



ANÁLISE COMPARATIVA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES DE FONTES  
VEICULARES OBTIDAS POR MICROSSIMULADORES DE TRÁFEGO NA  
CIDADE UNIVERSITÁRIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

Paulo Kazuo Aoyagui

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes.

Orientadora: Andréa Souza Santos

Rio de Janeiro  
Novembro de 2023

ANÁLISE COMPARATIVA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES DE FONTES VEICULARES OBTIDAS POR MICROSSIMULADORES DE TRÁFEGO NA CIDADE UNIVERSITÁRIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

Paulo Kazuo Aoyagui

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES.

Examinada por:

---

Profa. Andrea Souza Santos, D.Sc.

---

Profa. Marina Leite de Barros Baltar, D.Sc.

---

Profa. Luciana Maria Baptista Ventura, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

NOVEMBRO DE 2023

Aoyagui, Paulo Kazuo

Análise Comparativa De Estimativas De Emissões De Fontes Veiculares Obtidas Por Microsimuladores De Tráfego Na Cidade Universitária Da Universidade Federal Do Rio De Janeiro / Paulo Kazuo Aoyagui. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2022

XII, 60p.: il.; 29,7 cm.

Orientadora: Andréa Souza Santos

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia de Transportes, 2021.

Referências Bibliográficas: p. 59-60.

1. Engenharia de Tráfego. 2. Poluentes veiculares. 3. Microsimulação. I. Santos, Andréa Souza. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Transportes. III. Título.

*“Dificuldades preparam pessoas comuns para destinos extraordinários.”*

*C.S Lewis*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida e pela oportunidade de ter me concebido esta graça alcançada, apesar de todas as dificuldades e contratempos.

À minha mãe Rosi, minha madrinha Dulce e minha esposa Mônica, que sempre me apoiaram nessa jornada, pelo apoio e compreensão recebidos durante toda a minha vida acadêmica e profissional. A ausência da presença física por muitas vezes aconteceu, mas o apoio nunca deixou de existir.

A Professora Andréa Souza Santos, especialmente pela paciência, apoio e resiliência.

Aos demais professores do PET, da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, que, apesar dos problemas de saúde mundial, nos anos de 2020 e 2021, se empenharam em oferecer aos alunos o conteúdo programático da melhor forma possível, sempre com muito esforço e profissionalismo.

Aos Companheiros do Laboratório de Transporte Sustentável e aos discentes que tanto trocaram experiência comigo nesse período, destacando o companheirismo e apoio.

Aos meus amigos que sempre me apoiaram na difícil rotina de compartilhar a vida profissional com a acadêmica, em especial nos momentos que possuímos grandes responsabilidades em servir a sociedade.

Aos excepcionais profissionais e amigos da Companhia de Engenharia de Tráfego do Município do Rio de Janeiro – CET-Rio – Gerência de Planejamento, que, além do apoio, também estiveram ao meu lado compartilhando conhecimento e experiências, em especial aos engenheiros de tráfego, Rodolpho Moreira, Henrique Torres, Adalberto Garcia (*in memoriam*), Carlos Lessa, Ubiratan, Vera, Ana Paula, Rufino, Emerson, Virgínia, Andrea, Emília, Walmir, Arnaldo e Denise.

A professora Cláudia Daza, minha orientadora da graduação e amiga que sempre me acompanha nos eventos acadêmicos e na vida profissional.

A todas as pessoas que, de alguma forma, colaboraram para que eu cumprisse este objetivo.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ANÁLISE COMPARATIVA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES DE FONTES VEICULARES OBTIDAS POR MICROSSIMULADORES DE TRÁFEGO NA CIDADE UNIVERSITÁRIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

Paulo Kazuo Aoyagui

Novembro/2023

Orientadora: Andréa Souza Santos

Programa: Engenharia de Transportes

Gestores das mais diversas esferas do planejamento urbano, se preocupam com a qualidade do ar e o sistema de transportes de uma cidade, a microssimulação de tráfego é uma ferramenta de planejamento e operação dos transportes, e têm obtido expressivos avanços no desenvolvimento e aprimoramento das estimativas de emissões veiculares. O propósito deste estudo consiste em fornecer uma análise comparativa entre os resultados das estimativas de emissões de poluentes provenientes de fontes veiculares geradas por microssimuladores de tráfego, assim como apresentar o potencial dessas ferramentas de modelagem. Foram utilizados dados do último inventário de emissões de fontes veiculares da Região Metropolitana do Rio de Janeiro, publicado em 2016, com ano base de 2013, e aplicados aos microssimuladores AIMSUN e CORSIM. O objeto de análise foi a Cidade Universitária da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Os resultados mostram que os microssimuladores, após calibração, representam 98,2% da realidade dos fluxos de veículos nas vias e podem ser uma ferramenta confiável no planejamento e no controle de medidas mitigadoras para redução das emissões veiculares, levando-se em conta que esses modelos consideram o impacto dos congestionamentos, elevações em rampa e filas e, conseqüentemente, o aumento de emissões dos cenários estudados/existentes.



Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

COMPARATIVE ANALYSIS OF EMISSION ESTIMATES FROM VEHICULAR  
SOURCES OBTAINED BY TRAFFIC MICROSIMULATORS IN THE  
UNIVERSITY CITY OF THE FEDERAL UNIVERSITY OF RIO DE JANEIRO

Paulo Kazuo Aoyagui

November/2023

Advisor: Andréa Souza Santos

Department: Transportation Engineering

Managers from the most diverse spheres of urban planning are concerned about air quality and a city's transport system. Traffic microsimulation is a tool for transport planning and operation, and has made significant progress in developing and improving estimates of vehicle emissions. The purpose of this study is to provide a comparative analysis of the results of estimates of pollutant emissions from vehicular sources generated by traffic microsimulators, as well as to present the potential of these modeling tools. Data from the latest inventory of emissions from vehicular sources in the Metropolitan Region of Rio de Janeiro, published in 2016, with a base year of 2013, was used and applied to the AIMSUN and CORSIM microsimulators. The object of analysis was the University City of the Federal University of Rio de Janeiro. The results show that the microsimulators, after calibration, represent 98.2% of the reality of vehicle flows on the roads and can be a reliable tool for planning and control of mitigating measures to reduce vehicle emissions, taking into account that these models consider the impact of congestion, ramp elevations and queues and, consequently, the increase in emissions of the studied/existing scenarios.

## Sumário

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO.....	1
1.2. OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS.....	3
1.3. JUSTIFICATIVA.....	4
1.4. ESTRUTURA DA PESQUISA.....	5
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>7</b>
2.1. ENGENHARIA DE TRÁFEGO E EMISSÕES DE POLUENTES.....	7
2.2. SOFTWARES DE MICROSIMULAÇÃO DE TRÁFEGO E PARÂMETROS DE EMISSÃO.....	11
2.2.1. SOFTWARES UTILIZANDO MÉTODOS DETERMINÍSTICOS.....	15
2.2.2. SOFTWARES UTILIZANDO MÉTODOS ESTOCÁSTICOS...	16
2.2.3. SST <i>AIMSUN</i> .....	17
2.2.4. SST <i>TSIS-CORSIM</i> .....	19
2.3. INVENTÁRIO DE EMISSÕES DE FONTES VEICULARES.....	21
2.3.1. METODOLOGIA BOTTOM-UP.....	21
2.3.2. METODOLOGIA TOP-DOWN.....	22
2.3.3. INVENTÁRIO DE EMISSÕES DE FONTES VEICULARES: REGIÃO METROPOLITANA DO RIO DE JANEIRO DE 22 DE SETEMBRO DE 2016.....	23
2.4. CONTROLE DAS EMISSÕES VEICULARES.....	24
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>27</b>
3.1. CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO.....	29
3.2. COLETA DE DADOS.....	31
3.2.1. DADOS DO IEFV DO INEA.....	31
3.2.2. DADOS DE CONTAGEM DE TRÁFEGO CET-RIO.....	32
3.2.3. TRANSPORTE PÚBLICO.....	34
3.2.4. DADOS DE EMISSÃO VEICULARES.....	35
3.2.5. TRATAMENTO DOS DADOS PARA A SIMULAÇÃO.....	36
3.2.6. ANÁLISE DOS DADOS DE EMISSÃO INVENTARIADOS E SIMULADOS.....	41

3.3	VALIDAÇÃO DO MODELO	41
<b>4.</b>	<b>PROCESSAMENTO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b>	<b>42</b>
4.1	VIAS COMPARADAS DA REGIÃO	43
4.2	CODIFICAÇÃO DA REDE DE TRANSPORTES	45
4.3	MÉTODO DE OBTENÇÃO DE RESULTADOS DAS EMISSÕES E CALIBRAÇÃO	47
4.4	ALIMENTAÇÃO DOS DADOS NOS SIMULADORES DE TRÁFEGO	48
4.5	TRATAMENTO DOS DADOS SIMULADOS	49
4.6	CONFRONTO DOS DADOS DE EMISSÃO INVENTARIADOS E SIMULADOS	50
<b>5.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>56</b>
5.1	BREVE EXPOSIÇÃO DO TRABALHO	57
5.2	REVISÃO TEÓRICA	58
5.3	DETALHAMENTO DA PROPOSTA	58
5.4	EXPERIMENTO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	58
5.5	PRINCIPAIS CONCLUSÕES	59
5.6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	60
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>62</b>

## Índice de Figuras

Figura 2.1 –	Microsimuladores e seus respectivos parâmetros de emissões de poluentes.....	14
Quadro 1 –	Definições dos tipos de veículos automotores.....	26
Figura 3.1 –	Etapas desenvolvidas no procedimento proposto .....	29
Figura 3.2 –	Mapa de Localização da Ilha do Fundão.....	30
Figura 3.3 –	Mapa Viário da Ilha do Fundão.....	31
Figura 3.4 –	Perfil de velocidade da Av. Horácio Macedo - Ilha do Fundão.	35
Figura 3.5 –	Pesquisa de campo na Região da Cidade Universitária.....	35
Figura 3.6 –	Aquisição de dados de trajetos, pontos e das frequências das linhas de ônibus.....	36
Figura 3.7 –	Modelagem Rede Viária do CORSIM da Região da Cidade Universitária.....	38
Figura 3.8 –	Rede Viária do IEFV-RMRJ da Região da Cidade Universitária.....	39
Figura 3.9 –	Levantamento Semafórico da Região da Cidade Universtária...	40
Figura 3.10 –	Comparação de dados simulados com Inventariados.....	41
Figura 3.11 –	Configurações de emissões no AIMSUN.....	40
Figura 4.1 –	Rede Viária do IEFV-RMRJ da Região da Cidade Universtária.....	43
Figura 4.2a –	Volumes de tráfego, Av. Brigadeiro Trompowski, sentido Cidade Universitária.....	44
Figura 4.2b –	Volumes de tráfego, Av. Brigadeiro Trompowski, sentido Cidade Universitária.....	44
Figura 4.3a –	Ilustração em alta resolução de alguns trechos analisados (com vias principais com alta circulação de veículos).....	45
Figura 4.3b –	Trechos de TT e Cruzamento detalhado da imagem do SAS Planet.....	46
Figura 4.4 –	Rede modelada no simulador de tráfego AIMSUN.....	46
Figura 4.5 –	Rede modelada no simulador de tráfego CORSIM.....	47
Figura 4.6 –	Ilustração da tela de seleção dos dados do modelo de emissão presente no simulador AIMSUN.....	50

Figura 4.7 –	Calibração de dados simulados com Inventariados.....	51
Figura 4.8 –	Gráfico de emissão de CO por via comparando resultados do IEFV com microssimuladores CORSIM e AIMSUN.....	54
Figura 4.9 –	Gráfico de emissão de NOX por via comparando resultados do IEFV com microssimuladores CORSIM e AIMSUN.....	555
Figura 4.10 –	Gráfico de emissão de HC por via comparando resultados do IEFV com microssimuladores CORSIM e AIMSUN.....	56

## Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Estratégias para Redução de Emissões.....	10
Tabela 2.2 – Lista de SMT utilizados e suas características.....	12
Tabela 2.3 – Porcentagem do número de citações dos simuladores de tráfego microscópicos na produção científica por artigo no período de 2000 a 2015.....	13
Tabela 3.1 – Lista de vias e suas características.....	31
Tabela 3.2 – Lista de vias e suas características.....	32
Tabela 3.3 – Contagem volumétrica.....	33
Tabela 3.4 – Perfil de velocidade da Av. Horácio Macedo - Ilha do Fundão	36
Tabela 3.5 – Fator de emissão de Veículos leves.....	36
Tabela 4.1 – Calibração de emissão por trecho de 1 km.....	51

## Lista de Abreviaturas e Siglas

ABRACICLO	Associação Brasileira dos Fabricantes de Motocicletas, Ciclomotores, Motonetas, Bicicletas e Similares
ANFAVEA	Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
CETESB	Companhia Ambiental do Estado do Rio de Janeiro
DETRAN-RJ	Departamento Estadual de Trânsito do Rio de Janeiro
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IEMA	Instituto de Energia e Meio Ambiente
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
MMA	Ministério do Meio Ambiente
PETROBRAS	Petróleo Brasileiro S/A
PROCONVE	Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores

## 1. INTRODUÇÃO

O setor de transporte é uma das atividades antrópicas que mais impacta o meio ambiente local e global, devido a grandes quantidades de emissão de gases poluentes (RIBEIRO et al., 2000; SOARES, 2019). A Organização Mundial da Saúde (OMS) estima que, a nível mundial, a poluição atmosférica é responsável por cerca de 7 milhões de mortes prematuras por ano devido a doenças cardíacas, acidentes vasculares cerebrais, doenças pulmonares obstrutivas crônicas e cancro do pulmão, mas também devido a infecções respiratórias agudas, como a pneumonia, que afeta principalmente crianças em regiões de baixas renda (WHO, 2023).

É nítido que o aumento significativo do número de automóveis particulares e a ineficiência do sistema público de transportes afetam muito a população quanto a sua mobilidade, a qualidade de vida e saúde. Os gases emitidos pelos veículos automotores de combustão interna não se limitam a problemas urbanos pontuais, pois essas emissões afetam a qualidade do ar e propagam-se pela atmosfera, conforme condições meteorológicas, não respeitando fronteiras geográficas ou políticas (INEA, 2016; LOUREIRO, 2005; SOARES, 2019).

Em 2023, a OMS lançou o relatório “Acesso a ar limpo e energia para populações mais saudáveis e cobertura universal de saúde” visando proteger a saúde pública por meio de ações baseadas em evidências para melhorar a qualidade do ar e garantir o acesso a soluções energéticas limpas e sustentáveis (WHO, 2023). Neste sentido, Dias (2014) afirma que modelos de emissão integrados aos modelos de tráfego são ferramentas imprescindíveis para estudar os efeitos do tráfego nas emissões dos poluentes atmosféricos e consumo de combustível. Assim, o uso de ferramentas de simulação de tráfego, integradas aos modelos de emissão, pode contribuir para o planejamento dos transportes sustentáveis, com vistas à melhoria da redução das emissões de poluentes.

### 1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

As estimativas de emissões dos poluentes estão se tornando cada vez mais relevantes na avaliação dos impactos de projetos de transportes por gestores das cidades, e os métodos para avaliar essas emissões, por meio de mensurações da qualidade do ar, estão relacionados com as alterações climáticas e a saúde pública (BEHAN, 2020). Em várias regiões metropolitanas do mundo desenvolveram-se inventários de emissões do transporte rodoviário usando uma ampla gama de modelos de emissão para gestão do

tráfego nas emissões de gases de efeito estufa (GEE) (TU et al., 2018). O desenvolvimento de estratégias urbanas para redução de impactos ambientais e descarbonização requer monitoramento contínuo em escala local e maior implantação de ações para melhorar a demanda de transporte (características do usuário e escolha modal) e oferta (infraestrutura e serviços) (MAŁDZIEL et al., 2021).

A degradação da qualidade ambiental nos grandes centros urbanos é observada por frequentes episódios críticos de poluição do ar, sendo o setor de transportes um grande fator de impacto nas emissões de poluentes, principalmente oriundos dos processos de combustão (IPCC, 2014). Uma importante área de pesquisa em rápida evolução consiste nos esforços empregados na estimativa de emissões por uma integração de modelos de simulação de tráfego (SONG; YU; ZHANG, 2012).

As emissões dos veículos são amplamente estimadas pelos inventários de emissões que detalham os comportamentos, qualidade da frota na região, fluxo, tipo de combustível e tipos de veículos.

Avaliar, conhecer, estudar alternativas de estimar as emissões de poluentes de fontes veiculares é fundamental para possibilitar o aprimoramento do controle com maior eficácia e redução, evitando problemas locais de saúde pública e bem-estar (NUNES; HERNANDES, 2019), e até questões globais, como as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) e o conseqüente aumento da temperatura terrestre. O setor de transportes é significativo em termos de impactos ambientais em escala global, e foi responsável pelas emissões totais de 2.006,09 tCO<sub>2</sub> Eq/ano, no ano de 2018, e 1.797,33 tCO<sub>2</sub> Eq/ ano, no ano de 2019. Embora tenha havido uma diminuição de cerca de 10% das emissões de 2018 para 2019, acredita-se que seja necessário investir em medidas que busquem reduzir ainda mais essas emissões (DE ABREU; SANTOS, 2021).

Os inventários de emissões desempenham um papel fundamental na gestão da qualidade do ar e no desenvolvimento de estratégias de controle da poluição atmosférica (SOARES, 2019). No contexto das emissões provenientes de fontes veiculares, duas abordagens principais são frequentemente utilizadas: a abordagem *top-down* e a abordagem *bottom-up* (INEA, 2016).

A abordagem *top-down*, também conhecida como "abordagem de referência" pelo IPCC (1997), envolve a totalização das emissões com base no volume de combustíveis consumidos na região investigada e na massa de poluentes gerada pela queima de cada litro de combustível nos veículos. Essa metodologia é considerada mais simples, sendo empregada quando há falta de informações detalhadas sobre a frota de veículos, seu

desempenho médio e intensidade de uso. Em tais casos, valores de referência internacionais são frequentemente adotados, estabelecendo emissões médias em função do volume de combustível.

Embora seja razoavelmente precisa e amplamente aceitável para o inventário de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), a abordagem *top-down* pode ser menos adequada para o inventário de outros poluentes veiculares, exigindo informações mais detalhadas para maior precisão. Na abordagem *bottom-up*, por outro lado, preconiza a coleta de dados detalhados sobre a frota de veículos, suas características tecnológicas, eficiência média e padrões de uso. Essa metodologia é recomendada quando há disponibilidade de informações suficientes, tendo sido considerada mais precisa para inventários de poluentes veiculares.

É indiscutível, portanto, a necessidade de ampliação e melhoria na gestão da qualidade do ar e na redução das emissões de poluentes atmosféricos provenientes do setor de transporte no contexto urbano. Os microssimuladores de tráfego emergiram como uma ferramenta valiosa para a modelagem de sistemas de transporte urbano, estimar emissões de poluentes veiculares e consumo de combustível, essas ferramentas de modelagem que permitem a simulação detalhada do comportamento de veículos em redes viárias urbanas. Eles consideram fatores como velocidade, aceleração, distância entre veículos e escolhas de trajetórias individualmente, permitindo uma representação precisa do tráfego em cenários complexos.

## 1.2. OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS

Como objetivo geral, visa-se realizar uma análise comparativa entre os modelos de microssimuladores de tráfego CORSIM e AIMSUN quanto aos parâmetros de emissões de poluentes atmosféricos de fontes veiculares, a fim de confrontar os resultados obtidos pelos respectivos modelos, onde a região no entorno da Cidade Universitária da Universidade Federal do Rio de Janeiro foi utilizada como estudo de caso.

O estudo compreende os seguintes objetivos específicos:

- a) modelar e alimentar os dados de tráfego disponibilizados no Inventário de emissões de fontes veiculares da RMRJ para o ano 2016<sup>1</sup>;
- b) analisar o desempenho dos microssimuladores de tráfego para os

---

<sup>1</sup>O ano de 2016 foi considerado base por ser o último Inventário de metodologia *Bottom up* na região do estudo.

- resultados dos parâmetros de emissões de poluentes atmosféricos;
- c) comparar os dados de emissões atmosféricas do inventário de emissões veiculares da RMRJ (2016) com os resultados obtidos a partir da microssimulação utilizando os 2 modelos (CORSIM e AIMSUN); e
  - d) confrontar as emissões simuladas com os limites de emissões estabelecidas pelas leis vigentes e apresentar recomendações aos tomadores de decisão.

### 1.3. JUSTIFICATIVA

O problema da poluição atmosférica nos centros urbanos e o agravamento do aquecimento global necessita de ferramentas para compreender, mensurar e monitorar os níveis de emissões comparados com os que são especificados pelos órgãos de controle e demais tomadores de decisão. Em 2015, foi estabelecido o Acordo de Paris, que visa limitar o aquecimento do planeta em 2 °C, de preferência em 1,5 °C, o que implica numa redução drástica e urgente da emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE).

