetros do modelo MQO sem intercepto, 1 tipo de via e 3 agrupamentos de regionais para a velocidade dos **carros**.

Regional	MAD	FPM	EPM	FPA	EPT	FPT	NOT
Centro	13,0	8,1	8,7	8,9	8,9	6,7	10,9
Barreiro, Norte e Pampulha	32,3	17,5	20,9	22,8	19,7	15,4	23,4
Leste, Nordeste, Noroeste, Oeste, Sul e Venda Nova	24,9	17,3	16,7	19,1	17,8	16,0	19,9

Fonte: elaborado pelo autor.

Analisando diretamente a Tabela 23, já fica visível que a Regional Centro exibiu menores valores que as demais.

Gráfico 20 - Parâmetros do modelo MQO sem intercepto, 1 tipo de via e 3 agrupamentos de regionais para a velocidade dos **carros**.



Fonte: elaborado pelo autor.

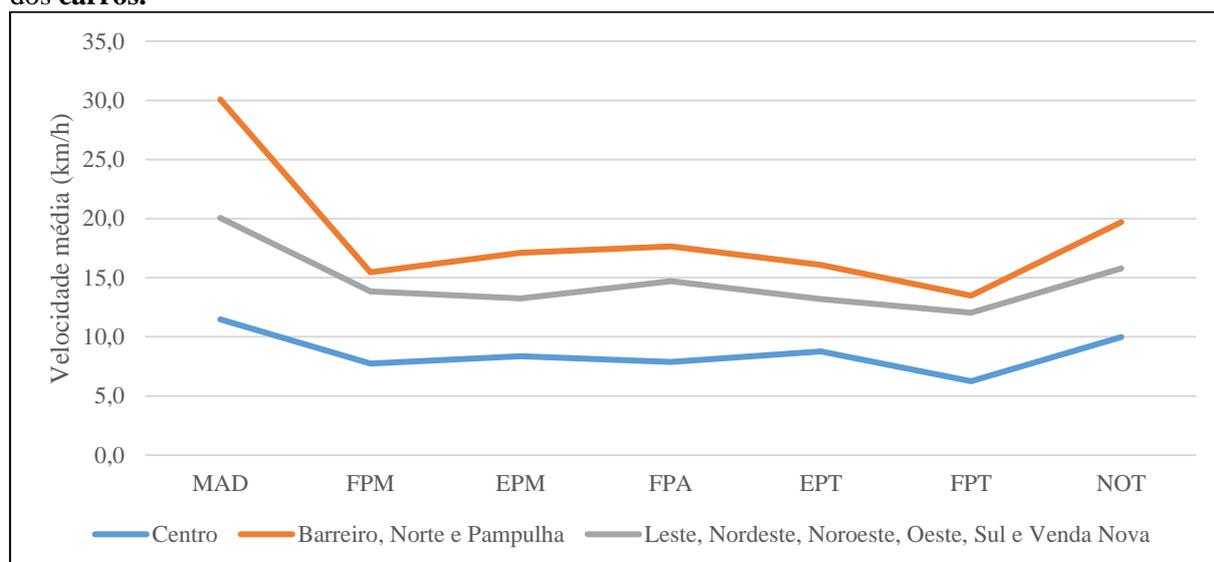
Pelo Gráfico 20, fica mais evidente a diferença entre o Centro e o restante da cidade no quesito "velocidade média dos carros", segundo o modelo MQO sem intercepto com 1 tipo de via e 3 agrupamentos de regionais. Também fica evidente que os valores das estimativas agora se mostraram muito mais estáveis, provavelmente por causa da robustez de uma maior base de dados em cada matriz X , já que as regionais foram agrupadas. Mais uma vez, como o resultado do modelo MQO não extrapolou os limites considerados válidos, não foi necessário ajustar o modelo com restrições.

Tabela 24 - Parâmetros do modelo MQP sem intercepto, 1 tipo de via e 3 regionais para a velocidade dos **carros**.

Regional	MAD	FPM	EPM	FPA	EPT	FPT	NOT
Centro	11,5	7,7	8,4	7,9	8,8	6,2	10,0
Barreiro, Norte e Pampulha	30,1	15,5	17,1	17,6	16,1	13,5	19,7
Leste, Nordeste, Noroeste, Oeste, Sul e Venda Nova	20,1	13,8	13,2	14,7	13,2	12,0	15,8

Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 21 - Parâmetros do modelo MQP sem intercepto, 1 tipo de via e 3 regionais para a velocidade dos carros.



Fonte: elaborado pelo autor.

Apesar do Gráfico 21 ser semelhante ao Gráfico 20, o resultado do modelo MQP sem intercepto com 1 tipo de via mostrou uma maior separação entre os três grupos de regionais. Em todas as faixas horárias, a Regional Centro apresentou velocidades inferiores às demais; as regionais Barreiro, Norte e Pampulha apresentaram as maiores velocidades. As outras 6 regionais, por sua vez, apresentaram valores intermediários da velocidade ao longo de todo o dia. A seguir são exibidos os resultados do modelo MDA.

Tabela 25 - Parâmetros do modelo MDA sem intercepto, 1 tipo de via e 3 regionais para a velocidade dos carros.

Regional	MAD	FPM	EPM	FPA	EPT	FPT	NOT
Centro	13,3	9,0	9,4	10,2	9,9	7,2	12,6
Barreiro, Norte e Pampulha	30,5	17,2	20,1	21,7	18,8	15,3	23,4
Leste, Nordeste, Noroeste, Oeste, Sul e Venda Nova	29,0	16,6	17,2	18,1	17,1	15,1	20,3

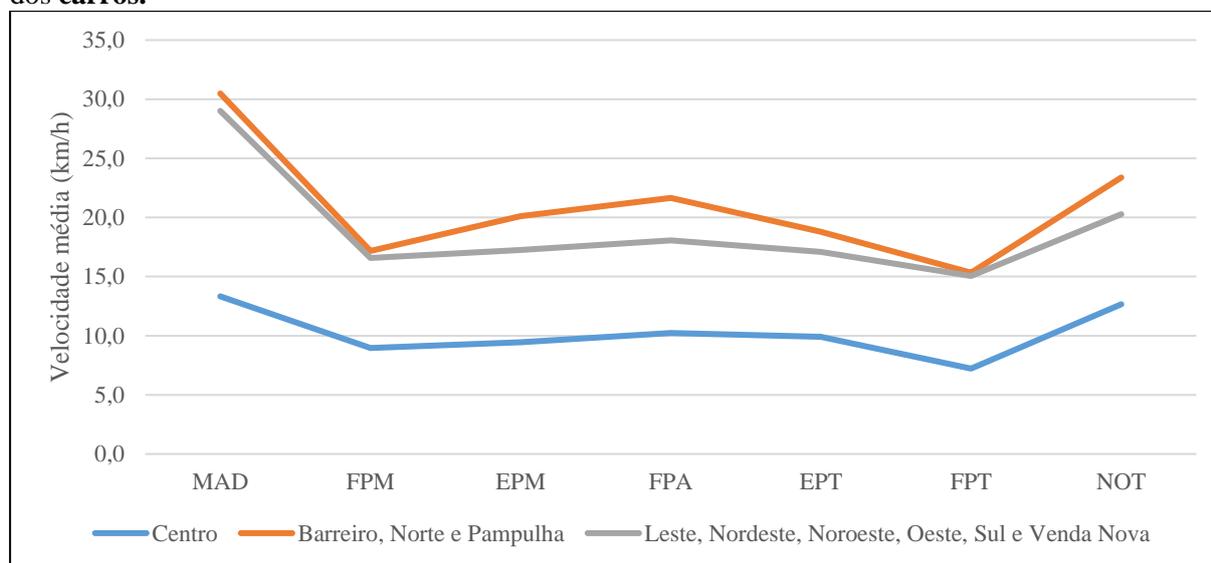
Fonte: elaborado pelo autor.

O Gráfico 22 mostra, de forma mais clara que a Tabela 25; que embora a relação entre os três agrupamentos de regionais tenha sido a mesma no modelo MDA que foi no modelo MQP, o formato em si da curva pode ser considerado mais semelhante ao modelo MQO. Assim sendo, pode ser interpretado que o modelo MDA é uma espécie de meio termo entre os outros dois.

Uma importante conclusão, entretanto, que à primeira vista pode passar despercebida, é que há uma diferença de escala entre os três Gráficos (20, 21 e 22). Em geral o modelo MQP apresenta menores velocidades que os outros dois. Com isto, podemos prever que ao menos um modelo deve ser viciado. Conforme adiantado na seção 2.4.2, os modelos seriam escolhidos pelos

critérios de “razoabilidade” das estimativas, pela ausência de viés de predição e pelo menor Erro Quadrático Médio. A ausência de viés de predição pode ser avaliada pelo Erro Médio, que deve ser 0 em caso de não haver viés. A Tabela 26 mostra os Erros Médios (EM) e os Erros Quadráticos Médios (EQM) de todos os modelos acima apresentados.

Gráfico 22 - Parâmetros do modelo MDA sem intercepto, 1 tipo de via e 3 regionais para a velocidade dos carros.



Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 26 – Erro Médio e Erro Quadrático Médio dos modelos de previsão da velocidade em carros com 3 regionais.

Modelo	Intercepto	Vias (tipos)	Erro médio (minutos)	Erro Quadrático Médio (minutos)
MQO	sem	1	4,69	4,71
MQP	sem	1	0	5,32
MDA	sem	1	4,99	4,74

Fonte: elaborado pelo autor.

A interpretação da Tabela 26 é simples e direta: apenas o modelo de Mínimos Quadrados Ponderados é não viciado para a estimação do tempo de viagem. Além disso, o mesmo ainda apresentou um baixo valor para o EQM (apesar de ter sido ligeiramente superior aos outros dois modelos). Assim, este modelo foi o escolhido.

A ponderação do modelo MQP foi feita utilizando o inverso do comprimento das vias, ou seja, trajetos mais longos tiveram seu peso reduzido na análise. Na verdade, a justificativa encontrada para este resultado é a seguinte. A suposição de *homocedasticidade*, ou seja, de igualdade de variâncias de Y (tempo de trajeto) para quaisquer valores de X (distância percorrida), é violada no modelo MQO. Maiores distâncias geram maiores tempos e consequentes maiores variâncias

deste tempo. E a literatura já diz claramente como corrigir esta violação, que é com o uso da ponderação dos resíduos (MONTGOMERY e PECK, 1992). De fato, caso esta correção dos pesos não fosse feita, é como se o modelo MQO desse grande importância às maiores distâncias (devido à maior variabilidade do tempo), e o que a ponderação faz é corrigir este problema.

4.2.4 Modelos com 3 grupos de regionais e 1 tipo de via para ônibus

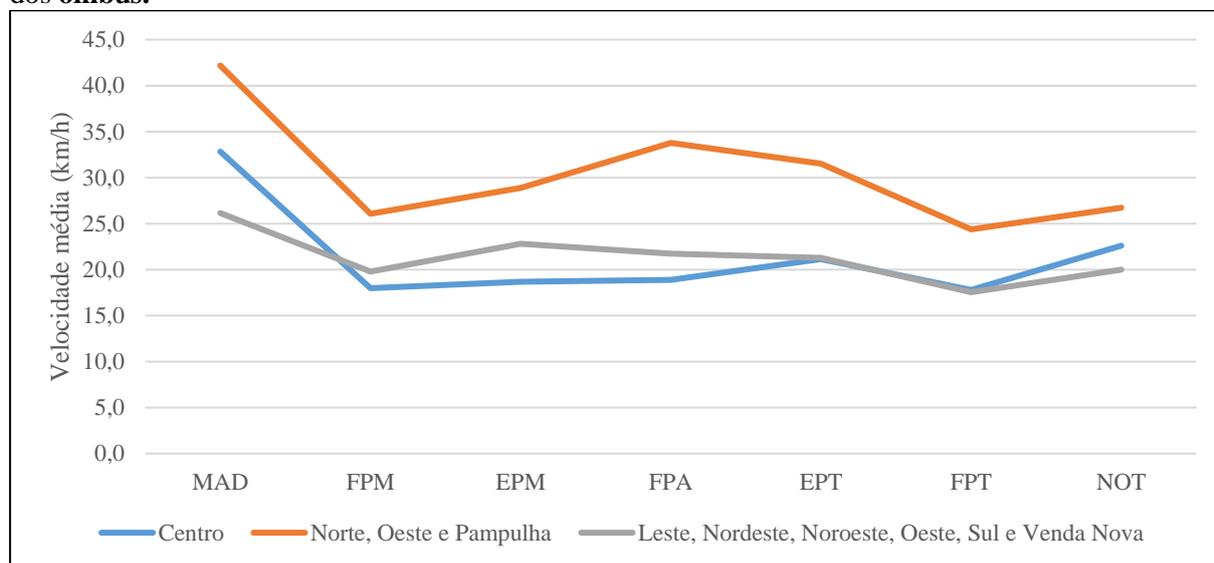
A Tabela 27 e o Gráfico 23, exibidos a seguir, mostram o resultado do modelo MQO sem intercepto e com 1 tipo de via ajustado ao deslocamento dos ônibus, considerando os três agrupamentos de regionais sugeridos pela argumentação do antepenúltimo parágrafo da seção 4.2.2.

Tabela 27 - Parâmetros do modelo MQO sem intercepto, 1 tipo de via e 3 regionais para a velocidade dos ônibus.

Regional	MAD	FPM	EPM	FPA	EPT	FPT	NOT
Centro	32,8	18,0	18,7	18,9	21,1	17,8	22,6
Norte, Oeste e Pampulha	42,2	26,1	28,9	33,8	31,5	24,4	26,7
Leste, Nordeste, Noroeste, Oeste, Sul e Venda Nova	26,1	19,8	22,8	21,7	21,3	17,5	20,0

Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 23 - Parâmetros do modelo MQO sem intercepto, 1 tipo de via e 3 regionais para a velocidade dos ônibus.



Fonte: elaborado pelo autor.

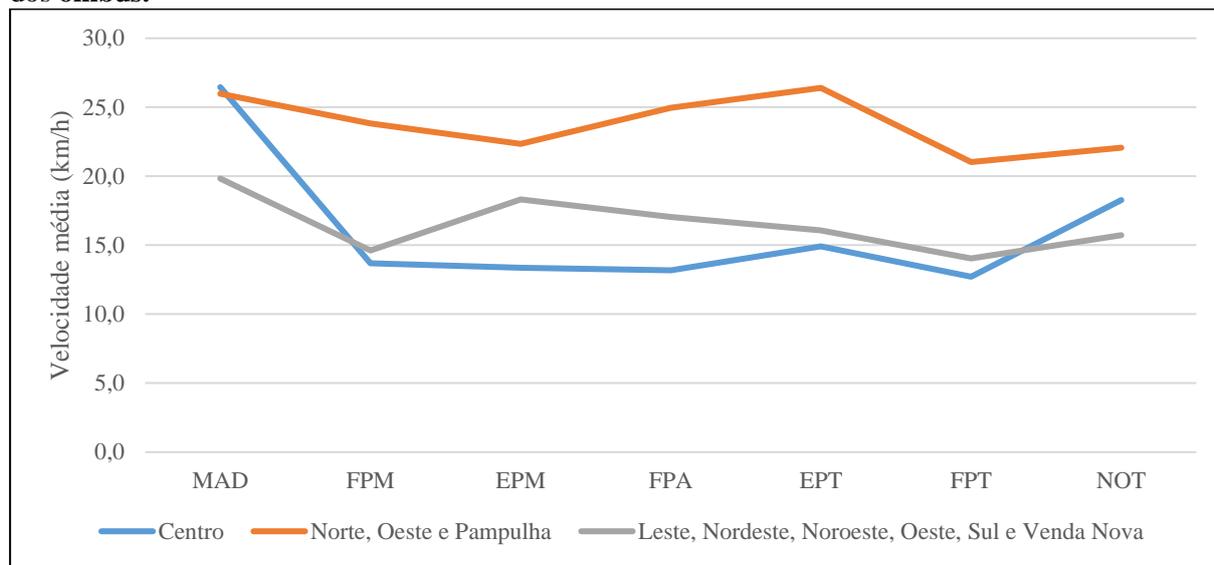
Diferentemente do modelo MQO ajustado aos carros, o Gráfico 21 não mostra a Regional Centro com menores valores de velocidade em todas as horas do dia. A Regional Centro divide tal posto com o agrupamento de seis regionais, enquanto que as Regionais Norte, Oeste e Pampulha mostraram maiores velocidades ao longo de todo o dia. A Tabela 28 e o Gráfico 24 exibem os resultados do modelo MQP.

Tabela 28 - Parâmetros do modelo MQP sem intercepto, 1 tipo de via e 3 regionais para a velocidade dos ônibus.

Regional	MAD	FPM	EPM	FPA	EPT	FPT	NOT
Centro	26,5	13,7	13,4	13,2	14,9	12,7	18,3
Norte, Oeste e Pampulha	26,0	23,8	22,4	25,0	26,4	21,0	22,1
Leste, Nordeste, Noroeste, Oeste, Sul e Venda Nova	19,8	14,6	18,3	17,0	16,1	14,0	15,7

Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 24 - Parâmetros do modelo MQP sem intercepto, 1 tipo de via e 3 regionais para a velocidade dos ônibus.



Fonte: elaborado pelo autor.

O Gráfico 24, do modelo MQP, apresentou resultado semelhante ao Gráfico 23, do modelo MQO, no quesito ordenação dos agrupamentos de regionais. Contudo, as velocidades do Gráfico 24 se mostraram mais *errantes* que as do Gráfico 21.

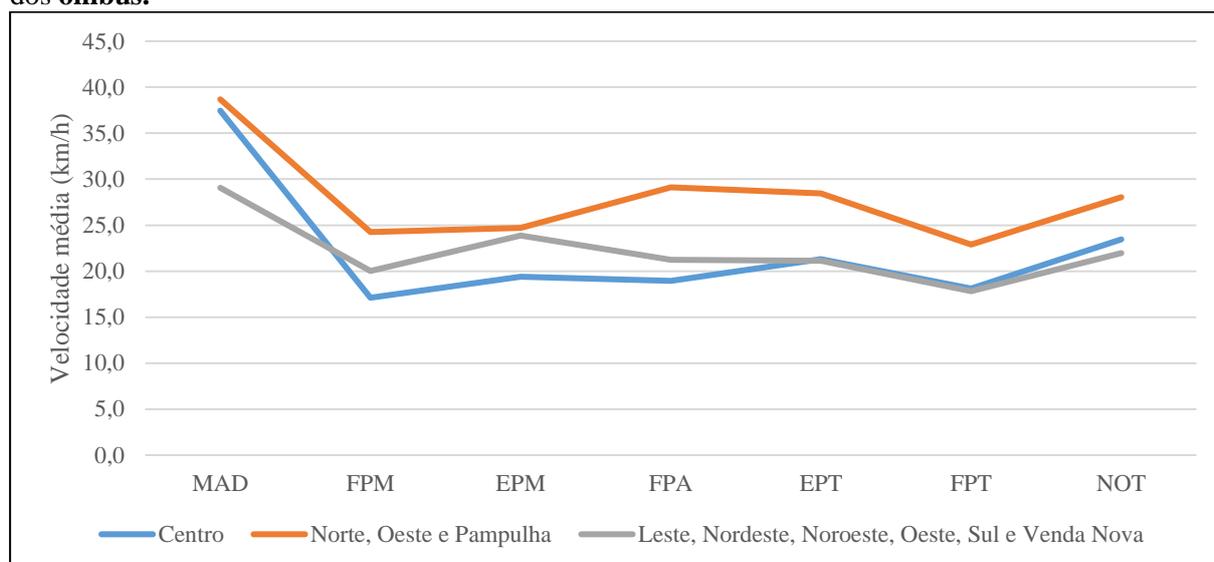
Tabela 29 - Parâmetros do modelo MDA sem intercepto, 1 tipo de via e 3 regionais para a velocidade dos ônibus.

Regional	MAD	FPM	EPM	FPA	EPT	FPT	NOT
Centro	37,4	17,1	19,4	18,9	21,3	18,1	23,4
Norte, Oeste e Pampulha	38,7	24,3	24,7	29,1	28,5	22,9	28,1
Leste, Nordeste, Noroeste, Oeste, Sul e Venda Nova	29,1	20,0	23,9	21,2	21,1	17,8	22,0

Fonte: elaborado pelo autor.

