ALESSANDRO SANTIAGO DOS SANTOS

**Análise espaçotemporal da qualidade do ar em vias urbanas por meio de
Redes de Sensores com nós embarcados em ônibus coletivos**

Tese apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Doutor em
Ciências.

Área de Concentração: Engenharia de
Transportes.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Pimentel
Cintra.

São Paulo
(2018)

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Santos, Alessandro Santiago dos

Análise espaçotemporal da qualidade do ar em vias urbanas por meio de Redes de Sensores com nós embarcados em ônibus coletivos / A. S. Santos -
- versão corr. -- São Paulo, 2018.
197 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1.Redes de Sensores sem fio 2.ITS 3.Cidades Inteligentes
4.Poluição Atmosférica 5.SIG I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II.t.

SANTOS, A. S. **Análise espaçotemporal da qualidade do ar em vias urbanas por meio de Redes de Sensores com nós embarcados em ônibus coletivos.** 2018. 192 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

Aprovado em: 08/12/2017

Banca Examinadora

Prof. Dr. Jorge Pimentel Cintra (Presidente)

Instituição: Escola Politécnica – Universidade de São Paulo - USP

Prof. Dr. Claudio Luiz Marte

Instituição: Escola Politécnica – Universidade de São Paulo - USP

Prof. Dr. Flavio Guilherme Vaz de Almeida Filho

Instituição: Escola Politécnica – Universidade de São Paulo - USP

Prof. Dra. Regina Maura de Miranda

Instituição: Escola de Artes, Ciências e Humanidades – Universidade de São Paulo – USP

Prof. Dra. Flavia da Fonseca Feitosa

Instituição: - Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas - UFABC

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha esposa Sandra Quintino e as minhas filhas Yasmin e Lavínia, que tão cedo já descobriram que há momentos, onde o papai nem sempre está presente como gostaria.

Agradeço ao Professor Edvaldo Simões no apoio para a aquisição dos sensores, o que se tornaram um desafio, com vários percalços, e dificuldades burocráticas de importação, mas que foram superadas com sua persistência e habilidade. Agradeço também ao CNPq pelo suporte financeiro a esta compra.

Agradeço à Professora Regina Miranda, que se mostrou muito colaborativa e disponibilizou acesso as instalações do IAG para o processo inicial de calibração dos sensores.

Agradeço ao IPT, que possibilitou e compatibilizou meu horário de trabalho, com as atividades do doutorado. Em especial aos técnicos Edson Pistoni e Roberto Gonçalves, e o estagiário Icaro Gonçales, cujo apoio foi fundamental na montagem do encapsulamento do equipamento sensor para hospedá-lo em cima do veículo, além do pesquisador Luiz Gustavo Faccini, que me ajudou a explorar as funcionalidades do ArcGIS. Agradeço também, a Fundação de apoio ao IPT, que financiou a segunda versão do kit sensor, parte fundamental para realização dos testes finais.

Por fim, agradeço ao orientador Professor Jorge Cintra e ao Professor Claudio Marte, na dedicação e compreensão dos desafios deste aluno, em seu caminho para a conclusão da presente tese.

Meu objetivo não é ganhar uma série de corridas neste ano. Meu objetivo é dar o máximo e o melhor de mim. Minha motivação é a busca da perfeição, a busca de me aperfeiçoar sempre, de aprender sempre. Talvez nunca se chegue à perfeição absoluta, mas meu objetivo é chegar lá.

(Ayrton Senna)

RESUMO

Os veículos que compõem o tráfego urbano são considerados como o principal agente causador de poluição afetando diretamente a qualidade do ar nas cidades, sendo um desafio ter mecanismos de monitoramento que possibilitem uma visão geral das condições ambientais. Para proporcionar uma visão abrangente seria necessário um grande número de estações fixas de monitoramento da qualidade do ar, além de um incremento constante para acompanhar o crescimento da cidade. Neste cenário, surge a oportunidade de instrumentação de ônibus coletivo com sensores que medem a qualidade do ar durante seu trajeto, assim aproveitando as características de mobilidade do transporte público, o qual transita em áreas povoadas, com postura dinâmica de crescimento, adaptando-se de forma coerente à mutabilidade populacional e geográfica da cidade. A presente tese apresenta novas formas de realizar análises espaçotemporais da qualidade do ar de regiões urbanas. Os modelos cartográficos criados permitem analisar regiões mapeadas usando perspectivas espaciais e temporais com informações obtidas de kits sensores móveis, para análises a cada 100 metros, promovendo uma resolução maior que os modelos tradicionais de monitoramento (escala quilométrica), os quais ainda não oferecem esta possibilidade. Esta maior resolução permite uma nova perspectiva de análises de microrregiões e, desta forma, permite que os especialistas ou gestores urbanos possam entender melhor as situações, ao utilizarem as ferramentas e recursos apresentados pela presente tese. Para atingir os objetivos optou-se pela criação e validação de um kit sensor para ser hospedado em ônibus coletivo, o qual foi validado e testado, quanto à sua eficiência de medição. Este kit foi integrado a uma plataforma computacional construída para extrair e processar informações com algoritmos matemáticos. Todos os componentes da plataforma foram legitimados com experimentos que confirmaram as hipóteses inicialmente formuladas para validação. E por fim, mapeamentos com mais de 70 mil pontos foram utilizados na criação de modelos espaçotemporais para realização de estudo de caso de regiões da cidade de São Paulo, os quais demonstraram os usos potenciais das proposições desta tese.

Palavras-Chave: Redes de Sensores sem fio. ITS. Cartografia Digital. Cidades Inteligentes. Qualidade do Ar. SIG. Análise espaçotemporal. Mapas temáticos.

ABSTRACT

The vehicles in urban traffic are considered as the main cause of urban pollution with a direct impact on air quality, being a challenge to have monitoring tools that enable an overview of the environmental conditions influenced by vehicle emissions. One option is to instrument the entire city with low-cost fixed sensors to collect environmental data; however, to provide a comprehensive view would require a large number of sensors, and a constant increase to follow the growth of the city. In this scenario, arises the opportunity for urban bus instrumentation with sensors that measure the environmental pollution, to take advantage of the mobility characteristics of public transport, which moves in populated areas, with dynamic attitude of growth, adapting in a coherent way to population and geographic variability of the city. This PhD Thesis proposes the monitoring of air quality inside urban roads by Wireless Sensor Networks (WSN), hosted on city buses. Thus, new ways of performing spatiotemporal analyzes of the air quality of urban regions are possible with the cartographic models created by this thesis. These allow to analyze mapped regions using spatial and temporal perspectives with information obtained from mobile sensor kits, for analyzes every 100 meters, promoting a resolution higher than the traditional monitoring models (kilometer scale), which still do not offer this possibility. This higher resolution allows a new perspective of analyzes of micro regions and, in this way, allows specialists or urban managers to have a better understanding of the urban scenario. Sensor kits are created to be hosted by bus, which has been validated and tested for its efficiency in measurement. This was integrated into a computational platform built to extract and process information with mathematical algorithms. All the components of the platform were validated with experiments that confirmed the hypotheses originally formulated for validation. Finally, mappings with more than 70,000 points were used in the creation of spatiotemporal models for the study of the case of regions of the city of São Paulo, which denoted the potentials constructed by this thesis.