A Organização das Nações Unidas (ONU) estabeleceu a Agenda de 2030, os 17 objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS), com metas associadas. Segundo Costa (2017) os modelos de simulação de tráfego são importantes ferramentas de apoio para o teste e análise de problemas de transportes. Nos estudos de redes urbanas destacam-se duas principais razões: a primeira deve-se à dificuldade de realização de experiências no sistema real e a segunda à possibilidade que os modelos oferecem em testar distintas alternativas de um modo mais seguro e econômico. Modelos microscópicos de simulação descrevem o tráfego através da representação individual dos veículos, contemplando as interações dos veículos entre si e com a infra-estrutura viária (IMASATO et al., 2008).

Para Moreira (2005), utilizar um modelo sem o estudo detalhado das hipóteses simplificadoras feitas na sua concepção ou quais os conceitos físicos e matemáticos utilizados para sua elaboração pode levar o técnico ao emprego de uma ferramenta inadequada para resolver um problema específico, o que, na maioria das vezes, significa agregar mais um custo ao projeto do que otimizar recursos por meio da escolha da melhor proposta de solução.

Com a atividade de transportes, que ainda é muito dependente de combustíveis fósseis, e, portanto, grande emissora de CO<sub>2</sub>, a questão do efeito estufa torna o impacto ambiental global mais relevante dentre as possíveis mudanças climáticas associadas ao

transporte (RIBEIRO, 2000; SANTOS; RIBEIRO, 2015). O setor de transporte possui forte interação com as mudanças climáticas, e gera impactos que podem ser agrupados em duas categorias:

- a) aquelas originárias pelo setor, tais como as emissões de gases de efeito estufa e poluentes (efeitos negativos sobre o aquecimento global); e
- b) aquelas causadas pelas mudanças climáticas sobre o setor de transporte (SANTOS; RIBEIRO, 2015).

O Banco Interamericano Desenvolvimento (BID, 2008) exige que em estudos e projetos financiados por ele que sejam realizados estudos utilizando microssimuladores de tráfego para ampliação de capacidade do sistema viário e implantação de transporte urbano, (GOMES, 2015).

#### 1.4. ESTRUTURA DA PESQUISA

A presente dissertação foi estruturada em cinco capítulos.

O Capítulo 1 contextualiza e delimita o assunto abordado na dissertação com a introdução contendo a caracterização do problema, objetivos, justificativas e a descrição sucinta dos capítulos.

O Capítulo 2 trata da revisão de literatura, apresentando quatro fundamentações teóricas: o 2.1 apresenta conceitos referentes à Engenharia de Tráfego e emissões de poluentes, abordando os fundamentos da engenharia de tráfego e de uma gestão eficaz do tráfego para a redução das emissões atmosféricas e promoção da sustentabilidade do transporte; o item 2.2 apresenta os principais *Softwares* de Microssimulação de Tráfego (SMT) e seus Parâmetros de Emissão, além dos mais utilizados na literatura; o item 2.3 apresenta as principais metodologias utilizadas nos Inventários de Emissões de poluentes de fontes veiculares (IEFV) e no item 2.4 são apresentados os principais órgãos de controle de poluição e os microssimuladores de tráfego AIMSUN e CORSIM.

O Capítulo 3 descreve a concepção de um novo procedimento metodológico, com o método utilizado no estudo, e a presença de um organograma e descrição das etapas envolvidas de preparação da coleta de dados de tráfego, da análise da atualização de dados do Inventário de Emissões de Poluentes com uso dos parâmetros de poluição dos microssimuladores e da parte da microssimulação com uso do modelo computacional AIMSUN e CORSIM.

O Capítulo 4 tem a aplicação do método na área de estudo, onde estão inseridos as análises e os resultados do estudo.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões da aplicação da análise, onde são evidenciadas as principais potencialidades do procedimento proposto e suas limitações. Traz também as conclusões e recomendações para estudos futuros.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo aborda-se a revisão de literatura, tendo como principal objetivo a apresentação dos métodos e conceitos desenvolvidos em estudos anteriores que tratam de forma direta ou indireta o assunto desta dissertação. A revisão é fundamental para melhor compreender e contextualizar o atual cenário (*Business as Usual*) que se encontram os sistemas de microssimuladores de tráfego e seus *outputs* de emissões de poluentes, sendo também a oportunidade para avaliar ferramentas, como tipos de emissões estimadas, os métodos de estimativas de emissões adotados e como são disponibilizados esses dados de cada ferramenta.

A revisão está dividida em quatro tópicos: na Seção 2.1 são apresentados os conceitos de Engenharia de Tráfego e Emissões de Poluentes, bem como seus principais aspectos e características; na Seção 2.2 são expostos os modelos de microssimuladores, suas características e seus principais parâmetros de estimativas de emissão; na Seção 2.3 aborda-se sobre Inventário de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores, aqui denominado de Emissões Veiculares, e principais metodologias de estimativa; e, por fim, na Seção 2.4 são apresentados os principais Inventários de Emissões Veiculares elaborados no Brasil bem como ferramentas de controle da poluição veicular.

### 2.1. ENGENHARIA DE TRÁFEGO E EMISSÕES DE POLUENTES

Esta seção aborda o papel crítico da Engenharia de Tráfego de veículos no que diz respeito às emissões de fontes veiculares. A relação entre o tráfego rodoviário e as emissões têm sido objeto de estudo em todo o mundo, à medida que as áreas urbanas enfrentam desafios crescentes relacionados à qualidade do ar e à saúde pública. A compreensão das condições de tráfego e do seu impacto nas emissões é fundamental para o desenvolvimento de estratégias de mitigação eficazes como a implementação de tecnologias avançadas; o planejamento viário sustentável; a promoção de transporte limpo e as regulamentações eficazes. Segundo o relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), essas medidas são necessárias para a mitigação das emissões do setor de transportes (IPCC, 2014).

Segundo o *Institute of Traffic Engineering* (ITE) e o Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN), a Engenharia de Tráfego é uma disciplina integrante da Engenharia de Transportes dedicada ao planejamento, com o desenho geométrico e com

as operações de tráfego das estradas, com suas redes, terminais e terrenos adjacentes, inclusive a integração de todos os modos de transporte, visando proporcionar a movimentação conveniente, eficiente e segura das pessoas e das mercadorias (CONTRAN, 2016).

De acordo com Vieira (2019) a engenharia de tráfego trata dos problemas de planejamento, operação e controle de tráfego atendendo objetivos como mobilidade sustentável e socialmente inclusiva. Dessa maneira, pode-se dizer que visa proporcionar a movimentação segura, eficiente e conveniente de pessoas e mercadorias. Um conceito mais moderno para engenharia de tráfego seria engenharia da mobilidade, que está baseado em três fatores de segurança: a Engenharia Veicular, referente a segurança automobilística; a Engenharia Viária, que se preocupa com projetos de infraestrutura; e os Fatores Humanos, conscientizando a população e autoridades sobre a gravidade das consequências dos acidentes, o estímulo ao uso de meios de transporte mais seguros e a melhor capacitação de condutores e pedestres (VIEIRA, 2019).

Existe uma forte dependência de dados sobre padrões de tráfego, velocidades dos veículos e densidade do tráfego para determinar a precisão das informações geradas pelos modelos de tráfego e, conseqüentemente, das emissões geradas pelos modelos de emissões dos veículos. Os procedimentos normalmente utilizados na engenharia de tráfego para levantamentos de dados de campo são as pesquisas, que podem ser feitas mediante entrevistas ou por observação direta. Os dados de tráfego são essenciais para a modelação da qualidade do ar nos centros urbanos (BORGES, 2022).

A emissão de poluentes provenientes de fontes veiculares é um problema ambiental significativo nas áreas urbanas, e é uma questão essencial a ser abordada pela engenharia de tráfego. A gestão eficaz do tráfego desempenha papel fundamental na redução das emissões de poluentes atmosféricos e na promoção da sustentabilidade do transporte.

Os dados de tráfego geram resultados confiáveis em modelos de emissões de veículos e modelos de qualidade do ar. Devido ao grande crescimento do transporte motorizado e carbonizado, o nível de organização e controle das atividades de transporte público, privado e de cargas e a intensidade de utilização do transporte individual, pela população, são condicionantes importantes para explicar os diferentes índices de poluição veicular observados em cidades com características demográficas semelhantes (MELO, 2018; IPEA, 2011). Mesmo uma pequena mudança positiva na precisão dos modelos de tráfego pode melhorar a precisão dos modelos de emissões dos veículos (VIEIRA DA

ROCHA *et al.*, 2015), e aumentar a complexidade dos modelos pode introduzir mais parâmetros com valores incertos, diminuir a transparência e depreciar a precisão das respostas dadas pelos modelos.

Os veículos são uma das principais fontes de emissões de poluentes, incluindo dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), material particulado (MP), óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>) e hidrocarbonetos (HCs) que por sua reatividade, é comum tratar os HC como Compostos Orgânicos Voláteis (COV), onde se exclui o metano. Essas emissões têm impactos adversos na qualidade do ar, saúde pública e mudanças climáticas. A engenharia de tráfego desempenha um papel vital na busca por soluções para mitigar esses impactos (BORSARI, 2022).

A emissão de poluentes provenientes de fontes veiculares é um problema ambiental significativo nas áreas urbanas e deve ser abordada pela engenharia de tráfego. A gestão eficaz do tráfego desempenha um papel fundamental na redução das emissões de poluentes atmosféricos e na promoção da sustentabilidade do transporte. Neste contexto, são citadas na tabela 2.1 as tendências mais relevantes na Engenharia de Tráfego e seus conceitos em relação às emissões de poluentes veiculares.

**Tabela 2.1:** Estratégias para Redução de Emissões nos transportes

(Fonte: Elaboração própria, 2023)

<b>TENDÊNCIAS PARA A REDUÇÃO DE EMISSÕES</b>	<b>CONCEITOS</b>
Gestão de Tráfego Inteligente	A Implantação de Sistemas de gestão de tráfego inteligente, como controle adaptativo de semáforos, pode melhorar o fluxo de tráfego, reduzir congestionamentos e minimizar as emissões associadas a paradas e acelerações frequentes.
Veículos Inteligentes e Conectados	A integração de tecnologias avançadas em veículos, como sistemas de assistência ao motorista e veículos autônomos, pode otimizar a eficiência do tráfego, evitando frenagens bruscas e acelerações excessivas.
Transporte Público Sustentável	Investir em sistemas de transporte público eficientes, com veículos de baixa emissão e prioridade em faixas exclusivas, pode incentivar a transição dos motoristas para modos de transporte mais sustentáveis.
Incentivos Fiscais e Regulamentações	A engenharia de tráfego desempenha um papel fundamental na implementação de regulamentações mais rigorosas para veículos de baixa emissão e na criação de incentivos fiscais para a adoção de veículos mais limpos.
Planejamento Viário Orientado para o Transporte Sustentável	O planejamento urbano que prioriza infraestrutura para pedestres e ciclistas, bem como a criação de zonas livres de emissões, pode reduzir a dependência do automóvel e diminuir as emissões de poluentes veiculares.

As emissões do tráfego continuam a ser uma variável fundamental para simulações globalmente precisas, especialmente em centros urbanos, para além da sua utilização no desenvolvimento de modelos de qualidade do ar (BORREGO *et al.*, 2016). Embora dados de entrada detalhados aumentem a precisão das estimativas de emissões, a recolhimento de dados de entrada confiáveis uma tarefa complexa que exige tempo e recursos (ALAM; HATZOPOULOU, 2014).

Os dados de tráfego são essenciais para a modelação da qualidade do ar nos centros urbanos, mas inicialmente é necessário analisar e tratar os dados de tráfego. Dados reais de tráfego, como os do radar, podem reduzir as incertezas nos modelos, melhorando assim a sua precisão. Os esforços para desenvolver melhores representações do fluxo de tráfego precisam integrar dados de engenharia de tráfego em modelos de emissões e,

como resultado, melhorar os resultados dos modelos de qualidade do ar e estimativas de emissões veiculares (PINTO *et al.*, 2020).

## 2.2. SMT E SEUS PARÂMETROS DE EMISSÃO

Os simuladores de tráfego são utilizados como ferramenta de apoio à avaliação do desempenho viário, para prever alterações de um sistema real, submetido a diversas situações, sem necessitar que o evento ocorra para saber como irá se comportar. Construir um sistema assim exige compreender como o trânsito funciona, se comporta e evolui. Esses modelos apresentam diversas abordagens como, por exemplo, a estimativa das emissões veiculares (DOURADO *et al.*, 2016). Com o impacto negativo sobre o ambiente, a saúde pública e a economia, as emissões veiculares são cada vez mais uma preocupação, sendo o cálculo das emissões veiculares fundamental para avaliar as políticas de proteção ambiental (WEI *et al.*, 2019). Mais de 90% da população global é exposta a concentrações de poluentes mais elevadas pela OMS (CETESB, 2023). Os tipos de emissões de poluentes podem ser estimados por modelos de microssimulação.

Nas regiões metropolitanas, as emissões dos veículos, tais como automóveis, ônibus, caminhões e motocicletas, se constituem nas principais fontes de poluição. Essas emissões são compostas por diversas substâncias tóxicas que, absorvidas pelo sistema respiratório, produzem efeitos negativos sobre a saúde. Essa emissão é composta de gases como: CO, NO<sub>x</sub>, HC, SO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> (CETESB, 2021). Os modelos microscópicos representam os veículos individualmente e consideram as interações dos veículos entre si e com a rede viária o tráfego de forma detalhada, descrevendo os veículos individualmente e considerando as interações dos veículos entre si e com a rede viária. Esses modelos fornecem estimativas mais detalhadas do desempenho viário (DIAS, 2021).

O Sistema de Transporte Inteligente (ITS) que abrange política, planejamento, concepção, gestão e engenharia de tráfego desempenham um papel enorme na eficiência da mobilidade urbana. Neste sentido, vários softwares de simulação de tráfego (SST) foram desenvolvidos para planejamento, concepção e gestão eficiente.

Ullah *et al.* (2021) realizou uma análise comparativa abrangente para avaliar diferentes SST. Para este efeito, vinte e nove softwares de simulação foram explorados, conforme apresentados na Tabela 2.2, analisados e comparados para avaliar a sua adequação a diferentes cenários de fluxo de tráfego do mundo real. Para esta avaliação,

foram considerados parâmetros que variaram entre comportamento do tráfego (homogêneo ou heterogêneo), modelos de fluxo de tráfego (microscópico, macroscópico ou mesoscópico), modelos de tráfego (como seguimento de carro, mudança de faixa), sistema (discreto ou contínuo) e disponibilidade (código aberto) ou comercial). Além disso, é relatada a viabilidade de cada SST para diferentes infraestruturas rodoviárias (tais como cruzamentos, estradas urbanas, autoestradas, uso do solo, para citar alguns).

**Tabela 2.2:** Lista de SMT utilizados e suas características (Fonte: Adaptada de ULLAH et al., 2021)

SMT	Sistema	Disponibilidade
AIMSUN	DISCRETO (MIC/MES/MAC)	COMERCIAL
ARCHISIM	DISCRETO	GRATUITO
CITYTRAFFIC SIMULATOR	-	GRATUITO
CORSIM	DISCRETO (MIC/MAC)	COMERCIAL
Cube/Sugar/Urban-Engines	DISCRETO (MIC/MES/MAC)	GRATUITO
Dracula	DISCRETO (MIC/MES)	COMERCIAL
HeteroSim	DISCRETO	GRATUITO
INTEGRATION	CONTÍNUO (MIC/MES)	GRATUITO
MATSIM	CONTÍNUO	GRATUITO
MEZZO	DISCRETO	GRATUITO
MITSIMLAB	-	GRATUITO
MOVSIM	DISCRETO	GRATUITO
PARAMICS	DISCRETO	COMERCIAL
SATURN	DISCRETO	COMERCIAL
SIDRA	CONTÍNUO	COMERCIAL
SUMO	CONTÍNUO	GRATUITO
SYNCRO	-	COMERCIAL
TRANSMODELER	-	COMERCIAL
TRANSIMS	CONTÍNUO	GRATUITO
URBANSIM	DISCRETO	GRATUITO
VISSIM PTV	CONTÍNUO	COMERCIAL

Por se tratar de um sistema dinâmico, todas as variáveis em um modelo de simulação de pedestres são função do tempo, por exemplo, as velocidades. Essas variáveis podem ser discretas ou contínuas. Quando um modelo é contínuo no tempo, para cada passo no tempo, ocorre uma atualização aleatória e sequencial dos pedestres e regiões, ou seja, os elementos a serem atualizados a cada instante são escolhidos aleatoriamente entre

os demais. Por outro lado, em um modelo discreto, todos os pedestres são movidos ao mesmo tempo. É necessário definir uma escala de tempo.

Neves e Galhardi (2016) pesquisaram a produção científica de simuladores microscópicos de tráfego, utilizando dados bibliográficos indexados na base de dados da *ISI Web of Science*, no período de 2000 a 2015. Seus resultados apresentaram uma lista com os microssimuladores mais utilizados na literatura até então, conforme apresentado na tabela 2.3.

**Tabela 2.3:** Porcentagem do número de citações dos simuladores de tráfego microscópicos na produção científica por artigo no período de 2000 a 2015 (Fonte: Adaptada de NEVES; GALHARDI, 2016)

<b>Rank</b>	<b>SMT</b>	<b>Porcentagem</b>
1°	VISSIM PTV	43,80%
2°	CORSIM	20,00%
3°	PARAMICS	11,00%
4°	AIMSUN	5,80%
5°	MATSIM	4,90%
6°	TRANSIMS	4,50%
7°	SUMO	1,70%
8°	TREIBER	1,30%
9°	MITSIMLAB	0,80%
10°	SIMTRAFFIC	0,80%
11°	SITRAS	0,80%
12°	NEMIS	0,70%
13°	TRANSMODELER	0,70%
14°	HUTSIM	0,60%

Com a análise da Tabela 2.3, constatou-se que os quatro primeiros colocados, VISSIM, CORSIM, PARAMICS e AIMSUN somam mais de 80% do total de citações no período. Os autores consideraram o NETSIM e o FRESIM como simuladores diferentes, mas esses dois modelos microscópicos de simulação representam todo o ambiente de tráfego do CORSIM. Notifica-se que em um mesmo artigo, um ou mais nomes de simuladores podem ser citados. Com base nas pesquisas anteriores foram revisados os microssimuladores mais utilizado nas pesquisas como: AIMSUN, CORSIM, DRACULA, FLEXYT II, HUTSIM, INTEGRATION, MATSIM, NEMIS, PARAMICS, SIMTRAFFIC, SUMO, TRANSIMS, TRANSMODELER, TRITONE E VISSIM.

<i>Microsimuador</i>	<i>Tipo de Emissão de Poluente Estimado</i>								
	<i>Fuel</i>	<i>CO</i>	<i>Nox</i>	<i>MP</i>	<i>HC</i>	<i>VOC</i>	<i>CO<sub>2</sub></i>	<i>SO<sub>2</sub></i>	<i>NO<sub>2</sub></i>
<i>AIMSUN</i>	✓		✓	✓		✓	✓		
<i>CORSIM</i>	✓	✓	✓		✓				
<i>DRACULA</i>	✓	✓	✓		✓				
<i>INTEGRATION</i>	✓	✓	✓		✓		✓		
<i>MATSIM</i>	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓
<i>PARAMICS</i>	✓	✓	✓	✓	✓		✓		
<i>SIMTRAFFIC</i>	✓	✓	✓			✓			
<i>SUMO</i>	✓	✓	✓	✓	✓		✓		
<i>TRANSIMS</i>	✓	✓	✓	✓	✓		✓		
<i>TRANSMODELER</i>	✓	✓	✓	✓	✓		✓		
<i>VISSIM</i>	✓		✓	✓			✓		
<i>FLEXYT II</i>	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	
<i>HUTSIM</i>	✓	✓	✓		✓				
<i>NEMIS</i>	✓	✓	✓		✓				
<i>TRITONE</i>	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		

**Figura 2.1:** Microssimuladores e seus respectivos parâmetros de emissões de poluentes.

(Fonte: Elaboração própria, 2023).

A Figura 2.1 destaca os principais microssimuladores encontrados na literatura e os respectivos parâmetros de emissão de poluentes que estimam, destaque para o AIMSUN, que possui três modelos ambientais embutidos: um modelo de consumo de combustível e dois modelos de emissão de poluição. Um dos modelos calcula as emissões de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> (óxido de nitrogênio), MP10 (partículas inaláveis de diâmetro inferior a 10 micrômetros) e VOC (compostos orgânicos voláteis) a partir da velocidade instantânea e

da aceleração dos veículos, aplicando uma fórmula desenvolvida por Panis et al. (2006). O usuário define os parâmetros de calibração para cada tipo de veículo e poluente. A emissão total é então calculada integrando esta emissão instantânea em cada viagem do veículo. A preferência pelos programas computacionais nos estudos de tráfego vem se tornando numa prática mais didática, atraente e estimulante. No entanto, o uso de tais programas encontra muitas dificuldades para serem efetivamente aplicadas, como: os altos custos, a dificuldade na calibração, a falta de recursos no ensino público superior no Brasil, e a curta vida útil desses softwares, pois se tornam obsoletos rapidamente. É então necessário definir claramente qual o objetivo a ser atingido durante a escolha do programa de simulação, visto que é necessário fazer uma ponderação para se chegar a um resultado de adequabilidade e apropriação aos recursos disponíveis, a variedade de programas disponíveis.