O modelo MDA, por sua vez, exibido na Tabela 29 e no Gráfico 25, mostrou valores mais "bem-comportados" da velocidade que o Gráfico 24 (MQP), e semelhantes em comportamento ao Gráfico 23 (MQO).

Gráfico 25 - Parâmetros do modelo MDA sem intercepto, 1 tipo de via e 3 regionais para a velocidade dos ônibus.



Fonte: elaborado pelo autor.

Além dessas pequenas diferenças entre os modelos, mais uma vez um olhar atento permite perceber que o modelo MQP apresentou menores valores que os outros dois modelos, indicando que ao menos um dos modelos é viciado. A Tabela 30 mostra a comparação destes modelos em relação ao Erro Médio – que analisa o viés – e ao Erro Quadrático Médio – que analisa a variância.

Tabela 30 – Erro Médio e Erro Quadrático Médio dos modelos de previsão da velocidade em ônibus com 3 regionais.

Modelo	Intercepto	Vias (tipos)	Erro médio (minutos)	Erro Quadrático Médio (minutos)
MQO	sem	1	6,59	6,48
MQP	sem	1	0,0	7,58
MDA	sem	1	6,92	6,51

Fonte: elaborado pelo autor.

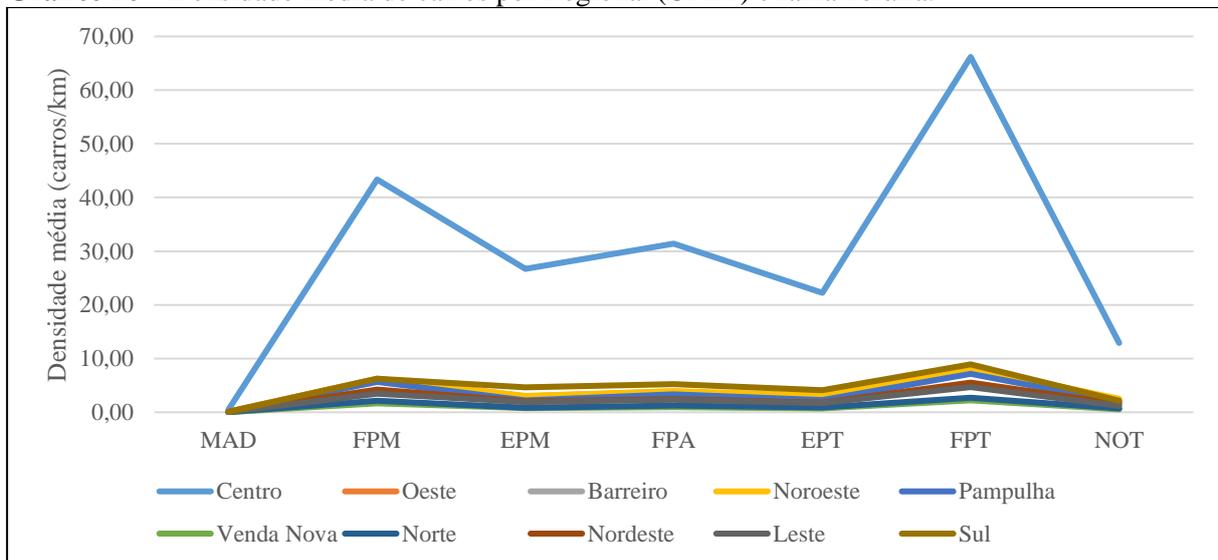
Assim como aconteceu com os carros, apesar de apresentar (ligeiramente) o maior EQM, o modelo de Mínimos Quadrados Ponderados foi o único que não apresentou viés (EM=0). Assim, este modelo foi o escolhido. Outra análise importante que pode ser feita é que a velocidade dos ônibus não parece ter um comportamento tão bem definido como a dos automóveis, cujos modelos apresentaram uma evidente redução da velocidade nos horários de pico e um grande aumento na madrugada. Este comportamento não é tão claro nos ônibus, indicando que os mesmos não sofrem tanto impacto do congestionamento quanto os automóveis. Talvez isto ocorra pelas constantes paradas nos Pontos de Embarque e Desembarque (PED), que já diminui sua velocidade mesmo em baixas densidades.

4.3 Estimação da densidade de veículos

Após ter sido demonstrado como foi o cálculo das velocidades médias em cada Regional e hora do dia, é possível estimar a densidade de veículos nestas mesmas vias a cada hora do dia. Para isto, seguindo os pressupostos descritos na seção 3.4.3, bastou usar o algoritmo desenvolvido para este fim. Este algoritmo de simulação somou o tempo gasto por cada veículo em cada via, e dividiu a soma pelo produto entre o tempo disponível e o comprimento destas vias. Como a densidade calculada foi por Regional e por período, o valor final foi uma densidade média de veículos em determinado horário e determinado conjunto de vias, e esta densidade foi medida em veículos por quilômetro linear.

Um importante fator a ser considerado é que no caso dos ônibus, foi considerado o quadro de horário dos veículos para se saber o número de veículos circulando em determinado momento. Já para os carros, foram considerados os motoristas segundo a pesquisa OD. O Gráfico 26 exhibe os valores das densidades de automóveis calculados separadamente para cada grupo de regionais. Para isto, considerou-se a densidade de carros como sendo b/e e a densidade de ônibus d/e , segundo a equação apresentada em 3.4.3.

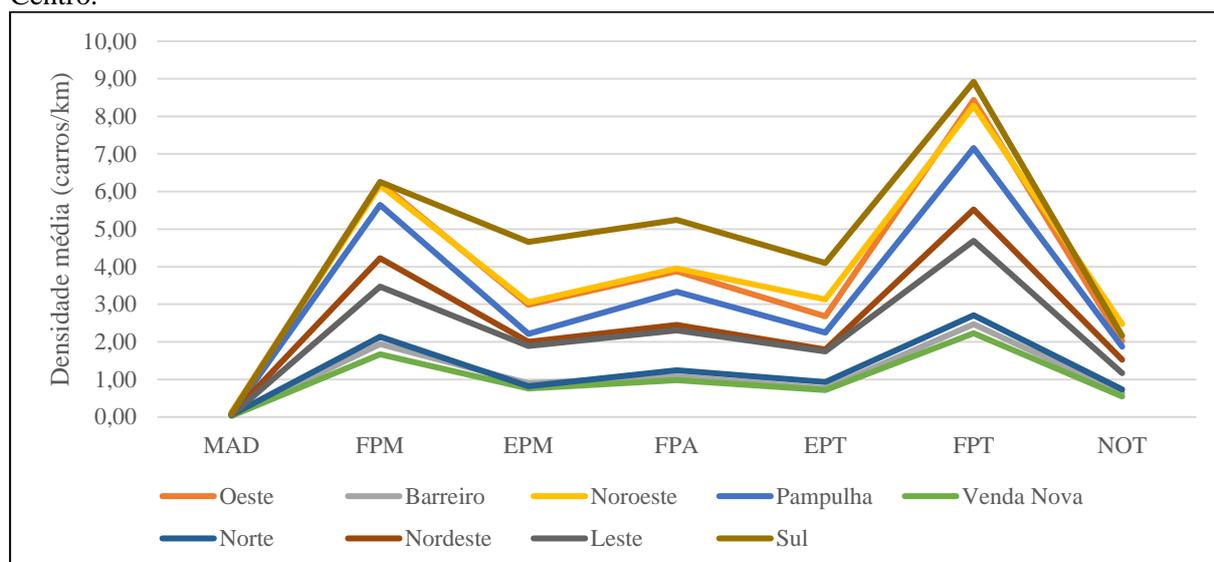
Gráfico 26 – Densidade média de carros por Regional (UMM) e faixa horária.



Fonte: elaborado pelo autor.

Segundo o Gráfico 26, a Regional Centro apresentou uma densidade variável ao longo do dia, com destaque para as densidades nos horários de pico. Contudo, como tal Regional apresentou valores de densidade muito superiores às demais regionais, dificultando a comparação destas outras, construiu-se o Gráfico 27, que excluiu a Regional Centro.

Gráfico 27 – Densidade média de carros por Regional (UMM) e faixa horária, excluindo a UMM Centro.



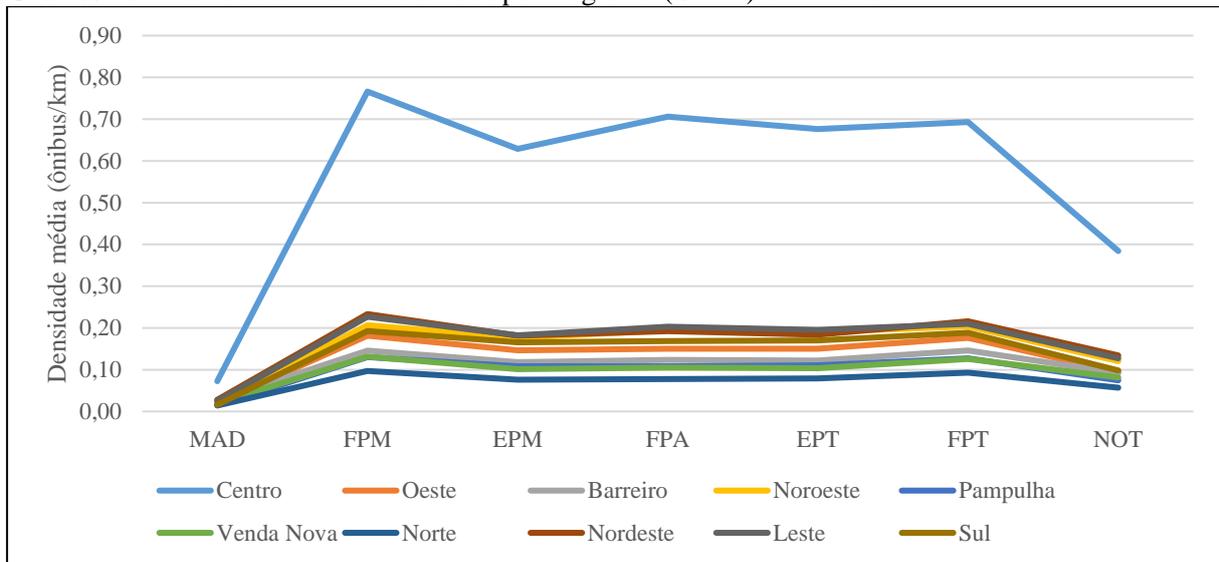
Fonte: elaborado pelo autor.

Como já era de se esperar, os Gráficos 26 e 27 mostraram que a densidade de automóveis no Centro da cidade é muito superior à densidade nas demais regionais. De fato, as regionais Venda Nova, Barreiro e Norte foram as que apresentaram menores valores de densidade de veículos. Da mesma forma, observou-se que a densidade é muito maior nos horários de picos, tanto para as regionais em geral, quanto somente para a Regional Centro (Gráfico 26). E dentre os dois picos, a densidade foi ainda maior na Faixa de Pico da Tarde, seguida pela Faixa de Pico da Manhã e pela Faixa de Pico do Almoço.

O Gráfico 28 exhibe as densidades calculadas como acima, mas desta vez considerando apenas os ônibus nas vias. Assim como na análise dos carros (Gráfico 26), a densidade de ônibus se mostrou muito superior no Centro que no restante da cidade. É interessante perceber, contudo, que com exceção dos horários da Madrugada e Noturno, a densidade de ônibus no Centro não variou muito ao longo do dia.

O Gráfico 29, no que excluiu a Regional Centro da análise, mostra que também nas outras regionais não há uma grande diferença de densidade de ônibus ao longo do dia, excetuando-se os horários Noturno e da Madrugada. Isto é, a diferença entre os picos e os outros horários não é tão evidente quanto no caso dos automóveis. Como destaque de menor densidade de ônibus, a Regional Norte pode ser escolhida isoladamente, diferentemente dos carros, quando houve um empate técnico entre três regionais. Por último, mas não menos importante, é possível perceber que diferentemente das densidades dos carros, dentre os dois picos, aparentemente o pico da manhã apresentou uma densidade de ônibus ligeiramente superior à do pico da tarde.

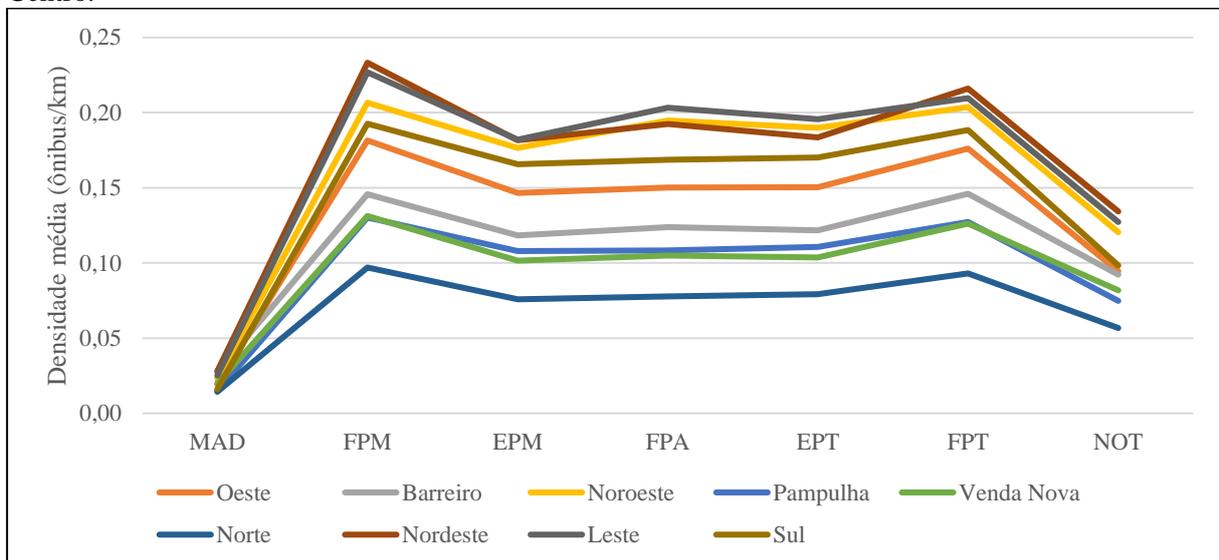
Gráfico 28 – Densidade média de ônibus por Regional (UMM) e faixa horária.



Fonte: elaborado pelo autor.

A grande diferença entre as densidades de ônibus e de carro, contudo, está na escala dos valores. Enquanto que os automóveis em quase todos os horários e regionais apresentam uma densidade superior a 1 veículo por quilômetro linear, isto não acontece sequer uma vez com os ônibus.

Gráfico 29 – Densidade média de ônibus por Regional (UMM) e faixa horária, excluindo a UMM Centro.



Fonte: elaborado pelo autor.

Estes gráficos acima são apenas instrutivos para demonstrar o efeito que cada modo de transporte tem no congestionamento da cidade. Entretanto, foi calculada também a densidade geral de veículos, valor necessário para o intuito do próximo objetivo específico. Conforme já

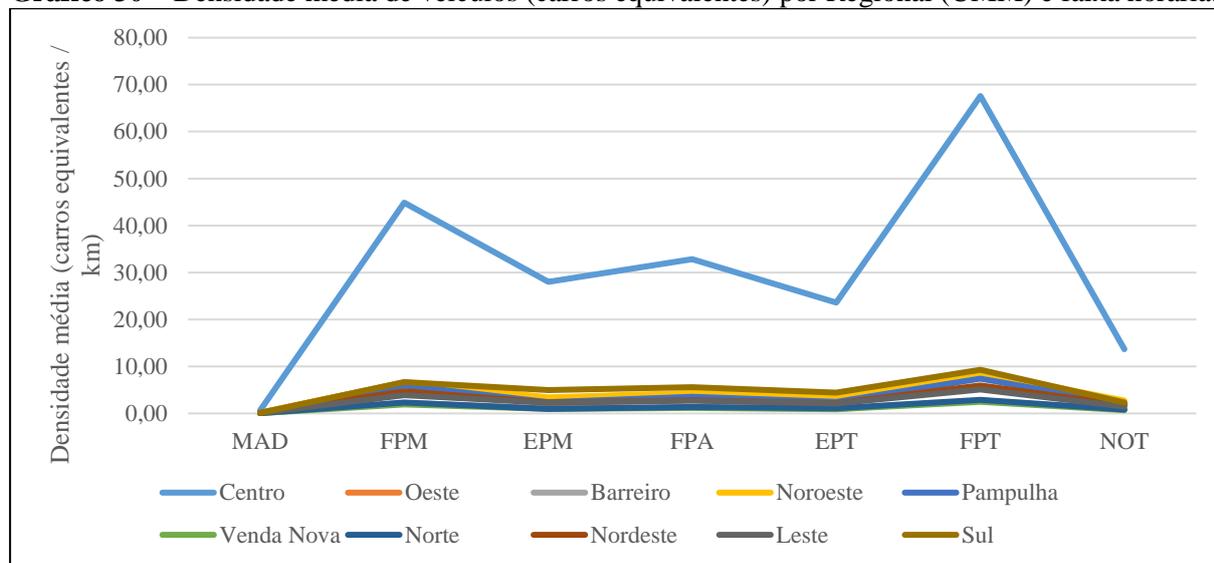
foi explicado e justificado na seção 3.3.3, isto foi feito somando as densidades de carros e de ônibus $((b+2*d)/e)$, mas com "peso dois" para os ônibus. Assim como antes, foram construídos dois gráficos, sendo que o segundo deles não exibe os resultados da Regional Centro, devido à grande diferença da escala entre os valores, que torna difícil a visualização e interpretação dos valores para estas outras nove regionais. Os resultados são exibidos na Tabela 31 e nos Gráficos 30 e 31 a seguir.

Tabela 31 – Densidade média por faixa horária, em carros equivalentes por quilômetro

Regional	MAD	FPM	EPM	FPA	EPT	FPT	NOT
Centro	0,7	44,9	28,0	32,8	23,6	67,6	13,7
Oeste	0,2	6,6	3,3	4,2	3,0	8,8	2,2
Barreiro	0,1	2,2	1,1	1,3	1,0	2,8	0,8
Noroeste	0,1	6,6	3,4	4,3	3,5	8,7	2,7
Pampulha	0,1	5,9	2,4	3,5	2,5	7,4	2,0
Venda Nova	0,1	1,9	1,0	1,2	0,9	2,5	0,7
Norte	0,1	2,3	1,0	1,4	1,1	2,9	0,8
Nordeste	0,1	4,7	2,4	2,8	2,2	6,0	1,8
Leste	0,1	3,9	2,3	2,7	2,1	5,1	1,4
Sul	0,1	6,6	5,0	5,6	4,4	9,3	2,4

Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 30 – Densidade média de veículos (carros equivalentes) por Regional (UMM) e faixa horária.

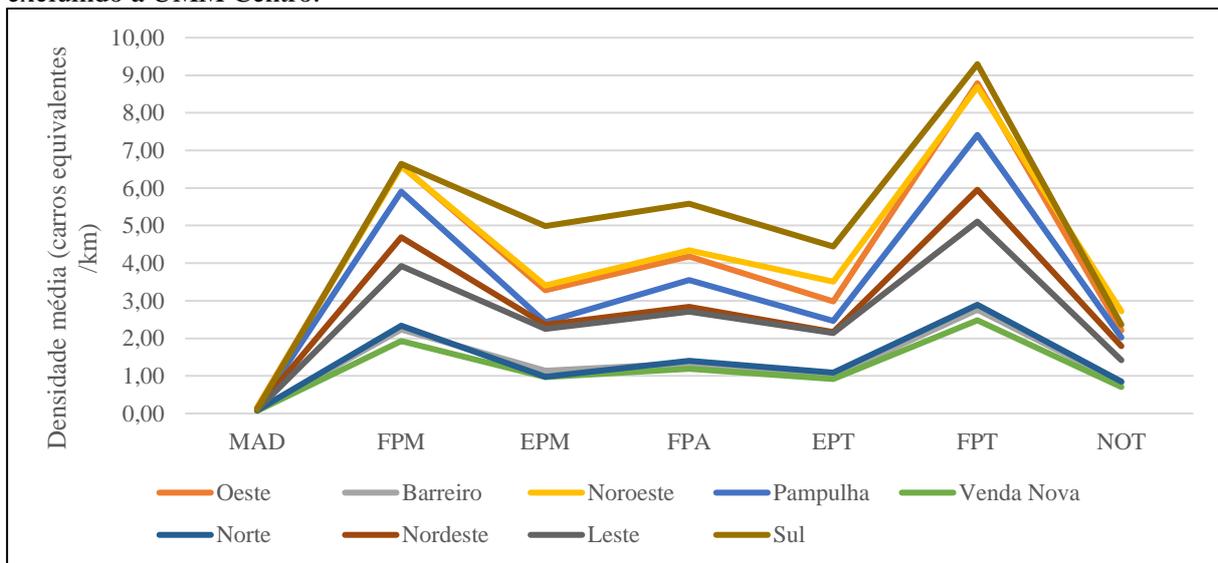


Fonte: elaborado pelo autor.