Keywords: Wireless Sensor Networks. ITS. Digital Cartography. Smart Cities. GIS. Spatio-temporal analysis. Air quality. Thematic maps.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Visão Geral do ecossistema de cidades inteligentes: infraestrutura em verde, pessoas em amarelo e operações em azul.	8
Figura 2 - Sentidos e cidades e o possível estabelecimento de uma analogia	9
Figura 3 - Arquitetura de monitoramento por sensores embarcados em ônibus	12
Figura 4 - Cenário e etapas de implantação de RSSF	16
Figura 5 - Blocos Funcionais do hardware de nós de RSSF	17
Figura 6 - Sensores de projetos acadêmicos de pesquisa	18
Figura 7 - Exemplos de nós de RSSF modernos.....	19
Figura 8 - Nós sensores encapsulados e preparados para uso externo.....	20
Figura 9 - Histórico das operações de redes estaduais de monitoramento	22
Figura 10 – Representação da concentração de poluição por diferentes tipos interpolações	26
Figura 11 - Localização dos componentes IoT no centro de Santander	28
Figura 12 – <i>Mitos</i> . Interface web do Experimento piloto no projeto SmartSantander	29
Figura 13 – <i>Ekobus</i> . Experimento piloto no projeto SmartSantander	29
Figura 14 – Ambiente ciberfísico para análise espaçotemporais da qualidade do ar de alta resolução	33
Figura 15 - Arquitetura de monitoramento por sensores embarcados em ônibus ..	34
Figura 16 – Linha do tempo das versões dos nós sensores.....	37
Figura 17 - Componentes dos kits de sensores Libelium	39
Figura 18 - Sensores de NO ₂ , CO ₂ , CO, O ₃ , temperatura e umidade.....	39
Figura 19 - <i>Smart gases board</i> (esquerda); Waspote com WiFi, 3G, GPS, bateria	39
Figura 20 - Kit Montado e conectado à bateria	40
Figura 21 - Kit Montado com cola quente para fixar componentes	40
Figura 22 - Kit Montado no suporte para fixação em veículo	41
Figura 23 - Kit Montado fixado em veículo de passeio	41
Figura 24 - Kit móvel com ventoinha instalada	41
Figura 25 – Visão interna e externa do kit móvel com encapsulamento IP65.....	42
Figura 26 - Visão do túnel para fluxo de ar com os sensores no topo	42
Figura 27 – Kit de sensores – Waspote Gas PRO.....	43
Figura 28 – Projeto da versão com impressão 3D.....	43
Figura 29 – Fotografia do módulo gerado na impressora 3D.....	43
Figura 30 - <i>Libelium</i> IDE	44
Figura 31 - Fluxograma do programa de coleta de dados	45
Figura 32 - Arquivo CSV com as informações extraídas do nó sensor.....	47
Figura 33 – Ensaio de verificação de calibração dos kits sensores.....	49
Figura 34 – Dispersão dos valores de Monóxido de Carbono dos kits número 3 e 4	49
Figura 35 - Arquitetura de transmissão/Armazenamento	52
Figura 36 – <i>Script</i> de criação da tabela principal de armazenamento de dados.....	52
Figura 37 – <i>Scripts</i> da <i>View</i> que representa as composições temporais.....	53
Figura 38 – Etapas metodológica para projeção espaçotemporal	55
Figura 39 – Etapas metodológica de ETL.....	56
Figura 40 – Aplicação realizando a importação da coleta de dados dos sensores.....	57
Figura 41 – Etapas metodológica para a Composição de aspectos temporais	58
Figura 42 – Perfil típico da concentração de gases durante o dia	59

Figura 43 – Comparação dos gráficos de concentração diária de NO ₂ com valores: absoluto, padronizado e normalizado.....	61
Figura 44 – Etapas metodológica para a Composição de aspectos espaciais.....	63
Figura 45 – Preenchimento de parâmetros para realização de interpolação IDW ..	65
Figura 46 – Exemplo de projeção de camada cartográfica após as etapas metodológicas	67
Figura 47 – Trajeto fictício de linha de ônibus coletivo	69
Figura 48 – Projeções dos valores absolutos e relativos em relação ao trajeto fictício	69
Figura 49 - kit sensor versão 1.2 e kit sensor versão 1.3 (com cooler instalado)....	77
Figura 50 - Local da realização dos experimentos.....	78
Figura 51 - Veículo no trecho do Experimento (em movimento e estático).....	79
Figura 52 - Resistência do sensor de O ₃ no Ensaio 1 – valor médio a cada 10 minutos.....	80
Figura 53 - Dispersão dos valores da Resistência do sensor de O ₃ no Ensaio 1	81
Figura 54 - Tensão no sensor de CO no Ensaio 1– valor médio a cada 10 minutos	81
Figura 55 - Dispersão da Tensão no sensor de Dióxido de Carbono (CO ₂).....	81
Figura 56 - Gráfico de referência de O ₃ em ppb apresentado pelos equipamentos do LAPAt.....	82
Figura 57 - Gráfico de referência de O ₃ em µg/m ³ apresentado pela estação USP da CETESB.....	82
Figura 58 – Dispersão dos valores da resistência do sensor de O ₃ – Ensaio 2	83
Figura 59 - Resistência do sensor de O ₃ – Ensaio 2	84
Figura 60 - Trajeto do experimento em vias de alto volume de tráfego.....	87
Figura 61 - Fotos do Trajeto – Vd. Jabaquara/Aeroporto/Vd. Santo Amaro/IPT (esq. para direita)	89
Figura 62 – Gráficos de valores médios por trecho durante o dia e noite	90
Figura 63 - Pontos coletados com informações dos sensores de CO de manhã	91
Figura 64 - Projeção das condições de tráfego típico de uma terça-feira as 09h....	93
Figura 65 - Trajeto de IDA e Volta da linha 535 em Juiz de Fora - MG.....	95
Figura 66 – Instalação do kit sensor na Cid. Universitária	96
Figura 67 - Trajeto da linha 535 (corredor no centro; av. pres. Itamar; morro e a Cid. Universitária)	97
Figura 68 – Projeção dos pontos coletados durante o experimento.	98
Figura 69 – Médias horárias de temperaturas e umidade por trecho.....	100
Figura 70 – Médias horárias de concentração de CO ₂ por trecho*.	100
Figura 71 – Médias horárias de concentração de O ₃ e NO ₂ por trecho†.....	100
Figura 72 – Mapa com o valor da resistência do sensor de O ₃ na rota da linha 535	101
Figura 73 – Mapa com o valor da resistência do sensor de NO ₂ dia 03/09, período matutino	102
Figura 74 – Mapa com valor da resistência do sensor de NO ₂ dia 02/09, período vespertino.....	102
Figura 75 – Perfil típico de trânsito dos dias e horários do experimento (manhã e tarde).....	103
Figura 76 – Chamado para a carreata de veículos elétricos	105
Figura 77 - Trajeto da carreata.....	106
Figura 78 - Fotos da instalação do kit no Ônibus da BYD no dia da carreata	107
Figura 79 - Fotos da carreata na Avenida Paulista	108

Figura 80 – Área de cobertura das medidas.....	108
Figura 81 – Mapeamento de concentração de CO no dia da Carreata	110
Figura 82 – Mapeamento de concentração de CO no sábado normal	111
Figura 83 – Mapeamento de concentração de CO na sexta normal.....	111
Figura 84 – Veículos instrumentados	117
Figura 85 - Estações da Região Metropolitana de SP	118
Figura 86 – Médias anuais de CO nas estações das Zonas Central e Leste da RMSP	119
Figura 87 – Distribuição percentual da qualidade do ar para O ₃ na RMSP	120
Figura 88 – Relatório de Sistema sobre a distribuição da qualidade do ar para Est. Parque D. Pedro II	121
Figura 89 – Relatório de Sistema sobre a distribuição da qualidade do ar para Estação Mooca	121
Figura 90 – Trajeto da Linha 2002-10 com a demarcação dos pontos coletados.	122
Figura 91 – Gráfico dos valores horários médios dos poluentes coletados pela Estação CETESB - Pq. Dom Pedro II	125
Figura 92 – Gráfico dos valores horários médios dos poluentes coletados pelo mapeamento na Linha 2002-10.	125
Figura 93 – Modelo de representação relativo da concentração de CO na Zona Central de SP	126
Figura 94 – Modelo de representação absoluto da concentração de CO na Zona Central de SP	126
Figura 95 – Parte de Modelo absoluto por faixa horária de concentração de NO ₂ na Zona Central	127
Figura 96 – Modelo de representação relativa de CO com vista de satélite da Zona central de SP	128
Figura 97 – Detalhe da região crítica de CO com duas vistas superiores da Zona central de SP	129
Figura 98 – Visão 3D da região crítica de CO da Zona central de SP	129
Figura 99 – Foto do cruzamento com a Praça João Mendes	130
Figura 100 – Gráfico de dispersão das amostras de CO coletadas na região crítica	130
Figura 101 – projeção 3D do viaduto sobre a avenida 9 de julho	131
Figura 102 – projeção 3D do viaduto do Chá sobre o vale do Anhangabaú.....	131
Figura 103 – projeção 3D do largo de são bento.....	132
Figura 104 – projeção 3D da praça da República.....	133
Figura 105 – Foto panorâmica do cruzamento Av. São Luiz e Av. Consolação ...	133
Figura 106 – Pontos no trajeto da Linha 3160-10 TERM. PQ. D. PEDRO II / TERM. VL. PRUDENTE.....	134
Figura 107 – Gráfico de valores médios diários de NO ₂ coletados na Linha 3160-10	136
Figura 108 – Gráfico de valores médios diários de NO ₂ da estação CETESB - Parq. Dom Pedro II.....	136
Figura 109 – Gráfico de valores médios diários de CO coletados na Linha 3160-10	137
Figura 110 – Gráfico de valores médios diários de CO da estação CETESB - MOOCA	137
Figura 111 – Gráfico do dia que revelou valores mais elevados para NO ₂	138
Figura 112 – Modelo de representação relativo da concentração de CO na Zona Centro-Leste de SP	140