Os modelos AIMSUN, CORSIM e VISSIM representam bem as vias arteriais, estradas e redes integradas de rodovias e ruas, sendo considerados os mais adequados (NAZARETH, *et al.*, 2015). Os simuladores AIMSUN, Paramics e CORSIM são potencialmente favoráveis para os Sistemas Inteligentes de Transportes (NAZARETH, *et al.*, 2015; Ratrout e Rahman, 2009). As propriedades do AIMSUN são favoráveis à criação de grandes redes urbanas e regionais, também possui uma versão *on-line*, o AIMSUN *Live* é uma ferramenta preditiva de gerenciamento de tráfego que combina técnicas de IA com simulação em tempo real para Gestão de transporte em tempo real (TSS, 2023).

Dependendo do contexto analítico e dos objetivos do projeto, a relevância de cada critério pode diferir. Os critérios incluem os seguintes tópicos de análise como: habilidade de analisar o espaço geográfico apropriado ou de estudar a área de análise, inclui uma interseção isolada, rodovia, corredores ou redes viárias; a Potencialidade de modelagem de vários tipos de instalações, considera as vias expressas, pistas com alta ocupação veicular, rampas, vias arteriais, praças de pedágio, etc.; a habilidade de analisar várias modalidades de viagem, tais como viagens em veículos leves, veículos pesados, ônibus, trem, caminhão, bicicleta, e ainda tráfego de pedestres; habilidade de analisar várias estratégias e aplicações do gerenciamento do tráfego, tais como medidas de rampa, coordenação de semáforos, gerenciamento de acidentes, etc.; potencialidade de estimar respostas dos usuários às estratégias de gerenciamento do tráfego, inclusive referentes à alteração da rota de viagem, o horário da partida, o modo de deslocamento, a escolha do destino, e a demanda de viagens induzidas ou deslocadas; habilidade de produzir

diretamente medidas de desempenho como dados de saída, tais como medidas de segurança (acidentes, fatalidades) e de eficiência (volumes veiculares/km/viagem), índices de mobilidade (tempo de percurso, velocidade) e de produtividade (economia de custo/viagem), e medidas ambientais (emissões de poluentes, consumo de combustível, nível de ruídos); e a Relação de Custo/Benefício da ferramenta de análise para a tarefa, principalmente numa perspectiva gerencial ou operacional. Os parâmetros que influenciam o custo/benefício incluem o custo da ferramenta, o nível de esforço requerido, a facilidade de utilização, os requisitos de equipamentos de *hardware*, os requisitos dos dados, animação entre outros (NAZARETH, 2015). Sequencialmente serão apresentados então dois métodos mais utilizados para simulação e estudos na Engenharia de Tráfego, descrevendo suas principais características, diferenças e recomendação de utilização.

### 2.2.1. SOFTWARES UTILIZANDO MÉTODOS DETERMINÍSTICOS

Esse tipo de método assume hipóteses e impõe diversas restrições, baseando-se então em fórmulas predefinidas. Como os resultados tendem a perder precisão e representatividade, adota-se um caráter conservador nos cálculos utilizados, trabalhando então sempre a favor da segurança. O fator aleatoriedade é descartado, ou seja, os modelos de simulação que utilizam esse método não contêm nenhuma variável aleatória. Assim, um conjunto conhecido de dados de entrada resultará em apenas um conjunto de saída. São utilizadas fórmulas predefinidas, tornando, desta maneira, um método mais conservador, onde são realizados cálculos super dimensionados para que estes estejam a favor dessa segurança. Analisando de outro ponto, é uma alternativa a ser considerada para estudos preliminares e de nível estratégico, pois os requerimentos para sua utilização são mínimos, demandando reduzido tempo e custo (OLIVEIRA, 2014).

Os softwares que utilizam este método, normalmente, são destinados para certas finalidades, como análise de rotatórias ou de interseção “semaforizada”. Em muitos casos, alguns programas incorporam parâmetros predefinidos que apresentam boa calibração, como valores médios obtidos em estudos de caso no país de origem, obtendo bons resultados para a região de incorporação. Pode-se citar a Sidra e o Rodrel, baseados em dados da Austrália e Inglaterra, respectivamente (SORRATINI, 2002).

Vale destacar que este último foi utilizado durante muito tempo pela grande maioria dos Departamentos Estaduais de Transporte dos Estados Unidos. Entre outros

programas, menciona-se ainda o TORUS (específico para análise de rotatórias), o *Arcady 7* (da empresa “TRL”, desenvolvedora do *Transyt*, amplamente utilizado para otimização semafórica) e a metodologia recomendada pelo HCM2000; esses modelos determinísticos são baseados em modelos empíricos de regressão linear e exponencial, fundamentados na teoria de aceitação de brechas.

### 2.2.2. SOFTWARES UTILIZANDO MÉTODOS ESTOCÁSTICOS

A utilização desse tipo de método só foi possível com o avanço da tecnologia e com a “universalização” de computadores com elevada capacidade de processamento, pois só então foi possível incorporar aleatoriedade nas análises de tráfego. Esse método elabora uma matriz de origem e destino, alocando os pares de viagem, e o “microsimulador” é capaz de identificar caminhos mínimos e simular deslocamentos de cada veículo, considerando a influência exercida pela via, seu entorno e outros veículos. Para realizar esse processo, o *software* utiliza de um algoritmo gerador de números aleatórios, como uma “semente” específica para cada rodada de simulação e assim consegue distribuir valores nas replicações tendendo a um valor médio representativo com determinado nível de significância.

A utilização de “microsimuladores” cada vez mais se consolida em instituições governamentais internacionais, de pesquisa e consultoria, visto que com eles é possível que se reproduza o comportamento do tráfego em situações reais, testar alternativas e também simular uma previsão futura de tráfego e indicadores de desempenho. Como exemplo de métodos estocásticos, podem ser citados: *Integration*, *CORSIM*, *AIMSUN*, *SimTraffic* e *Paramics*, mas merece ser dado um destaque especial para o *CORSIM* e *AIMSUN* devido à sua utilização na Companhia de Engenharia de Tráfego do Rio de Janeiro CET-Rio.

### 2.2.3. SST AIMSUN

O SST AIMSUN tem se destacado como uma ferramenta de alto desempenho para a modelagem e simulação de sistemas de transportes. Ele foi desenvolvido pela empresa TSS-Transport Simulation Systems, é um dos simuladores de tráfego mais amplamente utilizados em todo o mundo. Já o seu desenvolvimento começou o primeiro protótipo do SST AIMSUN 2 (Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-urban

Networks), foi desenvolvido no ano de 1989 por membros da Universidade Politécnica da Catalunha (UPC) em Barcelona. Entretanto, apenas no ano de 1997 a empresa Transport Simulation Systems (TSS) começou a comercializar o modelo (AIMSUN, 2018), e desde então, o software passou por várias versões e atualizações significativas. A capacidade de modelar sistemas de transporte complexos ao nível microscópico e integrar aos modelos mesoscópicos, macroscópicos e híbridos tem sido a chave do sucesso do AIMSUN.

Aplicações desse programa incluem desde o planejamento de transporte, que utiliza ferramentas para avaliar a eficácia de novos projetos de infraestrutura, como rodovias e sistemas de transporte público. A Análise de Segurança Viária ajuda a identificar pontos críticos de segurança nas vias e avaliar medidas de mitigação. Na Gestão de Tráfego são utilizados algoritmos de controle de tráfego e sistemas de gerenciamento de congestionamento. Já na avaliação de Políticas de Transporte, o AIMSUN auxilia na avaliação de políticas de transporte, como restrições de tráfego, pedágios urbanos e zonas de emissão.

O AIMSUN é um modelo de simulação estocástico, ou seja, são aplicados processos de randomização que produzem resultados diferentes cada vez que o processo é repetido. O simulador microscópico, modelo de interesse para este trabalho, segue a abordagem de que o comportamento de cada veículo na rede é modelado continuamente enquanto ele viaja pela rede de tráfego no período da simulação (TSS, 2014b).

Esta abordagem é feita através dos modelos de comportamento car-following, gap-acceptance e lane-changing. O modelo car-following utilizado pelo AIMSUN consiste basicamente em dois componentes: aceleração e desaceleração. A aceleração representa a intenção de um veículo em atingir uma velocidade desejada, enquanto a desaceleração representa as limitações impostas pelo veículo posterior ao tentar dirigir na velocidade desejada. As características deste modelo são determinadas pelo tipo de condutor, geometria da seção e influência dos veículos nas pistas adjacentes (TSS, 2014a). O modelo *gap-acceptance* tem consistência com o modelo car-following para que não ocorram colisões. O modelo lane-changing do AIMSUN é um processo de decisão que analisa a necessidade da mudança de faixa e a viabilidade desta manobra, considerando a velocidade do veículo que está à frente (TSS, 2014a).

Diferentes tipos de vias podem ser modelados pelo simulador AIMSUN, como rodovias e vias arteriais, bem como os mais diversos tipos de situações de tráfego urbano. Os dados de demanda de tráfego podem ser inseridos de duas maneiras no simulador: por

meio de matrizes de origem/destino e por volumes de tráfego para cada link da rede. O simulador de tráfego AIMSUM incorpora o modelo de emissão instantânea de poluentes à ferramenta de microssimulação de tráfego. Ao contrário dos modelos estáticos, que se baseiam principalmente em indicadores gerais de tráfego, como velocidade média e distância total percorrida, os modelos de emissão instantânea avaliam os estados de deslocamento dos veículos, como velocidade, aceleração, desaceleração, declive e a cive, permitindo assim avaliar os impactos das reais condições de tráfego, como congestionamentos, por exemplo, no consumo de combustível e na emissão de poluentes.

Ao final da microssimulação, o software fornece um relatório detalhado dos poluentes emitidos em cada trecho e por cada tipo de veículo, segregando-o nas seguintes substâncias:

- a) CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono);
- b) NO<sub>x</sub> (óxidos de nitrogênio);
- c) PM (material particulado); e
- d) VOC (compostos orgânicos voláteis).

Aliar a quantificação de poluentes ao estudo de tráfego permite observar os benefícios que uma alteração no plano de circulação, ou que a implantação de um sistema de transporte em massa com possível redução na demanda de veículos poderia trazer ao meio ambiente. Estudos assim geralmente proporcionam ao órgão público obter financiamentos com bancos internacionais para a implementação das melhorias sugeridas nos estudos, tendo como contrapartida a redução na emissão dos gases poluentes (TSS, 2023).

#### 2.2.4. SST TSIS-CORSIM

O programa *CORridor-microscopic SIMulation* (CORSIM), um modelo de simulação microscópica estocástica, foi desenvolvido pela primeira vez pela FHWA durante a década de 1970. CORSIM é um componente central do pacote de sistema integrado de software de tráfego (TSIS), que é um dos modelos de simulação microscópica mais utilizados nos Estados Unidos. O CORSIM consiste em um conjunto integrado de dois modelos microscópicos de simulação que representam todo o ambiente de tráfego. NETSIM representa o tráfego nas vias urbanas e FRESIM representa o tráfego nas rodovias. Modelos de simulação microscópica representam movimentos de veículos

individuais, que incluem as influências do comportamento do derivador (FHWA, 2007). As principais características do TSIS-CORSIM (seguimento de automóveis, mudança de faixa e aceitação de lacunas, estimativa de emissões) são resumidas a seguir.

O modelo de acompanhamento de carro no CORSIM define um intervalo desejado para motoristas individuais (existem dez tipos de motoristas definíveis pelo usuário) correspondente a um intervalo específico. Nas restrições dos dispositivos de controle de tráfego e outros elementos do sistema, os veículos procuram manter uma distância mínima de seguimento do carro, sem exceder a sua velocidade máxima. CORSIM utiliza uma abordagem de simulação baseada em intervalos, movendo cada veículo (representado como um objeto distinto) e atualizando cada semáforo a cada segundo. Quando um veículo é movido, sua posição (lateral e longitudinal) no link e sua relação com outros veículos próximos são recalculadas com base em sua velocidade, aceleração e status.

A mudança de faixa pode ocorrer se houver necessidade de movimento de conversão, mudança de velocidade ou em rodovias para evitar a saída de veículos. A aceitação de lacunas é um elemento importante na maioria dos modelos de mudança de faixa. Os dez tipos de motorista no CORSIM recebem parâmetros variáveis de aceitação de lacuna para conversões permissivas à esquerda, curva à direita no vermelho e outras situações de aceitação de lacuna. Cada decisão de aceitação de lacuna é tomada de forma independente por um motorista individual.

O NETSIM e FRESIM utilizam as mesmas tabelas para consumo de combustível e emissões e podem especificar as características detalhadas do veículo quanto ao consumo de combustível e emissões de poluentes. As taxas de consumo de combustível podem ser especificadas para automóveis, caminhões e ônibus. Os fatores de emissões de HC, emissões de CO e emissões de NOx podem ser definidas para 7 tipos de veículos. O arquivo da tabela de ambiente é uma entrada opcional. Nesta versão do TRAFED (Versão 6.0) os valores individuais podem ser editados pelo Registro 172 customizados pelo usuário.

A combinação de arterial (NETSIM) e autoestrada (FRESIM) faz do CORSIM um dos modelos de análise disponível para engenheiros de tráfego que admite a todos os componentes individuais do sistema arterial e rodovia serem avaliados e simulados como um sistema completo. O CORSIM produz as propriedades específicas de cada veículo, tais como: o comprimento do veículo, agressividade do motorista, taxa de aceleração, distância mínima aceitável e a velocidade máxima livre, emissões, entre outros (AHMED

*et al.*, 2021; NAZARETH, *et al.*, 2015, p. 5). O CORSIM é um modelo de microsimulação projetado para análise de vias expressas, vias urbanas e corredores ou redes de tráfego, simulando os movimentos dos veículos conforme as “Leis de Perseguição”, modelando assim o escoamento das filas, mudanças de faixa e a determinação da velocidade, aceleração e posição de cada veículo da rede. (MOREIRA, 2005).

No CORSIM, as “Leis de Perseguição” implementadas simulam em intervalos de tempo discretos, limitando os movimentos dos veículos através dos dispositivos de controle de tráfego e outros elementos do sistema, que por sua vez procuram manter a distância mínima entre eles, enquanto não excedam a velocidade máxima permitida, (BLOOMBERG, 2010; MOREIRA, 2005).

O CORSIM permite a representação de interseções com diferentes tipos de controle (controle por prioridade, preferência e semafórica de tempo fixo ou atuado), vias com faixas exclusivas para giro, estacionamentos, operação de ônibus com pontos abrigados em baias ou dispostos diretamente na via, levando-se também em consideração a interação com pedestres, e assim, consegue-se uma representação detalhada da realidade. É disponibilizado um processo de alocação de tráfego como opcional, para os casos em que não se conheçam as partições de tráfego nas interseções a partir da definição de uma matriz origem-destino (MOREIRA, 2005).

Na versão atual do CORSIM, as emissões estimadas são de HC, CO e NO<sub>x</sub> e dependem apenas da velocidade, valores de pesquisa de aceleração e o nível de desempenho do veículo (também conhecido como “índice de desempenho”). No CORSIM existem dois níveis de desempenho para automóveis de passageiros (baixo desempenho e alto desempenho) e cinco níveis de desempenho para veículos pesados. Os níveis de desempenho afetam a aceleração desejada e máxima e valores de velocidade, que geralmente variam de 0 a 110 pés/s (0-75 mi/h) para velocidade e de -10 a 10 pés/s<sup>2</sup> (ÿ6,82 a +6,82 mi/h/s) para aceleração.

As taxas de consumo de combustível são modeladas semelhantemente às taxas de emissões na versão atual (6.3) do CORSIM, mas o cálculo difere para os dois subprogramas de simulação diferentes dentro CORSIM. Os dois subprogramas são o NETSIM, que realiza a modelagem de tráfego em áreas urbanas e ruas, e o FRESIM, que realiza a modelagem de tráfego em rodovias e vias expressas. Em NETSIM, o valor do consumo de combustível depende apenas da velocidade, aceleração e índice de desempenho.

## 2.3 INVENTÁRIO DE EMISSÕES DE FONTES VEICULARES

Os inventários de emissões provenientes de fontes veiculares desempenham um papel essencial na gestão da qualidade do ar e na formulação de políticas ambientais externas para a redução das emissões atmosféricas. Nesta Seção da revisão da literatura, abordaremos as principais metodologias empregadas na elaboração desses inventários, com destaque para as abordagens *Bottom-Up* e *Top-Down*, sendo amplamente utilizadas para quantificar as emissões de fontes veiculares, além das metodologias implementadas mais recentemente como a GHG Protocol.

### 2.3.1. METODOLOGIA BOTTOM-UP

A metodologia *Bottom-Up*, também conhecida como "abordagem de setorial", é uma abordagem detalhada que visa calcular as emissões veiculares com base em informações específicas de frota, tecnologias veiculares, padrões de uso e eficiência dos veículos. Ela envolve uma coleta de dados detalhados, como a idade da frota, a composição de combustíveis utilizados, a quilometragem percorrida, o perfil de condução e a manutenção veicular.

A partir desses dados, as emissões são estimadas utilizando modelos matemáticos que determinam as características de cada veículo e as condições de operação (CETESB, 2018). Essa abordagem é altamente precisa, especialmente quando apresenta dados detalhados e específicos. No entanto, um recolhimento de dados minucioso pode ser oneroso e demorado. Além disso, a precisão do inventário depende da representatividade das informações coletadas e da qualidade dos modelos utilizados. O método *bottom-up* identifica onde e como ocorrem as emissões regionais (BRASIL, 2010a) por caracterizar emissões por vias (MAES, 2019).

Esta metodologia pode ser descrita pela Equação 1 (MMA, 2011):

$$E_{B,p,c,l} = \sum_{l=1}^n FE_{p,j,i,c} * N_{l,h} * D_l \quad (1)$$

Onde:

$EB_{p,c,l}$  é a emissão estimada pelo método *bottom-up*, do poluente  $p$ , da categoria  $c$  e na via  $l$ , em kg/hora;

$FE_{p,j,i,c}$  corresponde ao fator de emissão para cada poluente  $p$ , combustível  $j$ , ano-modelo  $i$  e da categoria  $c$ , em kg/km;

$N_{l,h}$  é o número de veículos da via  $l$  e na hora  $h$ , em veículo/hora; e

$D_l$  é a distância percorrida pelo veículo na via  $l$ , em veículo/km.

### 2.3.2. METODOLOGIA TOP-DOWN

A metodologia Top-Down, em contraste, é conhecida como “abordagem de referência” e estima de modelo matemático mais simplificado. Nesse método, as emissões são estimadas a partir de dados agregados, como o consumo total de combustível na região e a massa média de emissões emitida por unidade de combustível queimado em veículos. Essa abordagem é frequentemente usada quando não se dispõe de informações detalhadas sobre a frota, seu desempenho e intensidade de uso. O Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) recomenda a metodologia Top-Down para estimativas de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) é consideravelmente precisa nesse contexto (IPCC, 2017).

O cálculo da emissão por esta metodologia é descrita na Equação 2 (MMA, 2011):

$$E_{M,C}^{A,P} = \sum_{m=1}^m \sum_{c=1}^n FR_{A,M,C} \times IU_{ajust_{A,M,C}} \times FE_{A,M,C} \quad (2)$$

onde:

$E$  é a emissão estimada pelo método top-down, proveniente de veículos automotores, por ano calendário, ano modelo do veículo considerado e combustível utilizado em g/ano;

$A$  é o ano calendário;

$P$  é o poluente;

$M$  é o ano modelo de Veículo;

$C$  é o tipo de combustível;

*Fr* é a frota circulante estimada, expressa em número de veículos, variando conforme o ano calendário, o ano modelo do veículo considerado e o combustível utilizado.

*IUajust* é a intensidade de uso ajustada, expressa em quilometragem anual percorrida (km/ano), variando conforme o ano calendário, o ano modelo do veículo considerado e o combustível utilizado.

*Fe* é o fator de emissão do poluente considerado, expresso em massa de poluentes emitidos por quilômetro percorrido ( $\text{g}_{\text{poluente}} \text{km}^{-1}$ ). É específico para o ano, modelo do veículo considerado e depende do tipo de combustível utilizado.

### 2.3.3. INVENTÁRIO DE EMISSÕES DE FONTES VEICULARES: REGIÃO METROPOLITANA DO RIO DE JANEIRO DE 22 DE SETEMBRO DE 2016

Entre as principais fontes de emissão de poluente atmosférico que contribuem para a degradação da qualidade do ar, os veículos automotores são fontes bastante significativas, principalmente nos grandes centros urbanos, como a Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) (LOUREIRO, 2005; INEA, 2010). Segundo o Inventário de emissões publicado em 2004, o transporte rodoviário representava a maior fonte de poluição do ar na RMRJ (FEEMA, 2004).

O total emitido em uma região pode ser conhecido aplicando a metodologia de inventário de fontes móveis proposta pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2013), em escala nacional, com apenas algumas considerações para âmbito estadual e regional, assim como foi aplicado no Inventário de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores do Estado do Rio de Janeiro, publicado em 2011 pela Secretaria do Estado de Ambiente (SEA).