O Gráfico 30 é muito semelhante ao Gráfico 26. Isto se deve ao fato de que como a densidade de automóveis é muito maior que a densidade de ônibus, quando os dois veículos são considerados conjuntamente, mesmo se dando um peso 2 para o ônibus, o valor da densidade do carro *domina* a densidade do ônibus.

Da mesma forma, o Gráfico 31 é muito semelhante ao Gráfico 27. Ambos apresentam o formato que indica que a maior densidade de veículos ocorre na Faixa de Pico da Tarde, seguida pela Faixa de Pico da Manhã e pela Faixa de Pico do Almoço.

Gráfico 31 – Densidade média de veículos (carros equivalentes) por Regional (UMM) e faixa horária, excluindo a UMM Centro.



Fonte: elaborado pelo autor.

4.4 Modelagem macroscópica

Nas seções anteriores foram apresentadas a velocidade e a densidade médias de veículos, estimadas em cada Regional e hora do dia. Ambas as seções apresentaram tais estimativas em relação à hora do dia, mas não uma em relação à outra, que é o que será apresentado nesta seção. Com isto, foi possível testar três modelos macroscópicos para a relação "densidade *versus* velocidade", tanto de carros quanto de ônibus. É importante lembrar que, como está sendo considerado que os carros e ônibus dividem todas as vias – ou seja, está se desconsiderando as vias exclusivas para ônibus –, a densidade é a mesma para ambos os modos. Esta densidade está sendo medida em carros equivalentes por quilômetro linear de via. Conforme já foi explicado na seção anterior, está sendo considerado que o espaço ocupado por um ônibus equivale ao espaço ocupado por dois carros na via.

Os parâmetros a serem estimados pelos modelos de Underwood e Edie; de Greenberg e Herman; e de May e Keller, são: a velocidade média em trânsito livre (u_l), a velocidade média ótima – em fluxo máximo – (u_o), a densidade de congestionamento (k_{con}) a densidade ótima – em fluxo máximo – (k_o), além dos parâmetros α e β . Os valores mínimos e máximos de cada

um destes parâmetros foram principalmente baseados nos valores máximos e mínimos das densidades e velocidades nas mesmas regiões ao longo do dia. Por exemplo, a densidade de congestionamento deve ser maior que a densidade máxima de veículos ao longo do dia, que é a densidade na Faixa de Pico da Tarde (FPT). A densidade ótima, que é a densidade associada ao fluxo máximo de veículos, por outro lado, deve ser superior à densidade mínima, que é a observada durante a Madrugada (MAD).

Os valores máximos das densidades de congestionamento foram delimitados com o raciocínio descrito na seção 3.5.4, que explica que este trabalho seguiu os resultados obtidos por Greenberg (1959). Neste estudo, o autor descobriu que a densidade máxima observada no Túnel Lincoln em Nova York foi de 227 veículos por milha por faixa, que é equivalente a 141 veículos por quilômetro por faixa. Este valor foi então multiplicado pelo número médio de faixas de cada Regional. Como o número de faixas não é uma variável contida nas bases de dados, este valor foi estimado subjetivamente, de acordo com a impressão do autor. Com isto, assumiu-se um número médio de 2,5 faixas para a Regional Centro e de 1,5 faixas para as demais faixas. Com isto, os limites máximos para as densidades foram de 353 veículos por quilômetro linear de via no Centro, e de 212 no restante da cidade.

Em relação à velocidade em trânsito livre, esta deve ser maior que a velocidade máxima observada, que é a velocidade na Madrugada (MAD). Esta velocidade máxima observada, por outro lado, deve ser superior à velocidade ótima (em fluxo máximo). Embora haja a tentação de pensar que a velocidade ótima deva ser superior à velocidade mínima observada em cada Regional, que é a velocidade na Faixa de Pico da Tarde (FPT), não podemos afirmar que isto seja verdade. É possível que apesar do grande congestionamento no Pico da Tarde, o fluxo máximo de veículos ainda não tenha sido atingido. Por conseguinte, foi admitido arbitrariamente como limite inferior para a velocidade ótima o valor de 1 km/h. Da mesma forma, o limite máximo da velocidade em fluxo livre também foi definido arbitrariamente, como sendo de 100 km/h.

Os parâmetros α e β do modelo de May e Keller, por outro lado, não possuem interpretação prática como os parâmetros apresentados anteriormente. Mesmo assim, com base em testes com a otimização, e interpretando os valores gerados desde os parâmetros de velocidade livre e densidade de congestionamento com este modelo, chegou-se à conclusão de que os resultados foram melhores quando o α e o β foram limitados inferiormente em 0,3 e 1, respectivamente.

A Tabela 32 apresenta os valores iniciais e os limites destes parâmetros utilizados na função "solver" do Excel para a obtenção da minimização dos erros de previsão.

Tabela 32 – Descrição dos parâmetros, seus limites e valores iniciais

Parâmetro	Descrição	Modelo(s)	Limite inferior	Limite superior	Valores iniciais
u_l	velocidade livre	Underwood e Edie; May e Keller	velocidade na MAD	100	40
k_c	densidade de congestionamento	Greenberg e Herman; May e Keller	densidade na FPT	353	100
u_o	velocidade ótima	Greenberg e Herman	1	velocidade na MAD	10
k_o	densidade ótima	Underwood e Edie	densidade na MAD	353	50
A	-	May e Keller	0,3	-	1
B	-	May e Keller	1	-	2

Fonte: elaborado pelo autor.

A função utilizada para a estimação dos erros foi a soma ponderada dos erros quadráticos da velocidade prevista pelos modelos macroscópicos em cada faixa horária. A variável de ponderação utilizada foi diferente para carros e ônibus. Na verdade, uma foi o contrário da outra. Isto porque no caso dos automóveis, deseja-se que o modelo tenha boa previsão para altos valores de densidade, já que se espera que a densidade de veículos seja maior se todos utilizarem o carro. Por outro lado, se todos os cidadãos utilizarem o ônibus, a densidade deve apresentar baixos valores. Com isto, a ponderação utilizada para os automóveis foi proporcional à densidade de veículos, e para os ônibus, inversamente à densidade. De fato, no caso dos carros se utilizou o *ranking* crescente da densidade (1 para a menor densidade e 7 para a maior), e no caso dos ônibus, o contrário disto (1 para a maior densidade e 7 para a menor).

Abaixo são apresentadas as tabelas com os resultados dos ajustes de todos os modelos citados para os automóveis em cada grupo de regionais separadamente.

Tabela 33 – Resultados do Modelo de Underwood e Edie para carros

Parâmetro	Centro	Barreiro, Norte e Pampulha	Leste, Nordeste, Noroeste, Oeste, Sul e Venda Nova
u_l	11,5	30,1	20,1
k_o	103,8	4,6	11,1
u	$11,5 \exp\left(-\frac{k}{103,8}\right)$	$30,1 \exp\left(-\frac{k}{4,6}\right)$	$20,1 \exp\left(-\frac{k}{11,1}\right)$

Fonte: elaborado pelo autor.

Segundo o modelo de Underwood e Eddie (Tabela 33), a velocidade em trânsito livre foi inferior no Centro em relação às demais regionais. Isto provavelmente ocorre por causa da maior quantidade de semáforos na área central da cidade, além dos cruzamentos, que às vezes incluem 4 vias (ruas na horizontal e vertical e avenidas nas diagonais). Por outro lado, a densidade ótima foi muito superior no Centro que no resto da cidade, indicando que o fluxo máximo ocorre a uma maior densidade e menor velocidade no Centro que nas outras regionais.

Tabela 34 – Resultados do Modelo de Greenberg e Herman para carros

Parâmetro	Centro	Barreiro, Norte e Pampulha	Leste, Nordeste, Noroeste, Oeste, Sul e Venda Nova
u_o	3,1	3,9	3,3
k_c	352,7	156,0	211,6
U	$3,1 \ln\left(\frac{352,7}{k}\right)$	$3,9 \ln\left(\frac{156,0}{k}\right)$	$3,3 \ln\left(\frac{211,6}{k}\right)$

Fonte: elaborado pelo autor.

O modelo de Greenberg e Herman, segundo resultados exibidos na Tabela 34, mostrou que as velocidades ótimas são velocidades extremamente baixas, inferiores à velocidade de deslocamento a pé. Embora tal modelo não apresente a densidade ótima, provavelmente esta densidade seria alta, em virtude da baixa velocidade. O fluxo seria máximo devido à alta densidade, e não à velocidade. As densidades de congestionamento, inclusive, foram encontradas em dois agrupamentos de regionais como sendo o limite máximo proposto, de 352,7 e de 211,6 veículos por km linear.

Tabela 35 – Resultados do Modelo de May e Keller para carros

Parâmetro	Centro	Barreiro, Norte e Pampulha	Leste, Nordeste, Noroeste, Oeste, Sul e Venda Nova
u_l	11,9	36,7	22,3
k_c	347,62	211,6	211,6
α	0,59	0,30	0,30
β	1,34	2,62	1,37
u	$11,9 \left[1 - \left(\frac{k}{347,62}\right)^{0,59}\right]^{1,34}$	$36,7 \left[1 - \left(\frac{k}{211,6}\right)^{0,30}\right]^{2,62}$	$22,3 \left[1 - \left(\frac{k}{211,6}\right)^{0,30}\right]^{1,37}$

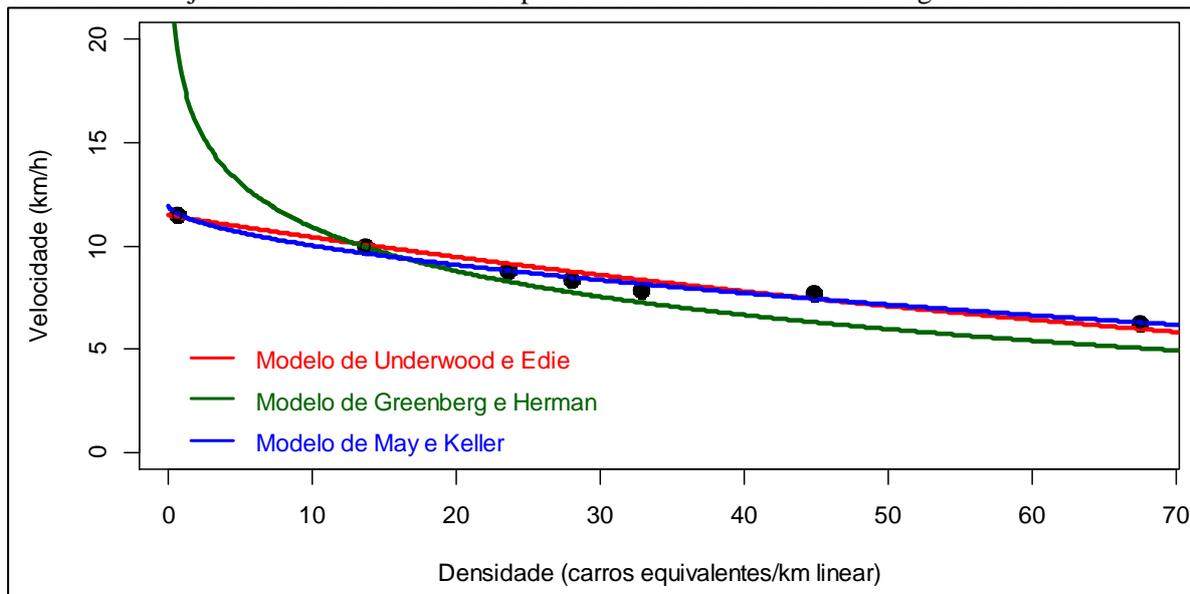
Fonte: elaborado pelo autor.

As velocidades em trânsito livre estimadas pelo modelo de May e Keller (Tabela 35) foram muito semelhantes às estimadas pelo modelo de Underwood e Eddie (Tabela 33). Da mesma forma, as densidades de congestionamento de May e Keller também foram muito semelhantes às densidades estimadas pelo modelo de Greenberg e Herman (Tabela 34). Isto indica que

apesar de diferentes, há uma grande coerência entre os modelos, e de fato a estimação está sendo feita corretamente.

Na sequência estão apresentados os gráficos com os valores das densidades e velocidades estimadas (pontos pretos), bem como as curvas dos modelos (linhas coloridas) conforme as funções apresentadas nas tabelas.

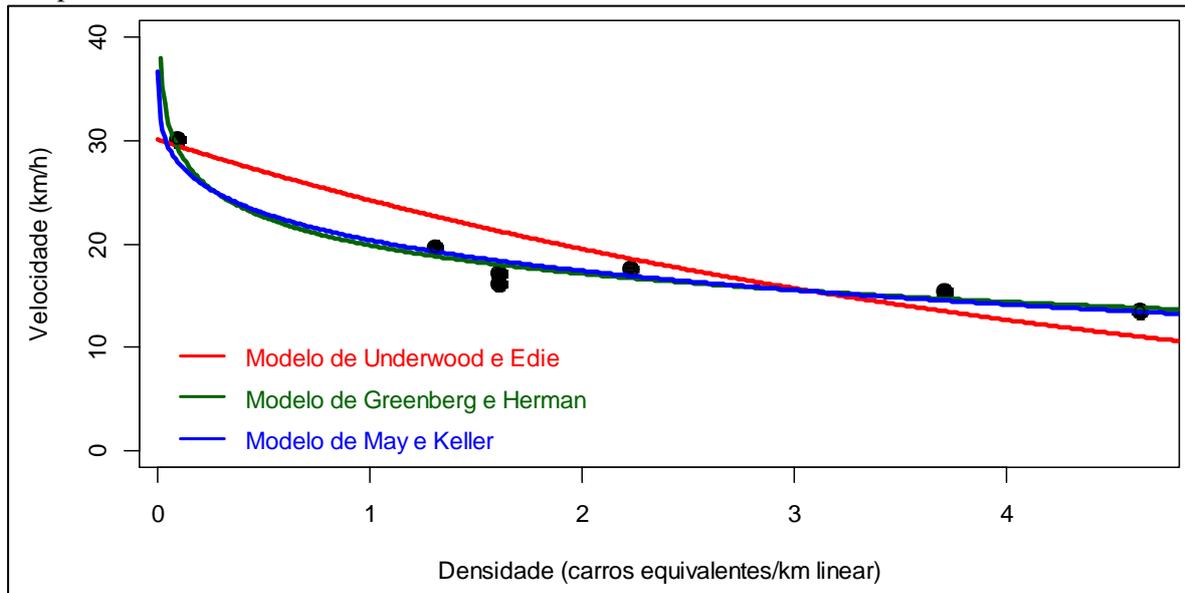
Gráfico 32 – Ajuste dos modelos macroscópicos ao trânsito dos carros na Regional Centro



Fonte: elaborado pelo autor.

Os modelos de Underwood e Eddie e de May e Keller apresentaram um ajuste muito melhor aos dados de tráfego no Centro que o modelo de Greenberg e Herman, conforme pode ser visto no Gráfico 32.

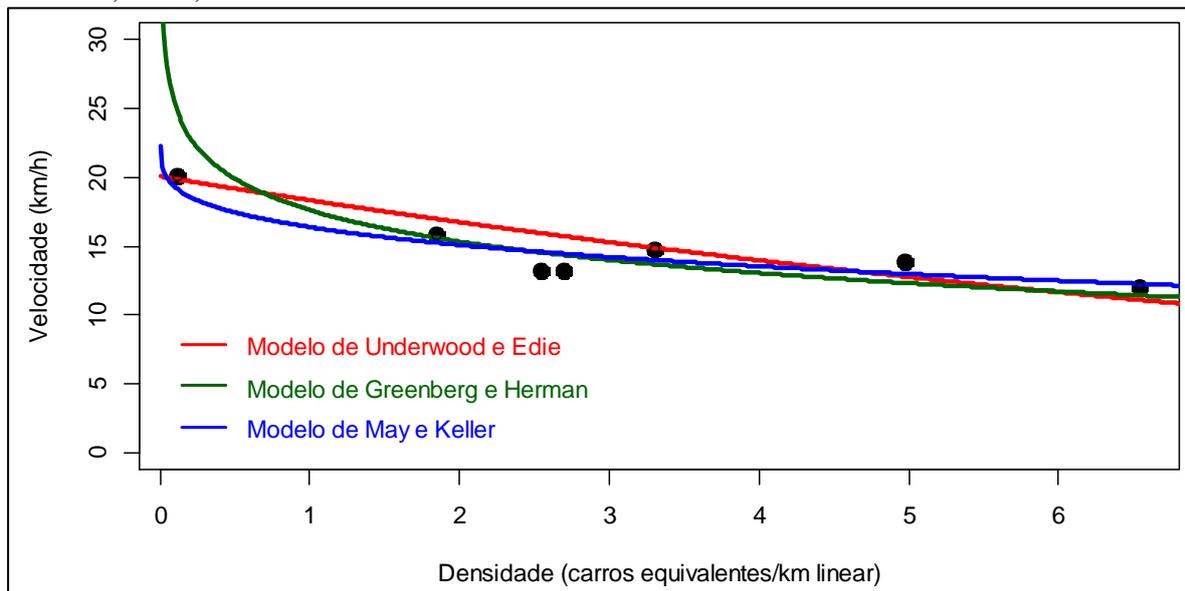
Gráfico 33 – Ajuste dos modelos macroscópicos ao trânsito dos carros nas regionais Barreiro, Norte e Pampulha



Fonte: elaborado pelo autor.

Segundo o Gráfico 33, os modelos de Greenberg e Herman e de May e Keller apresentaram resultados muito mais ajustados aos dados das regionais Barreiro, Pampulha e Norte, que o modelo de Underwood e Edie.

Gráfico 34 – Ajuste dos modelos macroscópicos ao trânsito dos carros nas regionais Leste, Nordeste, Noroeste, Oeste, Sul e Venda Nova



Fonte: elaborado pelo autor.

Analisando o Gráfico 34, percebe-se que os três modelos apresentaram resultados semelhantes em relação aos dados de tráfego de seis regionais de Belo Horizonte. Isto é mais visível

principalmente para os altos valores de densidade, que é a região (no gráfico) mais importante de ajuste da mobilidade dos automóveis, conforme descrito no início desta seção.

Analisando conjuntamente os três gráficos anteriores, e tendo em mente que para os automóveis é desejado que o modelo apresente boa previsão para os maiores valores da densidade, conclui-se que o melhor modelo foi o de May e Keller, representado pelas linhas azuis.

A seguir exibe-se os resultados dos mesmos modelos acima, mas desta vez ajustados aos ônibus.

Tabela 36 – Resultados do Modelo de Underwood e Edie para ônibus

Parâmetro	Centro	Norte, Oeste e Pampulha	Barreiro, Leste, Nordeste, Noroeste, Sul e Venda Nova
u_l	26,5	26,4	19,8
k_o	67,6	28,7	13,4
u	$26,5 \exp\left(-\frac{k}{67,6}\right)$	$26,4 \exp\left(-\frac{k}{28,7}\right)$	$19,8 \exp\left(-\frac{k}{13,4}\right)$

Fonte: elaborado pelo autor.

Diferentemente dos resultados encontrados para os carros, o modelo de Underwod e Edie (Tabela 36) não estimou que a velocidade máxima (em trânsito livre) dos ônibus seria menor no Centro que no restante da cidade. Aliás, o resultado mostrou que nas seis regionais agrupadas (Barreiro, Lestes, Nordeste, Noroeste, Sul e Venda Nova), é que este valor seria menor. Por outro lado, a densidade ótima de ônibus foi maior no Centro que no restante do município, assim como a densidade de carros.

Tabela 37 – Resultados do Modelo de Greenberg e Herman para ônibus

Parâmetro	Centro	Norte, Oeste e Pampulha	Barreiro, Leste, Nordeste, Noroeste, Sul e Venda Nova
u_o	4,7	4,4	3,1
k_c	352,7	211,6	211,6
u	$4,7 \ln\left(\frac{352,7}{k}\right)$	$4,4 \ln\left(\frac{211,6}{k}\right)$	$3,1 \ln\left(\frac{211,6}{k}\right)$

Fonte: elaborado pelo autor.