Figura 113 – Modelo de representação absoluta da concentração de CO na Zona Centro-Leste de SP	140
Figura 114 – Modelo absoluto por dia da semana de concentração de CO na Zona Centro-Leste	141
Figura 115 – Modelo de representação relativa de CO com vista de satélite do Centro-Leste de SP	142
Figura 116 – Detalhe da região crítica de CO com duas vistas superiores da Zona Central-Leste.....	143
Figura 117 – Visão 3D da região crítica de CO da Zona Centro-Leste de SP	143
Figura 118 – Gráfico de dispersão das concentrações de CO coletadas na região crítica.....	144
Figura 119 – Detalhe da região destaque 2 com duas vistas superiores do viaduto Trinta e um de março (linha branca indicando o trajeto)	145
Figura 120 – projeção 3D do viaduto Trinta e Um de Março sobre a Av. do Estado	146
Figura 121 – Detalhe da região destaque 2 com duas vistas superiores do viaduto Antônio Nakashima	146
Figura 122 – Detalhe dos pontos coletados durante o período dos experimentos da tese	154

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Poluentes do ar.....	20
Tabela 2 - Padrões e níveis dos poluentes do ar.....	23
Tabela 3 - Tipos de itens monitorados.....	36
Tabela 4 – Resumo das versões dos nós sensores	38
Tabela 5 - Dicionário de Dados do Arquivo Texto gerado pelo nó sensor	46
Tabela 6 - Especificações dos sensores e componentes do kit montado para os experimentos	48
Tabela 7 - Prós e Contras do tipo e posicionamentos dos sorvedouros	51
Tabela 8 - Critérios para exclusão de dados das análises.....	56
Tabela 9 - Padrões de representação espacial das estações.	62
Tabela 10 - Requisito para representação espacial na escala bairro de estações que monitoram CO	62
Tabela 11 – Valores fictícios de coleta de dados de 4 trechos de uma linha classificada por 4 quartis	70
Tabela 12 - Valores médios e desvio padrões obtidos com veículo estático no Ensaio 1.....	80
Tabela 13 - Valores médios e desvio padrão obtidos com veículo em movimento no Ensaio 1.....	80
Tabela 14 - Valores médios e desvios padrão obtidos com veículo estático no Ensaio 2.....	83
Tabela 15 - Valores médios e desvio padrão obtidos com veículo em movimento no Ensaio 2.....	83
Tabela 16 - Trechos de observação do experimento 2.....	87
Tabela 17 - Valores médios por trecho percorrido na manhã do dia 16-10	89
Tabela 18 - Valores médios por trecho percorrido na noite do dia 16-10	89
Tabela 19 – Trecho segregados para estudo e suas características.....	97
Tabela 20 – Valores médios e desvio padrão do Trecho “Cidade Universitária”	99
Tabela 21 – Valores médios e desvio padrão do Trecho “Centro II”	99
Tabela 22 – Valores médios e desvio padrão do Trecho “Centro I”	99
Tabela 23 – Estatística descritiva das coletas de dados do kit sensor no dia da carreta.....	109
Tabela 24 – Estatística descritiva das coletas de dados do kit sensor no Sábado tradicional	109
Tabela 25 – Estatística descritiva das coletas de dados do kit sensor no Sexta tradicional	110
Tabela 26 – Valores comparativos dos índices de poluição com nível de confiança de 95%.....	113
Tabela 27 – Resultados dos testes das hipóteses.....	115
Tabela 28 - Estações de monitoramento de CO na cidade de SP e sua classificação	118
Tabela 29 – Estatística descritiva dos valores de monóxido de carbono coletados	123
Tabela 30 – Estatística descritiva dos valores de ozônio coletados	124
Tabela 31 – Estatística descritiva dos valores de NO ₂ coletados	124
Tabela 32 – Estatística descritiva dos valores de CO coletados na Linha 3160-10	135
Tabela 33 – Estatística descritiva dos valores de O ₃ coletados na Linha 3160-10	135

Tabela 34– Estatística descritiva dos valores de NO ₂ coletados na Linha 3160-10	136
Tabela 35 – Estatística descritiva dos valores de CO após retirada de valores elevados.....	138
Tabela 36 – Estatística descritiva dos valores de NO ₂ após retirada de valores elevados.....	138
Tabela 37 – Estatística descritiva dos valores de O ₃ após retirada de valores elevados.....	139

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
1.1	JUSTIFICATIVA	10
1.2	PROPOSTA E OBJETIVOS	11
1.3	ORGANIZAÇÃO DA TESE.....	13
2	REVISÃO DA LITERATURA	15
2.1	REDES DE SENSORES SEM FIO	15
2.1.1	<i>Nós sensores</i>	<i>16</i>
2.2	MONITORAMENTO DA QUALIDADE DO AR	20
2.3	SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS	24
2.4	TRABALHOS RELACIONADOS COM A PRESENTE TESE	26
2.4.1	<i>Estudo de Caso: Smart Santander</i>	<i>27</i>
2.5	CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO.....	30
3	INFRAESTRUTURA E METODOLOGIA PARA ANÁLISE ESPAÇOTEMPORAL DE ALTA RESOLUÇÃO	32
3.1	PLATAFORMA TECNOLÓGICA	33
3.1.1	<i>Infraestrutura de sensoriamento</i>	<i>35</i>
3.1.2	<i>Infraestrutura de transmissão e armazenamento</i>	<i>50</i>
3.1.3	<i>Infraestrutura de processamento e visualização</i>	<i>53</i>
3.2	PROCESSO METODOLÓGICO PARA ANÁLISE ESPAÇOTEMPORAL	54
3.2.1	<i>Extração, transformação e carregamento</i>	<i>55</i>
3.2.2	<i>Composição de aspectos temporais.....</i>	<i>57</i>
3.2.3	<i>Composição de aspectos espaciais</i>	<i>61</i>
3.3	CRIAÇÃO DE MODELOS ESPAÇOTEMPORAIS DE INTERPRETAÇÃO ABSOLUTA E RELATIVA	67
3.3.1	<i>Construção de representação espaçotemporal absoluta</i>	<i>67</i>
3.3.2	<i>Construção de representação espaçotemporal relativa</i>	<i>68</i>
3.4	CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO.....	71
4	EXPERIMENTOS E HIPÓTESES DE VALIDAÇÃO	74
4.1	VALIDAÇÃO DO KIT SENSOR.....	76
4.1.1	<i>Objetivos e hipóteses de verificação</i>	<i>76</i>
4.1.2	<i>Materiais e métodos</i>	<i>76</i>
4.1.3	<i>Desenvolvimento do experimento</i>	<i>78</i>
4.1.4	<i>Resultados.....</i>	<i>79</i>
4.1.5	<i>Discussão dos resultados</i>	<i>84</i>
4.2	MAPEAMENTO DE VIAS DE ALTO VOLUME DE TRÁFEGO	85
4.2.1	<i>Objetivos e hipóteses de verificação</i>	<i>86</i>
4.2.2	<i>Materiais e métodos</i>	<i>86</i>
4.2.3	<i>Desenvolvimento do experimento</i>	<i>88</i>
4.2.4	<i>Resultados e representações espaçotemporais</i>	<i>89</i>
4.2.5	<i>Discussão dos resultados</i>	<i>91</i>
4.3	MAPEAMENTO DA QUALIDADE DO AR EM ROTA REGULAR DE ÔNIBUS COLETIVO	94
4.3.1	<i>Objetivos e hipóteses de verificação</i>	<i>94</i>
4.3.2	<i>Materiais e métodos</i>	<i>94</i>
4.3.3	<i>Desenvolvimento do experimento</i>	<i>96</i>
4.3.4	<i>Resultados e representações espaçotemporais</i>	<i>97</i>
4.3.5	<i>Discussão dos resultados</i>	<i>103</i>
4.4	MAPEAMENTO DA QUALIDADE DO AR DURANTE CARREATA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS.....	104
4.4.1	<i>Objetivos e hipóteses de verificação</i>	<i>105</i>
4.4.2	<i>Materiais e métodos</i>	<i>106</i>
4.4.3	<i>Desenvolvimento do experimento</i>	<i>107</i>
4.4.4	<i>Resultados e representações espaçotemporais</i>	<i>109</i>
4.4.5	<i>Discussão dos resultados</i>	<i>112</i>
4.5	CONSIDERAÇÕES SOBRE OS EXPERIMENTOS.....	114