Para a produção deste documento, a SEA tomou como base a metodologia descrita no 1º Inventário de Poluição Atmosférica de Veículos Automotores Rodoviários, publicado pelo MMA, também em 2011. Estes inventários, apesar de denominados metodologia bottom-up, utilizam a metodologia top-down para estimativa das emissões por veículos automotores, pois não fazem uso de todas as informações disponíveis para o cálculo das emissões. Esta mesma metodologia foi aplicada para estimar as emissões totais da região em estudo, ou seja, as emissões difusas.

Cabe ressaltar que todas as estimativas foram realizadas para a RMRJ, e houveram uma estimativa por município e por zona administrativa da cidade do Rio de Janeiro Para

o cálculo das emissões, é necessário fazer o levantamento de três conjuntos de informações: (1) Frota circulante; (2) Intensidade de Uso corrigida; (3) Fatores de emissão (VENTURA, 2016).

Além dos fatores de emissão adotados na metodologia bottom-up, na metodologia top-down são também usados os fatores de emissão evaporativos de hidrocarbonetos não metano (NMHC): diurnos, em função da insolação (Fed) , e do veículo em repouso com o motor quente e frio , correspondendo a situações reais de uso dos veículos , ambos na faixa de temperatura de 20-35 °C, fornecidos no Inventário nacional (MMA, 2011).

O Inventário de Emissões de Fontes Veiculares: Região Metropolitana do Rio de Janeiro, foi divulgado em setembro de 2016 pelo INEA e possui dados de emissão de poluentes veiculares de cerca de 1600 vias da Região Metropolitana utilizando a metodologia bottom-up.

#### 2.4. CONTROLE DAS EMISSÕES VEICULARES

O controle das emissões veiculares é uma preocupação global devido ao seu impacto na qualidade do ar e nas mudanças climáticas. No Brasil, país com uma frota veicular em constante crescimento, o controle das emissões é essencial para mitigar os efeitos negativos da poluição do ar e contribuir para um futuro mais sustentável. Nesta seção, examinaremos as principais ações, regulamentações e desafios relacionados ao controle das emissões veiculares no Brasil.

As indústrias representavam as principais fontes de poluição do ar nos grandes centros urbanos até meados da década de 80, devido ao desenvolvimento industrial no Brasil. Conseqüentemente, estas novas fontes de emissão passaram a contribuir significativamente para a degradação da qualidade do ar nos principais centros urbanos, que por sua vez, passou a afetar diretamente a saúde da população, causando desde irritação nos olhos a problemas cardiorrespiratórios com alto nível de severidade (VENTURA *et al.*, 2019, SANTOS, 2015).

Neste contexto, foi necessária a criação de medidas de controle da poluição veicular, de modo a estabelecer metas e prazos para a redução dos poluentes atmosféricos emitidos por tais veículos automotores. Uma das principais maneiras de controle da poluição veicular foi a criação do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE) publicado pela Resolução CONAMA nº18/1986 e do Programa de Controle da Poluição do Ar por Motociclos e Veículos Similares

(PROMOT), publicado pela Resolução CONAMA nº 297/2002.

O PROCONVE, em particular, passou por diferentes fases desde sua criação na década de 1980. Cada fase estabelece limites mais rígidos de emissões para veículos automotores, promovendo a introdução de tecnologias mais limpas e eficientes. Os veículos leves, pesados e motocicletas são abrangidos pelo programa, e suas metas são ajustadas periodicamente para refletir as melhores práticas internacionais.

Um exemplo são os veículos do ciclo Otto (movidos à gasolina, etanol, GNV ou flex), a referência foi dos Estados Unidos e para os veículos do ciclo Diesel, foram dos padrões europeus (VENTURA, *et al.*; SOARES, *et al.*, 2019). Estes Programas incentivaram desde a melhoria da qualidade dos combustíveis à fabricação de veículos com tecnologias mais limpas. Seus principais objetivos eram reduzir as emissões dos veículos pesados (P), leves (L) e motocicletas e similares (M), conforme apresentados os tipos de veículos no Quadro 1, estabelecendo limites máximos de emissão para os novos veículos fabricados, de modo a atender os padrões de qualidade do ar estabelecido pelo PRONAR.

TIPOS DE VEÍCULOS	CARACTERÍSTICAS
Veículos Motociclos e Similares	Incluí os ciclomotores, motonetas e motocicletas ou qualquer tipo de veículo automotor de duas rodas.
Veículos Leves	Veículo rodoviário automotor de passageiros, de carga ou de uso misto, com capacidade para transportar até doze passageiros ou com massa total máxima igual ou inferior a 2,8 Toneladas. No Brasil, normalmente os veículos leves são equipados com motores do ciclo Otto.
Veículo Pesado	Veículo rodoviário automotor de passageiros, de carga ou de uso misto, com capacidade para transportar mais de doze passageiros ou com massa total máxima superior a 2,8 Toneladas. No Brasil, normalmente os veículos pesados são equipados com motores do ciclo Diesel.
Motor do Ciclo Otto	O nome advém de seu inventor, Nikolaus August Otto, que idealizou este invento em 1861. Motor a combustão interna de ignição por centelha. Os motores movidos a gasolina, álcool, gás natural veicular ou mesmo flex fuel são do ciclo Otto.
Motor do Ciclo Diesel	O nome advém de seu inventor, Rudolf Christian Karl Diesel, engenheiro alemão que registrou a patente do invento em 1897. Motor a combustão interna, com ignição espontânea, ou seja, o combustível é pulverizado na câmara de combustão e, por meio da elevada temperatura, se autoignição sem auxílio de centelha externa.

**Quadro 1:** Definições dos tipos de veículos automotores (Fonte: CNT: SEST/SENAT, 2012; Resolução CONAMA nº 418/2009)

O Proconve é atualizado de tempos em tempos e o Conama publicou em 2018 as Resoluções 490 e 492, que trazem as novas fases do Proconve L7 e P8 a partir de 2022. A nova fase L7 trouxe redução significativa dos vapores de combustíveis que se perdem na atmosfera, enquanto a fase P8 deve reduzir significativamente a emissão dos óxidos de nitrogênio. Estas duas ações se complementam e devem auxiliar na redução da formação dos compostos de oxidação na atmosfera dos grandes centros urbanos, sobretudo o gás ozônio.

A nova fase L8 a partir de 2025 traz uma mudança metodológica para aprovação nos processos de licenciamento, que deixará de ser por modelo de veículo e será pela média corporativa, exigindo que os veículos comercializados de uma empresa apresentem uma média de emissão que atenda limites progressivamente mais restritivos. Assim, se induz à produção de veículos de emissão zero (como elétricos), que compensam a produção de veículos que sejam mais emissores (CETESB, 2022).

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

Nesta seção, são apresentados os materiais e métodos necessários ao desenvolvimento do estudo. Destaca-se que em todas as etapas fizeram-se necessários o uso de dados do IEFV do INEA 2016, dados de contagem de tráfego da CET-Rio e dos Relatórios anuais de Emissões Veiculares que fornecem as taxas de emissões por tipo de veículo fornecido anualmente pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). Os dados foram preparados e manipulados primordialmente para inserção dos mesmos nos Microsimuladores AIMSUN (versão 7.0) e no CORSIM, (Versão 6.3).

Para atingir os objetivos estabelecidos na pesquisa, a metodologia proposta baseia-se no comparativo entre os dados de estimativas de emissões provenientes do IEFV do Inea do ano de 2016, dos dados de contagem de tráfego da CET-Rio, dados coletados em campo, plano semaforico, características da infraestrutura das vias, e das ferramentas integradas aos microsimuladores de tráfego.

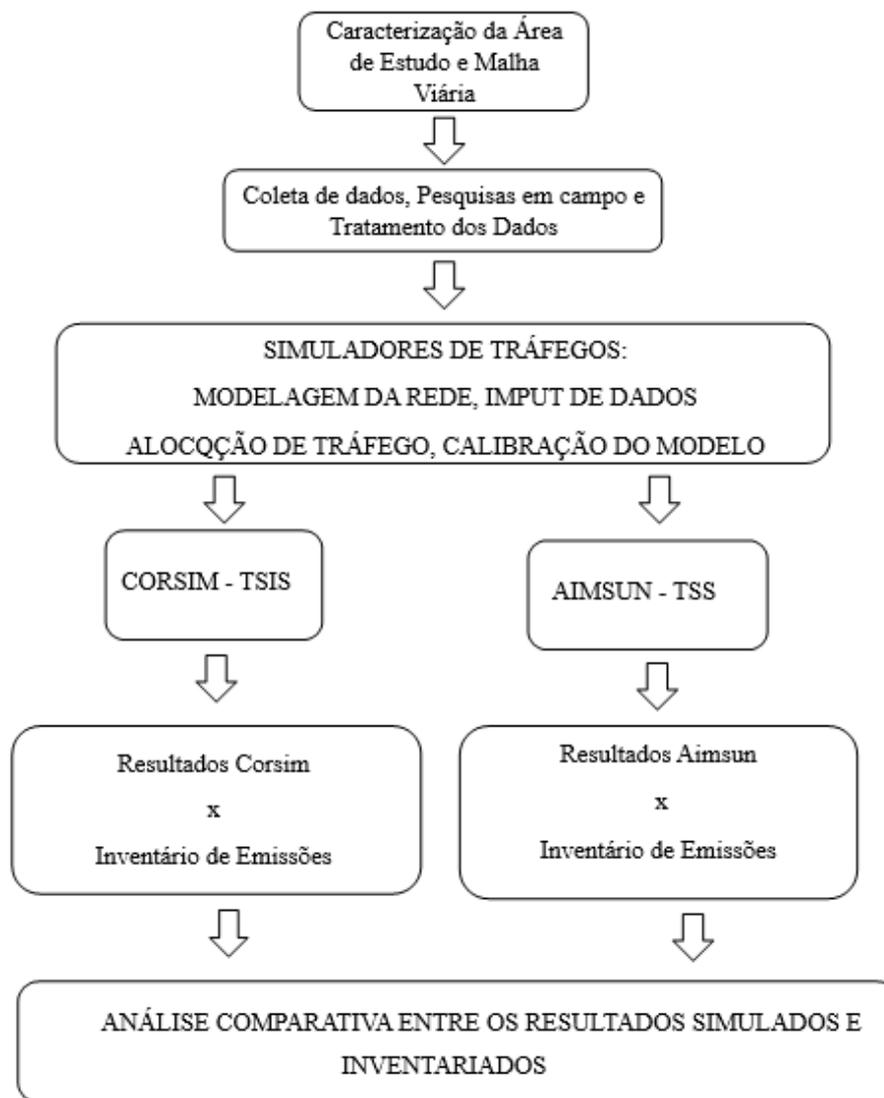
O presente trabalho tomará por base uma área piloto para estudo de caso. A escolha de tal região segue alguns critérios: (i) apresenta significativo volume de tráfego; (ii) possua polos de atração ou produção de viagens, relacionadas com vários tipos de vias; e (iii) esteja estimada pelo IEFV com medidas de circulação de vários tipos de veículos.

Nessa área foram inseridos dados de todos os tipos de veículos automotores que

serão analisados, com vistas a estudar os impactos resultantes do tráfego, em termos de emissão de poluentes; além disso, verificar-se-ão os efeitos das variações de tecnologia de veículos em termos de emissão.

Já o estudo das emissões está dividido em duas etapas paralelas: (i) coleta de dados documentados: desenvolvimento da metodologia de coleta de emissões e volume de tráfego; e (ii) simulações: preparação dos simuladores de tráfego, para que posteriormente os resultados simulados sejam confrontados com os dados inventariados. Em complementação, haverá uma sub etapa que consiste em análise documental e tratamento dos dados coletados em campo, garantindo com que os dados possam ser analisados e confrontados com os valores resultantes das simulações.

Para tanto, no presente capítulo será descrito o método proposto para atingir os objetivos da pesquisa, sintetizado pelo fluxograma apresentado na Figura 3.1, onde é apresentado um procedimento metodológico com base no processo de revisão da literatura tecido. Foram determinadas 6 etapas que, após finalizadas, permitem atender os objetivos propostos no presente trabalho.



**Figura 3.1:** Etapas desenvolvidas no procedimento proposto (Fonte: Elaboração própria, 2023)

A primeira fase envolveu a coleta de dados, delimitação da área de estudo, coleta de dados de campo e o desenvolvimento de modelos microscópicos de simulação de tráfego para simular a rede existente (cenário business-as-usual). Foram utilizados os dados do IEFV da RMRJ e alimentados nos modelos de simulação de tráfego desenvolvidos na primeira etapa. São avaliados os dados de emissões, os dados de volume de tráfego e trajetória de velocidade para calibração da rede.

### 3.1. CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo se concentra na cidade universitária da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), conforme apresentado na Figura 3.2, que está situada na região da Ilha do Fundão. Segundo dados da UFRJ de 2019, em seu campus principal, a Cidade Universitária, circulam mais de 100 mil pessoas/dia, onde estudam mais de 40 mil alunos, em aproximadamente 130 cursos (ABREU & SANTOS, 2020). A UFRJ é a primeira universidade do Brasil e é atualmente classificada como uma das maiores e melhores universidades do país e do mundo (SANTOS & NORONHA, 2020).



**Figura 3.2:** Mapa de Localização da Ilha do Fundão. (Fonte: Elaboração Própria, 2023).

A malha viária no entorno da Cidade Universitária é composta por uma rede de avenidas, ruas e em alguns trechos por vias expressas como a Linha Vermelha, que conectam os diferentes setores do campus e protegem o acesso às suas instalações. Uma das principais vias da Cidade Universitária da UFRJ é Avenida Horácio Macedo que corta a Cidade Universitária da UFRJ, ela liga a entrada principal do campus na Linha Vermelha até a rua Hélio de Almeida que liga ao Parque Tecnológico e vila operária. A Avenida Horácio Macedo é uma via larga e movimentada que permite o trânsito de veículos e ônibus. Na Figura 3.3, é possível verificar a malha viária da região da ilha do Fundão.



**Figura 3.3:** Mapa Viário da Ilha do Fundão. (Fonte: Elaboração Própria, 2023).

A rede viária da área de estudo será modelada, seguindo os procedimentos, condições e metodologias de codificação de cada um dos SMT utilizados. Essas ferramentas são largamente empregadas em estudos de tráfego e são frequentemente utilizadas. O fator crucial para escolha dos dois microsimuladores é que o AIMSUN e o CORSIM apresentam características necessárias para o estudo em questão, como: (i) ser capaz de realizar a simulação de tráfego em micro escala (microsimular); (ii) ter ferramentas de simulação que permitam considerar as particularidades do veículo analisado (no caso, veículos de carga); (iii) apresentar nativamente em suas lógicas de simulação a possibilidade de aplicação de modelos de emissão, além da disponibilidade de serem utilizados pela CET-Rio para planejamento e estudos da Companhia.

A rede modelada em todos os simuladores deverá apresentar as mesmas características para que os dados de emissão tenham aderência quando confrontados, como: comprimento das vias, número de faixas, intervalo semafórico, entre outras. A única diferença aceitável será em termos da entrada dos dados, ou método para codificação.

Para o detalhamento das vias nos simuladores, serão utilizadas imagens de satélite georreferenciadas, possibilitando a modelagem das dimensões reais do cenário analisado, como: comprimento e largura das vias, número de faixas e movimentos ou até mesmo utilização de coordenadas UTM para locação de nós e links no caso do CORSIM.

### 3.2. COLETA DE DADOS

Para coleta e tratamento dos dados foram levantados três fontes básicas: O IEFV do INEA publicado em 2016 com ano base de 2013 com dados de estimativas de emissões da região do estudo, Pesquisas de Contagem de Veículos da CET-Rio, itinerários e demais informações de transportes públicos da região, além de pesquisas de campo para informações de infraestrutura, ciclos semafóricos, e circulação nos Trajetos de Tráfego (TT) para verificar tempo de trajeto e velocidade média no horário de pico.

#### 3.2.1 DADOS DO IEFV DO INEA

O IEFV disponibiliza em seus anexos dados de fluxo de tráfego, extensões de trechos das vias estimadas e suas estimativas de emissões por trecho de vias da área de influência da cidade universitária. Esses dados possuem informações vetoriais, georreferenciadas e hierarquia da malha viária da região, os quais podem ser sistematicamente codificados, possibilitando associá-los a informações de tráfego e são disponibilizadas pelo Instituto conforme tabela 3.1. Com as coordenadas UTM pode georreferenciar os trechos do Início ao fim do logradouro estimado e suas respectivas distâncias em km definem o TT. Essas informações são essenciais para modelagem e calibração dos SMT.

**Tabela 3.1:** Lista de vias e suas características (Fonte: Adaptada INEA, 2016)

Vias	Distância (KM)	Tipo da via	Coordenadas UTM (m)			
			iniciais x	iniciais y	finais x	finais y
Av. Horácio Macedo-Trecho 1	2	Arterial	681.108	7.472.692	681.692	7.471.075
Av. Horácio Macedo-Trecho 2	0,5	Arterial	681.718	7.471.080	681.985	7.470.662
Av.Athos da Silveira Ramos	0,32	Coletora	681.587	7.471.144	681.313	7.470.989
Av.Athos da Silveira Ramos	0,72	Coletora	680.639	7.473.051	681.074	7.472.672
Av. Brigadeiro Trompowski	2,57	Arterial	679.842	7.471.878	680.398	7.473.814
Estrada do Galeão - Trecho 8	3,4	Arterial	680.425	7.473.154	682.445	7.475.779
Linha Vermelha - Trecho 3	8,85	Expressa	675.746	7.476.729	680.822	7.470.854
Linha Vermelha - Trecho 4	9,3	Expressa	675714	7.476.739	681.052	7.470.534

Outra informação disponibilizada pelos anexos do IEFV são os fluxos diários estimados por 4 tipos de veículos como: motos, veículos pequenos, veículos médios e veículos grandes conforme apresentados na tabela 3.2.

**Tabela 3.2:** Lista de vias e suas características (Fonte: Adaptada INEA, 2016)

Vias	Fluxo diário (n° de veículos/dia)					
	Logradouro	motos	Veículos Pequenos	Veículos Médios	Veículos Grandes	TOTAL
Av. Horácio de Macedo - VIA 1		6.900	2.067	1.033	10.739	20.739
Av. Horácio de Macedo - VIA 2		6.900	2.067	1.033	10.739	20.739
Avenida Athos da Silveira Ramos		1.444	12.402	8.904	4.864	27.614
Terminal Rodoviário da UFRJ		5.553	1.741	723	8.256	16.273
Avenida Brigadeiro Trompowski		1.392	32.328	10.136	4.211	48.067
Estrada do Galeão - Trecho 8		475	33.955	896	1.473	36.798
Estrada do Galeão - Trecho 10		533	38.099	1.005	1.652	41.289
(Linha Vermelha) - Trecho 3		71.087	710	1.291	74.268	147.356
(Linha Vermelha) - Trecho 4		69.948	834	770	72.163	143.715

### 3.2.2 DADOS DE TRÁFEGO CET-RIO

Para entender a demanda, comportamento do fluxo diário das vias e os horários de pico foram utilizados dados de contagens veiculares como mostra a tabela 3.3, a

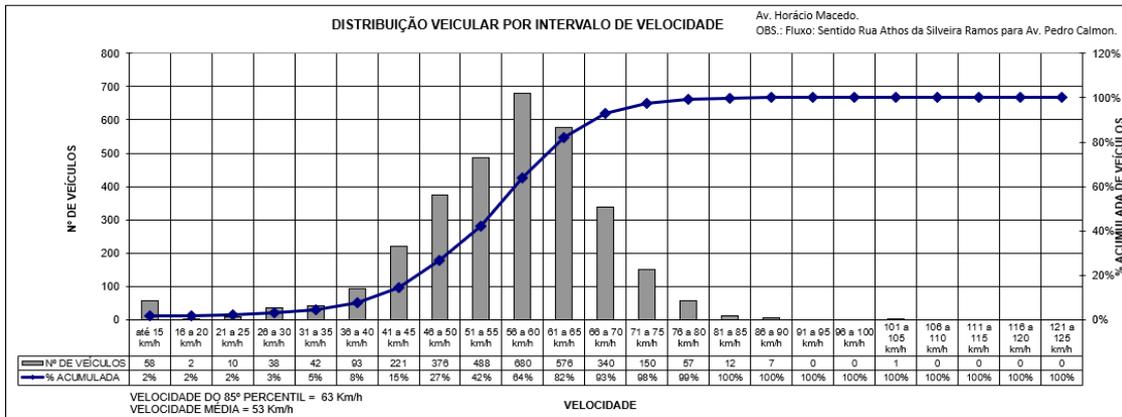
utilização dos dados de horário de pico e velocidade média servirão de inputs nos SMT.