A Tabela 37 apresentou resultados do modelo de Greenberg e Herman para os ônibus semelhantes aos resultados para os carros: baixas velocidades ótimas para os três modelos, e altas densidades de congestionamentos (valores idênticos aos limites máximos aceitos).

Tabela 38 – Resultados do Modelo de May e Keller para ônibus

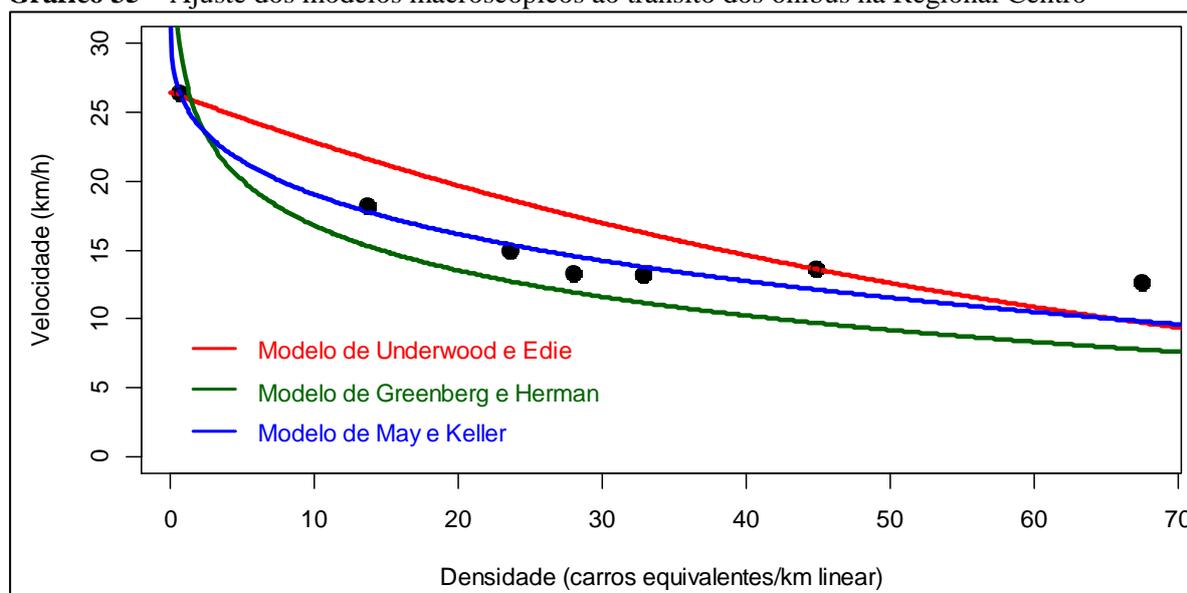
Parâmetro	Centro	Norte, Oeste e Pampulha	Barreiro, Leste, Nordeste, Noroeste, Sul e Venda Nova
u_l	32,5	26,4	21,9
k_c	352,7	211,6	211,6
α	0,30	0,52	0,31
β	1,27	1,00	1,00
u	$32,5 \left[1 - \left(\frac{k}{352,7} \right)^{0,30} \right]^{1,27}$	$26,4 \left[1 - \left(\frac{k}{211,6} \right)^{0,52} \right]^{1,00}$	$21,9 \left[1 - \left(\frac{k}{211,6} \right)^{0,31} \right]^{1,00}$

Fonte: elaborado pelo autor.

Mais uma vez, assim como para os carros, os resultados da velocidade máxima (em trânsito livre) do modelo de May e Keller para os ônibus (Tabela 38) foram muito semelhante aos resultados do modelo de Underwood e Edie (Tabela 36). Da mesma forma, as densidades de congestionamento estimadas foram limitadas pelo valor máximo utilizado, exatamente como no modelo de Greenberg e Herman (Tabela 37).

A semelhança entre os parâmetros estimados de velocidade em trânsito livre e de densidade de congestionamento dos modelos da mobilidade dos ônibus, assim como a semelhança entre parâmetros para os carros, assegura a coerência entre os modelos, e dá credibilidade aos resultados. A seguir são apresentados os mesmos resultados acima, em forma de gráficos, separados por agrupamentos de regionais.

Gráfico 35 – Ajuste dos modelos macroscópicos ao trânsito dos ônibus na Regional Centro

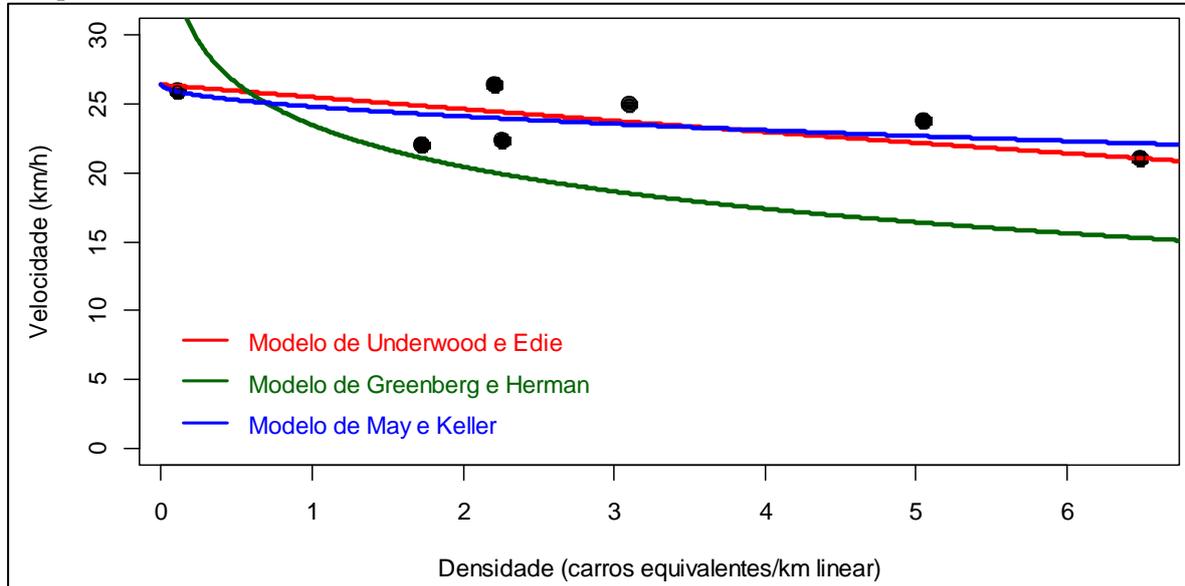


Fonte: elaborado pelo autor.

Em relação ao trânsito de ônibus no Centro (Gráfico 35), os três modelos apresentaram resultados semelhantes quando analisados somente com comparação ao menor valor de

densidade. O modelo de May e Keller, entretanto, também apresentou um bom ajuste para o segundo menor valor de densidade, diferentemente dos outros dois modelos.

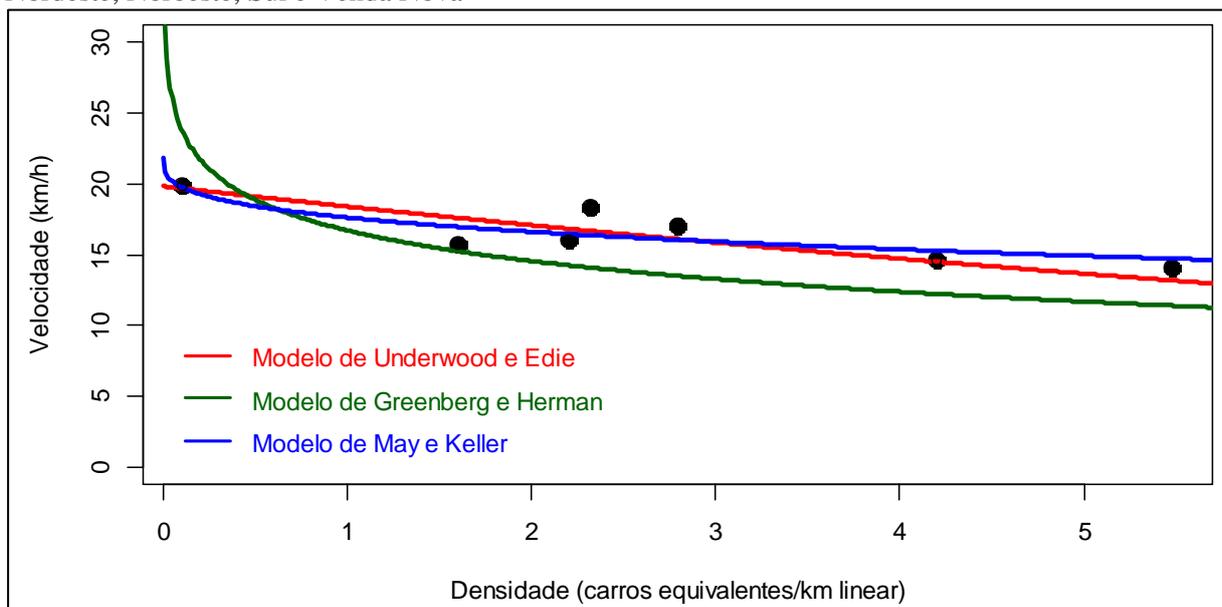
Gráfico 36 – Ajuste dos modelos macroscópicos ao trânsito dos ônibus nas regionais Norte, Oeste e Pampulha



Fonte: elaborado pelo autor.

O Gráfico 36 mostrou que o modelo de Greenberg e Herman não se mostrou adequado à predição da velocidade dos ônibus nas regionais Norte, Oeste e Pampulha, para qualquer valor de densidade considerado, ao contrário dos outros dois modelos, que apresentaram bons resultados.

Gráfico 37 – Ajuste dos modelos macroscópicos ao trânsito dos ônibus nas regionais Barreiro, Leste, Nordeste, Noroeste, Sul e Venda Nova



Fonte: elaborado pelo autor.

Comparando o ajuste dos dados ao tráfego de ônibus nas seis regionais restantes (Gráfico 37), mais uma vez o modelo de Greenberg e Herman apresentou um resultado muito inferior aos demais.

Analisando os três gráficos conjuntamente, ou seja, o tráfego dos ônibus em toda a cidade, o modelo de Greenberg e Herman em geral subestimou a velocidade, exceto para a madrugada, quando ele superestimou. Aparentemente este modelo foi punido pela limitação da densidade de congestionamento em 141 veículos (carros equivalentes) por quilômetro e pelo número médio de faixas considerado para cada grupo de regionais (2,5, 1,5 e 1,5). Caso não houvesse estes limites, provavelmente o ajuste de tal modelo seria melhor. Contudo, conforme já discutido, não faz sentido desconsiderar tal restrição. Assim, o modelo de Greenberg e Herman foi descartado por apresentar os piores resultados. Dentre os dois modelos restantes, os resultados foram muito semelhantes; exceto para a UMM Centro, que apresentou um ajuste ruim do modelo de Underwood e Edie para valores da densidade diferentes da densidade durante a Madrugada. Assim, o modelo de May e Keller foi considerado o de melhor ajuste, assim como para os carros.

Outro importante fato observado condiz com a análise feita no último parágrafo da seção 4.2.4, de que os ônibus parecem ser menos afetados que os automóveis pelo congestionamento. Isso ocorre provavelmente por sua velocidade máxima não ser tão grande, mesmo em fluxo livre, quanto no caso dos carros. Isto fica claro com os gráficos apresentados, que mostram que as curvas dos modelos macroscópicos dos ônibus são muito menos inclinadas que as curvas dos modelos dos automóveis.

4.5 Comparação dos tempos de viagem sob diferentes matrizes modais

Esta seção apresenta os resultados que permitem concluir a respeito da ocorrência ou não da *tragédia dos bens comuns na mobilidade* em Belo Horizonte. A conclusão é afirmativa se o tempo gasto quando todos os usuários utilizam o automóvel particular for maior do que quando todos utilizam o ônibus, embora o tempo de viagem de automóvel seja menor que o de ônibus, segundo a matriz modal de 2012. Em caso contrário, não há evidências da *tragédia* em curso. Assim, nesta seção foram estimados os tempos de viagem considerando os três casos descritos na Introdução, que são os seguintes: o primeiro é o caso em que os usuários utilizam ambos os modos, exatamente na mesma proporção observada na pesquisa OD; o segundo é o caso em que todos utilizam o automóvel; e o terceiro em que todos utilizam o ônibus. A realização da estimação para o primeiro caso serviu apenas como um grupo controle, para avaliar se a

metodologia de simulação está adequada, bem como se o estão os próprios objetivos específicos atingidos até aqui, já que com uma análise direta da própria pesquisa OD já é possível calcular os tempos médios para este caso.

4.5.1 Primeiro caso, onde a matriz modal é a mesma da pesquisa OD2012

Segundo o relatório da OD 2012 (SEGEM e ADRMBH, 2013), o tempo médio gasto nas viagens por modo individual foi de 32 minutos, e nas viagens por modo coletivo, de 1 hora e 2 minutos. Contudo, há uma diferença entre os modos individual e coletivo descritos no referido trabalho; e os modos "carro" e "ônibus" aqui considerados. Conforme pode ser visto no Quadro 4, o modo individual engloba “Automóvel carona”, “Automóvel dirigindo”, “Caminhão”, “Moto carona”, “Moto pilotando”, “Perua ou van dirigindo”, “Táxi” e “Táxi lotação”. Já o modo coletivo contém todos os seguintes modos: “Avião”, “Metrô / Trem Metropolitano”, “Ônibus rodoviário”, “Ônibus coletivo urbano”, “Ônibus fretado convencional”, “Ônibus fretado escolar”, “Perua ou van fretado convencional”, “Perua ou van fretado escolar” e “Trem Regional (EFVM)”. Como neste trabalho considerou-se apenas “Automóvel carona” e “Automóvel dirigindo” como sendo modo “carro”, e “Ônibus coletivo urbano” como sendo modo “ônibus”, os valores não podem ser comparados diretamente.

Outro detalhe importante é que a pesquisa OD se refere ao tempo gasto na viagem, e não apenas no trajeto. Como, em geral, a viagem de carro é realizada por apenas um trajeto, não há muito problema em considerar o tempo de trajeto como o tempo de viagem, aproximadamente. O cálculo direto deste tempo médio de trajeto de carro foi 29,98 minutos, e é em um valor próximo deste tempo que a simulação deve resultar. Já para o ônibus, uma viagem padrão inclui um trajeto – geralmente a pé – antes do trajeto de ônibus (caminhada até o ponto de ônibus de origem); um trajeto de ônibus; e outro trajeto – mais uma vez, geralmente a pé – após o trajeto de ônibus (caminhada desde o ponto de ônibus de destino). Além do tempo gasto nesses três trajetos, é preciso considerar o tempo de espera no ponto de ônibus, que foi calculado como a diferença entre o horário inicial do trajeto de ônibus e o horário final do trajeto que o antecedeu, realizado pela mesma pessoa de um mesmo domicílio. Nos três casos, para efeito de se evitar a influência de valores extremos ou errados, assim como foi feito na etapa de estimação das velocidades médias, excluiu-se tempos de trajeto superiores a 120 minutos para se calcular os tempos médios. Por coincidência, estes três valores foram extremamente próximos uns dos outros, tendo sido de 6,650, 6,712 e 6,695 minutos; para o tempo de trajeto a pé até o ponto de ônibus; para o tempo de espera no ponto; e para a caminhada do ponto de desembarque até o destino, respectivamente; totalizando 20 minutos.

O tempo que resta para completar aproximadamente o tempo de 1 hora e 2 minutos da viagem do modo coletivo deve ser preenchido pelo tempo do trajeto do ônibus, que foi de 32,5 minutos. Contudo, como existem muitos casos em que há mais de um trajeto de ônibus na mesma viagem, é preciso multiplicar este valor por um fator. De fato, houve em média 1,233 trajetos de ônibus por viagem, o que fez com que o tempo médio gasto nos trajetos de ônibus de uma mesma viagem fosse de 40 minutos (aproximadamente $32,5 * 1,233$). O tempo total, então, calculado diretamente a partir da base de dados de trajetos da Pesquisa OD 2012 para uma viagem de ônibus, foi de 1 hora, valor bem próximo ao tempo apresentado no relatório da Pesquisa, de 1 hora e 2 minutos, para o tempo médio de viagens de todos os modos coletivos.

Tendo sido demonstrado que os valores aqui calculados diretamente da base de dados oficial estão próximos dos valores relatados no relatório oficial, tanto para ônibus quanto para carros, resta demonstrar que os valores estimados indiretamente por meio da simulação também resultaram em valores semelhantes. O tempo médio – calculado pela simulação – para os trajetos de carro deve ser, portanto, próximo de 30 minutos; e o de ônibus, próximo de 32,5 minutos.

Esta estimativa do primeiro caso foi feita por meio de um algoritmo de simulação direta, onde simulou-se os tempos de viagem dos 1.341.535 motoristas de carro e dos 1.577.483 passageiros de ônibus, considerando as velocidades médias estimadas por modo e faixa horária na seção 4.2. Como os 587.230 viajantes de carona não tiveram sua rota estimada para o objetivo específico 1, estes não foram considerados. O tempo médio resultante para os viajantes de carro foi de 31 minutos, valores muito próximos dos 30 minutos relatados no parágrafo anterior, calculados diretamente da base de dados de trajetos. Além disso, há ainda uma possível explicação para esta pequena diferença observada, já que não foram considerados os trajetos de carona na simulação, enquanto que os mesmos foram considerados no cálculo direto. De fato, o tempo de viagem de uma pessoa que viajou de carona é o mesmo tempo gasto pelo motorista (desde que a viagem de ambos tenha começado e terminado nos mesmos locais), entretanto, nem todas as viagens possuem carona. Desse modo, o tempo dos motoristas que levavam consigo os caronas deveria ser contado duas (ou mais) vezes para se calcular o tempo médio de viagem dos usuários do carro. Como isto não foi feito na simulação, é possível que isto tenha causado um pequeno impacto. Espera-se que seja pequeno, porque não há qualquer evidência de que os motoristas que viajem sozinhos o façam de maneira mais rápida ou mais lenta que os demais. Assim, a diferença seria meramente ao acaso, para mais ou para menos de 30 minutos.

No presente caso, a simulação apontou 31 minutos, valor considerado muito satisfatório, dentro destas circunstâncias.

Para os usuários de ônibus, o tempo médio de trajeto estimado pela simulação foi de 31,4 minutos do ponto de ônibus de origem até o ponto de ônibus de destino do trajeto, valor muito próximo dos 32,5 minutos calculados diretamente pela base de dados de trajetos. Mais uma vez, dadas as circunstâncias de todos os problemas com os itinerários, detalhados na seção 4.1, o resultado foi considerado excelente. Provou que não houve grande impacto em se considerar o itinerário que aparentemente superestima a distância percorrida pelos ônibus. No final, o tempo simulado é o mesmo, já que a velocidade do ônibus estimada na seção 4.2 também foi superestimada na mesma proporção.

Outra possível diferença entre os resultados aqui simulados e os calculados diretamente da base de dados da OD, tanto para ônibus quanto para carros, é que na simulação considerou-se os tempos de todos os trajetos *reamostrados*, ou seja, indiretamente levou-se em conta o fator de expansão de cada observação, enquanto que no cálculo direto da base de trajetos da pesquisa OD 2012 isto não foi feito. De toda forma, os tempos encontrados pela simulação foram considerados satisfatoriamente próximos dos valores da pesquisa OD. Logo, concluiu-se que tanto a simulação quanto toda a metodologia anterior (objetivos específicos 1, 2, 3 e 4) se mostraram confiáveis, e com isto pôde-se prosseguir para a simulação do segundo e do terceiro casos.