5	ESTUDO DE CASO: CIDADE DE SÃO PAULO	116
5.1	REGIÕES DE ESTUDO: ZONAS CENTRAL E CENTRO-LESTE DE SP	117
5.2	ANÁLISE ESPAÇOTEMPORAL DA REGIÃO CENTRAL DE SP	122
5.2.1	<i>Representações espaçotemporais</i>	125
5.2.2	<i>Caracterização dos pontos relevantes das representações</i>	128
5.3	ANÁLISE ESPAÇOTEMPORAL DA REGIÃO CENTRO-LESTE DE SP	134
5.3.1	<i>Representações espaçotemporais</i>	139
5.3.2	<i>Caracterização dos pontos relevantes das representações</i>	142
5.4	CONSIDERAÇÕES DO ESTUDO DE CASO	147
6	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	149
6.1	PRINCIPAIS DIFICULDADES E APRENDIZADOS	151
6.2	PRINCIPAIS RESULTADOS E CONTRIBUIÇÕES	153
6.3	PERSPECTIVAS FUTURAS	155
	REFERÊNCIAS	157
	APÊNDICE A – GRÁFICOS DAS AMOSTRAS	163
	APÊNDICE B – REPRESENTAÇÕES CARTOGRÁFICAS DOS MODELOS ESPAÇOTEMPORAIS	166

1 INTRODUÇÃO

Viver nas regiões urbanas tem se tornado uma realidade cada vez mais presente na realidade mundial e estudos da ONU mostram que, no período de 1950 a 2011, a população mundial urbana passou de 26% para 51% do total, e já há perspectivas de que, em 2050, 70% da população mundial viverá em meio urbano (UNITED NATIONS, 2012). Considerando o território brasileiro, o censo demográfico de 2010 identificou que 84,4% da população vive em áreas urbanas (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2011). Esta constatação aponta para a criticidade e os desafios dos gestores públicos, na difícil missão de oferecer uma boa qualidade de vida aos cidadãos. Estes desafios exigem uma postura criativa e desafiadora dos gestores para tornar a vida nas cidades mais saudável e amigável.

Segundo Peter Drucker, a mudança da sociedade está intrinsicamente ligada às cidades, e o planejar no contexto de cidades carrega definições do planejamento geral.

A definição do 'Planejar', o institui como um processo contínuo de tomada de decisões, empreendedoras e atuais de forma sistemática e com o melhor conhecimento possível de seu futuro, organizando os esforços necessários para efetivar as decisões e avaliando periodicamente os resultados dessas decisões, face às expectativas, por meio de uma realimentação, igualmente organizada e sistemática (DRUCKER, 1992 apud WILHEIM, 2008).

Nesse contexto, o Plano Diretor urbano, que se tornou obrigatório a partir da Constituição federal de 1988 para todos os municípios com mais de vinte mil habitantes, deve definir uma lógica de ocupação urbana, visando integrar as políticas de transporte, trânsito, uso do solo e meio ambiente. O Plano Diretor de cada cidade não pode ser encarado apenas como um documento técnico, mas como um instrumento de desenvolvimento, que se baseia na compreensão integrada dos elementos sociais, culturais, ambientais, institucionais, políticos, econômicos, financeiros e espaciais, como condicionantes para alcançar os objetivos na gestão municipal (COSTA, 2008).

Este trabalho vem ao encontro das necessidades de entender melhor os fenômenos das cidades e oferecer mecanismos que auxiliem as decisões para promover a melhoria de qualidade de vida dos cidadãos. Esta proposta se alinha com as

prioridades governamentais, com a missão de se incluir como uma iniciativa para tornar as cidades mais inteligentes, com o suporte de uma plataforma de tecnologias da informação e comunicação.

O conceito de cidades inteligentes emerge em um momento onde se busca alternativas para os desafios modernos, em que vários aspectos sociais, culturais, políticos e econômicos devem ser considerados. Neste sentido, os avanços tecnológicos têm proporcionado novas possibilidades para as análises de perspectivas urbanas, permitindo o processamento de grande quantidade de informação. O complexo ecossistema das cidades pode ser segmentado conforme várias concepções, uma dessas (HARRISON et al., 2010) divide este ecossistema em três grupos: Infraestrutura, Pessoas e Operações (Figura 1).

Figura 1 - Visão Geral do ecossistema de cidades inteligentes: infraestrutura em verde, pessoas em amarelo e operações em azul.

Fonte: Harrison et al. (2010).

A cidade pode ser conceituada e comparada com um organismo vivo, com uma estrutura complexa em constante transformação, e para entendê-la é preciso buscar sua compreensão, diagnosticando e prognosticando, estabelecendo uma simplificação de seus elementos, a fim de estabelecer, tentativamente, quais elementos são predominantes, significativos e substantivos (WILHEIM, 2008).

Com esta concepção, pode-se realizar uma analogia com os cinco sentidos fundamentais dos seres humanos, que são estimulados por fenômenos externos. Estes estímulos possuem pelo menos quatro parâmetros: tipo, intensidade, localização e duração. A questão de ter vários sentidos é importante, porém o mais

importante é o que se faz com as informações recebidas. Exemplificando, em algumas situações quando o tato percebe uma intensidade de calor acima do tolerável, automaticamente ativa os mecanismos de proteção, que induzem a movimentação para afastar-se da fonte de calor. Ao mesmo tempo, o corpo aprende com o caso, sendo que no próximo episódio poderá obter informações de outros sentidos para evitar situações similares que poderão levar a uma má experiência novamente. Este processo de aprendizado é mais perceptível nos primeiros anos de vida, onde os bebês estão aprendendo com as inúmeras informações provenientes dos sistemas sensoriais do corpo, onde um suporte dos pais é necessário para a compreensão das informações recebidas (Figura 2).

Figura 2 - Sentidos e cidades e o possível estabelecimento de uma analogia

Fonte: Elaborado pelo autor.

Segundo esta analogia, quais seriam os sentidos das cidades? Como preparar a cidade para sentir seus fenômenos e o ambiente que está ao seu redor? Estamos em um estágio embrionário, neste caminho de aprendizado?

A presente tese situa-se na área de monitoramento da poluição ambiental, propondo metodologia e equipamentos alternativos, de baixo custo, para medição da qualidade do ar, fornecendo subsídios para análise e tomada de decisão.

1.1 JUSTIFICATIVA

Cada cidade tem sua própria conjuntura política, cultural, social e econômica, portanto não é possível um único cenário para estabelecer prioridades governamentais para as cidades. No entanto, alguns temas estão sempre presentes e figuram na agenda dos gestores de forma corriqueira, um deles é a mobilidade urbana. Neste tema estão inclusos discussões que envolvem impactos e benefícios gerados pelo transporte. Por exemplo, na cidade de São Paulo existe restrição de circulação de veículos em áreas delimitadas (centro expandido), assim como se discutem diferentes iniciativas para minimizar os efeitos das emissões veiculares, por exemplo, o programa “EcoFrota” - programa de ônibus urbanos que possuem menor emissão de gases em relação aos níveis tradicionais - com mais de 2.500 unidades implantadas, chegando atualmente a 16% da frota (SPTRANS, 2017).