**Tabela 3.3:** Contagem volumétrica (Fonte: CET-Rio, 2022)

Av. Horácio Macedo. Fluxo 3 - sentido Rua Athos da Silveira Ramos->Av. Pedro Calmon		Av. Brigadeiro Trompowski Fluxo 1 - Sentido: da Cidade Centro -> Cidade Universitária.	
Horário (h)	Terça-feira Fluxo 3 N. veic.	Horário (h)	Terça-feira Fluxo 1 N. veic.
00:00 às 01:00	7	00:00 às 01:00	46
01:00 às 02:00	4	01:00 às 02:00	32
02:00 às 03:00	9	02:00 às 03:00	14
03:00 às 04:00	8	03:00 às 04:00	7
04:00 às 05:00	107	04:00 às 05:00	40
05:00 às 06:00	513	05:00 às 06:00	276
06:00 às 07:00	810	06:00 às 07:00	1208
07:00 às 08:00	831	07:00 às 08:00	1404
08:00 às 09:00	935	08:00 às 09:00	1082
09:00 às 10:00	850	09:00 às 10:00	923
10:00 às 11:00	801	10:00 às 11:00	825
11:00 às 12:00	734	11:00 às 12:00	718
12:00 às 13:00	761	12:00 às 13:00	796
13:00 às 14:00	784	13:00 às 14:00	766
14:00 às 15:00	639	14:00 às 15:00	772
15:00 às 16:00	711	15:00 às 16:00	749
16:00 às 17:00	831	16:00 às 17:00	1087
17:00 às 18:00	705	17:00 às 18:00	1193
18:00 às 19:00	596	18:00 às 19:00	1146
19:00 às 20:00	391	19:00 às 20:00	849
20:00 às 21:00	197	20:00 às 21:00	617
21:00 às 22:00	107	21:00 às 22:00	438
22:00 às 23:00	59	22:00 às 23:00	312
23:00 às 24:00	25	23:00 às 24:00	161
<b>SOMA</b>	<b>11415</b>	<b>SOMA</b>	<b>15461</b>
<b>P. DA MANHÃ</b>	<b>935</b>	<b>P. DA MANHÃ</b>	<b>1404</b>
<b>ENTREPICO</b>	<b>831</b>	<b>ENTREPICO</b>	<b>1087</b>
<b>P. DA TARDE</b>	<b>705</b>	<b>P. DA TARDE</b>	<b>1193</b>

Para a coleta de dados de velocidade média a CET-Rio forneceu o perfil de velocidades dos veículos nas vias da área de estudo como mostrado em exemplos dessas pesquisas na figura 3.4, permitindo uma distribuição da velocidade dos veículos num determinado trecho da via fornecendo a informação da velocidade média e da velocidade

regulamentada da via.



**Figura 3.4:** Perfil de velocidade da Av. Horácio Macedo - Ilha do Fundão. (Fonte: CET-Rio, 2022).

### 3.2.3. TRANSPORTE PÚBLICO

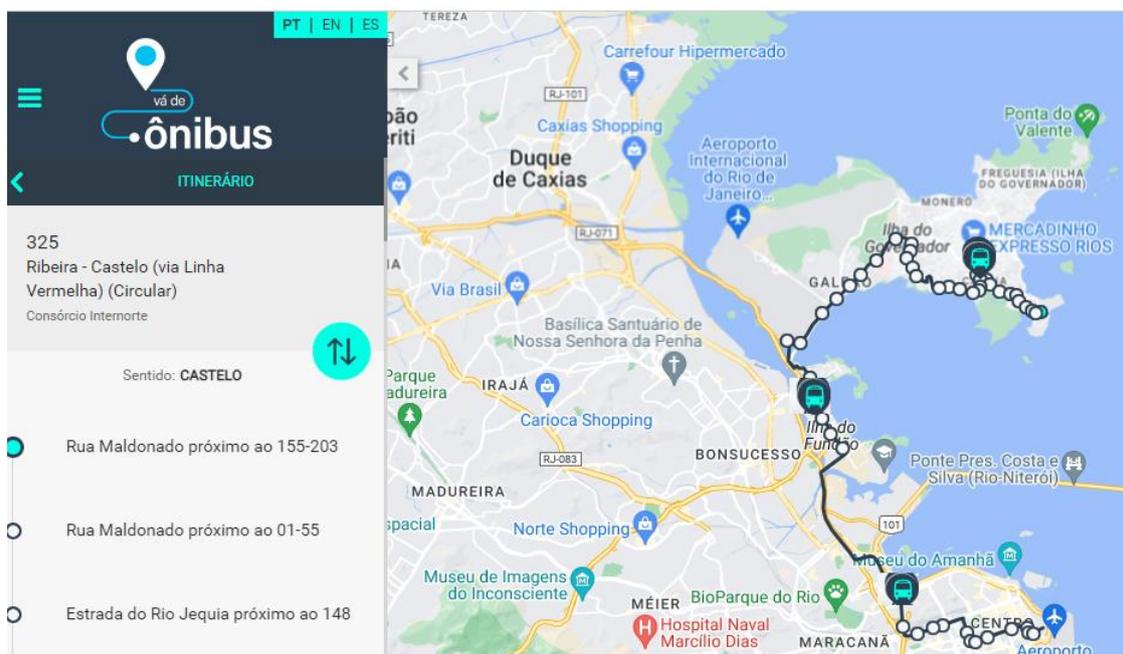
Para coleta de informações das linhas de transporte público da região foram catalogados os pontos, terminais e todas as linhas de ônibus que circulam na região, sendo a Avenida Horácio Macedo a via principal das linhas de ônibus que circulam pela cidade universitária, além de pesquisa em campo nos pontos de ônibus, para coleta de frequência e tempo de parada como apresentado na figura 3.5.



**Figura 3.5.** Pesquisa de campo na Região da Cidade Universitária. (Fonte: Elaboração própria, 2023).

Além da pesquisa de campo foram utilizados aplicativos “Moovit” e o “Vá de Ônibus” (plataforma web existente desde 2007), que oferecem a possibilidade de pesquisar as rotas e horários, além de fornecer a localização, por meio de GPS, de todas

as linhas de ônibus municipais de seu banco de dados mostrado na figura 3.6. Mesmo assim, o sistema é ainda pouco preciso com relação à localização dos ônibus em tempo real (DA CUNHA TEIXEIRA; PARAIZO, 2020).



**Figura 3.6:** Aquisição de dados de trajetos, pontos e das frequências das linhas de ônibus (Fonte: [www.vadeonibus.com.br](http://www.vadeonibus.com.br))

Foram utilizados os dados da plataforma “Vá de Ônibus”, que disponibiliza os trajetos das linhas e nessa plataforma é possível monitorar os ônibus de uma determinada linha *on-line*, sendo possível estimar a frequência de uma linha em um determinado ponto.

#### 3.2.4. DADOS DE EMISSÃO VEICULARES

A CETESB divulga anualmente o Relatório de Emissões Veiculares. Esse relatório é uma ferramenta importante para monitorar e avaliar as emissões de emissões atmosféricas provenientes do setor de transporte no estado de São Paulo, Brasil, e foi usado no IEFV como a base para fatores de emissões por veículo. As taxas de emissões correspondentes aos veículos leves do estudo estão na tabela 3.4. Para esse estudo foi utilizado a tabela do ano base do IEFV, ou seja, a tabela de emissões veiculares de 2013 da CETESB.

**Tabela 3.4:** Fator de emissão de Veículos leves (Fonte: Adaptada de CETESB/2013).

TIPO	Fase	CO	HC	HC		NOx	RCHO	CO2	MP	Autonomia
Combustível	Proconv e	(g/km)	total (g/km)	NMHC	CH4	(g/km)	(g/km)	(g/km)	(g/km)	(km/L)
Gasolina C		0,159	0,02	0,016	0,004	0,014	0,0009	236	nd	9,4
Flex-Gasol.C	L5	0,267	0,036	0,026	0,009	0,047	0,002	247	nd	8,9
Flex-Etanol		0,703	0,092	0,061	0,031	0,048	0,0113	241	nd	6,2
Diesel		0,07	0,027	0,014	0,013	0,28	nd	258	0,016	10,3

O INEA forneceu em 2016 as emissões estimadas pela metodologia *bottom-up*, considerando o perfil da frota, a distância percorrida, ou seja, a intensidade de uso do veículo e os fatores de emissão em um determinado período, quantificando as emissões por aproximadamente 1600 trechos de vias (INEA, 2016). A Tabela 3.5 apresenta as emissões estimadas na Região da Cidade Universitária que vão servir de referência para comparar com os resultados simulados.

**Tabela 3.5:** emissão por trecho de vias (Fonte: Adaptada de INEA (2016).

Vias	Estimativa bottom-up (ton.ano-1)								
	CO	NOX	SOX	RCHO	RCHO	MP_esc.	MP_ressu	NMHC_Ev	
Av. Horácio de Macedo - Trecho 1	12,12	8,54	0,48	0,04	0,21	0,43	1,12	0,78	
Av. Horácio de Macedo - Trecho 2	3,03	2,14	0,12	0,01	0,05	0,11	0,28	0,19	
Avenida Athos da Silveira Ramos	8,69	6,02	0,36	0,03	0,14	0,33	0,76	0,60	
Terminal Rodoviário da UFRJ	3,28	2,27	0,13	0,01	0,05	0,12	0,29	0,23	
Avenida Brigadeiro Trompowski	23,87	7,27	0,72	0,09	0,14	0,81	1,69	1,85	
Estrada do Galeão - Trecho 8	78,71	23,97	2,40	0,30	0,47	2,66	5,57	6,10	
Estrada do Galeão - Trecho 10	88,31	26,90	2,69	0,34	0,53	2,99	6,25	6,85	
(Linha Vermelha) - Trecho 3	419,31	82,54	11,95	1,64	1,19	13,95	28,06	33,12	
(Linha Vermelha) - Trecho 4	427,39	72,83	12,14	1,70	0,85	14,34	27,87	34,26	

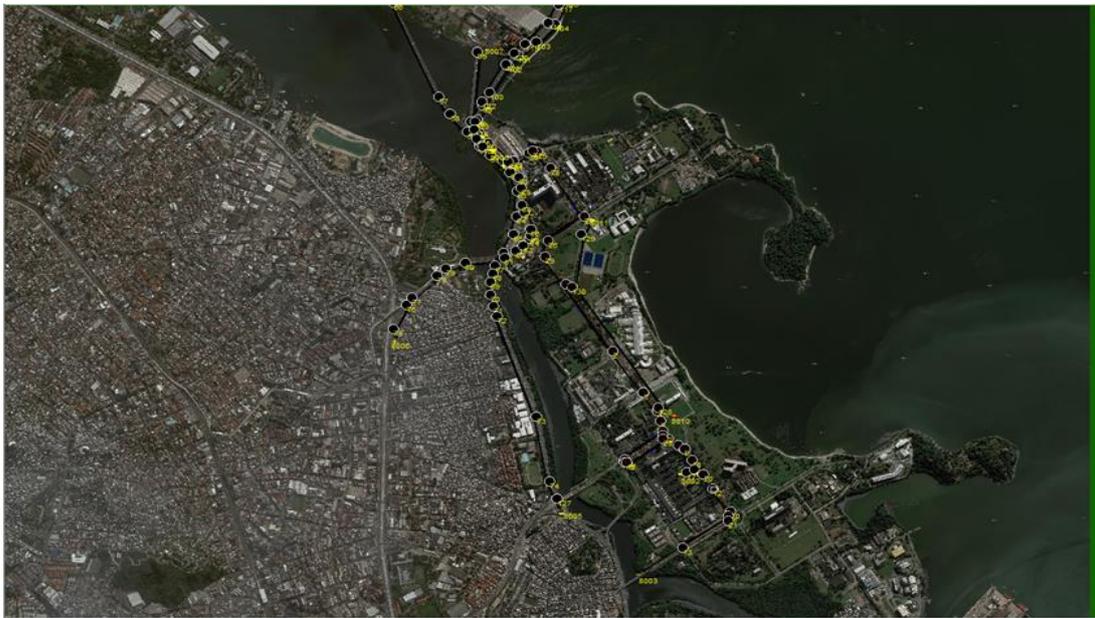
### 3.2.5. TRATAMENTO DOS DADOS PARA A SIMULAÇÃO

Os dados coletados nos simuladores serão levantados considerando todos os poluentes estimados em cada modelo de cada via do IEFV do INEA na região da área de estudo com influência de toda a rede simulada por cada modelo.

Serão desenvolvidas redes de tráfego dos modelos microscópicos: AIMSUN e CORSIM para a rede existente na área de estudo, que inclui vias locais, coletoras, arteriais e expressas na caracterização da rede de vias. O procedimento a seguir inclui codificação

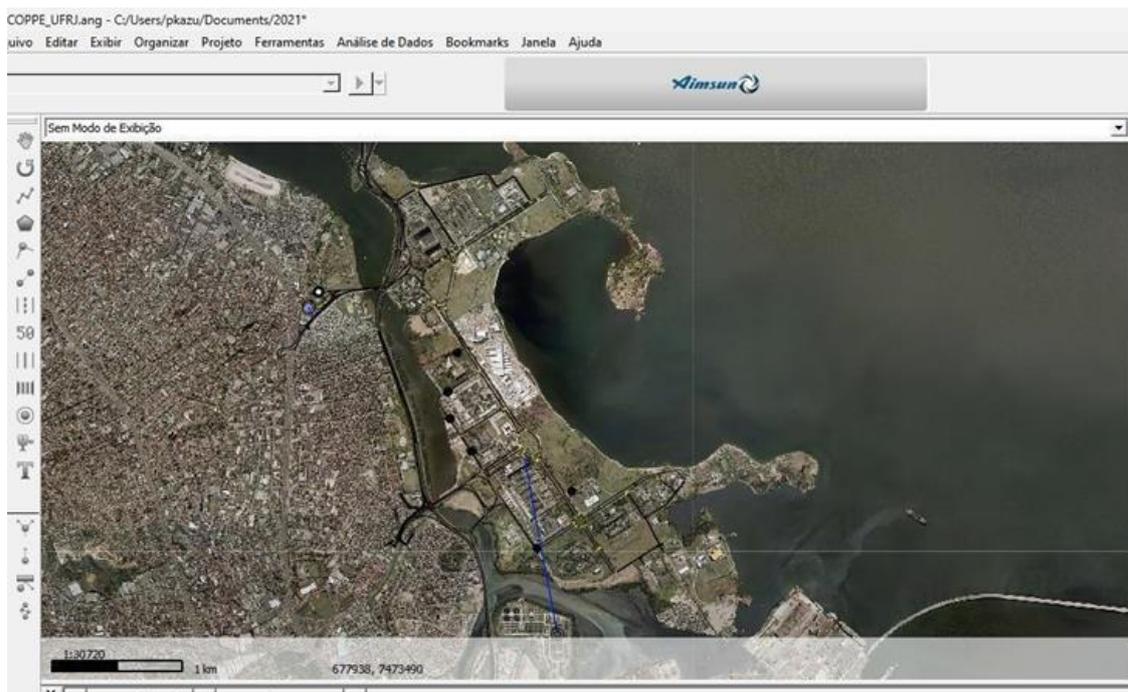
de rede e modelagem de simulação, validação de modelo, construção de cenário, execuções de simulação e pós-processamento.

Na modelagem da rede no CORSIM consiste em adicionar vetores e pontos para representar as vias e interseções na rede da área de estudo. A modelagem ficou com 137 vetores e 136 pontos ou conectores de link como mostrado na figura 3.7. Nessa modelagem no CORSIM foi utilizada uma abordagem diferente, articulando-se o simulador urbano NETSIM com o simulador de vias expressas ou rodovias FRESIM para produzir o modelo misto. A existência de vias rápidas dentro da cidade universitária torna fundamental que os modelos sejam capazes de representar os dois tipos de rede com o mesmo programa.



**Figura 3.7:** Modelagem Rede Viária do CORSIM da Região da Cidade Universitária  
(Fonte: Elaboração própria, 2023).

O microssimulador AIMSUN foi modelado na mesma área de estudo para avaliar as emissões geradas pelo tráfego sob diferentes tipos de vias e de condições de tráfego conforme mostrado na figura 3.8. A ferramenta foi selecionada devido à sua capacidade de modelar a geometria da rede rodoviária, o comportamento de cada veículo em resposta aos sinais de controle do tráfego e sua facilidade de utilização.



**Figura 3.8:** Rede Viária do IEFV-RMRJ da Região da Cidade Universitária (Fonte: AIMSUN/Elaboração própria, 2023).

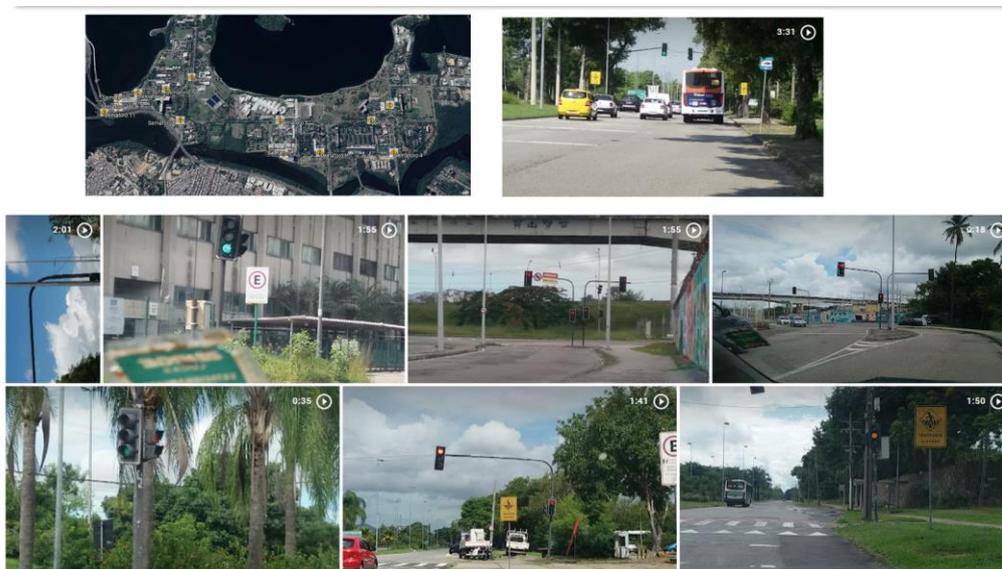
Para as condições urbanas, os resultados da simulação, em termos de volumes, foram comparados com os dados pesquisados e observados, em situações de congestionamento; para as condições em meio interurbano, a validação foi realizada em relação ao uso da via, às manobras de mudança de faixa e à distribuição de velocidades, como visto nos dados do inventário com os dados simulados e os resultados comparados por regressão linear.

Para calibração e validação de emissões de poluentes foram modeladas duas vias (urbana e de fluxo contínuo) com as condições informadas pelo inventário utilizando a velocidade média padrão do inventário e a distância de 1 km nas condições estimadas para uso dos fatores de cada emissão.

O modelo de rede incluí as rotas de automóveis, transporte público e caminhões conforme os dados geográficos do IEFV 2016. Mais 31 paradas de ônibus, doze semáforos e outros atributos de rede foram codificados na rede com dados relevantes sobre tempo de ciclo semaforico coletados na pesquisa de campo. Os limites de velocidade das vias, variando de 30 km/h a 90 km/h, foram adotados na rede para movimentos de conversão.

Os dados dos semáforos foram coletados do esquema de temporização do sinal

coletados em campo conforme exemplificado na figura 3.11. Três tipos de esquemas de temporização de sinal foram identificados como Plano 1 (ativado fora dos períodos de pico), Plano 2 (ativado das 10h00 às 16h00) e Plano 3 (ativado das 16h00 às 20h00); esses foram usados para representar o tempo real dos semáforos para o período de modelagem. Um total de 25 áreas de conflitos veiculares nos cruzamentos foram identificadas através da aplicação das regras de direito de passagem. Outras medidas de controle de tráfego, como restrições de conversão e regras de prioridade, foram codificadas na rede para tornar o modelo de simulação de tráfego representativo das condições do tráfego real.



**Figura 3.9.** Levantamento Semafórico da Região da Cidade Universitária. (Fonte: Elaboração própria, 2023).

### 3.2.6 ANÁLISE DOS DADOS DE EMISSÃO INVENTARIADOS E SIMULADOS

Para a realização da coleta e tratamento de todos os dados de emissão (inventariados e simulados), visando encontrar eventuais discrepâncias dos dados simulados com relação aos dados inventariados, haverá o confronto estatístico entre eles.

Para cada poluente estimado, em cada simulador, serão avaliadas as diferenças relativas e absolutas entre as emissões médias de cada percurso. Com isso, será conhecido o simulador (ou simuladores) que mais se aproxima(m) dos dados coletados através da aplicação da metodologia, considerando a calibração dos simuladores.