4.5.2 Segundo e terceiro casos, primeira etapa: estimação dos novos fluxos de veículos

Conforme explicada na seção 3.4.5, a estimação do tempo médio de viagem foi dividida em três etapas. A primeira delas envolveu a estimação do fluxo de veículos para cada caso. Mas antes de descrever o algoritmo, é preciso considerar que a diferença inicial entre os casos é basicamente uma diferença de fluxo de veículos e, para isto, é preciso considerar as taxas de ocupação dos automóveis e dos ônibus. No presente trabalho elas foram consideradas constantes, e iguais às taxas encontradas no primeiro caso (situação atual). Para a estimação do segundo caso, por exemplo, foi preciso considerar que, como houve 1.341.535 trajetos de “automóvel dirigindo” e 587.230 de “automóvel carona” no caso 1, a taxa de ocupação dos automóveis foi de 1,44 pessoas por veículo. Isto é, pode-se considerar que dos viajantes de carro, 30,4% deles viajaram de carona, e esta proporção seria a mesma entre os novos usuários. Com isto, no caso 2, supondo que a mesma proporção de viajantes de carona (30,4%) se mantenha entre os atuais passageiros de ônibus (1.577.483) que utilizariam o carro no futuro;

haveria novos 1.097.504 motoristas e outras 480.279 viagens de carona. Com isto, haveria um fluxo de 2.438.739 carros em um dia útil, que transportariam esses 2.438.739 motoristas e 1.067.509 pessoas de carona; ou seja, isto aconteceria com a mesma taxa de 1,44 pessoas por veículo, que é a taxa atual.

Já para o terceiro caso, em que todos viajariam de ônibus, foi preciso fazer a suposição de que a ocupação dos ônibus se mantenha constante. Como, segundo o Quadro de Horários, foram feitas 27.247 viagens de ônibus em um dia útil, e como, segundo a OD, foram 1.577.483 passageiros; chega-se a uma ocupação de 57,9 passageiros por viagem de ônibus. Da mesma forma, considerando-se que esta ocupação se manteria a mesma; e como haveria novos 1.928.765 passageiros (atuais usuários de carro), totalizando 3.506.248 por dia; o número de viagens de ônibus¹⁰ teria que aumentar em 122,2%, indo de 27.247 mil para 60.561. Com este aumento de viagens de ônibus, espera-se que sob esta situação, os tempos de espera no ponto de ônibus diminuam. Para isto, considerou-se que o tempo médio de espera é a metade do *headway* dos ônibus (supondo-se que os passageiros chegam em horário aleatório ao ponto), ou seja, o tempo médio entre um ônibus e outro. Isto posto, o tempo de espera no ponto, que em 2011 foi de 6,7 minutos; com este aumento de 122% do número de viagens, iria para apenas 3 minutos (3 é aproximadamente igual a $6,7/2,22$).

4.5.3 Segundo e terceiro casos, segunda etapa: estimação das novas velocidades

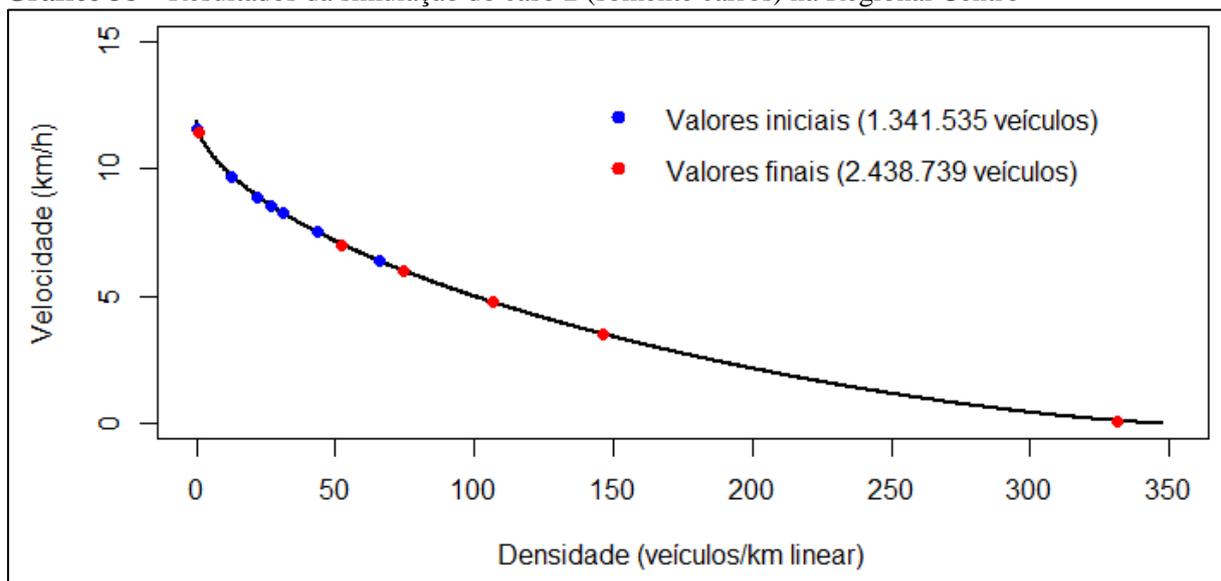
A segunda etapa foi feita de duas formas, a fim de se validarem. Uma, via simulação; e outra, analítica. As simulações para estes novos casos foram feitas por meio de um algoritmo iterativo desenvolvido pelo autor; uma vez que o fluxo de veículos é alterado, é alterada a densidade, que então altera a velocidade. E esta velocidade alterada, por sua vez, também altera a densidade, e assim por diante. Tendo sido definidos os novos fluxos de veículos para os casos 2 (2.438.739 viagens de carro) e 3 (60.561 mil viagens de ônibus), foi possível, por meio dos modelos macroscópicos da seção anterior e do algoritmo iterativo, estimar os tempos médios gastos em cada situação. Na primeira iteração, foi assumido que os veículos viajarão à mesma velocidade da faixa horária calculada na seção 4.2. Com isto, a densidade de veículos aumentaria na mesma proporção que o fluxo de veículos, já que a densidade é a razão entre o fluxo e a velocidade ($k = q/u$). Com estas novas densidades (uma para cada Regional/UMM e faixa horária), foi possível estimar as novas velocidades para cada Regional e faixa horária

¹⁰ Para que não houvesse uma superlotação das ruas dos itinerários dos ônibus, é preciso supor que os mesmos teriam que ser levemente alterados, a fim de se “espalhar” os ônibus por mais ruas do que atualmente.

por meio dos modelos da seção anterior. Sob estas novas velocidades, o algoritmo calculou novos valores do tempo gasto nas viagens – como o somatório dos tempos gastos em cada via – e conseqüentemente o tempo total de ocupação das vias, permitindo estimar novos valores da densidade de veículos. Com estes novos valores da densidade, foi possível calcular diretamente novos valores de velocidade, e este processo foi repetido até que se considerou que a alteração dos tempos médios de viagem não foi mais significativa entre um passo e outro. Isto é, foram tais repetidos até que se considerou que houve convergência dos resultados. Foi considerada como convergência uma alteração inferior a 1 minuto de uma iteração para a outra.

No caso dos automóveis, a simulação não encontrou convergência dos resultados. Na verdade, na terceira iteração, chegou-se a uma densidade de veículos na região Centro na Faixa de Pico da Tarde de 502 veículos por quilômetro linear, que é superior a densidade de congestionamento para tal UMM (348 veículos). Dessa forma, a velocidade prevista pelo modelo apresentado na Tabela 33 seria negativa. Para se conseguir estimar as velocidades nas outras regionais, decidiu-se por truncar a densidade de veículos no valor de 331 veículos por quilômetro linear, de forma que a velocidade também ficasse truncada em 0,1 km/h. Assim, o algoritmo seguiu sua simulação, mas ao contrário da simulação anterior, este não encontrou convergência porque os valores dos tempos médios não pareciam convergir para um único valor. De qualquer forma, apresenta-se abaixo os valores iniciais e finais das densidade e velocidades de cada agrupamento de regionais, considerando como valores finais os resultados da quarta iteração (uma iteração após a velocidade ser truncada em 0,1).

Gráfico 38 – Resultados da simulação do caso 2 (somente carros) na Regional Centro

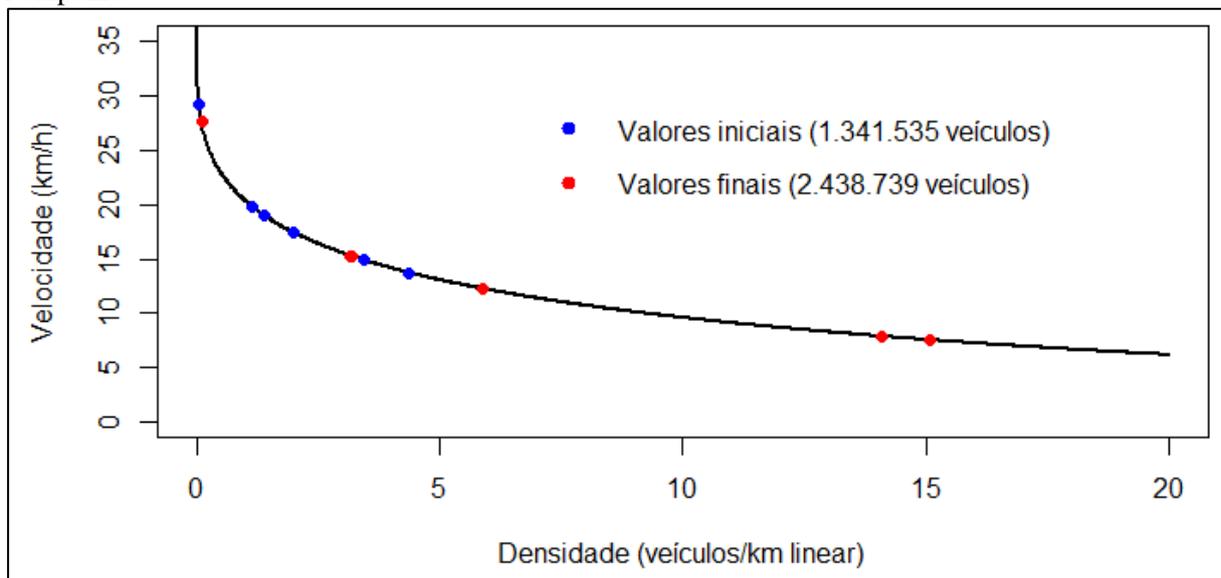


Fonte: elaborado pelo autor.

O Gráfico 38 exibe alguns pontos sobrepostos da combinação entre densidade e velocidade dos carros, já que deviam ser exibidos sete pontos azuis e sete pontos vermelhos. Por exemplo, há dois pontos sobrepostos no valor máximo da densidade na Regional Centro, de 331 veículos por quilômetro linear. Estes pontos representam a densidade truncada associada a uma velocidade de 0,1 km/h, nos horários da Faixa de Pico da Tarde (FPT) e Noturno (NOT). O modelo gerou este congestionamento máximo no horário Noturno justamente porque as viagens que se iniciaram no horário anterior (FPT) não terminaram no mesmo horário, devido à lentidão do tráfego (0,1 km/h), ficando para ser concluídas no horário noturno (NOT). É interessante notar que apesar do fluxo ter aumentado em “apenas” 81%, a densidade, quando há congestionamento, aumenta muito mais. Repare-se que a densidade máxima observada na situação inicial, sem ônibus nas ruas, era de 66 veículos, e aumentou cerca de 5 vezes para que o fluxo aumentasse em 81%, de 1.341.535 para 2.438.739 viagens.

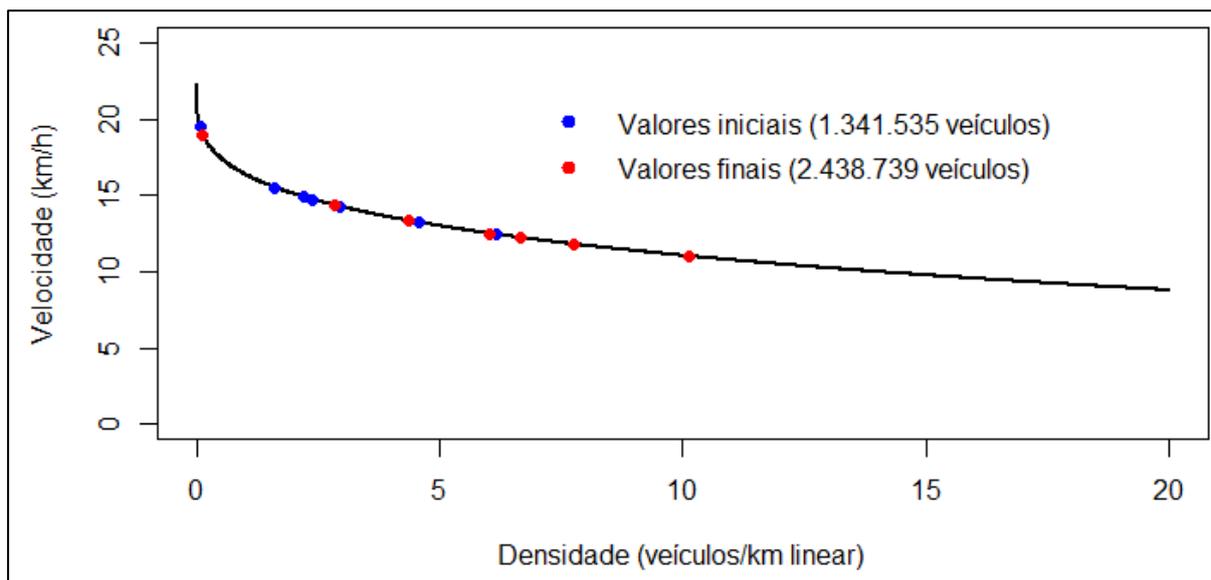
Novamente, houve pontos sobrepostos no Gráfico 39, que representa os resultados da simulação para as regionais Barreiro, Norte e Pampulha. Mesmo assim, é possível observar novamente o efeito que o congestionamento gera em si mesmo, embora com menor evidência do que no gráfico anterior.

Gráfico 39 – Resultados da simulação do caso 2 (somente carros) nas regionais Barreiro, Norte e Pampulha



Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 40 – Resultados da simulação do caso 2 (somente carros) nas regionais Leste, Nordeste, Noroeste, Oeste, Sul e Venda Nova



Fonte: elaborado pelo autor.

O Gráfico 40 exibe os resultados da simulação para o caso em que só haveria carros nas vias das seis regionais restantes. Pode-se perceber que esta simulação foi a que mostrou menor retroalimentação da densidade em si mesma, ou seja, o aumento densidade foi mais próximo do aumento de fluxo, de 81%.

Para tornar possível a visualização dos pontos sobrepostos dos gráficos acima, exibe-se abaixo os mesmos valores em formato de tabela, mas apenas para os valores finais (após a convergência do algoritmo) de densidade e velocidade.

Tabela 39 - Densidades estimadas pela simulação para o caso 2 (somente carros nas ruas)

Regional	MAD	FPM	EPM	FPA	EPT	FPT	NOT
Centro	0,9	146,0	106,6	74,7	52,6	331,1	331,1
Barreiro, Norte e Pampulha	0,1	15,1	5,9	5,9	3,2	14,1	3,2
Leste, Nordeste, Noroeste, Oeste, Sul e V. Nova	0,1	10,1	6,0	6,7	4,4	7,8	2,8

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 40 - Velocidades estimadas pela simulação para o caso 2 (somente carros nas ruas)

Regional	MAD	FPM	EPM	FPA	EPT	FPT	NOT
Centro	11,5	3,5	4,8	6,0	7,0	0,1	0,1
Barreiro, Norte e Pampulha	27,6	7,5	12,2	12,3	15,3	7,9	15,2
Leste, Nordeste, Noroeste, Oeste, Sul e V. Nova	19,0	11,0	12,5	12,2	13,3	11,8	14,3

Fonte: elaborado pelo autor.

As Tabelas 39 e 40 mostram que os pontos sobrepostos foram os da FPT e NOT no Centro e os da faixa EPM e FPA no Barreiro, Norte e Pampulha.

A solução analítica também se mostrou impossível para a Faixa de Pico da Manhã e para Faixa de Pico da Tarde na Regional Centro. Para se chegar nesta conclusão, foi calculado o valor máximo do fluxo para tal UMM, maximizando a função $q=ku$:

$$q = k * 11,93 \left[1 - \left(\frac{k}{347,62} \right)^{0,59} \right]^{1,34} \quad (34)$$

O valor máximo desta função é de 518 veículos por hora (por rua), valor “apenas” 22% superior ao valor da função quando a densidade (k) é de 67,6 veículos, que é o valor da Faixa de Pico da Tarde em 2012, onde o fluxo médio das ruas do Centro é de 426 veículos por hora. Já na Faixa de Pico da Manhã, a densidade é de 44,9 veículos por quilômetro linear, e o fluxo de 334 veículos por hora, por rua. Ainda assim, o aumento máximo do fluxo para este horário seria da ordem de 55%. A conclusão que se tira é que, segundo o modelo adotado, é impossível haver um aumento de 81% no fluxo de automóveis na UMM Centro. Haveria um congestionamento total no trânsito antes que isso acontecesse. De qualquer forma, para efeito de comparação dos resultados, as densidades e velocidades estimadas para os outros horários e para as demais regionais foram calculadas e estão apresentadas nas tabelas abaixo.

Tabela 41- Densidades estimadas via solução analítica para o caso 2 (somente carros nas ruas)

Regional	MAD	FPM	EPM	FPA	EPT	FPT	NOT
Centro	1,2	-	69,4	92,2	54,5	-	28,4
Barreiro, Norte e Pampulha	0,2	2,7	3,7	5,4	3,7	14,9	2,9
Leste, Nordeste, Noroeste, Oeste, Sul e V. Nova	0,2	10,9	5,6	6,9	5,3	15,2	3,7

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 42 - Velocidades estimadas via solução analítica para o caso 2 (somente carros nas ruas)

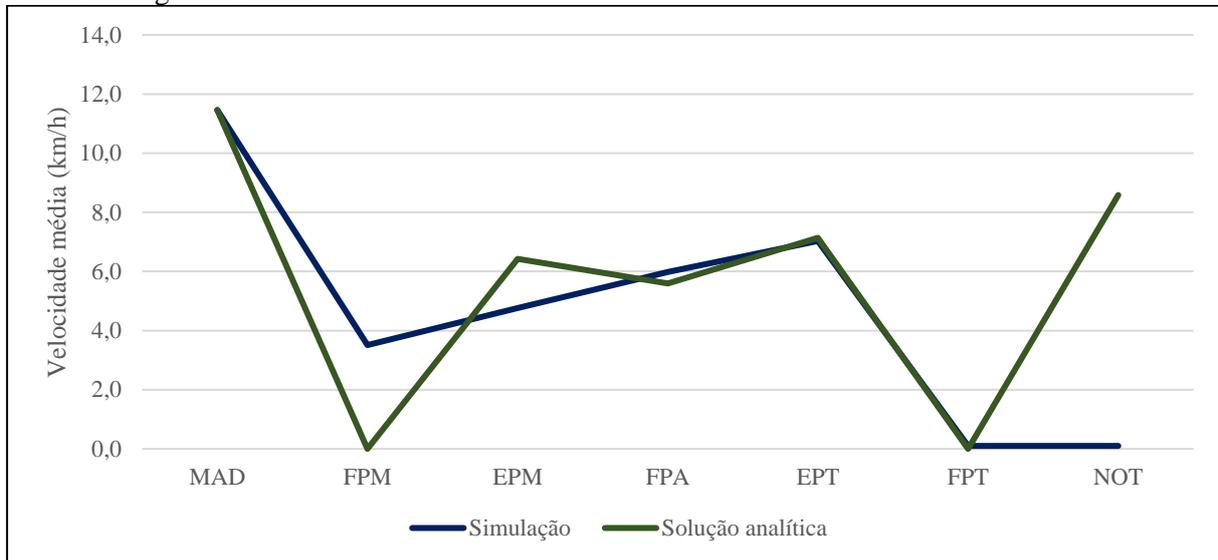
Regional	MAD	FPM	EPM	FPA	EPT	FPT	NOT
Centro	11,4	0,0	6,2	5,3	6,9	0,0	8,5
Barreiro, Norte e Pampulha	26,4	16,1	14,6	12,7	14,6	7,6	15,7
Leste, Nordeste, Noroeste, Oeste, Sul e V. Nova	18,4	10,8	12,7	12,1	12,9	9,7	13,7

Fonte: elaborado pelo autor.

Diferentemente da simulação – quando a velocidade lenta na Faixa de Pico da Tarde atrasou também o trânsito no horário seguinte (horário Noturno) –, como a solução analítica foi encontrada para cada horário separadamente, isto não ocorreu. A solução analítica, por outro lado, concluiu que na Faixa de Pico da Manhã também seria alcançado o congestionamento máximo, diferentemente da simulação. Esta divergência, portanto, deve ser relevada, já que a simulação foi parada antes que houvesse convergência dos resultados. Isto é, é provável que o tempo de viagem na Faixa de Pico da Manhã também fosse considerado nulo, caso a simulação houvesse prosseguido.