As principais regiões metropolitanas brasileiras possuem mecanismos de monitoramento da qualidade do ar; no entanto, o primeiro diagnóstico das redes nacionais para este fim (INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE, 2014), sinaliza que partes importantes do Brasil não contam com monitoramento, e existem assimetrias estruturais significativas, entre as redes de monitoramento. Além disso, as estações de monitoramento são instaladas com uma cobertura mais abrangente possível, no entanto, esta característica projeta uma região com uma baixa resolução espacial de dados, assim, não permite que características de microrregiões sejam perceptíveis. A literatura já aponta que microrregiões com características da ocupação do solo, como: túneis, cruzamentos viários, e ruas flanqueadas por prédios em ambos os lados são pontos potenciais de concentração de poluentes (VASCONCELLOS; CARVALHO; POOL, 2005) (BARREFORS, 1996) (GOEL; KUMAR, 2015) (AHMAD; KHARE; CHAUDHRY, 2005). Surge então a dúvida de como minorar estas deficiências, e como avaliar os resultados de iniciativas de mitigação das emissões para poder apoiar a decisão do gestor público na definição de estratégias para melhorar a qualidade de vida dos cidadãos.

Uma opção para criar um arcabouço tecnológico de coleta de informações ambientais é instrumentar toda a cidade com sensores fixos. Nessa solução, para obter uma visão abrangente seria necessário um grande número de sensores, bem como seu incremento constante para acompanhar o crescimento da cidade.

Diante disso, uma alternativa surge quando se verifica que a malha de transporte público coletivo cobre as principais áreas povoadas, possui uma postura dinâmica de crescimento e se adapta de forma coerente com a mutabilidade populacional e geográfica das cidades. Principalmente considerando a proliferação dos cenários de corredores rápidos para o Transporte Público (*Bus Rapid Transport - BRT*). O BRT apresenta-se como a opção mais recomendada para sistemas de transporte de média capacidade; as suas linhas troncais preconizam: maior velocidade operacional, veículos de maior capacidade, vias segregadas, cobrança externa, meios eletrônicos de pagamento, embarque em nível, prioridade semafórica, entre outros (MARTE et al., 2012). Assim, sensores embarcados em plataformas móveis (ônibus ou BRT) podem cobrir uma área maior do que as cobertas pelos modelos tradicionais de uma rede fixa, com menor custo.

As cidades podem contar com mecanismos tecnológicos (sensores) que coletam informações de forma automatizada, criando uma base de conhecimento que permite estabelecer correlações entre informações históricas e condições mensuráveis de um conglomerado urbano. No entanto, os conglomerados urbanos devem ser repensados para se adaptarem e usufruírem dessas novas possibilidades, motivando um novo olhar do gestor público.

1.2 PROPOSTA E OBJETIVOS

Aproveitando dos princípios de mobilidade do transporte público, a presente tese propõe a utilização de ônibus urbanos como hospedeiros móveis de sensores ambientais, capturando dados sobre a qualidade de ar por onde trafegam, permitindo cobrir uma vasta região geográfica, com leituras periódicas. Uma possibilidade, entre outras, é a hospedagem dos sensores em ônibus urbanos preferencialmente com motorização elétrica e que trafegam em corredores BRT, para evitar uma hipotética interferência nas medidas provocada pelo próprio veículo hospedeiro. Assim, propõe-se uma concepção tecnológica de monitoramento das condições ambientais, afetadas principalmente pelas emissões veiculares, para fornecer ao gestor público, informações presentes e históricas da qualidade do ar. As informações coletadas pelos sensores hospedados são enviadas para Sistemas Inteligentes de Transporte em uma central de monitoramento, onde são integradas a Sistemas de Informações Geográficas, para análise (Figura 3).

Figura 3 - Arquitetura de monitoramento por sensores embarcados em ônibus

Fonte: Elaborado pelo autor.

Por exemplo, os modelos tradicionais fixos de monitoramento de qualidade do ar utilizam estações com sensores de alta precisão e acurácia, com um alto custo de implantação (INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE, 2014). O modelo aqui proposto baseia-se na análise de informações proveniente de vários sensores, que possuem um custo menor e facilitam o uso disseminado; mesmo que com acurácia menor, as coletas por vários sensores distribuídos no espaço e no tempo agregam um nível de confiabilidade satisfatório (SANCHEZ et al., 2014). Assim, o gestor público poderá ter uma visão abrangente das condições da cidade, de uma forma instantânea e ao longo do tempo, e poderá associar com estratégias adotadas para mitigar os efeitos indesejáveis gerados pelo transporte nas grandes cidades.

A presente tese tem como objetivo principal, a criação de modelos cartográficos com informações coletadas de forma distribuída por sensores móveis que permitam realizar análises espaçotemporais da qualidade do ar. Estes modelos devem se caracterizar pela maior resolução, se comparados com os modelos fixos tradicionais de monitoramento da qualidade do ar, permitindo assim, a interpretação de características e análises de microrregiões que não são perceptíveis com a atual rede fixa de sensores.

Para atingir o objetivo principal, algumas etapas e objetivos secundários são necessários a fim de estabelecer os princípios da tese:

- Criação de kit sensor de qualidade do ar, para ser hospedado em ônibus coletivo, que suporte os intemperes e vibrações naturais da operação de transporte, oferecendo informações de sensores calibrados e validados tecnologicamente.

- Criação de uma plataforma tecnológica para coletar, transmitir e processar dados provenientes de sensores móveis, para elaborar mapas cartográficos com informações que permitam análises espaçotemporais de microrregiões para auxiliar a tomada de decisões de gestores públicos, e/ou como instrumento informativo para a sociedade.
- Execução de experimentos de validação e estudos de caso para avaliação e análises espaçotemporais de regiões urbanas de uma grande metrópole, de forma a permitir interpretações e correlações com as características da ocupação do solo.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE

Neste capítulo 1 foi apresentado o contexto de cidades inteligentes, as principais razões e justificativas do tema desta tese, assim como a proposta e os objetivos.

O capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura, que aborda os aspectos fundamentais, como: redes de sensores sem fio, sistemas tradicionais de monitoramento de qualidade do ar e Sistema de Informações Geográficas (SIG), assim como os trabalhos correlatos.

O capítulo 3 descreve os componentes e as características da plataforma tecnológica utilizada para operacionalizar a leitura, coleta, transmissão e processamento dos dados da qualidade do ar. Neste, ainda se encontra o processo metodológico utilizado para criar os modelos cartográficos para as análises espaçotemporais.

O capítulo 4 revela os resultados de experimentos de validação do kit e da plataforma tecnológica. Neste incluem-se hipóteses levantadas e verificadas, com base nos experimentos: verificação se a movimentação do veículo hospedeiro do sensor promove alteração nas medidas realizadas; mapeamentos da qualidade do ar em vias de alto volume de tráfego e em rota regular de ônibus coletivo; e por fim o mapeamento da qualidade do ar durante a carreata de veículos elétricos e híbridos na Avenida Paulista.

O capítulo 5 apresenta a operacionalização de projeto piloto na capital paulista, que coletou informações contínuas em ônibus coletivos regulares em rotas no centro histórico e na região centro-leste da capital, durante três meses. Os dados foram

base para a realização de estudos de casos para avaliar a qualidade do ar, nas regiões monitoradas.

E por fim, as conclusões e considerações finais no capítulo 6. Este também consolida as principais dificuldades e aprendizados, os principais resultados e contribuições, assim como as perspectivas futuras.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo sintetiza os principais fundamentos conceituais que são abordados na presente tese. Está dividido em quatro grandes blocos fundamentais: Tecnologias para coleta de dados que é realizada por Redes de Sensores Sem Fio; Modelos tradicionais de monitoramento da qualidade do ar; Sistemas de Informações Geográficas (SIG); e por fim trabalhos correlacionados.