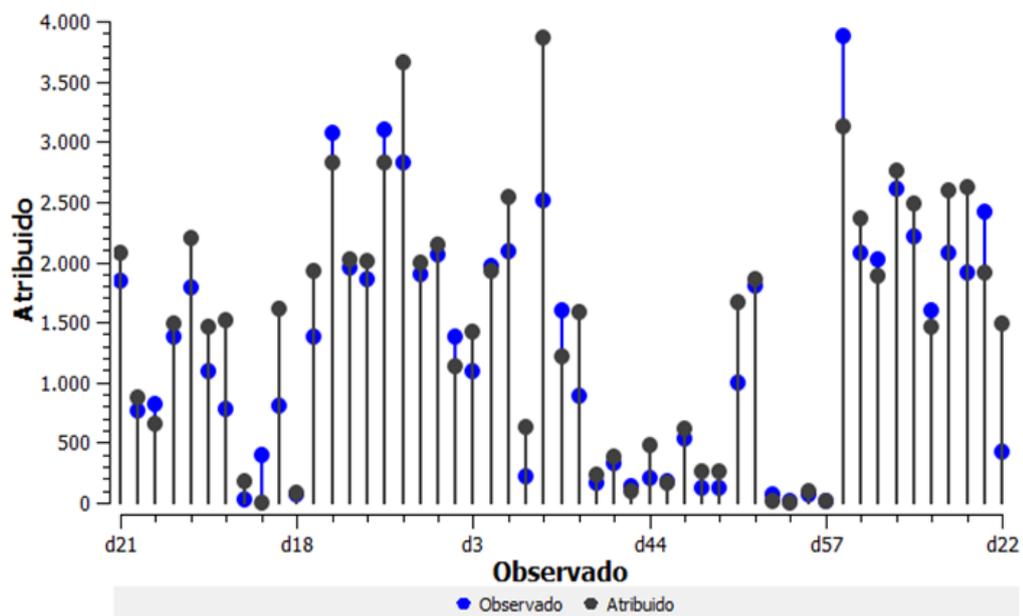
Com a seleção do(s) simulador(es) mais próximo do valor inventariado, serão realizadas simulações com todos os veículos, com diferentes configurações de peso, tecnologia (tipo de motor e combustível usado) e dimensões, para verificar as questões

de emissões, e não somente relativas ao tráfego

Como último ponto, serão analisadas as vias com diferentes carregamentos de tráfego, visando verificar os impactos que um maior fluxo pode acarretar quanto às emissões de um veículo inserido nessas vias, considerando as variações de velocidade e aceleração.

### 3.3 VALIDAÇÃO DO MODELO

Foram selecionadas oito principais interseções periféricas da área de estudo para gerar parâmetros de calibração do modelo. Dados simulados de volume de tráfego direcional para 12 cruzamentos principais, com base em 9 vias com coleta de dados na área de estudo, foram validados com volume de tráfego de campo. A validação do modelo foi realizada pela correlação de determinação ( $R^2$ ) e estatística. Os gráficos de dispersão do volume de tráfego simulado e do IEFV deverão revelar que o valor de  $R^2$  para os períodos de pico da manhã conforme exemplificado na figura 3.10.



**Figura 3.10.:** Comparação de dados simulados com Inventariados (Fonte: Elaboração própria, 2023).

Para calibração dos parâmetros de emissões foram geradas seções com as principais características e informações fornecidas pelo IEFV da RMRJ para área de

estudo e seguindo as recomendações da metodologia do Inventário. Dados como fator de emissão em gramas por quilômetro, velocidade média, tipos de veículos e tipos de combustível serão usados na calibração em seções teste na simulação.

Na modelagem levou-se em conta todas as características geométricas e operacionais, tanto na montagem da rede, quanto na imagem de fundo ou de outras camadas, facilitando a percepção dos fatores que interferem no funcionamento da rede, aumentando a precisão do trabalho. Para determinar os caminhos inventariados, foram inseridos no modelo os dados com as mesmas informações fornecidas pelo IEFV do INEA e com as mesmas distâncias nos links principais. O CORSIM e o AIMSUN permitem a edição da malha viária da região vetorizada em rede.

Os resultados estão organizados de forma que representem as vias da área de estudo inventariadas, os parâmetros de emissões estimados e as características de tráfego da via. As vias mais congestionadas devem mostrar maiores quantidades de emissões, os trechos, com variações de velocidade, semáforos devem obter variações significativas. A Seção 4, a seguir, apresenta os resultados do estudo e discussões a partir da aplicação metodológica apresentada nesta seção.

#### **4. PROCESSAMENTO E ANÁLISE DOS RESULTADOS**

Para que a proposta anteriormente apresentada possa ser verificada, faz-se necessário uma análise através da realização de testes experimentais. Serão apresentados a seguir, ponto a ponto, os tópicos sugeridos no detalhamento da proposta, descrevendo a realização experimental passo a passo da metodologia.

Em conjunto a realização dos experimentos será apresentada as análises dos resultados obtidos através dos mesmos.

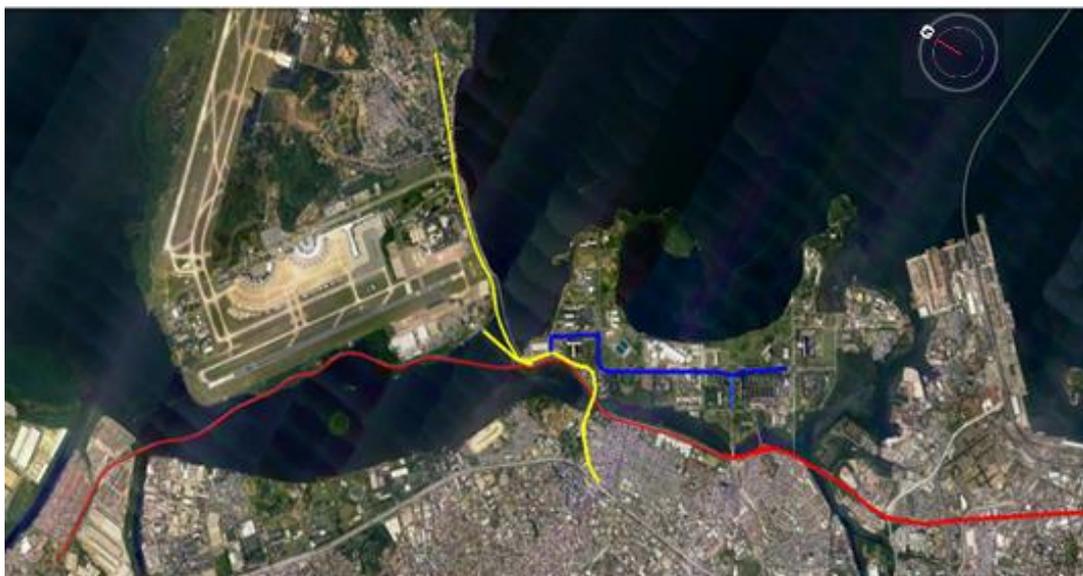
O presente Capítulo foi dividido em 3 seções. A primeira parte refere-se às informações de emissões entre os TT selecionados, por meio de tabela de emissões do IEFV foram calculadas as emissões dos TT e razão entre estes tempos, em segundos, e tecidas algumas análises pertinentes.

Já a segunda seção do Capítulo faz referência aos resultados de simulação do AIMSUN, desta vez, já estima as emissões dos TT.

Na seção 3 são apresentadas as estimativas das emissões no SMT CORSIM dos TT.

#### 4.1 VIAS COMPARADAS DA REGIÃO

Foram estimadas as vias inventariadas que passam pela Cidade Universitária da UFRJ, das 9 Vias inventariadas e conectadas em rede foram selecionados os 3 Trajetos de Tráfego (TT) além de informações referentes a infraestrutura da via e interseções foram simulados cada um desses TT utilizados no estudo de caso. Esses TTs englobam toda a região da cidade universitária e as vias inventariadas que cruzam a região, conforme demonstrado na figura 4.1.



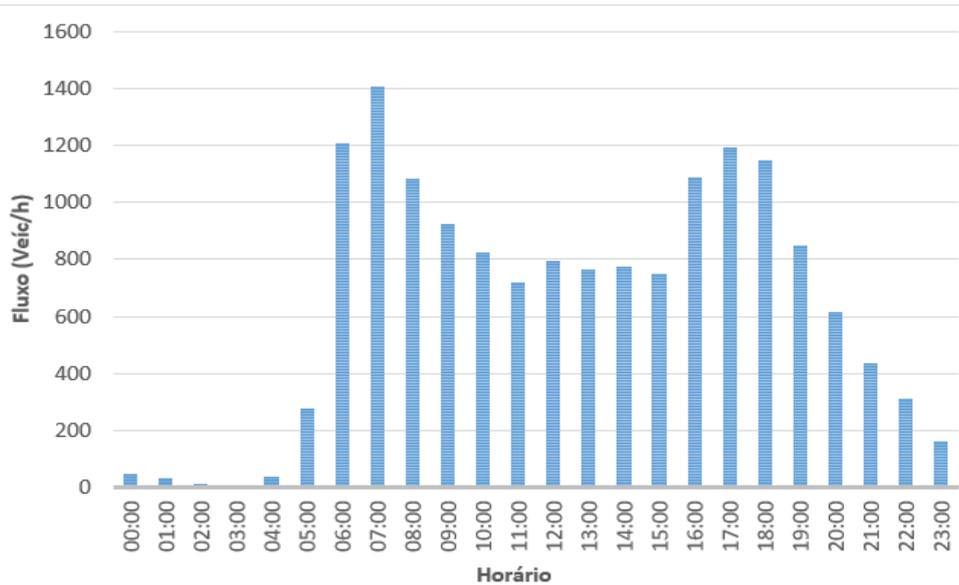
**Figura 4.1:** Rede Viária do IEFV-RMRJ da Região da Cidade Universtária. (Fonte: Elaboração própria, 2023).

Posteriormente a seleção do trecho a ser estudado, foi realizado um estudo volumétrico de tráfego com o objetivo de analisar os horários em que seriam verificadas as maiores quantidades de fluxo de veículos (horário de pico), juntamente ao órgão responsável pelo Controle de Tráfego da cidade do Rio de Janeiro (CET- Rio). Os dados de pesquisas de contagem fornecem dados de pesquisas manuais e pneumáticas, as pesquisas manuais, foram tabuladas de 15 em 15 minutos e classificadas por tipo de veículos, as pneumáticas são tabuladas de hora em hora. Esses dados serviram para distribuir a contagem diária de fluxo inventariado e forma a distribuição dos dados inventariados.

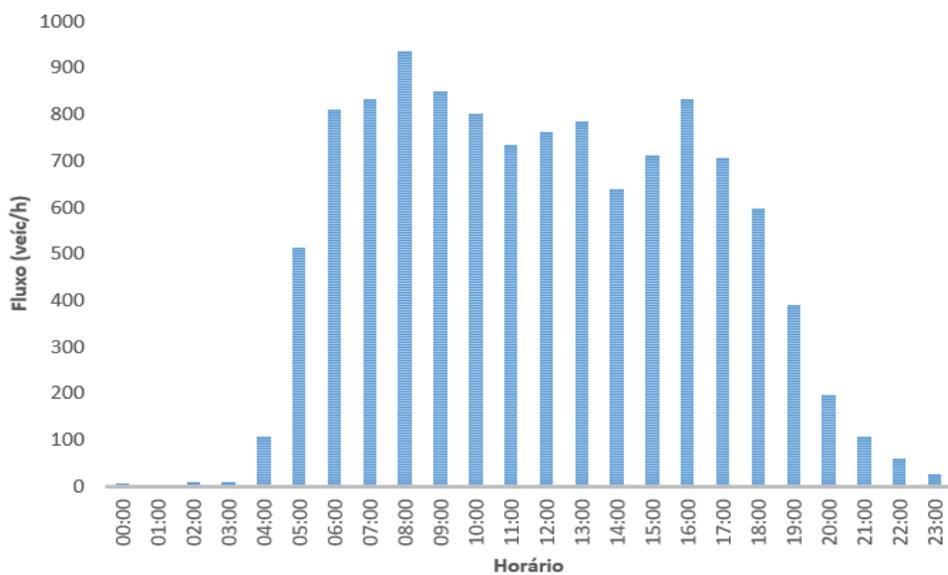
Nas pesquisas de campo foram levantados os planos semaforicos, informações dos ciclos semaforicos e implementados nas simulações como dados de entrada.

Considerou-se como parâmetro os dados armazenados no último inventário que

estimaram as emissões das vias em 2013. Os dados foram tratados e estão apresentados em histogramas (Figuras 4.2a, 4.2b e 4.2c), construídos a partir dos volumes coletados em dias típicos, ou seja, terça-feira, quarta-feira ou quinta-feira.



**Figura 4.2a:** Volumes de tráfego, Av. Brigadeiro Trompowski, sentido Cidade Universitária (Fonte: CET-Rio)



**Figura 4.2b:** Volumes de tráfego, Av. Brigadeiro Trompowski, sentido Cidade Universitária (Fonte: CET-Rio)

Por meio dos histogramas é possível verificar que os horários de fluxos mais

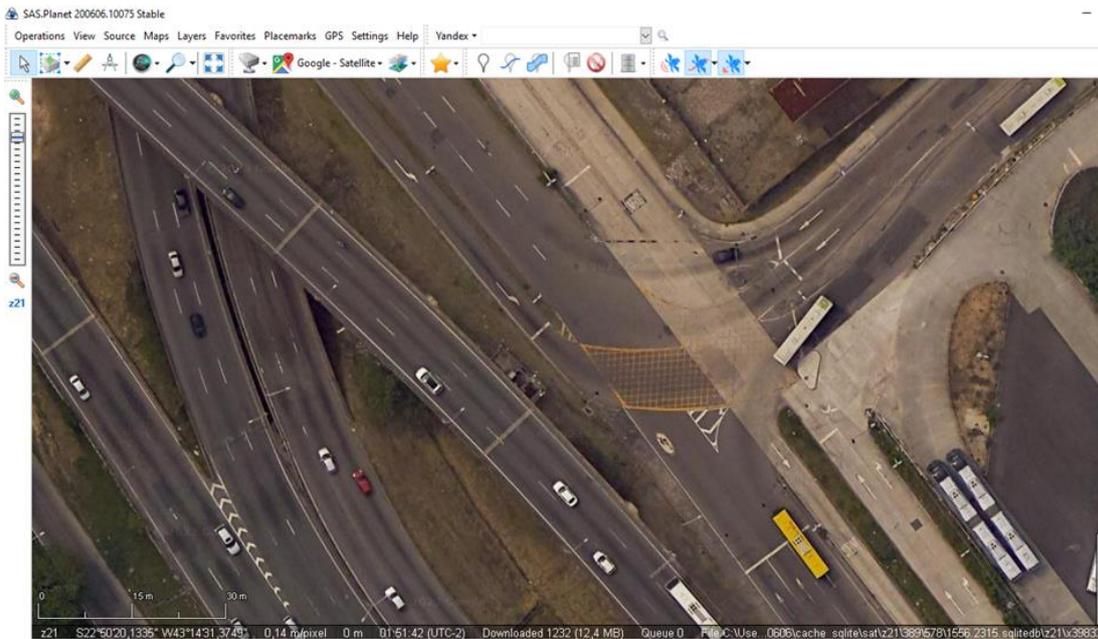
intensos são os do início do período da manhã (entre 07:00 h e 09:00 h) e do final do período da tarde (entre 17:00 h e 18:00 h). Optou-se por realizar as análises durante o período da manhã, em função das diferenças de volumes as 07:00h (fluxo menos intenso) estarem próximas aos momentos de alto fluxo.

#### 4.2. CODIFICAÇÃO DA REDE DE TRANSPORTES

Esta atividade metodológica consistiu em preparar os simuladores de tráfego para a realização do experimento. Considerando as particularidades de cada um dos simuladores para a etapa de codificação da rede de transportes, foi coletada uma imagem do trecho selecionado através do programa SAS Planet, georreferenciada e com resolução alta o suficiente para visualizar (através de aproximação da imagem), os detalhes do trecho estudado, como: número de faixas, sentidos das vias, presença de semáforos, entre outros. A imagem utilizada nos simuladores de tráfego AIMSUN e CORSIM é apresentada nas Figuras 4.3a e 4.3b, considerando o trecho em estudo na totalidade e uma aproximação pontual para visualização mais detalhada, respectivamente.

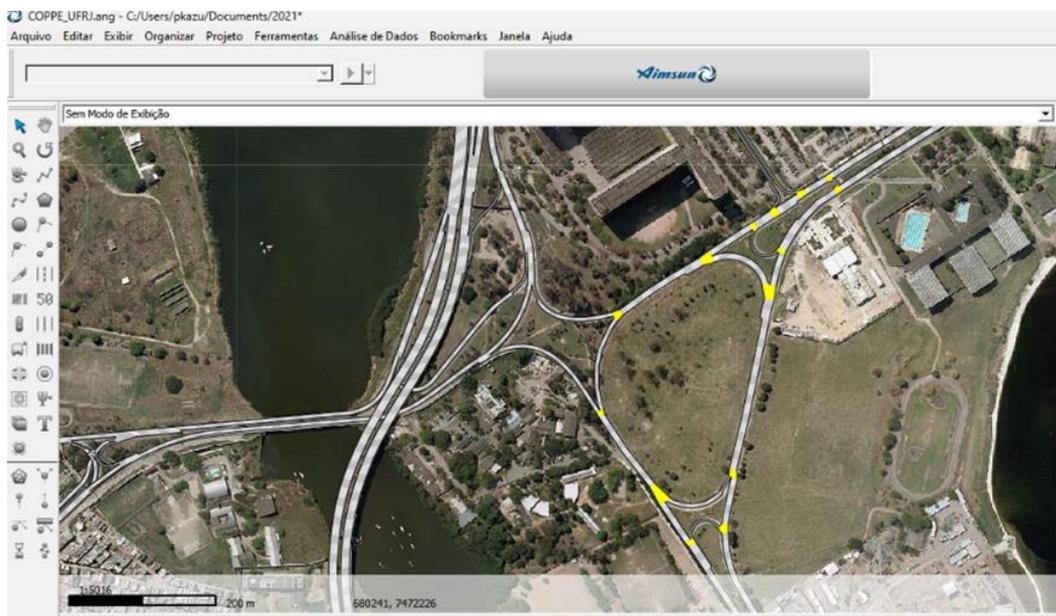


**Figura 4.3a:** Ilustração em alta resolução de alguns trechos analisados (com vias principais com alta circulação de veículos) (Fonte: Elaboração própria, 2023.).

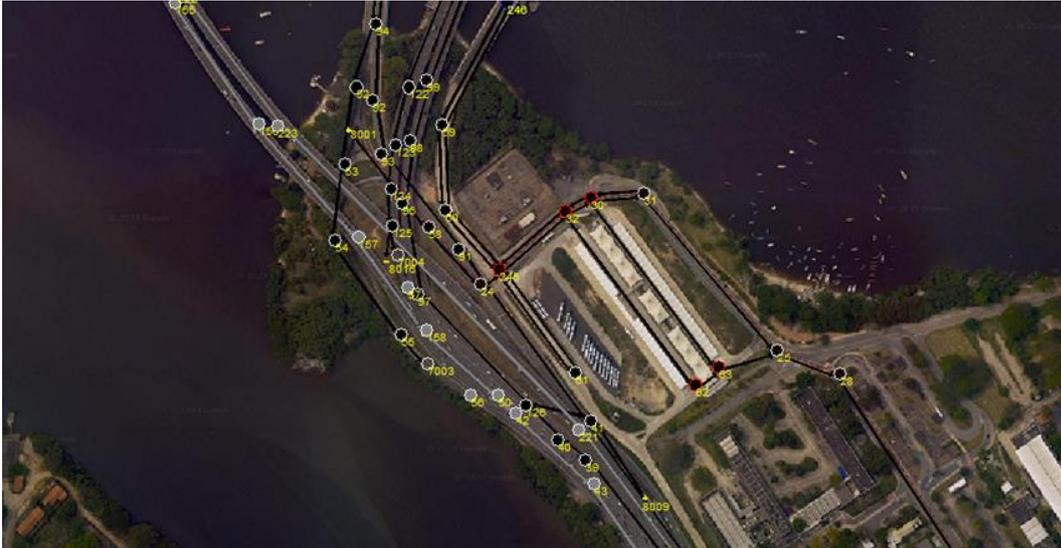


**Figura 4.3b:** Trechos de TT e Cruzamento detalhado da imagem do SAS Planet (Fonte: Elaboração própria, 2023)

Com a imagem foi possível realizar a codificação da rede nos simuladores. A Figura 4.4 representa a rede codificada no simulador AIMSUN. Já a Figura 4.5 representa a rede codificada no simulador CORSIM.



**Figura 4.4:** Rede modelada no simulador de tráfego AIMSUN (Fonte: Elaboração própria, 2023).



**Figura 4.5:** Rede modelada no simulador de tráfego CORSIM (Fonte: Elaboração própria, 2023)

As mesmas dimensões foram mantidas nos dois simuladores, com o objetivo de aproximar as condições em que estariam submetidos o tráfego e o veículo analisado. O trecho principal analisado (Avenida Horácio Macedo) foi modelado com 2.880 metros de comprimento, as vias que cruzam a cidade universitária foram codificadas com, no mínimo os mesmos comprimentos tabelados pelo inventário do INEA conforme já mostrado na tabela 3.1. Todo o trecho foi modelado com número de suas respectivas faixas, sentido, com 3,50 metros de largura/faixa como padrão.