Os gráficos abaixo exibem a comparação dos resultados da simulação (até a quarta iteração) e da solução analítica.

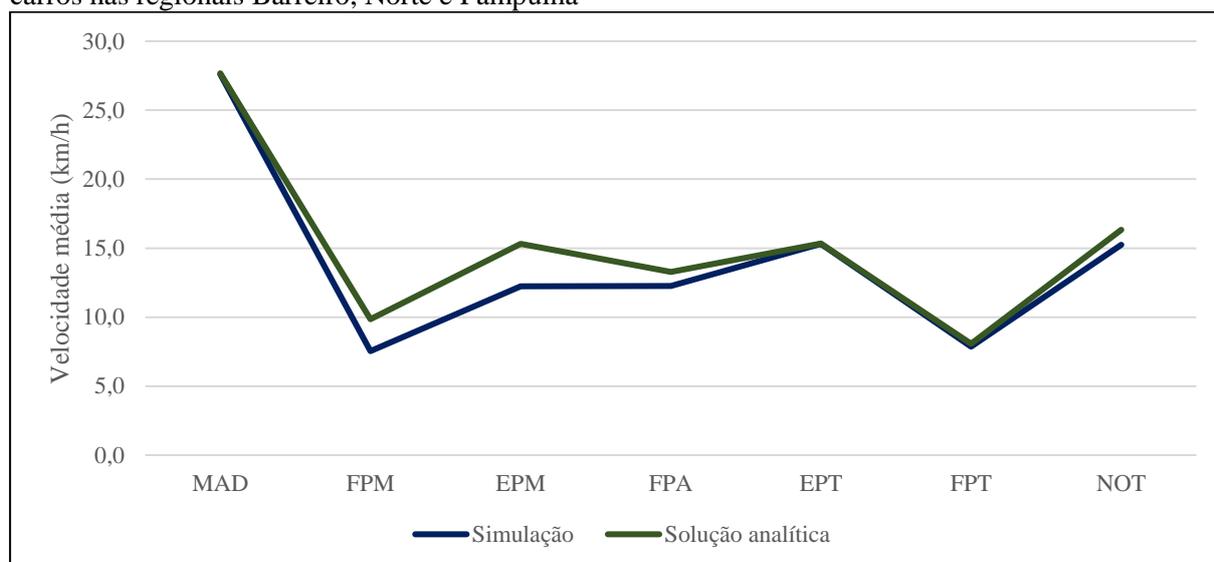
Gráfico 41 – Comparação dos resultados da simulação com a solução analítica das velocidades dos carros na Regional Centro



Fonte: elaborado pelo autor.

O Gráfico 41 mostrou que as maiores divergências, entre a simulação e o resultado analítico para as velocidades no Centro, foram para os horários da Faixa de Pico da Manhã e Noturno. Conforme já foi salientado, entretanto, tais diferenças são amplamente plausíveis, já que é possível que se a simulação tivesse continuado por mais iterações, a velocidade na Faixa de Pico da Manhã também chegasse a zero, assim como na solução analítica. Da mesma forma, como a solução analítica não considerou que o congestionamento poderia atrasar as viagens até mesmo de um horário posterior – como ocorreu com a Faixa de Pico da Tarde e com o horário Noturno com a simulação–, ela considerou que a velocidade média seria de cerca de oito quilômetros por hora no período.

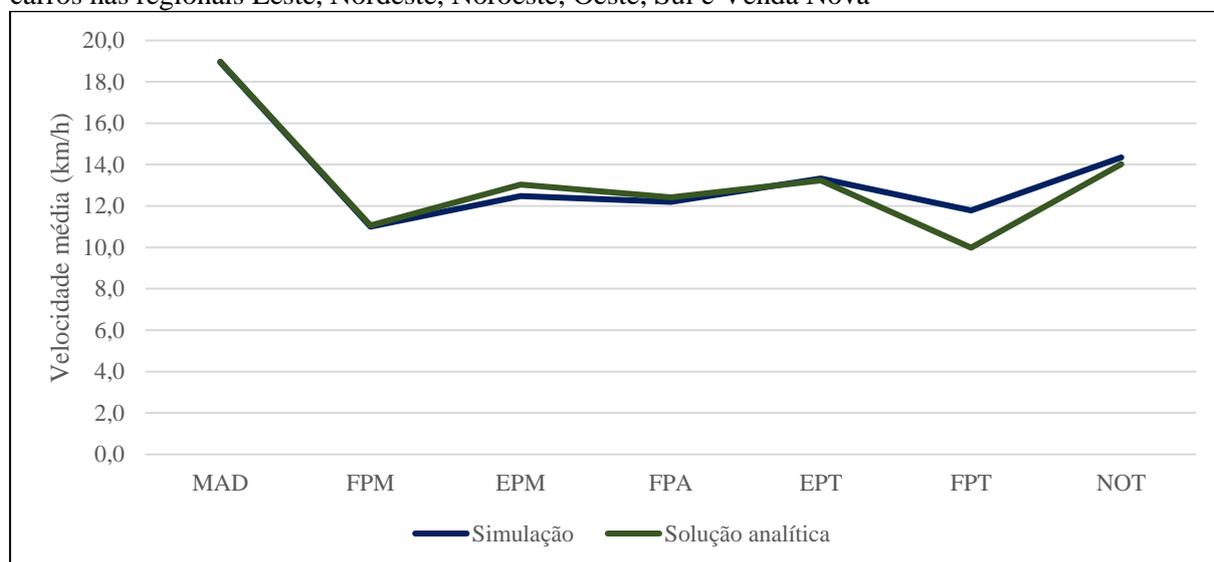
Gráfico 42 – Comparação dos resultados da simulação com a solução analítica das velocidades dos carros nas regionais Barreiro, Norte e Pampulha



Fonte: elaborado pelo autor.

O Gráfico 42, que mostra os resultados para as regionais Barreiro, Norte e Pampulha, mostrou que os resultados da solução analítica e da simulação foram bastante similares para estas regionais.

Gráfico 43 – Comparação dos resultados da simulação com a solução analítica das velocidades dos carros nas regionais Leste, Nordeste, Noroeste, Oeste, Sul e Venda Nova



Fonte: elaborado pelo autor.

Assim como ocorreu nas regionais Barreiro, Norte e Pampulha; as demais regionais (Leste, Oeste, Noroeste, Nordeste, Sul e Venda Nova) também apresentaram resultados semelhantes com as duas metodologias (Gráfico 43).

Analisando conjuntamente os gráficos 41, 42 e 43, considerou-se que os resultados analíticos e da simulação foram semelhantes e, portanto, os tempos médios de viagem foram calculados considerando os resultados da simulação para as velocidades médias em cada UMM, já que a simulação se mostrou confiável.

Já para os ônibus, os resultados da simulação foram os seguintes, mostrados nas Tabelas 43 e 44.

Tabela 43 - Densidades estimadas via simulação para o caso 3 (somente ônibus nas ruas)

Regional	MAD	FPM	EPM	FPA	EPT	FPT	NOT
Centro	0,18	2,18	1,85	2,00	1,97	2,02	1,06
Norte, Oeste e Pampulha	0,04	0,26	0,22	0,22	0,23	0,26	0,16
Barreiro, Leste, Nordeste, Noroeste, Sul e V. Nova	0,05	0,48	0,40	0,41	0,41	0,47	0,27

Fonte: elaborado pelo autor.

Em comparação com as densidades de veículos no segundo caso, a densidade de ônibus no terceiro caso (Tabela 43) é muito inferior, sendo de no máximo cerca de dois veículos (carros equivalentes) por quilômetro linear de via.

Tabela 44 - Velocidades estimadas via simulação para o caso 3 (somente ônibus nas ruas)

Regional	MAD	FPM	EPM	FPA	EPT	FPT	NOT
Centro	28,3	23,8	24,2	24,0	24,1	24,0	25,5
Norte, Oeste e Pampulha	26,1	25,6	25,7	25,7	25,7	25,6	25,8
Barreiro, Leste, Nordeste, Noroeste, Sul e V. Nova	20,1	18,5	18,7	18,6	18,6	18,5	19,0

Fonte: elaborado pelo autor.

A Tabela 44, que apresenta as velocidades esperadas – via simulação – dos ônibus para o terceiro caso, não mostrou grande variabilidade entre os horários, diferentemente da tabela análoga referente ao segundo caso (Tabela 40). A solução analítica das densidades e velocidades estimadas dos ônibus estão apresentadas a seguir, nas Tabelas 45 e 46.

Tabela 45 – Densidades estimadas via solução analítica para o caso 3 (somente ônibus nas ruas)

Regional	MAD	FPM	EPM	FPA	EPT	FPT	NOT
Centro	0,13	1,47	1,20	1,35	1,29	1,33	0,73
Norte, Oeste e Pampulha	0,03	0,23	0,19	0,19	0,19	0,23	0,14
Barreiro, Leste, Nordeste, Noroeste, Sul e V. Nova	0,04	0,37	0,30	0,32	0,31	0,35	0,21

Fonte: elaborado pelo autor.

À primeira vista, os resultados da Tabela 45 foram parecidos aos da Tabela 43, ou seja, a solução analítica e a simulação encontraram resultados semelhantes.

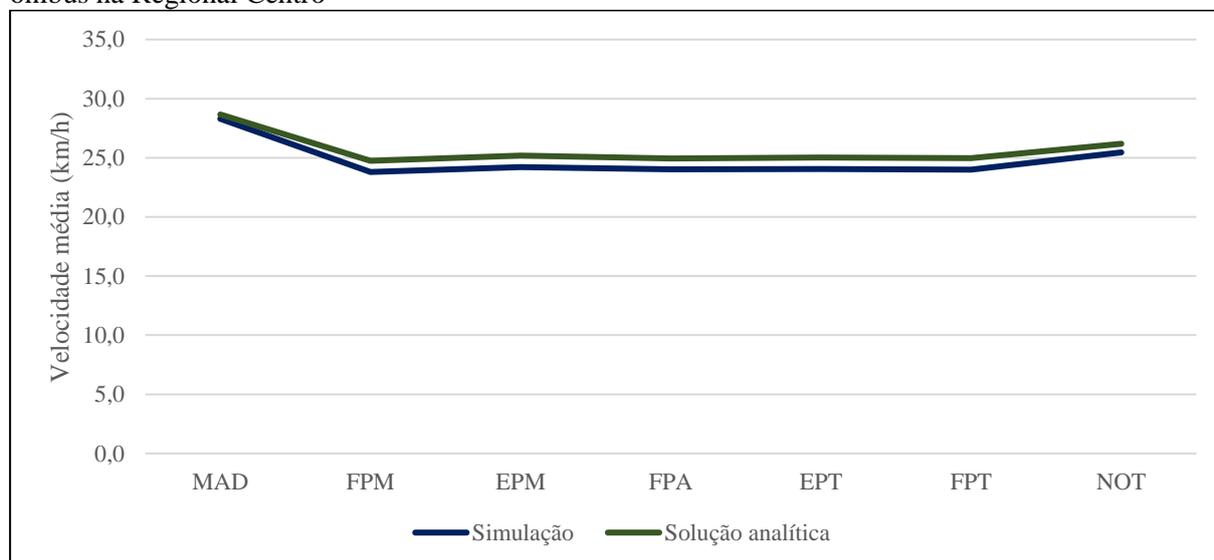
Tabela 44 – Densidades estimadas via solução analítica para o caso 3 (somente ônibus nas ruas)

Regional	MAD	FPM	EPM	FPA	EPT	FPT	NOT
Centro	28,7	24,7	25,2	24,9	25,0	25,0	26,2
Norte, Oeste e Pampulha	26,1	25,7	25,7	25,7	25,7	25,7	25,8
Barreiro, Leste, Nordeste, Noroeste, Sul e V. Nova	20,3	18,7	18,9	18,9	18,9	18,8	19,3

Fonte: elaborado pelo autor.

Da mesma forma que as densidades, as velocidades estimadas para quando haveriam somente ônibus nas ruas também foram aparentemente semelhantes entre a simulação e a solução analítica, conforme apresentado nas Tabelas 44 e 46. A seguir são apresentados os mesmos resultados das Tabelas 44 e 46, mas em forma de gráficos, e separados por agrupamento de regionais.

Gráfico 44 – Comparação dos resultados da simulação com a solução analítica das velocidades dos ônibus na Regional Centro

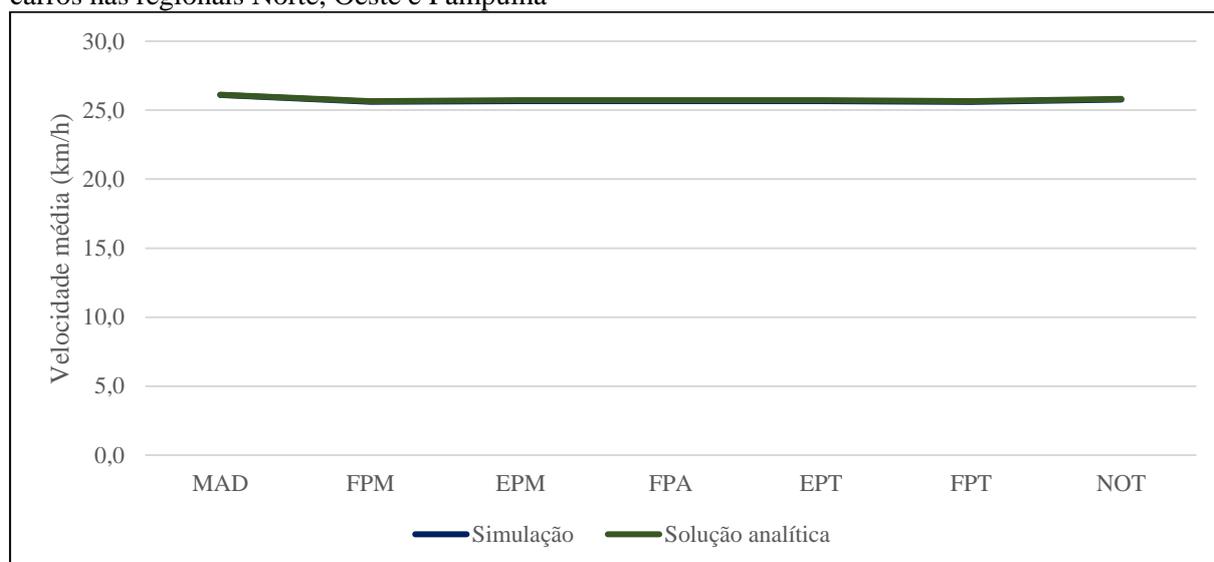


Fonte: elaborado pelo autor.

O Gráfico 44 confirma a comparação entre as Tabelas 44 e 46, em que se conclui que as velocidades estimadas na Regional Centro foram semelhantes entre as duas metodologias, embora a simulação tenha apresentado valores ligeiramente inferiores.

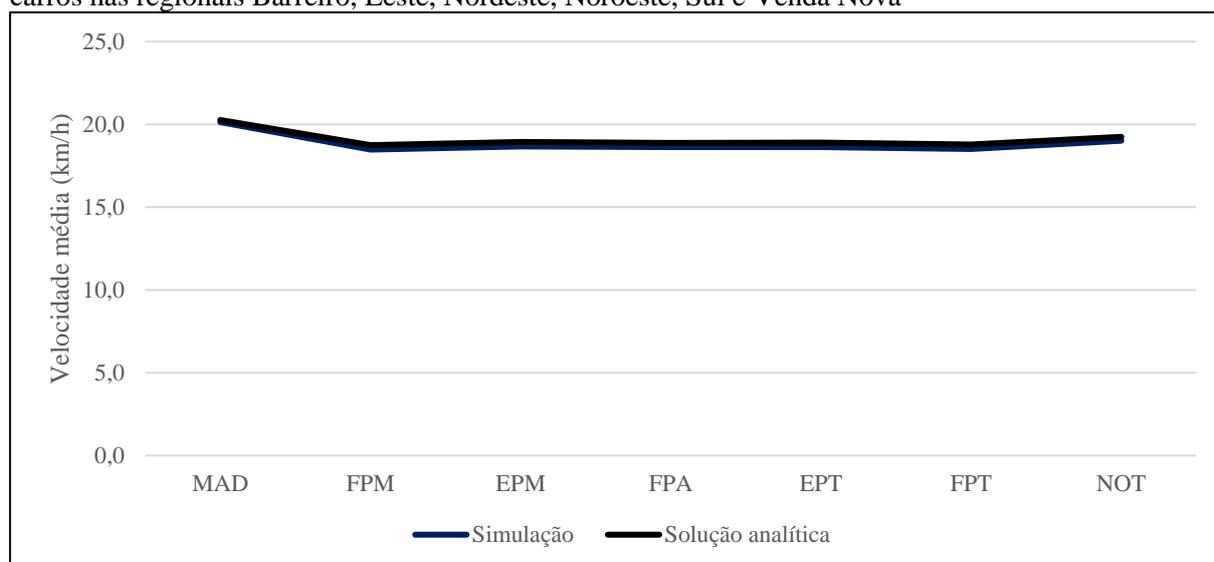
O Gráfico 45, que apresenta a comparação das velocidades entre os dois métodos nas regionais Norte, Oeste e Pampulha, também confirma a comparação entre as Tabelas 44 e 46. Isto é, as velocidades estimadas em tais regionais foram muito semelhantes entre as duas metodologias.

Gráfico 45 – Comparação dos resultados da simulação com a solução analítica das velocidades dos carros nas regionais Norte, Oeste e Pampulha



Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 46 – Comparação dos resultados da simulação com a solução analítica das velocidades dos carros nas regionais Barreiro, Leste, Nordeste, Noroeste, Sul e Venda Nova



Fonte: elaborado pelo autor.

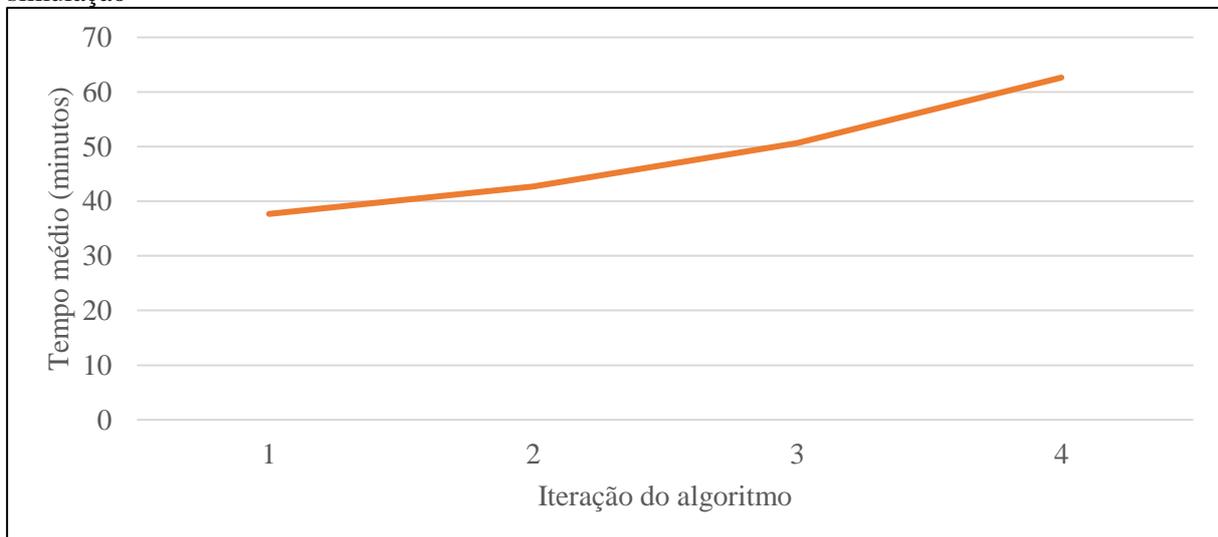
Por último, representando as últimas seis regionais, o Gráfico 46 também mostra que os resultados dos métodos foram muito similares, confirmando a comparação entre as Tabelas 44 e 46.

Todos os gráficos e tabelas desta seção validam o processo de simulação, tornando possível o prosseguimento do quinto objetivo específico, por meio da terceira etapa, que estima o tempo gasto nas viagens considerando as velocidades estimadas conforme os resultados aqui apresentados.