2.1 REDES DE SENSORES SEM FIO

Uma rede de sensores sem fio é um conjunto de nós sensores interligados. Estes nós sensores são pequenos dispositivos eletrônicos, geralmente consistindo de um micro controlador, uma unidade de rádio de curto alcance e de um ou mais transdutores atuando como sensores (ROSALES; GARCIA; SANCHEZ, 2009). Uma rede de sensores é um sistema baseado em eventos, com vários nós sensores que transferem dados por um elemento especial, o qual se comporta como canal para encaminhar as informações para outras redes (LEE; NA; HUH, 2012). A taxonomia de uma rede de sensores utiliza as seguintes terminologias (TILAK; ABU-GHAZALEH; HEINZELMAN, 2002):

- a) sensor: Dispositivo que detecta fenômenos físicos e faz medições ambientais, e implementa características para a comunicação de dados, geralmente sem fio;
- b) observador: O usuário final interessado em obter informações divulgadas pela rede de sensores sobre o fenômeno. O observador pode indicar interesses (ou consultas) para a rede e receber respostas a estas perguntas. Vários observadores podem existir em uma rede de sensores;
- c) fenômeno: A entidade de interesse para o observador que está sendo detectada e analisada pela rede de sensores. Vários fenômenos podem ser observados concorrentemente na mesma rede;
- d) sorvedouro: Dispositivo destino das informações coletadas pelos sensores da rede. Em muitos casos, este também se comporta como um elemento canal para encaminhar as informações para outras redes, e enviar dados ao observador.

O cenário de rede de sensores envolve uma área geográfica de observação que terá os fenômenos monitorados por sensores estrategicamente colocados, que enviarão as informações ao observador. Assim, em um cenário tradicional, escolhe-se a área alvo (Figura 4 parte a), realiza-se a colocação dos sensores (Figura 4 parte b), os quais utilizarão algoritmos para um reconhecimento da vizinhança (Figura 4 parte c), e por meio de auto-organização estabelecem uma rota de comunicação para transmitir o fluxo de dados ao observador (Figura 4 parte d).

Figura 4 - Cenário e etapas de implantação de RSSF

Fonte: Ruiz e Loureiro (2003).

2.1.1 Nós sensores

O nó sensor de RSSF geralmente tem dimensões pequenas. Apesar de não ser um requisito, podem existir sensores de maior porte; no entanto, a tendência é serem cada vez menores. Em consequência, os componentes possuem recursos funcionais mais limitados. O hardware pode ser construído com diversas técnicas de circuito e abordagem arquiteturais (HEMPSTEAD et al., 2008). Porém conceitualmente seguem o mesmo princípio funcional (Figura 5): Processador, memória, sensor, bateria, transceptor.

Figura 5 - Blocos Funcionais do hardware de nós de RSSF

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Bateria é o bloco funcional que fornece energia para o hardware do nó sensor (SAVVIDES; PARK; SRIVASTAVA, 2001).

O Transceptor é o bloco funcional responsável pela comunicação. Os modos de comunicação de RSSF usam canais de rádio frequência, óticos ou infravermelhos. O modelo de rádio frequência utiliza ondas eletromagnéticas em um espectro de frequência em conformidade com as regulamentações das telecomunicações. Este é o modelo com maior consumo de energia; no entanto, as características técnicas como comunicação unidirecional, distância de transmissão regulada pela potência, e diversas técnicas de modulação, favorecem o emprego desta tecnologia, sendo este o mais utilizado em RSSF.

Os blocos funcionais Processador e Memória representam o módulo computacional do hardware do nó sensor; este processa instruções e dados, manipula e armazena dados na memória. O processador é a unidade responsável pela inteligência do equipamento, obtendo informações do bloco sensor, e estabelecendo o elo entre o sensoriamento e a retransmissão de informações. Uma de suas principais características em RSSF é o baixo consumo de energia.

O Sensor é o componente responsável pelo registro e digitalização das características do ambiente, gerando informação que representa o fenômeno a ser observado. Existem diversos sensores e tipos, e talvez seja mais lógico classificá-los de acordo com o fenômeno físico que captam (RAKOČEVIĆ, 2011). Exemplos: sensores mecânicos, térmicos, elétricos, magnéticos, radiantes, químicos e bioquímicos.

Os primeiros estudos acadêmicos em RSSF utilizavam nós sensores com componentes discretos, ou mesmo montados de acordo com a aplicação em foco.

Exemplos deste cenário podem ser encontrados em projetos da Universidade da Califórnia, como: *COTS Dust*, *Smart Dust* (WARNEKE et al., 2001), *WINS* (POTTIE e KAISER, 2000) e *JPL Sensor Webs* (DELIN, 2002) do *Jet Propulsion Lab* da NASA (Figura 6).

Figura 6 - Sensores de projetos acadêmicos de pesquisa

COTS Dust: UC Berkeley

COTS Dust: UC Berkeley

SensorWebs: JPL

WINS: Rockwell

Smart Dust: UC
Berkeley

Fonte: Warneke et al. (2001); Pottie e Kaiser (2000); Delin (2002).

Com o desenvolvimento da microeletrônica estes equipamentos tornaram-se mais populares e com maior aplicabilidade. Atualmente vários projetos utilizam os nós sensores de RSSF provenientes de linhas de produção de empresas comerciais, os quais utilizam os sensores embarcados nos kits para montar cenários experimentais. Exemplos de kits podem ser visualizados na Figura 7, que apresenta as plataformas: MICA (MEMSIC, 2014a), IRIS (MEMSIC, 2014b), LOTUS (MEMSIC, 2014c), TelosB (MEMSIC, 2014d), WaspMote (LIBELIUM, 2014b).

Figura 7 - Exemplos de nós de RSSF modernos

MICAz: Memsic

Microcontrolador Atmel ATmega128L, Padrão de comunicação IEEE 802.15.4; 2.4 até 2.48 GHz, taxa de dados de 250kbps. Sensores: Luminosidade, temperatura, umidade relativa, Pressão barométrica, acelerômetro, acústico, magnético.
Fonte: MEMSIC (2014a).

Lotus: **Memsic**

Processador de 32 bits Cortex M3 @ de 10 - 100MHz; 64kB SRAM, 512KB FLASH, FLASH 64MB Serial; Rádio 802.15.4 Integrado; taxa de dados de 250 kbps, LED Indicador de Status; Sensores: Luminosidade, temperatura, umidade relativa, Pressão barométrica, acelerômetro, acústico, magnético
Fonte: MEMSIC (2014c).

IRIS: Memsic

Microcontrolador ATmega1281, Padrão de comunicação IEEE 802.15.4; 2.4 até 2.48 GHz, taxa de dados de 250 kbps. Sensores: Luminosidade, temperatura, umidade relativa, Pressão barométrica, acelerômetro, acústico, magnético.
Fonte: MEMSIC (2014b).

TelosB: Memsic

Microcontrolador TI MSP430 com 10kB RAM; rádio com IEEE 802.15.4 com taxa de dados de 250 kbps. Sensores integrados: Luminosidade, Temperatura e Umidade.
Fonte: MEMSIC (2014d).

Wasp mote: Libelium

Microcontrolador ATmega1281, com frequência de 14.7456 MHz; SRAM: 8KB; EEPROM: 4KB; FLASH: 128KB; SD Card: 2GB. Sensores diversos, como: CO, CO₂, NO₂, O₃, CH₄, H₂S, NH₃; Temperatura, luminosidade, humidade, material particulado (MP10), ultrassom, ruído; campos magnéticos, acelerômetro, GPS, etc.

Fonte: LIBELIUM (2014b).

Além dos exemplos anteriores, as condições de uso em ambiente externo impõem novos requisitos construtivos para os nós sensores, sendo assim, existe a possibilidade de construir um encapsulamento apropriado para o nó sensor, ou utilizar produtos encapsulados que já vêm adaptados a estas condições (Figura 8).

Figura 8 - Nós sensores encapsulados e preparados para uso externo

eKo pro series: Memsic

Grau de proteção: IP66 (protegido contra poeira e jatos de água de alta pressão); Temperatura de operação: -40°C a +60°C (duração da bateria degradada acima 50°C); Umidade de operação: 0 a 100% RHI, condensação; Temperatura de armazenamento: - 45°C a +70°C (sem bateria). Fonte: MEMSIC (2014d)

Waspote Plug-and-Sense: Libelium

Grau de proteção: IP65; Resistência ao impacto: IK08; isolamento da tensão AC: 690 V; isolamento da tensão DC: 1000 V; A temperatura ambiente de operação: -10° C a 50 ° C; Fonte: LIBELIUM (2014b).