#### 4.3. MÉTODO DE OBTER RESULTADOS DAS EMISSÕES E CALIBRAÇÃO

Segundo de Britto Porto & de Abreu (2020), os microssimuladores, por oferecer uma visão detalhada dos fluxos de tráfego, são uma boa base para o cálculo de emissão em cenários alternativos. Também mostraram que os padrões de desaceleração, seguidos de aceleração, fazem com que aumente o fator de emissões. Estas são claramente relacionadas ao volume de tráfego, ainda que o cenário máximo de emissões não corresponde ao maior fluxo, devido ao congestionamento e variações horárias na composição da frota. Neste contexto, como em outros parâmetros utilizados na microssimulação como velocidade, fluxo tamanho de fila, etc. Faz-se necessário a calibração dos parâmetros de emissão. Na literatura ainda há poucos estudos que fazem a calibração de parâmetros de emissões em pesquisas com microssimuladores.

Os modelos de emissão integrados aos simuladores AIMSUN apresenta, como dados de entrada, as velocidades e acelerações, para o cálculo das emissões, já o modelo presente no simulador CORSIM utiliza como *default* para realidades distintas das áreas urbanas adensadas brasileiras, sendo possível configurar as taxas de emissões por utilização de tipo do código 172 do seu script.

Para calibração das emissões foram criados modelos de simulação com as características informadas no inventário de emissões com a distância de 1 quilometro a velocidade média de 31,51 km/h e comparada com as taxas de emissões tabeladas por tipo de veículo.

As emissões de tráfego no AIMSUN foram calculadas usando o modelo de emissões instantâneas já incorporadas ao software, utilizando informações do inventário de emissões com a distância de 1 quilometro a velocidade média de 31,51 km/h e comparadas com as taxas de emissões tabeladas por tipo de veículo.

Os resultados da modelagem confirmaram que a correlação das emissões associadas e das estimadas pelo modelo não ultrapassaram 90% do desvio dos valores estimados pelo inventário referente ao CO, já para os valores de Nox e HC houveram variações maiores, dados desses experimentos é apresentado em formato de matriz conforme mostrado na tabela 4.1.

**Tabela 4.1:** Calibração de emissão por trecho de 1 km. (Fonte: Elaboração própria, 2023)

SIMULADOR	POLUENTE	TAXA do Inventário	TAXA Simulada	CALIBRAÇÃO
AIMSUN	(CO <sub>2</sub> )	247	191	77,32%
	(CO)	0,267	0,270	98,88%
	(MP)	0,016	0,026	61,53%
	(NO <sub>x</sub> )	0,047	0,060	78,33%
	(VOC) ou (HC)	0,036	0,048	75,00%
CORSIM	(CO <sub>2</sub> )	-	-	-
	(CO)	0,267	0,28561	93,48%
	(MP)	0,016	-	-
	(NO <sub>x</sub> )	0,047	0,0859607	54,68%
	(VOC) ou (HC)	0,036	0,072745	49,48%

#### 4.4. ALIMENTAÇÃO DOS DADOS NOS SIMULADORES DE TRÁFEGO

Esta etapa metodológica teve por objetivo preparar os dois simuladores de tráfego,

de forma que eles pudessem gerar resultados a serem utilizados na comparação com os valores coletados no inventário, possibilitando assim, identificar qual simulador mais se aproxima da realidade, no caso de uso sem a devida calibração.

A partir dos dados de contagens dos volumes de tráfego, foi possível realizar a alimentação dos dados de tráfego nos dois simuladores.

Para os simuladores de tráfego AIMSUN e CORSIM foram fornecidos os fluxos horários, sendo necessário informar aos simuladores os volumes em cada link do trecho estudado (em veículos/hora). Os dados de tempos semafóricos foram coletados em campo e codificados igualmente nos dois simuladores.

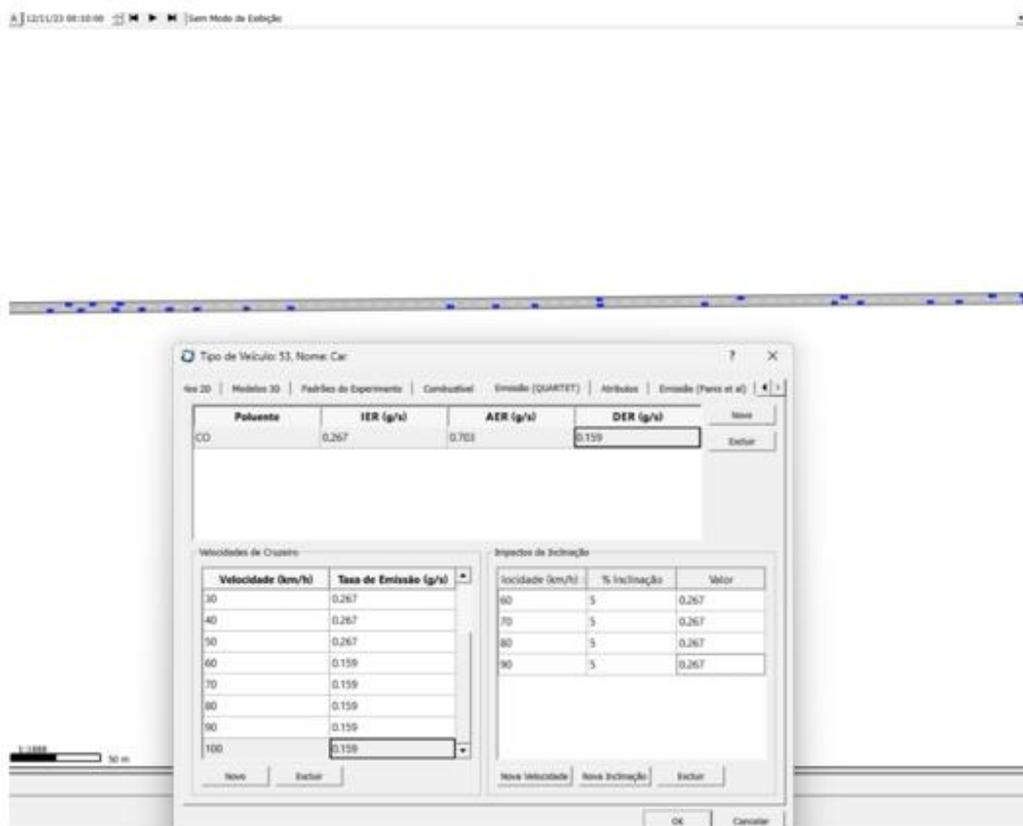
Para os ajustes do veículo estudado, cada simulador apresentou capacidades distintas de edição das características dos mesmos. O simulador AIMSUN apresentou menor capacidade de edição, no que diz respeito às características de um tipo de veículo, em particular, para caminhões (identificado no simulador como Truck). Por outro lado a edição de linhas de ônibus, pontos e tempos de paradas são bem mais simples de editar.

Já o CORSI, utiliza o conceito de link e nó apresentando um método para configurar o plano semafórico em um nó de interseção e as linhas de transporte público são editadas nó por nó para definir o trajeto das linhas de ônibus.

#### 4.5. TRATAMENTO DOS DADOS SIMULADOS

Essa atividade metodológica teve por objetivo atender a análise a respeito dos simuladores estudados, com a respectiva geração dos resultados das emissões. Segundo Dias (2014), são necessárias pelo menos dez rodadas de simulação (com diferentes sementes aleatórias) para a estabilização dos resultados, considerando as médias para dados como velocidade e densidade de tráfego. Desta forma, para os simuladores de tráfego AIMSUN e CORSIM foram realizadas dez simulações para cada um dos cenários analisados, com tempo de aquecimento de 15 minutos cada.

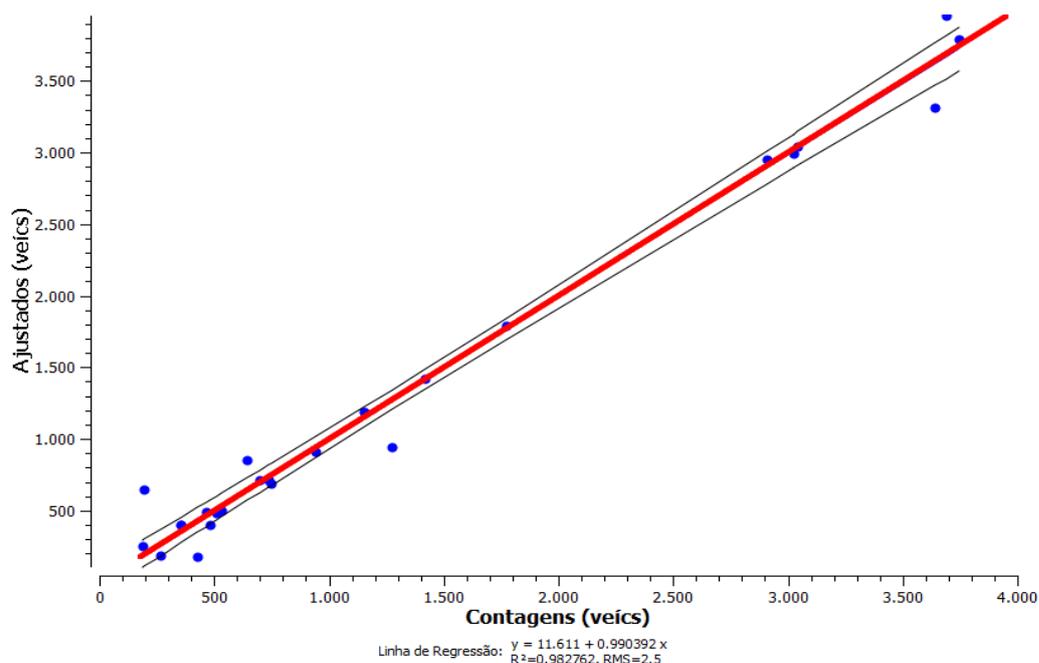
O simulador de tráfego AIMSUN apresenta internamente em seu pacote de simulação o modelo de emissão integrado, conforme ilustrado na Figura 4.6.



**Figura 4.6:** Ilustração da tela de seleção dos dados do modelo de emissão presente no simulador AIMSUN

#### 4.6. CONFRONTO DOS DADOS DE EMISSÃO INVENTARIADOS E SIMULADOS

Para o comparativo dos dados simulados com os reais, extraíram-se as diferenças absolutas e relativas dos dados das emissões estimados pelos simuladores e dos dados reais. Os comparativos estão apresentados nas Tabelas 4.1 a 4.2 (em gramas/quilômetro). Nesta primeira análise, os dados provenientes das simulações foram considerando como os dados de fator de emissão da CETESB (2013), utilizada no IEFV para estimas as vias, comparados com as vias inventariadas com as vias padrões modelados nos microsimuladores. Com a execução desta etapa, busca-se determinar qual simulador foi capaz de calibrar os dados de emissão próximos aos estimados pelos inventários, empreendendo esforço de calibração, ou seja, equivalendo os parâmetros de emissão o mais próximo possível.



**Figura 4.7.:** Calibração de dados simulados com Inventariados. (Fonte: Elaboração própria, 2023).

No processo de calibração, ajustou-se os parâmetros relacionados a velocidade (aceitação de velocidade e velocidade máxima desejada). Um experimento para cada conjunto desses parâmetros é realizado neste processo para obter seu valor RMSE que foi de 2,5. No geral, 150 conjuntos de parâmetros foram experimentados. O valor  $R^2$  foi de 98,27% mostrando que a calibração do sistema está aceitável, desses experimentos é apresentado em formato de matriz conforme mostrado na figura 4.7 por correlação linear. O experimento da calibração de fluxo é apresentado em formato de matriz conforme mostrado na Tabela 4.2.

**Tabela 4.2:** Fluxo De Vias e Suas Calibrações (Fonte: elaboração própria 2023)

Vias Logradouro	Fluxo diário (n° de veículos/hora)				
	Veículos IEFV	Fluxo AIMSUN	Fluxo CORSIM	calibração AIMSUN	calibração CORSIM
Av. Horácio de Macedo - VIA 1	1.699	1.670	1.733	98,26%	98,03%
Av. Horácio de Macedo – VIA 2	1.699	1.674	1.758	98,52%	96,64%
Avenida Athos da Silveira Ramos	1.150	1.202	1.004	95,67%	83,52%
Terminal Rodoviário da UFRJ	678	741	723	91,50%	93,77%
Avenida Brigadeiro Trompowski	3.942	3.728	4.236	94,57%	93,06%

Estrada do Galeão - Trecho 8	3.017	2.955	2.896	97,94%	95,99%
Estrada do Galeão - Trecho 10	3.386	3.199	3.405	94,47%	99,44%
(Linha Vermelha) - Trecho 3	12.084	11.710	12.291	96,90%	98,31%
(Linha Vermelha) - Trecho 4	11.785	10.934	11.844	92,78%	99,50%

Para o comparativo dos dados simulados com os inventariados, extraiu-se as diferenças absolutas e relativas dos dados das emissões estimados pelos simuladores e dos dados tabelados pelo IEFV. Os comparativos estão apresentados nas Tabelas 4.3 a 4.12 (em kilogramas/quilômetro). Nesta primeira análise, os dados provenientes das simulações foram considerando os dados das vias obtidos do IEFV. Com a execução desta etapa, busca-se determinar qual simulador foi capaz de gerar dados de emissão próximos aos estimados pelo IEFV, após empreender esforço de calibração, ou seja, considerando apenas os parâmetros de variação de velocidades e paradas.

**Tabela 4.3:** Estimativas de CO em g/h (Fonte: elaboração própria 2023)

	IEFV	AIMSUN	CORSIM	AIMSUN %	CORSIM %
Av. Horácio de Macedo - Trecho 1	1383,56	1435,23	1536,25	96,40	90,06
Av. Horácio de Macedo - Trecho 2	345,89	431,21	534,38	80,21	64,72
Avenida Athos da Silveira Ramos	992,01	1042,13	1523,54	95,19	65,11
Terminal Rodoviário da UFRJ	374,43	475,43	487,36	78,75	76,82
Avenida Brigadeiro Trompowski	2724,89	3284,43	3158,66	82,96	86,26
Estrada do Galeão - Trecho 8	8985,16	9345,31	10534,23	96,14	85,29
Estrada do Galeão - Trecho 10	10081,05	14154,67	15236,87	71,22	66,16
(Linha Vermelha) - Trecho 3	47866,44	53457,36	54237,67	89,54	88,25
(Linha Vermelha) - Trecho 4	48788,81	57484,34	61657,69	84,87	79,12

**Tabela 4.4:** Estimativas de NOx em g/h (Fonte: elaboração própria 2023)

	IEFV			AIMSUN	CORSIM
		AIMSUN	CORSIM	%	%
Av. Horácio de Macedo - Trecho 1	0,975	0,877	1,175	89,94%	82,97%
Av. Horácio de Macedo - Trecho 2	0,244	0,212	0,453	86,88%	53,86%
Avenida Athos da Silveira Ramos	0,687	0,485	0,872	70,59%	78,78%
Terminal Rodoviário da UFRJ	0,259	0,234	0,435	90,34%	59,54%
Avenida Brigadeiro Trompowski	0,830	0,756	1,540	91,08%	53,90%
Estrada do Galeão – Trecho 8	2,736	2,856	3,754	95,80%	72,88%
Estrada do Galeão - Trecho 10	3,071	3,054	3,843	99,45%	79,91%
(Linha Vermelha) - Trecho 3	9,422	9,733	9,937	96,80%	94,82%
(Linha Vermelha) - Trecho 4	8,314	8,874	8,971	93,69%	92,68%

**Tabela 4.5:** Estimativas de HC em g/h (Fonte: elaboração própria 2023)

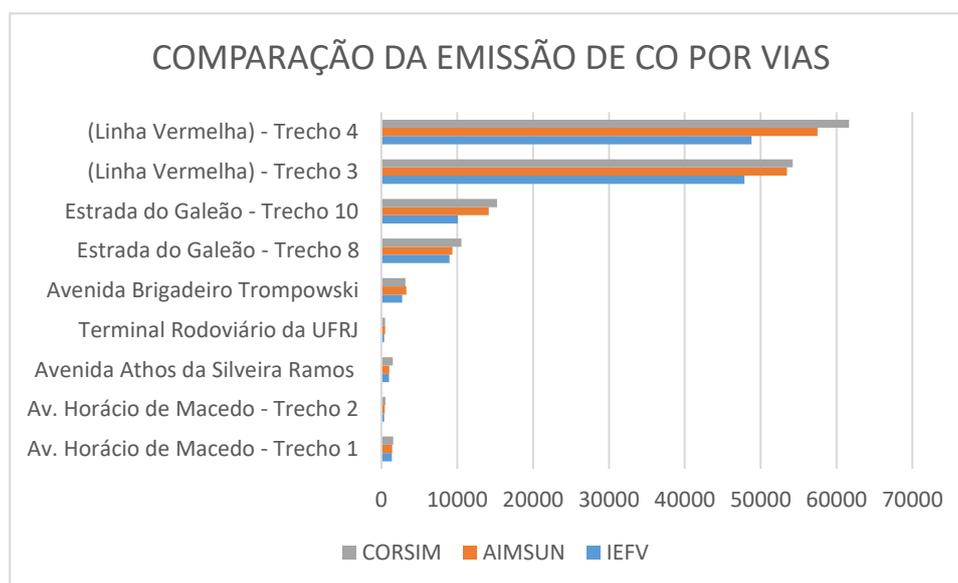
Estimativas de HC em g/h					
	IEFV			AIMSUN	CORSIM
		AIMSUN	CORSIM	%	%
Av. Horácio de Macedo - Trecho 1	0,014	0,023	0,025	60,318	55,492
Av. Horácio de Macedo - Trecho 2	0,013	0,020	0,018	66,062	73,402
Avenida Athos da Silveira Ramos	0,043	0,064	0,058	67,798	74,812
Terminal Rodoviário da UFRJ	0,012	0,023	0,028	50,837	41,759
Avenida Brigadeiro Trompowski	0,003	0,008	0,008	38,808	38,808
Estrada do Galeão - Trecho 8	0,010	0,013	0,018	79,183	57,187
Estrada do Galeão - Trecho 10	0,010	0,013	0,018	79,583	57,477
(Linha Vermelha) - Trecho 3	0,002	0,003	0,008	83,332	31,249
(Linha Vermelha) - Trecho 4	0,002	0,003	0,007	58,080	24,892

As Tabelas 4.3, 4.4 e 4.5 apresenta os resultados das estimativas de maneira a facilitar a sua visualização e comparação dos números. A estimativa de CO, corresponde ao percentual de poluentes atmosféricos que mais se aproxima das estimativas de emissões. De maneira análoga, a estimativa de NOX corresponde à variação de quase 50% nos trechos microssimulados com engarrafamentos e 90% na via expressa simulada. A estimativa de HC houve grande variação na frota microssimulada, o microssimulador

AIMSUN obteve valores mais próximos dos valores estimados pelo IEFV do que o microssimulador CORSIM.

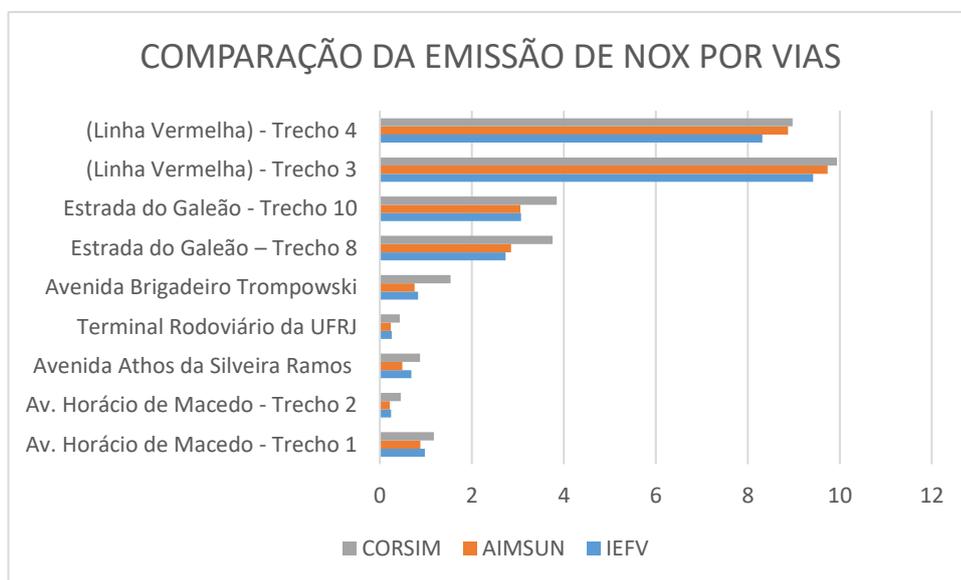
Ressalta-se que em todas as vias simuladas considerou-se que os demais veículos interagem em rede e podem variar essas estimativas conforme o fluxo, densidade, na simulação e no IEFV são estimadas por fluxos contínuos. Nas figuras 4.10, 4.11 e 4.12 são mostradas as emissões de CO, NOX e HC em cada via inventariada e microssimulada.

As estimativas de CO no microssimulador AIMSUN a Av. Horácio de Macedo, uma das principais vias UFRJ, obteve 96,4% do valor microssimulado com o valor estimado pelo IEFV. Houve grandes quantidades dessa emissão em vias de fluxo livre como a Linha Vermelha como mostrado na Figura 4.10. Em vias com grandes fluxos de ônibus simulados, como as vias do Terminal Rodoviário da UFRJ e Estrada do Galeão no trecho 10 e a apresentaram cerca de 70% de variações nos dois microssimuladores, indicando uma necessidade de calibrar esse tipo de veículo nos microssimuladores para esse tipo de emissão. No microssimulador CORSIM o CO foi a emissão que mais ficou próxima dos valores do IEFV se comparadas com a Emissão de NOX e HC.