4.5.4 Segundo e terceiro casos, terceira etapa: cálculo dos tempos

Considerando as velocidades encontradas na terceira iteração da segunda etapa da simulação, o tempo dos trajetos dos automóveis já estava em 51 minutos. Nesta etapa, a densidade de veículos na Faixa de Pico da Tarde na UMM Centro atingiu (ultrapassou) a densidade de congestionamento. Segundo o modelo, a velocidade neste momento seria zero e, portanto, o tempo infinito. Entretanto, conforme explicado na seção anterior, resolveu-se executar mais um passo da simulação truncando a densidade no valor máximo de 331 veículos, que resulta em uma velocidade em 0,1 km/h. Assim sendo, foi possível conseguir mais uma estimativa do tempo médio gasto, que foi de 62 minutos. A seguir apresentam-se os tempos médios estimados a cada iteração da estimativa do tempo médio gasto pelos automóveis.

Gráfico 47 – Tempos de viagem de automóvel para o caso 2, em cada iteração do algoritmo de simulação



Fonte: elaborado pelo autor.

O Gráfico 47, além de mostrar que não houve convergência dos resultados da simulação dos tempos gastos pelos viajantes de automóveis; indicou que o grande aumento da densidade de veículos pagou o seu preço. Na simulação deste segundo caso, onde todos usariam o automóvel, o tempo médio gasto pelos viajantes foi exatamente o mesmo tempo médio gasto pelos carros, ou seja, de 62 minutos.

Já para o terceiro caso, na situação em que todos usariam o ônibus, foi necessário primeiro calcular as velocidades médias dos ônibus, considerando as 60.561 viagens diárias. Com estas velocidades médias; foi simulado, com apenas uma iteração, o tempo médio por passageiro, cujo trajeto é apenas uma fração da viagem do ônibus. Isto resultou em um tempo médio de 26,4 minutos de trajeto, que multiplicados pelo fator de trajetos por viagem, de 1,233, chegam

a um tempo médio de 33 minutos. Somando este tempo dentro do(s) ônibus aos 7 minutos de caminhada até o ponto, aos 3 minutos de espera no ponto e aos 7 minutos de caminhada entre o ponto de desembarque e o destino final, contabilizou um tempo médio de viagem de ônibus de 50 minutos. Como este valor é inferior ao tempo médio pelo segundo caso, considerando a quarta iteração do algoritmo (62 minutos), pode-se concluir pela possibilidade da ocorrência da *tragédia dos bens comuns* na mobilidade de Belo Horizonte.

5 CONCLUSÕES

Este capítulo está dividido em três seções. A primeira apresenta as considerações finais a respeito de cada objetivo específico e, é claro, a respeito do objetivo principal do trabalho. Em seguida, são listadas as limitações da pesquisa. As contribuições teóricas e práticas a este trabalho estão listadas na seção 5.4 e, por último, as sugestões para pesquisas futuras sobre o assunto estão presentes na derradeira seção, a 5.4.

5.1 *Considerações finais a respeito dos objetivos*

O objetivo específico 1, de roteirização dos trajetos, apresentou resultados com diferentes satisfações entre os trajetos de carro e de ônibus. No caso dos veículos, as rotas dos motoristas foram calculadas diretamente das AHs de origem e de destino da OD, o que gerou um bom resultado, como mostrado nas Figuras 6, 7, 8 e 9. Aparentemente, o sorteio aleatório das vias de origem e de destino dentro das vias contidas nas AHs de origem e de destino funcionou satisfatoriamente, não deixando nenhuma via de fora da roteirização dos 1.341.535 trajetos simulados; mesmo considerando que a amostra original, da pesquisa OD, continha apenas 14.445 trajetos de carros. Isto ficou claro nas Figuras 7, 8 e 9. Em relação às principais vias, havia um risco de que as velocidades escolhidas *a priori*, de 40 km/h nas ruas, de 60 km/h nas avenidas, e de 80 km/h nas rodovias, não representassem a realidade e com isto ocorresse uma sub-representação ou sobre-representação de determinados tipos de via. Contudo, a Figura 10 mostra que as principais avenidas foram as mais representadas pela roteirização, assim como têm caráter principal no tráfego real, indicando que estas velocidades escolhidas estavam aproximadamente corretas, ou pelo menos a relação entre elas – a velocidade nas avenidas ser 50% superior à velocidade nas ruas, que por sua vez seria a metade da velocidade nas rodovias.

Já a roteirização dos trajetos de ônibus, entretanto, encontrou algumas dificuldades. Como as bases de dados não identificavam os logradouros da mesma forma, nem todos os pontos de ônibus do itinerário foram localizados na malha viária. Além disso, pelo menos analisando visualmente, as rotas das linhas de ônibus ficaram muito mais longas que as rotas reais, apresentando alguns *zigue-zagues* irrealistas. Foi demonstrado, contudo, que apesar de que isto superestimava a distância percorrida pelos usuários do ônibus, a velocidade dos veículos era superestimada na mesma magnitude, de forma que o tempo previsto para o trajeto não foi influenciado.

O segundo objetivo específico também foi considerado exitoso. Para se chegar nestes bons resultados, todavia, foi necessário considerar todos os tipos de via (ruas, avenidas, conversões) como iguais, e agrupar as dez regionais (UMMs) em três grupos. Estes grupos, aliás, com exceção do grupo formado unicamente pela Regional Centro, não possuem muitas similaridades geográficas entre si. Por exemplo, para os automóveis, foram agrupadas as regionais Pampulha, Norte e Barreiro, sendo que esta terceira está bem distante das duas primeiras. Apesar das três serem consideradas regionais periféricas, a Regional Venda Nova, que seria até mesmo mais periférica que a Regional Pampulha, ficou separada deste grupo. No caso dos ônibus, o agrupamento foi entre Norte, Oeste e Pampulha, trocando o Barreiro pela Regional Oeste em comparação com os carros. Os comentários aqui são os mesmos, com a exceção de que neste caso nem mesmo a Regional Oeste pode ser considerada muito periférica. De qualquer forma, tais grupos de regionais apresentaram velocidades médias semelhantes para os mesmos horários do dia, de forma que o agrupamento delas possibilitou a agregação de um maior número de dados, tornando as estimativas muito mais robustas e estáveis. Antes da agregação, por exemplo, a Regional Barreiro apresentou resultados muito estranhos – altas velocidades – para a Faixa de Pico da Tarde. Como não foram identificadas as razões para este fenômeno, a não ser o próprio baixo número de observações e suas consequentes estimativas voláteis, optou-se pela agregação das regionais.

Com esta agregação das regionais, após a comparação de vários modelos de regressão, chegou-se a um resultado não viciado que apresentou estimativas de velocidades médias condizentes com o que era esperado. As velocidades médias encontradas nos horários de pico foram inferiores às velocidades médias dos outros horários, com destaque para a maior velocidade no período da madrugada. Outro destaque é que os ônibus se mostraram menos impactados pelos *engarrafamentos* que os automóveis, provavelmente porque a velocidade máxima dos primeiros não é tão mais alta que a velocidade encontrada nos congestionamentos, ao contrário da velocidade dos segundos. A única ressalva em relação aos resultados deste objetivo específico diz respeito às estimativas de velocidade dos ônibus, que não podem ser utilizadas cruamente para outras análises diferentes da aqui proposta. Como as rotas dos ônibus foram superestimadas, as velocidades médias também o foram. Desse modo, elas não podem ser utilizadas para outros objetivos que não o próprio objetivo deste trabalho.

Também foi considerado de sucesso o objetivo específico da estimação das densidades de veículos nas vias. A partir daqui os problemas encontrados na roteirização e na estimação das velocidades dos ônibus, se anulam, gerando estimativas confiáveis de ocupação das vias. Isto

ocorre porque as estimativas das densidades médias de cada faixa horária consideram o tempo com que cada veículo ocupou as vias da referida Regional. Como o tempo total não foi afetado, ou seja, os objetivos 1 e 2 consideraram que os ônibus percorreram uma distância maior que a real, mas que também trafegaram em uma velocidade igualmente maior que a real; o tempo total – mais especificamente o valor esperado do tempo total – durante o qual eles ocuparam as vias foi igual ao tempo real. A partir deste objetivo foi possível visualizar a primeira grande diferença entre os dois modos de transporte analisados, que foi em relação à contribuição de cada um para a ocupação da malha viária. Ficou evidente a diferença da ordem de grandeza da utilização das vias, que foi muito superior pelos carros que pelos ônibus. Isto por si só já dava um indício da possibilidade da *tragédia*.

A modelagem macroscópica, que é o quarto objetivo específico, também foi considerada satisfatória, embora mais uma vez tenha apresentado melhores resultados para os carros do que para os ônibus. Talvez a pouca alteração das velocidades médias dos ônibus a despeito da grande alteração das densidades das vias ao longo do dia tenha contribuído para este pior resultado para a modelagem do tráfego dos ônibus. Em relação aos modelos macroscópicos comparados, o modelo mais generalista, de May e Keller, foi o selecionado, talvez pela própria flexibilidade do mesmo em seus dois parâmetros extras, α e β , além dos tradicionais *densidade de congestionamento* e *velocidade em trânsito livre*. Foi tomado o cuidado de se escolher para os ônibus um modelo que ajustasse melhor a velocidade dos veículos para baixas densidades, que seria a situação sob a suposição de se haver apenas ônibus nas ruas; e para os carros um modelo mais adequado para as altas densidades, que seria o encontrado caso todos passageiros de ônibus de hoje resolvessem utilizar o automóvel. Foi possível avaliar a qualidade dos ajustes destes modelos no próximo objetivo, quando simulou-se o tempo de viagem sob a matriz modal atual.

O quinto e último objetivo específico, que é calcular o tempo de viagem sob matrizes modais hipotéticas, também foi considerado bem-sucedido. Na verdade, com o primeiro caso considerado neste objetivo, em que foram avaliados os tempos de viagem sob a matriz modal atual, foi possível comparar o resultado das estimativas de tempo de viagem com os tempos de viagem calculados diretamente pela pesquisa OD. A proximidade entre os valores simulados – que utilizaram os modelos macroscópicos, os quais utilizaram as densidades e velocidades estimadas, que por sua vez utilizaram a roteirização –, e os valores calculados diretamente pela OD, serviu como uma comprovação do sucesso dos objetivos anteriores.

Quando os dois casos hipotéticos foram considerados, houve uma grande diferença nos resultados. O caso em que todos utilizariam somente o ônibus apresentou um tempo médio de viagem de 40 minutos, que é um valor superior ao tempo gasto pelos usuários atuais de automóvel e inferior ao tempo gasto pelos usuários atuais de ônibus. É importante salientar aqui uma importante questão a respeito da ocupação das vias neste caso em que só haveria ônibus nas ruas. Como não foi considerado que haveria alteração dos itinerários, era de se esperar que a maioria das vias ficasse completamente vazia e algumas poucas contivessem todo o tráfego dos ônibus. Entretanto, a densidade que está sendo considerada pelo modelo macroscópico é a densidade média da Regional, que seria muito inferior a esta densidade nas vias dos itinerários dos ônibus. Logo, é necessário supor que os itinerários seriam alterados de forma a utilizar melhor todas as vias, mas sem alterar o tempo de caminhada até os pontos de ônibus e os tempos de espera nos pontos. Somente neste caso esta estimativa de 40 minutos seria alcançada.

Quando foi considerado o caso em que haveria apenas carros nas ruas, entretanto, o resultado foi surpreendente. Embora a própria análise direta da comparação entre as duas últimas pesquisas OD já indicasse uma correlação entre o aumento da utilização do automóvel e o aumento do tempo médio de viagem, em ambos os modos de transporte, não era de se esperar que o tempo seria infinito para a simulação aqui apresentada. Apesar de surpreendente, o resultado da simulação foi corroborado com a solução analítica do problema, que também indicou ser impossível haver um aumento de 82% no fluxo de veículos na Regional Centro nos horários de pico.

Logo, a conclusão final do trabalho foi a de que a *tragédia dos bens comuns* é uma possibilidade real em Belo Horizonte, já que o tempo de viagem considerando matriz modal de 2012 indica que o automóvel produz uma viagem mais rápida; e no caso em que todos utilizassem o automóvel o tempo seria *muito superior* – infinito, de fato – ao tempo no caso em que todos utilizassem o ônibus. Os cidadãos, agindo racionalmente, escolheriam o carro como modo de transporte diário em Belo Horizonte, por ele ser mais rápido. Entretanto, se todos tomassem a mesma decisão, o tempo médio gasto por todos seria maior que caso todos tomassem a decisão contrária.

Mesmo se for considerado que este tempo de viagem infinito provavelmente nunca ocorreria na prática, já que os cidadãos poderiam alterar a sua rota, não passando pelo Centro, por exemplo, ou mesmo alterar o horário de sua viagem, adiantando-a ou atrasando-a, a fim de se evitar o horário de pico, a diferença dos resultados foi tão grande que a conclusão tomada foi a

favor da possibilidade da *tragédia*. Da mesma forma, mesmo que o fator econômico impossibilite que todos os cidadãos adquiram um automóvel, os resultados da solução analítica mostraram que não é necessário que todos os cidadãos optem pelo carro para que ocorra o congestionamento máximo das vias do Centro na Faixa de Pico da Tarde.

Por outro lado, aqui se está tomando o cuidado de se concluir apenas pela *possibilidade* da ocorrência da *tragédia*, e não pela tragédia em si, devido a alguns fatores. Um deles é que na prática o próprio alto tempo de viagem no Centro pode levar tal região a apresentar um declínio da sua atividade principal, o comércio, reduzindo sua importância na matriz de origens e destinos futura. O aumento do *trabalho em casa* e da *educação à distância*, além disso, também são fenômenos que podem reduzir a pressão sobre o número de viagens diárias de uma cidade, como Belo Horizonte. Por último, também é possível que, por exemplo, as novas tecnologias – como carros autômatos – possibilitem aos carros trafegar a densidades mais altas (menor distância entre os veículos) do que as aqui estimadas. Estes todos são fatores que contribuem para que a conclusão final deste trabalho seja a favor da *possibilidade* da *tragédia dos bens comuns* em Belo Horizonte.

5.2 Limitações

O presente trabalho, além de possuir um caráter exploratório, possui outras limitações, tanto conceituais quanto técnicas, em relação ao que busca concluir. Algumas destas limitações, aliás, acabaram de ser descritas na seção anterior. A principal destas limitações, contudo, é conceitual; a suposição de que se uma sociedade em um determinado momento está indo em direção a um estado limite, significa que um dia ela chegará a este estado limite. Isto não é uma verdade absoluta. Por exemplo, se hoje a escolha racional leva todo cidadão a optar pelo carro, por ser o modo de transporte mais rápido, isto não implica que no futuro todos os cidadãos utilizem o carro, como está sendo assumindo. Há uma restrição clara ao atingimento deste limite – em que todos os moradores de uma cidade possuem automóvel –, seja financeira ou não. Dentre exemplos de restrições não financeiras estão a dificuldade de dirigir um veículo, seja para jovens, idosos ou mesmo outras pessoas, que não consigam obter a Carteira Nacional de Habilitação. Há ainda aqueles que não gostam de dirigir, juntamente com os altruístas que não seguem a regra da maximização da função utilidade. Embora estes altruístas sejam a exceção na sociedade, os mesmos existem e não deveriam ser desconsiderados.

Ainda dentro das limitações conceituais, o fato de que hoje a escolha racional leve a uma direção não significa que daqui a algum tempo esta escolha racional leve à mesma direção, já que

mudanças podem ocorrer na sociedade. Por isto é necessário supor que as condições continuarão as mesmas nos próximos anos, ou seja, os custos e tempos de cada modo serão os mesmos, a população seria a mesma, as ações governamentais também, e assim por diante. É preciso supor uma estabilidade do *status quo* que de fato não ocorre na realidade, de forma a limitar a conclusão. Por exemplo, as tecnologias empregadas nos veículos serão diferentes no futuro, podendo permitir uma melhor fluidez do tráfego, mesmo com um maior número de veículos.

Dentre as limitações técnicas, uma delas é que a simulação se baseia em dados de uma pesquisa Origem e Destino de 2012, ou seja, de há 6 anos, sendo que neste período ocorreu uma grande mudança no sistema de transporte público por ônibus no município – a implantação do BRT, o que pode ter modificado consideravelmente a mobilidade no local. Além disso, também é preciso extrapolar os resultados da amostra da pesquisa para a população por meio dos fatores de expansão, o que gera erros amostrais que não estão sendo considerados. Outros erros inerentes ao trabalho é o sorteio da localização exata da origem e do destino por parte da simulação, já que os dados públicos da pesquisa OD somente informam a Área Homogênea, que segundo a função *gArea* do pacote *rgeos* do software *R*, possuem em média uma área de 60 hectares (597.898 m²), a qual, se fosse um círculo perfeito, teria um raio de 436 metros. O erro adicional gerado por tal sorteio aleatório existe e não está sendo contabilizado. Além disso, também é preciso supor que as respostas das pessoas ao questionário são precisas, o que provavelmente não é verdade, uma vez que nem sempre as pessoas lembram com exatidão o tempo que gastaram no percurso. Outro problema em relação às simulações é que as mesmas consideram uma malha viária, embora semelhante, não idêntica à malha real de Belo Horizonte. Variáveis importantes como "número de faixas", "regras de trânsito" e "preferências nos cruzamentos", "topografia", "qualidade da pavimentação da via", por exemplo, não foram consideradas. Ou seja, o acúmulo de muitas possíveis pequenas imprecisões durante a complexa coleta de dados, bem como durante a escolha dos modelos e da simulação, torna o resultado pouco robusto. Isto posto, há uma margem de erro, entre o simulado e o real, que não pode ser quantificada.

5.3 Contribuições desta pesquisa

Esta pesquisa possui contribuições para a comunidade científica e para a sociedade em geral, as quais muitas vezes se misturam. Por exemplo, a principal contribuição acadêmica pode ser vista como mais uma confirmação das ideias de Jacobs (1961) a respeito do risco associado ao

aumento da utilização do automóvel. Ademais, tal corroboração também fortalece os argumentos em prol da cobrança pelo uso do espaço viário, tão defendida por outros autores (BRINCO, 2014; VASCONCELLOS, 2000; IAIONE, 2000; FERRAZ e TORRES, 2004). Esta proposta de pedágios urbanos ou qualquer outro método semelhante, por outro lado, pode ser vista também como uma contribuição prática do trabalho, e não só acadêmica.

Outras contribuições acadêmicas secundárias desta dissertação e suas respectivas contribuições à sociedade podem ser encontradas. Primeiramente, o quadro de escolhas e recompensas para a analogia da *tragédia dos bens comuns na mobilidade* (Quadro 2), visto como um caso do *Dilema do Prisioneiro em mobilidade urbana*, pode ser considerado pioneiro na literatura.

Por sua vez, a roteirização dos trajetos e a estimação das velocidades médias seguindo a metodologia escolhida – regressão usando Mínimos Quadrados Ponderados –, mostrou ser viável calcular as estimativas de velocidades médias por distância percorrida, e não por linha reta, como eram feitas nas pesquisas anteriores (BHTRANS, 2016). Na verdade, esta dissertação mostrou que talvez a pesquisa OD de 2012 seja subutilizada pelos estudiosos do tema, bem como pelos planejadores de transporte da região; dado a grande quantidade de informação contida na pesquisa, aliada à sua principal qualidade, que é a representatividade não viciada da população. Em relação às estimativas das velocidades médias, as mesmas podem ser confrontadas com estimativas de velocidades médias obtidas por outras pesquisas (diferentes da OD), mais recentes, a fim de validá-las. Em suma, esta possibilidade de validação, pode ser vista tanto como uma contribuição prática quanto científica do trabalho.

A modelagem macroscópica mostrou ser possível, embora com um resultado não tão bom quanto em outros aspectos, ajustar um modelo macroscópico de tráfego a um grupo de vias conjuntamente, e não somente a vias separadamente. Isto tem uma contribuição científica, mas talvez a sua contribuição prática seja muito maior. Esta metodologia facilita muito o ajuste dos modelos e a realização de simulações de tráfego, que em geral consomem muitos recursos computacionais e tempo. Embora, na prática, as empresas de planejamento de transporte – em geral – utilizem a simulação microscópica; seja diretamente com o uso de *softwares* pagos ou indiretamente por meio de consultorias – e seus *softwares* pagos –, a simulação macroscópica pode ser também utilizada. Pode sê-lo simplesmente para a confirmação da primeira, ou mesmo para o caso em que não houver recursos financeiros para a execução da primeira, já que o *software* aqui utilizado (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2016) é livre e gratuito. Tal software só possui um elevado custo de aprendizagem; entretanto, após tal barreira ser vencida,

possui diversos usos e pode ser usado de maneira proveitosa e quase ilimitada por toda a empresa, e não só para a simulação de tráfego.