2.2 MONITORAMENTO DA QUALIDADE DO AR

Os poluentes presentes no ar são causadores de problemas de saúde principalmente em crianças e idosos. Já existem evidências de que o aumento de concentrações de MP_{10} , SO_2 , CO , NO_2 e O_3 têm efeitos nocivos à saúde, aumentando inclusive o número de atendimentos hospitalares por doenças respiratórias em idosos (MARTINS et al., 2002) e doenças isquêmicas do coração (LIN et al., 2003). A Tabela 1 apresenta os principais poluentes presentes no ar de regiões metropolitanas.

Tabela 1 - Poluentes do ar

Poluente				Sigla	
				Poluente	Sigla
Monóxido de Carbono				CO	ERT
Fumaça				FMS	HC
Partículas Totais em Suspensão				PTS	H ₂ S
Material	Particulado	inalável	MP ₁₀	Chumbo	Pb
inferior a 10 micrometros					
Material	Particulado	inalável	MP _{2,5}	Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno, meta-xileno, para-xileno e orto-xileno	BTEX
inferior a 2,5 micrometros					
Dióxido de Enxofre				SO ₂	NH ₂
Ozônio troposférico				O ₃	NO ₂
				Dióxido de Nitrogênio	

Fonte: Adaptado de Instituto de Energia e Meio Ambiente (2014).

Os veículos são um dos principais emissores de poluentes em regiões urbanas, sendo que as emissões veiculares contêm diversas substâncias tóxicas que podem causar vários problemas ao sistema respiratório. Essas emissões são compostas de gases como: monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NOx), hidrocarbonetos (HC), óxidos de enxofre (SOx), Material Particulado (MP), etc. A participação dos veículos na emissão leva a CETESB a realizar anualmente um inventário de emissões (CETESB, 2014).

A problemática de controle de poluentes requer uma atividade sistemática de averiguação das causas e motivações da presença destes poluentes, assim como ações de mitigação dos efeitos nocivos. Neste caso, recomenda-se uma sistemática gestão da qualidade do ar, que incorpore instrumentos de gerenciamento ambiental integrado as questões sociais e econômicas (NATIONAL RESEARCH CONCIL, 2004).

Neste contexto, a Organização Mundial da Saúde reconhece a importância de realizar uma análise espaçotemporal da qualidade do ar, sendo o monitoramento uma ferramenta indispensável (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2000), à medida que:

- a) permite identificar ameaças ao ecossistema natural;
- b) contribui para o desenvolvimento de políticas públicas;
- c) presta-se ao desenvolvimento, calibração e validação de outras ferramentas, tais como SIGs;
- d) produz condições de prever o estado futuro e tendências da situação ambiental, assim como avaliar o efeito de ações de gestão;
- e) facilita a identificação das fontes emissoras;
- f) colabora com o planejamento do uso do solo e transportes.

No Brasil, o Programa Nacional de Controle da Qualidade do AR (PRONAR) foi um dos primeiros movimentos para o sistema de gestão de qualidade do ar; ele foi instituído com a Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA) e Resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) de número 5/1989 e 3/1990. O programa tem sido fortalecido, ao longo do tempo, pelas várias resoluções do CONAMA e a incorporação do monitoramento por vários Estados, o que pode ser observado pelo histórico apresentado na Figura 9.

Figura 9 - Histórico das operações de redes estaduais de monitoramento

Fonte: Instituto de Energia e Meio Ambiente (2014).

Não são todos os poluentes do ar que possuem padrões estabelecidos no monitoramento da qualidade do ar estipulado pelo CONAMA; os poluentes e compostos monitorados se restringem a: CO, FMS, PTS, MP₁₀, SO₂, O₃, NO₂. Sendo assim, os Órgãos Estaduais de Meio Ambiente (OEMA) estabelecem sua rede de monitoramento para avaliar os índices destes poluentes.

O resultado do monitoramento feito numa certa estação deve representar as concentrações do poluente numa escala espacial. Para definir a representação espacial de estações utiliza-se o “*Code of Federal Regulations*”, dos Estados Unidos, o qual categoriza a representação dependendo da localização da estação, do poluente de interesse, da proximidade das fontes de emissão, da intensidade das emissões, das condições de topografia, relevo e transporte dos poluentes (U.S. GOVERNMENT, 2010). As escalas são classificadas como:

- a) microescala: representatividade espacial de áreas de dimensão de poucos metros até 100 metros;
- b) média escala: Blocos de áreas urbanas (poucos quarteirões com características semelhantes) com dimensões entre 101 e 500 metros;
- c) escala de bairro: Bairros urbanos com atividade uniforme e dimensões entre 501 e 4.000 metros;

d) escala urbana: Cidades ou regiões metropolitanas, da ordem de 4 a 50 km.

O planejamento de local de instalação de estações é feito de forma a cobrir boa parte do território, desta forma, tradicionalmente, as representações cartográficas são construídas utilizando apenas os dados provenientes das estações, geralmente consolidando mapas onde cada leitura cobre regiões quilométricas, gerando assim mapas com resoluções que podem chegar a 50 km. Pelo custo e pelo esforço operacional, a relação custo-benefício de estações de microescala nem sempre são vantajosas.

No caso de São Paulo, a CETESB é o órgão responsável por esta atividade, sendo que o Decreto Estadual nº 59113, de 23 de abril de 2013, estabeleceu padrões mais restritivos de qualidade do ar. Além deste Decreto, para fins didáticos estabeleceram-se faixas de concentração delineando níveis, que são equacionados em índices, que são base para estabelecer medidas de prevenção frente aos efeitos nocivos à saúde. A Tabela 2 apresenta os níveis, cores de referência e sintomas relacionados à saúde para cada índice.

Tabela 2 - Padrões e níveis dos poluentes do ar

Qualidade	Índice	MP ₁₀ (µg/m ³)	MP _{2,5} (µg/m ³)	O ₃ (µg/m ³)	CO (ppm)	NO ₂ (µg/m ³)	SO ₂ (µg/m ³)	Fumaça (µg/m ³)	Significado
N1 - BOA	0 - 40	0 - 50	0 - 25	0 - 100	0 - 9	0 - 200	0 - 20	0 - 50	
N2 - MODERADA	41-80	>50 - 100	>25 - 50	>100 - 130	>9 - 11	>200 - 240	>20 - 40	>50 - 100	Pessoas de grupos sensíveis (crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas) podem apresentar sintomas como tosse seca e cansaço. A população, em geral, não é afetada.
N3 - RUIM	81-120	>100 - 150	>50 - 75	>130 - 160	>11 - 13	>240 - 320	>40 - 365	>100 - 150	Toda a população pode apresentar sintomas como tosse seca, cansaço, ardor nos olhos, nariz e garganta. Pessoas de grupos sensíveis (crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas) podem apresentar efeitos mais sérios na saúde.
N4 - MUITO RUIM	121-200	>150 - 250	>75 - 125	>160 - 200	>13-15	>320 - 1130	>365 - 800	>150 - 250	Toda a população pode apresentar agravamento dos sintomas como tosse seca, cansaço, ardor nos olhos, nariz e garganta e ainda falta de ar e respiração ofegante. Efeitos ainda mais graves à saúde de grupos sensíveis (crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas).
N5 - PÉSSIMA	>200	> 250	>125	> 200	> 15	> 1130	>800	> 250	Toda a população pode apresentar sérios riscos de manifestações de doenças respiratórias e cardiovasculares. Aumento de mortes prematuras em pessoas de grupos sensíveis.

Fonte: CETESB (2017a).

2.3 SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS

Os SIGs são sistemas de informações especializados que incorporam dados geográficos, sendo um poderoso conjunto de ferramentas para coletar, armazenar, transformar e exibir dados espaciais, que auxiliam na tomada de decisões, atualização de mapas, etc. (BURROUGH, 1986). A projeção das informações em SIGs é um subsídio para monitorar o processo de crescimento urbano, tornando o planejamento mais adequado (COSTA; CINTRA, 1998).