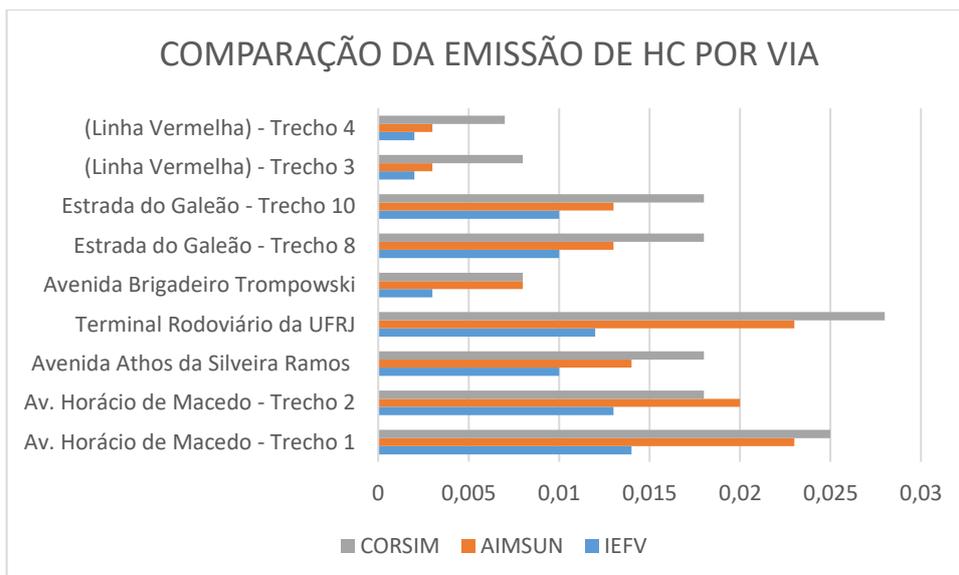
**Figura 4.8:** Gráfico de emissão de CO por via comparando resultados do IEFV com microssimuladores CORSIM e AIMSUN. (Fonte: Elaboração própria, 2023).

A estimativa de NOX, corresponde ao percentual de poluentes atmosféricos que se aproxima das estimativas de emissões no microsimulador AIMSUN comparadas com os dados IEFV. No CORSIM essa emissão obteve maiores variações em trechos congestionados na simulação e em trechos com maior volume de ônibus o que pode representar uma emissão a mais por essas impedâncias e representar essa emissão maior nessas vias congestionadas na simulação como a Estrada do Galeão, Av. Brigadeiro Trompowski e Terminal Rodoviário da UFRJ.



**Figura 4.9:** Gráfico de emissão de NOX por via comparando resultados do IEFV com microsimuladores CORSIM e AIMSUN. (Fonte: Elaboração própria, 2023).

A estimativa de HC, corresponde ao percentual de poluentes atmosféricos que mais variaram das estimativas de emissões se comparadas as microsimulações com os dados IEFV. No CORSIM e no AIMSUN essa emissão obteve maiores variações em quase todas as vias na simulação. Considerando-se que essas variações foram verificadas na calibração dos microsimuladores, os HC necessitam de fatores de ajuste das emissões se comparadas as estimativas do IEFV.



**Figura 4.10:** Gráfico de emissão de HC por via comparando resultados do IEFV com microssimuladores CORSIM e AIMSUN. (Fonte: Elaboração própria, 2023).

A comparação gráfica entre os resultados obtidos entre o AIMSUN e CORSIM para o desempenho das estimativas das emissões pode ser observada em cada tipo de emissão e a ferramenta que obteve seus dados mais próximos dos inventariados foi o AIMSUN em sua maioria de vias estimadas, Em vias microssimuladas congestionadas o CORSIM teve maiores variações de NOX evidenciando o impacto de haver maiores emissões nessas condições, apesar de haver necessidade de calibrar os sistemas dos microssimuladores, ambos obterem algoritmos diferentes, são uma ótima ferramenta de planejamento e podem ser indicados para avaliarem medidas de mitigação em regiões onde há grandes emissões de fontes veiculares ou em estudos onde apresentem cenários propostos com impactos.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo é descrita a última etapa do método proposto, buscando apresentar as conclusões a respeito do trabalho. As indagações, que motivaram a realização da pesquisa, apresentadas no primeiro capítulo, serão aqui respondidas. Para tanto, o presente capítulo está dividido em três seções: (5.1) Breve exposição do trabalho; (5.2) Revisão teórica; (5.3) Detalhamento da proposta; (5.4) Experimento e Análise de

Resultados; (5.5) Principais conclusões; (5.6) Sugestões para trabalhos futuros.

## 5.1. BREVE EXPOSIÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho integra a linha de pesquisa desenvolvida no Laboratório de Transportes Sustentáveis do Programa de Engenharia de Transportes da COPPE/UFRJ sob orientação da Professora Andrea Souza Santos. Esta linha aspira compreender os impactos, sob a ótica da sustentabilidade social, econômica e ambiental, que veículos movidos a combustão podem ocasionar, durante a circulação e de bens e pessoas em áreas urbanas adensadas, onde é verificada a presença de vários polos geradores de viagens e serviços.

A meta deste trabalho foi analisada e comparada a capacidade de se modelar a emissão de poluentes provenientes dos veículos em áreas urbanas adensadas, por meio de inventários de emissões de fontes veiculares e simulação de tráfego, em conjunto ao seu comparativo com emissões estimadas em inventários. Para isto, quatro objetivos foram estabelecidos para o alcance da meta:

- i. desenvolvimento de uma metodologia de coleta de emissão de poluentes provenientes de inventários e preparação de dados para uso dos mesmos nos microssimuladores;
- ii. análise do desempenho de simuladores de tráfego integrados a modelos de emissão, objetivando estabelecer relações que possibilitem identificar qual (ais) mais se aproxima (m) das medidas de desempenho obtidas em estimativas inventariadas por metodologia *Bottom-up*;
- iii. comparação das emissões provenientes de veículos inventariados no IEFV como veículos leves, veículos médios e veículos pesados, com os microssimuladores AIMSUN e CORSIM tendo em vista que este tipo de ação tem sido proposta como uma das principais medidas mitigadoras adotadas para melhoria da mobilidade urbana em municípios brasileiros; e
- iv. confronto entre as emissões estimadas em inventários com as microssimuladas.

Serão discutidas, brevemente, as conclusões para cada uma das etapas que

constituíram o método.

## 5.2. REVISÃO TEÓRICA

Através da revisão de literatura foi possível perceber que a maioria dos estudos para o processo de planejamento urbano não consideram os impactos ambientais decorrentes das emissões provocadas pelos veículos, mas avaliam, principalmente, questões relacionadas aos impactos no tráfego. Considerando a ausência dos estudos no âmbito das emissões é que buscou-se desenvolver o presente trabalho.

Além disso, foi possível compreender que a modelagem de emissões pode ser utilizada como ferramenta para inclusão de discussões ambientais, quando realizados estudos para o processo de planejamento urbano

## 5.3. DETALHAMENTO DA PROPOSTA

As vantagens da proposta apresentada são: desenvolvimento de uma metodologia de dados de emissões já existentes, onde considera as emissões no ambiente de uma grande região de uso comum de vários tipos de veículos, diferentemente de métodos estáticos de coleta, comumente utilizados; a coleta possibilitou avaliar o dinamismo do tráfego nas emissões; verificar particularidades da modelagem de emissões de veículos, como dimensões, tipos de poluentes, entre outros.

## 5.4. EXPERIMENTO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Contando com o apoio do Laboratório de Transportes Sustentáveis do PET-COPPE-UFRJ, dos dados do IEFV do INEA e da Companhia de Engenharia de Tráfego do Rio de Janeiro CET-Rio, foi possível construir a metodologia de coleta com recursos e equipamentos já existentes e com a aquisição de novas informações durante o período da pesquisa.

Foi observada a capacidade de edição de características veiculares em cada um dos simuladores analisados, tendo o simulador de tráfego AIMSUN se mostrado com maior capacidade de edição de parâmetros e o simulador CORSIM com a maior capacidade de variar as emissões em vias urbanas e vias expressas, o que pode interferir diretamente nos modelos de emissão integrados, pois todos consideram a velocidade e

aceleração, pela edição das características dos veículos.

Os simuladores de tráfego são capazes de realizar a modelagem de emissão, porém com vantagens e limitações para tipos distintos de poluentes. Tal fato levou a conclusão que AIMSUN e CORSIM são capazes de gerar resultados menos piores, quando comparados aos dados inventariados, conforme apresentados nas tabelas 4.3, 4.4 e 4.5, pois levam em conta as condições de tráfego e utilizam parâmetros de aceleração e desaceleração, declividade da via e engarrafamentos em uma situação em que há empregado e esforço de calibração dos modelos de emissão. Reforça-se aqui que ao longo da pesquisa bibliográfica, os relatos sobre a calibração dos modelos de emissão em análises de sistemas de transportes foram mínimos, praticamente escassos.

## 5.5. PRINCIPAIS CONCLUSÕES

Observou-se que modelos de emissão de poluentes integrados a simuladores de tráfego podem ser usados como ferramentas para estudos de emissões tabelados, porém, pela discrepância observada dos dados coletados em inventários e os gerados pelos simuladores, faz-se necessário um processo acurado de calibração dos modelos, tendo em vista que os valores calibrados default foram obtidos para realidades distintas das áreas urbanas adensadas brasileiras, avaliada no presente esforço.

Os modelos de emissão integrados aos simuladores AIMSUN e CORSIM apresentam, como dados de entrada, as velocidades e acelerações, para o cálculo das emissões, tipos de veículo (caminhões, no caso), o que pode ter levado a valores mais distantes dos reais (em função das diferentes características veiculares do país onde foi construído o modelo).

Foi possível comparar estimativas de emissões com a metodologia bottom-up com as ferramentas de microsimulação, porém, problemas (com possível correção) ocorreram durante o processo de coleta, como: conversão de dados para um sistema de referência; manipular os dados para representação em microescala, por conta do tempo de simulação em 1 hora, no horário de pico onde há maior emissão dos poluentes.

Através dos dados estimados, foi observado que as emissões de HC, CO e HC aumentam com o aumento no fluxo de tráfego, porém para os trechos congestionados na microsimulação foi observada uma variação muito maior, portanto, para estudos onde serão consideradas trechos congestionados, deve-se considerar como prejudicial o aumento no fluxo de veículos e nos trechos congestionados as emissões dos veículos.

Os parâmetros observados foram: capacidade de se considerar o tipo de veículo desejado (veículos pesados, leves e médios); capacidade de analisar os principais tipos de poluentes emitidos pelo veículo em estudo (no caso, 3 tipos de veículos); proximidade dos dados de emissão disponibilizados pelo simulador com os dados de emissão coletados na realidade analisada.

Por este esforço de pesquisa notou-se que medidas mitigadoras adotadas podem trazer interferências no sistema de transporte e na mobilidade urbana, não garantindo a manutenção da sustentabilidade, sendo aqui observada sob o princípio ambiental. Notou-se que veículos com maior dimensão, contribuíram para uma menor emissão de poluentes, quando comparado ao veículo regulamentado. Tal constatação merece um pouco mais de análise e reflexão, principalmente ao se analisar apenas um tipo representativo de cada categoria. Assim, tal questionamento ainda merece maior atenção e esforço de pesquisa.

## 5.6. SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTUROS

A modelagem de emissão de poluentes é um campo de pesquisa que ainda permite muitos estudos. A abordagem apresentada neste trabalho verificou apenas uma parte muito específica. Desta forma, serão listados alguns pontos que podem servir de base para pesquisas futuras.

Analisar as propostas de modelos de emissão, com o objetivo de verificar seu comportamento, em função de suas premissas, quando comparado com coletas em campo.

A realização da calibração do modelo matemático de emissão, com o objetivo de obter dados mais próximos dos coletados em campo.

Verificar o comportamento das emissões com a metodologia em vias e em outros tipos de veículos e confrontá-los com os dados simulados;

Avaliar quais as principais características de desempenho ambiental devem ser consideradas ao analisar a mobilidade urbana e analisar metodologias que contribuam para a proposição de medidas que sejam eficientes do ponto de vista ambiental.

Avaliar as implicações, em termos de emissões de poluentes e tráfego, que podem ser obtidas com inserção de tecnologias que buscam minimizar as emissões de poluentes.

Compreender o fenômeno da dispersão de poluentes atmosféricos e sua relação com o tráfego na análise de um sistema de transporte e avaliar as características de um modelo de simulação de tráfego que devem ser consideradas em estudos de mobilidade em áreas urbanas.

Para trabalhos futuros poderiam realizar simulações de tráfego de emissão considerando todas as premissas da metodologia descrita no Inventário do INEA (INEA, 2016). Além disso, poderia realizar simulações de todas as vias consideradas no anexo para estimar as concentrações em horários de pico e propor mitigações nos cenários e trechos críticos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL. 2006, Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. *Manual de Estudos de Tráfego*. Rio de Janeiro. 384 p. (IPR. Publ., 723)

BRASIL. 2011, Ministério do Meio Ambiente. Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas Por Veículos Automotores Rodoviários. Relatório final. Disponível em: [https://energiaambiente.org.br/wp-content/uploads/2011/01/projeto\\_iema.pdf](https://energiaambiente.org.br/wp-content/uploads/2011/01/projeto_iema.pdf). Acesso em: 13 nov. 2023

BRASIL. 1997, *Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997*. Institui o Código de Trânsito Brasileiro. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/19503compilado.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19503compilado.htm). Acesso em: 13 nov. 2023.

BRASIL. 2022, Ministério da Infraestrutura. Secretaria Nacional de Trânsito. *Portaria Nº 268, de 14 de março de 2022*. Homologa os veículos e as combinações de veículos de carga e de passageiros, constantes no Anexo desta Portaria, com seus respectivos limites de pesos e dimensões. Disponível em: <https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/arquivos-senatran/portarias/2022/Portaria2682022.pdf>. Acesso em: 13 nov. 2023.

CETESB. **2021**, *Nota Técnica 01.1: Quantificação e Relato de Emissões de Gases de Efeito Estufa*. 2021. São Paulo: CETESB..

COSTA, P. F. A. 2017, *Modelação de uma rede de transporte em meio urbano*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, Universidade do Minho.

DE BRITTO PORTO, A. B.; DE ABREU, V. H. S. 2020, Microsimulação para análise de rotatórias: um estudo bibliométrico. *Brazilian Journal of Production Engineering*, v. 6, n. 1, p. 130-142.

BORGES, Fábio de Souza Pereira. Modelo inteligente de controle adaptativo de tráfego urbano. 2022.

BRASIL. 2009, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Relatório de avaliação dos resultados. Relatório de projeto: Identificação de Sistemas de Pesagem em Movimento, Convênio TT 102/2007. Disponível em: <https://www.labtrans.ufsc.br/wp-content/uploads/2020/12/Identificacao-de-Sistemas-de-Pesagem-em-Movimento.-Sistemas-de-Pesagem-em-Movimento---WIM.-DNIT-sem-data..pdf> Acesso em: 13 nov. 2023.

BRASIL. 2010. Departamento Nacional de Trânsito. *Portaria Nº 870 de 26 de outubro de 2010*. Disponível em: <https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/arquivos-senatran/portarias/2010/portaria8702010.pdf>. Acesso em: 13 nov. 2023.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Manual de estudos de tráfego. Rio de Janeiro, 2006. 384 p. (IPR. Publ., 723).

DE NEGREIROS DOURADO, L. et al. 2016, Ensino de Engenharia de Tráfego com Apoio de Softwares de Simulação. COBENGE 2016 XLIV Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia 27 a 30 de setembro de 2016. Disponível em: [https://www.mackenzie.br/fileadmin/OLD/62/ARQUIVOS/PUBLIC/user\\_upload/\\_imported/fileadmin/LABGEO/Trabalhos/Cobenge2016/ENSINO\\_DE\\_ENGENHARIA\\_DE\\_TRAFEGO\\_COM\\_APOIO\\_DE\\_SOFTWARES\\_DE\\_SIMULACAO.pdf](https://www.mackenzie.br/fileadmin/OLD/62/ARQUIVOS/PUBLIC/user_upload/_imported/fileadmin/LABGEO/Trabalhos/Cobenge2016/ENSINO_DE_ENGENHARIA_DE_TRAFEGO_COM_APOIO_DE_SOFTWARES_DE_SIMULACAO.pdf) Acesso em: 13 nov. 2023.

DIAS, L. A. F. B. 2021, *Modelos de Correntes de Tráfego*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Porto, Portugal.

DIAS, Helry Luvillany Fontenele. Análise da modelagem integrada da emissão de poluentes atmosféricos provenientes de veículos transportadores de carga em área urbana. 2014.

GOMES, G. et al. 2015. *Análise comparativa das características de tráfego calculadas pelo HCM-2010 e pelo microssimulador Aimsun para uma área de estudo em Santa Catarina*. Dissertação (Mestrado) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

INEA - INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE. Emissões de Fontes Veiculares da Região Metropolitana do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro [s.l.], p.352, 2016.

IPCC. (2014). CLIMATE CHANGE SYNTESIS REPORT AR5. In ipcc. [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(00\)00575-3](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(00)00575-3)

JACOB, B.; COTTINEAU, L. M. 2016, Weigh-in-motion for Direct Enforcement of Overloaded Commercial Vehicles. *Transportation Research Procedia*, v.14, p. 1413–1422.

JACOB, B.; FEYPELL-DE LA BEAUMELLE, V. 2010, Improving truck safety: Potential of weighin-motion technology. *IATSS Research*, v.34, n.1, p.9-15.

LOUREIRO, L. N. Panorâmica sobre Emissões Atmosféricas Estudo de Caso: Avaliação do Inventário Emissões Atmosféricas da Região Metropolitana do Rio de Janeiro para Fontes Móveis. 2005.153f. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2005.

MOREIRA, R. B. 2005, *Uma contribuição para avaliação do modelo “corsim” em simulações de tráfego urbano no rio de janeiro*. 139f. 2005. Tese (Mestrado em Engenharia) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

NAZARETH, V. S.; de SOUZA, L. A. P.; RIBEIRO, P. C. M. 2015, *Análise comparativa entre simuladores de fluxo de tráfego*. XIII Rio De Transportes. Programa de Engenharia de Transportes Universidade Federal do Rio de Janeiro.

POYARES, C. N. 2000, *Critérios para Análise dos Efeitos de Políticas de Restrição ao Uso de Automóveis em Áreas Centrais*. Dissertação. COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

RIBEIRO, S. K. et al. 2003, *Transporte mais limpo*. Rio de Janeiro: Instituto Virtual de Mudanças Globais (IVIG) da COPPE.

SANTOS, A. S.; RIBEIRO, S. K. 2015, The role of transport indicators to the improvement of local governance in Rio de Janeiro City: A contribution for the debate on sustainable future. *Case Studies on Transport Policy*, v. 3, n. 4, p. 415–420.

SANTOS, Solange Maria; NORONHA, Daisy Pires. O desempenho das universidades brasileiras em rankings internacionais. *Em Questão*, p. 186-219, 2016.

SOARES et al., 2018. Avaliação do impacto na qualidade do ar após implantação do BRS no Rio de Janeiro. *Revista Internacional de Ciências*. Rio de Janeiro , p. 203– 220, 2018.

SOARES, Laiza Molezon et al. Previsão das emissões veiculares com a implantação gradativa de veículos híbridos e elétricos na cidade do Rio de Janeiro. 2019.

SORRATINI, José Aparecido; MACÊDO, Márcia Helêna; SILVA, A. R. Avaliação do desempenho e capacidade de rótulas urbanas–estudo de caso. *Ciência e Engenharia*, v. 11, n. 1, p. 19-26, 2002.

SOUZA, V.; SANTOS, A. 2021. Estimativa das emissões de gases de efeito estufa do setor de transportes na Cidade Universitária da UFRJ. In: SANCHES, E. (Org.). *Coleção Desafio das Engenharias: Engenharia de Transporte*. Ponta Grossa: Atena. p.01-16

VENTURA, L. M. B.; LOPES, J. S. . Evolução dos inventários de emissões veiculares da Região Metropolitana do Rio de Janeiro. *REVISTA INEANA (REVISTA TÉCNICA DO INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE, RJ)*, v. 4, p. 64-83, 2016.7

VENTURA, L.; SOARES, M.S.; LOPES, J.S. Evolução da Política do Controle da Poluição Veicular nos Últimos 30 anos. 1ª ed. Editora Prismas, p. 95, 2019.

WEI, Y. et al. 2019, Vehicle emission computation through microscopic traffic simulation calibrated using genetic algorithm *Journal of Artificial. Intelligence and Soft Computing Research*, v. 9, n.1, p. 67-80.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. Exposure to air pollution: A major public health concern. Disponível em: <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/air-quality-and-health/healthimpacts/exposure-air-pollution>. Acesso em: 29 mar. 2023.