5.4 Sugestões para trabalhos futuros

As limitações deste trabalho ajudam no processo de se sugerir trabalhos futuros, com o intuito de corrigir os problemas aqui encontrados. Por exemplo, sugere-se que uma nova pesquisa considere os outros modos de transporte, como o não motorizado e a motocicleta, e não somente o ônibus e o carro. Também se sugere que uma nova pesquisa possa avaliar a possibilidade da *tragédia* caso a matriz de origens e destinos fosse diferente, ou seja, não tão radial (periferia/centro) e pendular (casa/trabalho no pico da manhã e trabalho/casa no pico da tarde) como a aqui observada. Por exemplo, é bem provável que caso os trajetos passassem menos pelo Centro, ou fossem menos concentrados nos horários de pico, a *tragédia* seria evitada. Este novo trabalho poderia quantificar estas situações, em termos do número (proporção) máximo de viagens passando pelo Centro ou nos horários de pico, as quais seria possível admitir sem que ocorresse a *tragédia dos bens comuns na mobilidade*. Com base nesses resultados, seria possível balizar uma reorganização do espaço viário, propor alterações no Plano Diretor (que estimulem a desconcentração das atividades urbanas), ou mesmo criar políticas públicas a fim de facilitar/possibilitar a alteração dos horários de picos.

Além disso, vale relembrar que neste trabalho se supôs que o critério para a tomada de decisão é o menor tempo gasto, e não outros fatores. O fator custo, por exemplo, que já foi avaliado por Souza (2017), quando perguntou aos entrevistados qual valor os mesmos aceitariam pagar como tarifa do pedágio em Belo Horizonte, poderia ser útil em uma nova pesquisa. Se os resultados deste trabalho de Souza, ou mesmo de outro semelhante, que considere outros custos associados ao automóvel e ao ônibus, fossem avaliados com a metodologia aqui descrita, os resultados seriam de grande utilidade para a sociedade. Por exemplo, seria possível simular o impacto no tempo de viagem associado a uma determinada alteração do número de viagens de automóvel; alteração prevista pela pesquisa proposta. De fato, a metodologia pode ser melhorada para permitir avaliar outros fatores da viagem, como o próprio custo, que é uma função do tempo. Desse modo, seria possível avaliar a possibilidade da *tragédia* de uma maneira mais completa, já que poderia ser proposto até mesmo como evitá-la, por meio da cobrança do preço certo no pedágio.

De maneira análoga à pesquisa proposta no parágrafo anterior, sobre o estudo do pedágio como forma de se evitar a *tragédia*; poderia ser feita uma pesquisa semelhante à realizada por Santos

(2010), a qual, utilizando a metodologia desta dissertação, tornaria possível avaliar a possibilidade de se evitar a *tragédia* com a melhoria do transporte público. Como Santos avaliou a propensão dos motoristas de Salvador a deixar de usar o automóvel em caso de determinadas melhorias no transporte público; seria possível saber qual a melhoria necessária para se inverter a tendência de migração para o transporte privado; ou pelo menos se evite que *todos* os usuários do transporte público migrem para o privado, senão determinada *fração* deles que seja suficiente para evitar a *tragédia*.

Por último, sugere-se que outras pesquisas que alterem e melhorem a metodologia aqui utilizada seriam muito bem-vindas. Novos modelos macroscópicos, ou mesmo modelos microscópicos, desde que haja tempo viável e recursos computacionais para isto, seriam muito úteis e poderiam encontrar resultados mais robustos. Ademais, uma metodologia de simulação de tráfego que fosse realmente dinâmica, como descrito por Barceló (2010), ou seja, que permitisse uma nova roteirização de cada trajeto a cada instante que houvesse uma alteração da ocupação das vias, poderia gerar resultados muito melhores, já que de fato é isto que ocorre no mundo real. Quando uma via está congestionada, os motoristas a evitam, principalmente com a informação em tempo real do tráfego, disponível atualmente em aplicativos de *smartphones*. Este seria, portanto, um importante aperfeiçoamento do modelo de simulação aqui utilizado, que não considerou tal possibilidade.

6 REFERÊNCIAS

ALVARENGA, G. V.; ALVES, P. F.; SANTOS, C. F.; NEGRI, F.; CAVALCANTE, L. R.; PASSOS, M. C. *Políticas anticíclicas na indústria automobilística: Uma análise de cointegração dos impactos da redução do IPI sobre as vendas de veículos*, Texto para Discussão, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), No. 1512, 2010. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10419/91099>.

ANTP – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES PÚBLICOS. *Mobilidade Humana para um Brasil Urbano*. Associação Nacional dos Transportes Públicos, 2017. 287 p.

ANTP – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES PÚBLICOS. *Mobilidade Humana para um Brasil Urbano*. PW Gráficos e Editores Associados Ltda. São Paulo, 2016. 24 p.

ANTP – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES PÚBLICOS. *Sistema de Informação da Mobilidade Urbana – Simob*. Relatório de 2014. São Paulo, 2014.

AXELROD, R. M. *The Evolution of Cooperation*. Basic Books, Inc., Publishers, New York, 1984. 241 p.

BARCELÓ, J. *Fundamentals of Traffic Simulation*. International Series in Operations Research and Management Science. Springer, 2010. 440p.

BECKMANN, M.; MCGUIRE, M.; WINSTEN, C. B. *Studies in the Economics of Transportation*. Yale: University Press, 1955.

BELBUTE, J. M. M. (2008), Externalidades: O que “não-Economistas” devem saber, Évora, Departamento de Economia – Universidade de Évora. Acessado pelo endereço https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwi1v_ytX_DUAhWKWT4KHQ9FBf8QFggnMAA&url=https%3A%2F%2Fwww.ua.pt%2Fii%2Ffocupacao_dispersa%2FReadObject.aspx%3Fobj%3D4876&usg=AFQjCNEHf7ZdbPrx54PvxJp5I9JzYQeOQ em 16/05/2017.

BEN-AKIVA, M. E.; LERMAN, S. R. *Discrete Choice Analysis: Theory and Application to Travel Demand*. MIT Press Series in Transportation Studies. 1985. 390 p.

BENEVOLO, Leonardo. *As Origens da Urbanística Moderna*. Lisboa: Editorial Presença. 1981.

BHTRANS - Empresa de Transportes e Trânsito de Belo Horizonte, ObsMob-BH - Observatório da Mobilidade Urbana de Belo Horizonte. Balanço anual da mobilidade urbana de Belo Horizonte 2016 (ano base 2015), Belo Horizonte: BHTRANS, 2016. 106 p. Disponível em: bit.ly/balanço16.

BOK, J.; KWON, Y. Comparable Measures of Accessibility to Public Transport Using the General Transit Feed Specification. *Sustainability*, 8, 224, 2016. doi:10.3390/su8030224

BRINCO, R. *Transporte Urbano em Questão*. Porto Alegre, Fundação de Economia e Estatística, 1985.

BRINCO, R. *Pedágio urbano e gerenciamento do tráfego urbano: elementos para a análise*. Porto Alegre, Fundação de Economia e Estatística, 2014.

BRUTON, M. J. *Introduction to Transportation Planning*. Hutchinson Technical Education, 1970. 232 p.

CARDOSO, L. *Transporte público, acessibilidade urbana e desigualdades socioespaciais na Região Metropolitana de Belo Horizonte*. 2007. Tese do Curso de Doutorado em Geografia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

CARVALHO, C. H. R.; PEREIRA, R. H. M. Efeitos da variação da tarifa e da renda da população sobre a demanda de transporte público coletivo urbano no Brasil, *Transportes*, v. 20, n. 1 (2012) p. 31–40.

CERVERO, R. Efficient Urbanization: Economic Performance and the Shape of the Metropolis. *Urban Studies*, Vol. 38, No. 10, 1651–1671, 2001

CHANDLER, R. E.; HERMAN, R.; MONTROLL, E., W. Traffic Dynamics: Studies in Car Following, *Operational Res.*, v. 6, p. 165-184, 1958.

CHURCHMAN, A. Disentangling the Concept of Density. *Journal of Planning Literature*, Vol. 13, No. 4, Maio, 1999.

COASE, R. The problem of Social Cost. *Journal of Law and Economics*, 3: 1-44, 1960.

CORKER, N. *Historical paper: 'The tragedy of the commons'*, Engineering Sustainability, Volume 164 Issue ES2, June, 2011.

CORNES, R.; SANDLER, T. *The theory of externalities, public goods, and club goods*. 2^a ed. Cambridge University Press, 1986. 590 p.

CROPPER, M.; OATES, W. Environmental Economics: A Survey. *Journal of Economic Literature*, June 1992.

CSARDI, G.; NEPUSZ, T. The igraph software package for complex network research, *InterJournal, Complex Systems*, 1695, 2006. <http://igraph.org>.

DALES, J. H. Land, water and ownership. *Canadian Journal of Economics*, 1: 797-804, 1968.

DOWNS, A. *Still stuck in traffic: Coping with peak-hour traffic congestion*. Minnesota: Brookings Institution Press, 2004.

EMCT - European Conference of Ministers of Transport. *Freight transport and the city*. Paris, 1999 (Series EMCT – Round Table 109).

ESRI - Environmental Systems Research Institute. ESRI Shapefile Technical Description. *ESRI White Paper*, 1998. Disponível em <http://www.esri.com/library/whitepapers/pdfs/shapefile.pdf>

FERRAZ, A. C. C. P.; TORRES, I. G. E. *Transporte público urbano*. 2^a ed. Editora Rima. São Carlos, 2004. 410 p.

FLETCHER, J. *Situation Ethics*. Westminster, Philadelphia, 1966.

FORTIN, P. Innovative GTFS Data Application for Transit Network Analysis Using a Graph-Oriented Method. *Journal of Public Transportation*, Vol. 19, No. 4, 2016.

GAZIS, D. C.; HERMAN, R.; POTTS, R. B. Car-following theory steady state flow, *Oper. Res.* 9 (4), 499-505, 1959.

GAZIS, D. C. *Traffic Science*. John Wiley & Sons, York Town, New York, 1974. 293 p.

GERLOUGH, D. L.; HUBER, M. J. Traffic flow theory: a monograph. TRB special report 165, 1975.

GORDON, H. S. The economic theory of a common-property resource: the fishery. *Journal of Political Economy* 62(2): 124–142. 1954.

GREENBERG, H. An analysis on traffic flow, *Oper. Res.* 7(1): 79-85, 1959.

- HAIGHT, F. A. *Mathematical Theories of Traffic Flow*. Academic Press Inc., New York, 1963.
- HARDIN, G. The Tragedy of the Commons, *Science*, v. 162 (3859), p. 1243–1248, 1968. doi:10.1126/science.162.3859.1243. PMID 5699198.
- HERMAN, R.; MONTROLL, E. W.; POTTS, R. B.; ROTHERY, R. W. Traffic dynamics: analysis of stability in car following, *Oper. Res* 7(1): 86-106, 1959.
- HSU, S. L. What Is a Tragedy of the Commons? Overfishing and the Campaign Spending Problem. *Albany Law Review* 69(1):75-138, 2005.
- IAIONE, C. The tragedy of urban roads: saving cities from choking, calling on citizens to combat climate change, *Fordham Urban Law Journal*, Vol.37(3), p. 889(63), Maio, 2010.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Metodologia do censo demográfico 2010*. Série Relatórios Metodológicos, v 41, 2ª ed. Rio de Janeiro, 2016.
- IPEA – INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA E APLICADA. *Tarifação e financiamento do transporte público urbano*. Nota Técnica. Brasília, julho de 2013.
- JABAREEN, Y. R. Sustainable Urban Forms: Their Typologies, Models, and Concepts. *Journal of Planning Education and Research*, 26: 38-52, 2006. DOI: 10.1177/0739456X05285119
- JACKSON, K. T. *Cabgrass Frontier: The Suburbanization of the United States*. Oxford University Press, New York, 1985.
- JACOB, A. A. E.; YOUNG, A. F. O uso de métodos de interpolação espacial de dados nas análises sociodemográficas. Trabalho apresentado no XV *Encontro Nacional de Estudos Populacionais*, ABEP, realizado em Caxambu – MG - Brasil, de 18 a 22 de setembro de 2006.
- JACOBS, J. *The Death and Life of Great American Cities*, New York : Random House, 1961.
- KERR, R. W. The Chemistry of Life, *Rosicrucian Digest*, Maio, 1947.
- KÜHNE, R.; MICHALOPOULOS, P.; ZHANG, H. M. Continuum flow models, Chapter 5 in *Traffic flow theory*, 1992. <http://www.tfhr.gov>.
- LLOYD, W. F. *Two Lecter on the Checks to Population*. Oxford University Press, Offord, England, 1833.

MALTHUS, T. *An Essay on the Principle of Population*. Printed for J. Johnson, in St. Paul's Church-Yard, 1798.

MAY, A. D.; KELLER, H. E. M. Non-integer car-Following Models, *Highw. Res. Rec.* 199, 19-32, 1967.

MCFADDEN, D. Conditional Logit Analysis of Qualitative Choice Behavior, *Frontiers in Econometrics*, ed by Paul Zarembka, New York: Academic Press, 105-142, 1973.

MLODINOW, L. *O andar do Bêbado: como o acaso determina nossas vidas*. Tradução: Diego Alfaro, Rio de Janeiro, Zahar, 2011.

MONTGOMERY, D.; PECK, E. *Introduction to Linear Regression Analysis*. New York: John Wiley & Sons, 1992.

MONTGOMERY, W. D. Markets and licenses and efficient pollution control programs. *Journal of Economic Theory*, 5: 395-418, 1972.

NCHRP - National Cooperative Highway Research Program. *Cooperative Highway Program*. Paris: NCHRP Publishing, 2007.

NELDER, J. A.; MEAD, R. A simplex algorithm for function minimization. *Computer Journal* 7, 308-313, 1965.

NEUMANN, J.; MORGENSTERN, O. *Theory of Games and Economic Behavior*. Princeton University Press, 1944.

NEUMANN, J.; MORGENSTERN, O. *Theory of Games and Economic Behavior*, 3 ed. Princeton University Press, 1953. 641p.

OLSON, M. *The Logic of Collective Action. Public Goods and the Theory of Groups*. Harvard Economic Studies. Volume CXXIV. Harvard University Press. 1965.

OSBORNE, M. J. *An Introduction to Game Theory*. Oxford University Press, 1995, 470p.

OSTROM, E.; BURGER, J.; FIELD, C. B.; NORGAARD, R. B.; POLICANSKY, D. Revisiting the Commons: Local Lessons, Global Challenges. *Science* Vol. 284, Issue 5412, pp. 278-282, 09 Apr 1999. DOI: 10.1126/science.284.5412.278. Acessado pelo endereço <http://science.sciencemag.org/> em 04/04/2017.

- PARSONS, T.; SMELSER, N. *Economy and Society*. Glencoe, Ill.: Free Press, 1954
- PITOMBO, C. S.; COSTA, A. S. G.; SALGUEIRO, A. R. Proposal of a Sequential Method for Spatial Interpolation of Mode Choice, *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 21, n. 2, p. 274-272, Curitiba, abr-jun, 2015.
- PIPES, L. A. An Operational Analysis of Traffic Dynamics, *J. Appl. Phys.*, V. 24, p. 274-281, 1953.
- RAUX, C. How should transport emissions be reduced? Potential for emission trading systems. *OECD/International Transport Forum*, Joint Transport Research Centre. Discussion Paper No. 2008-1 January 2008.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. *R Foundation for Statistical Computing*, Vienna, Austria, 2016. URL <https://www.R-project.org/>.
- REUSCHEL, A. Vehicle movements in a platoon, *Osterreichisches Ing.-Arch* 4:193-215, 1950.
- RICHARDS, P. I. Shock Waves on a Highway, *Oper. Res.* 4, 42-51, 1956.
- ROTHERY, R. W. Car following models, Chapter 4 in *Traffic flow theory*, 1992. <http://www.tfhr.gov>.
- SANTOS, L. M. *A faceta econômica dos congestionamentos: um balanço sobre a eficácia das políticas na melhoria da mobilidade urbana em Salvador/BA*. 2010. 54 f. Monografia do Curso de Graduação em Ciências Econômicas da Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2010.
- STM - Secretaria De Transportes Metropolitanos. Pesquisa de Mobilidade da Região Metropolitana de São Paulo 2012: Síntese das Informações Pesquisa Domiciliar. São Paulo, 2013.
- SECRETARIA DE ESTADO EXTRAORDINÁRIA DE GESTÃO METROPOLITANA (SEGEM); AGÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DA REGIÃO METROPOLITANA DE BELO HORIZONTE (ADRMBH). Relatório completo pesquisa origem e destino 2011/2012. Belo Horizonte: Cidade Administrativa, 2013.
- SILVA, A. L. B. Transporte, uso do solo e planejamento. *Revista de Geografia - PPGEO* - v. 2, nº 1, 2012.

SILVA, G. J. A.; SILVA, S. E.; NOME, C. A. Densidade, dispersão e forma urbana. Dimensões e limites da sustentabilidade habitacional. *Arquitextos*, São Paulo, ano 16, n. 189.07, Vitruvius, fev. 2016.

SILVA, P. J. M. *Análise crítica da avaliação do desempenho do sistema BRT: Estudo de caso de uma estação de integração de Belo Horizonte*. 2015. 185f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

SMALL, K. A. *Urban Transportation Economics*. *Fundamentals of Pure and Applied Economics*, v 51. Harwood Academic Publishers, 1992. 185 p.

SMITH, A. *An Inquiry into the Nature and Causes of The Wealth of Nations*. London, 1776. Republicado por An Electronic Classics Series Publication, 2005. Disponível em <http://eet.pixel-online.org/files/etranslation/original/The%20Wealth%20of%20Nations.pdf>

SOUZA, S. L. *Pedágio urbano como instrumento de política pública, gestão e controle de tráfego: desafios para sua implantação na área central de Belo Horizonte*. 2017. 179 f. Dissertação do Curso de Mestrado em Geotecnia e Transportes da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

STPP. Gerência do Sistema de Transporte Público de Passageiros - Módulos de Treinamento. EBTU - Empresa Brasileira de Transportes Urbanos. Brasília - DF. 1988.

THURSTON, L. A Law of Comparative Judgement, *Psychological Rev.* 34: 273-286, 1927.

TRAIN, K. *Qualitative Choice Analysis: Theory, Econometrics, and an Application to Automobile Demand*. MIT Press Series in Transportation Studies. 3 ed. 1993. 252 p.

TREFAUT, M. P. “O carro é o cigarro do futuro”, *Revista Valor Econômico*, 02 set. 2016. Disponível em: <<http://www.valor.com.br/cultura/4696361/o-carro-e-o-cigarro-do-futuro-diz-lerner>>. Acesso em 05 fev. 2017.

TRIOLA, M. F. *Introdução à estatística*. 7 ed. Rio de Janeiro: LTC S.A., 1999. 412 p.

ULIAN, F.; COSA, A. M.O. Legado da Copa do Mundo da FIFA 2014: Mobilidade Urbana em Cinco Cidades Brasileiras, *Revista InSIET: Revista In Sustentabilidade, Inovação & Empreendedorismo Tecnológico*, São Paulo, V. 2, n. 2, agosto/dezembro de 2015.

VARGAS, J.; HERSCOVICI, A. A Tragédia dos Commons Revisitada: uma Análise Crítica. *Análise Econômica*, Porto Alegre, ano 35, n. 67, p. 105-128, mar. 2017.

VASCONCELLOS, E. A. *Transporte urbano nos países em desenvolvimento: reflexões e propostas*. 3ª ed. São Paulo: Annablume. 2000. 2936 p.

WEBER, M.; PARSONS, T.; SMELSER, N. *Theory of Social and Economic Organization*. New York, Oxford University Press, 1947.

WEITZMAN, M. Prices vs Quantities, 41, *Rev. Econ. Stud.* 477, 1974.

WEST, D.B. *Introduction to Graph Theory*. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall. 1996.

WHITEHEAD, A. N. *Science and the Modern World*. Mentor, New York, 1948.

WHITELEGG, J. Road Safety: defeat, complicity and the bankruptcy of science. *Accident Analysis and Prevention* 15(2):153-160, 1981.

WIESNER, J. B.; YORK, H. F. National Security and the Nuclear-Test Ban, *Scientific American*, v. 211, No 4, 27, p. 27-35, 1964.