Os SIGs são utilizados em diversas áreas com objetivos diversos, algumas categorias de aplicação podem ser equacionadas (OLIVEIRA, 1997), como, por exemplo:

- a) ocupação humana - redes de infraestrutura; planejamento e supervisão de limpeza urbana; cadastramento territorial urbano; mapeamento eleitoral; rede hospitalar; rede de ensino; controle epidemiológico; roteamento de veículos; planejamento urbano; sistema de informações turísticas; controle de tráfego aéreo; sistemas de cartografia náutica; serviços emergenciais;
- b) uso da terra - planejamento agropecuário; estocagem e escoamento da produção agrícola; classificação de solos; gerenciamento de bacias hidrográficas; planejamento de barragens; cadastramento de propriedades rurais; levantamento topográfico e planimétrico; mapeamento do uso da terra;
- c) uso de recursos naturais - controle do extrativismo vegetal e mineral; classificação de poços petrolíferos; planejamento de gasodutos e oleodutos; distribuição de energia elétrica; identificação de mananciais; gerenciamento costeiro e marítimo;
- d) meio ambiente - controle de queimadas; estudos de modificações climáticas; acompanhamento de emissão e ação de poluentes; gerenciamento florestal de desmatamento e reflorestamento;

- e) atividades econômicas - planejamento de marketing; pesquisas socioeconômicas; distribuição de produtos e serviços; transporte.

É comum o uso de SIGs para aplicação de Meio Ambiente, no contexto de acompanhamento de assuntos relacionados à poluição. Inclusive alguns trabalhos destacam a importância e as potencialidades dos SIGs para a avaliação da poluição atmosférica (LINDLEY; WALSH, 2005) (HOEK et al., 2008) (HORÁLEK et al., 2005); (MESQUITA, 2009).

Neste cenário, o SIG tem um papel importante nas análises espaciais. As análises espaciais podem ser realizadas por meio de recursos como manipulação de dados espaciais de diferentes formas para extrair conhecimento adicional como resposta. Incluindo consultas de informações espaciais dentro de áreas de interesse definidas, manipulação de mapas e cálculos estatísticos dessa informação; investigação de padrões e correlacionamento dos dados na região de interesse (BAILEY, 1994).

Uma das características que serão utilizadas por esta tese envolve o georreferenciamento de pontos de coletas das condições de concentração de poluentes. Como esses pontos são coletados em locais diferentes, para representar regiões com cobertura contínua, funções matemáticas e recursos de análises espaciais devem ser aplicados nos dados. Uma técnica frequentemente utilizada para este fim é a interpolação. A interpolação é um processo de aproximação inteligente que busca fazer uma estimativa razoável de valores de um campo contínuo em locais onde não foram feitas medidas de campo (LONGLEY et al., 2011).

Diferentes técnicas de interpolação podem ser aplicadas para a composição de representações cartográficas de fatores ligados à poluição do ar. Dentre elas, se destacam os métodos de ponderação com o inverso do quadrado das distâncias (*Inverse Distance Weighting* - IDW), crigagem (Kriging), Regressão Linear Múltipla (RLM) e outras. A Figura 10 apresenta exemplos de diversas técnicas de interpolação utilizadas na cidade de Lisboa em Portugal.

Figura 10 – Representação da concentração de poluição por diferentes tipos interpolações

Fonte: Mesquita (2009).

2.4 TRABALHOS RELACIONADOS COM A PRESENTE TESE

Durante a pesquisa, como revisão bibliográfica, foram avaliadas soluções de RSSF aplicadas a cidades inteligentes, envolvendo normalmente instalações experimentais, que possibilitem maiores informações técnicas e operacionais dos experimentos realizados. Aqui se destacam e comentam as seguintes: *Oulu*; *CitySense* e *SmartSantader*.

O *Oulu Smart City* (OJALA, 2010) utilizou como base a cidade de Oulu na Finlândia, onde foi criada uma infraestrutura de testes (*Testbed*) de computação ubíqua, com

diferentes tipos de redes sem fio. O projeto implementou o conceito em toda a cidade, como um recurso tecnológico aberto para toda a comunidade. A camada de infraestrutura era composta por três tipos de redes sem fio (IEEE 802.11 WLAN, Bluetooth, IEEE 802.15.4 WSN), grandes displays públicos e vários serviços na Internet. Ele forneceu vários recursos para suportar experimentos de tecnologia, desenvolvimento de aplicativos para *smartphones*, com possibilidades de mecanismos para o gerenciamento e monitoramento dos experimentos. A solução procurou demonstrar a aplicabilidade e os benefícios do ambiente para a realização de estudos de casos práticos e pilotos de tecnologia e serviços em ambiente urbano autêntico. Outro caso, o *CitySense* (MURTY et al., 2008), foi realizado em Cambridge, Massachusetts nos Estados Unidos, e envolveu mais de 100 nós. Cada nó era um computador com sistema operacional Linux instalado em um poste de iluminação da cidade. Estes permitiam que qualquer pesquisador desenvolvesse sua aplicação e a implantasse diretamente nos nós, e tinha como objetivo transformar-se em um ambiente experimental para teste de sistemas distribuídos em uma escala urbana. Em ambos os casos, os componentes eram instalados fisicamente em pontos estratégicos da cidade, e tinham o objetivo de criar um ambiente experimental em uma escala maior que o ambiente laboratorial em universidades.

O trabalho que mais se assemelha ao proposto nesta presente tese é o SmartSantander (SANCHEZ et al., 2014), o qual foi projetado para uma escala urbana, incluindo componentes instalados em unidades móveis. Sendo assim serão apresentados mais detalhes do mesmo.

2.4.1 Estudo de Caso: Smart Santander

O projeto SmartSantander foi um projeto financiado com recursos da Comunidade Europeia através de seu 7º programa quadro (FP7) de pesquisas¹. Ele se propõe a formar uma cidade real como campo experimental para testes de componentes de Internet das Coisas (*Internet of Things -- IoT*). A cidade escolhida foi Santander na Espanha que foi equipada com mais de 1500 sensores. A implantação dos componentes IoT ocorreu em ciclos, o primeiro implantou 740 kits de sensores fixos (Figura 11). Cada kit tinha características diferentes, e se for contabilizado o

¹ O Sétimo Programa-Quadro (FP7) é um instrumento da União Europeia para financiamento de pesquisas. Vigorou no período de 2007-2013, sendo principal programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico da Europa.

ambiente por tipo de sensores, a base instalada continha 600 sensores de temperatura, 500 sensores de luminosidade, 30 sensores de CO e 390 sensores de presença em vagas de estacionamento (SANCHEZ et al., 2014).

Figura 11 - Localização dos componentes IoT no centro de Santander

Fonte: Sanchez et al. (2014).

Num segundo ciclo, mais de 300 kits foram implantados. No entanto, o foco deste atingia outro escopo, que contemplava a implantação em cenários de irrigação inteligente, que usava informações de sensores de temperatura e umidade do solo, dentre outros, para aperfeiçoar o processo de irrigação agrícola. Além destes, foram incorporados kits de sensores móveis, instalados no topo de ônibus urbanos, taxis e ambulâncias para gestão de frota de transporte público, e informações sobre condições ambientais.

O projeto SmartSantander abre chamadas públicas para experimentos usarem sua infraestrutura para soluções inovadoras que utilizem os recursos disponíveis no *Testbed*. Dentre vários subprojetos selecionados, dois experimentos do projeto SmartSantander se destacaram pela similaridade dos componentes tecnológicos empregados, mas com escopos diferentes da presente tese. São eles: Subprojeto *Mitos* e Subprojeto *Ekobus*.

O subprojeto *Mitos* utilizava os kits móveis hospedados nos ônibus como fonte de informação para a plataforma web do experimento. Em síntese, o experimento *Mitos* apresenta informações *on-line* do posicionamento dos ônibus, condições do tráfego, níveis de ruídos captados pelos sensores fixos, mapas de vagas de estacionamento, e as informações dos sensores ambientais hospedados nos ônibus (CO, NO₂, O₃, MP₁₀), conforme apresentado na Figura 12.

Figura 12 – *Mitos*. Interface web do Experimento piloto no projeto SmartSantander

Fonte: SmartSantander (2017).

Da mesma forma que o experimento Mitos, outro experimento ocorreu na Servia, e foi chamado de *Ekobus* (BRKOVIĆ; SRETOVIĆ, 2012). Este explorava somente as informações provenientes dos sensores móveis embarcado em ônibus urbanos. As características técnicas envolvem fundamentalmente a infraestrutura para visualização das informações provenientes dos sensores seja em ambiente Web ou em dispositivos móveis (Figura 13). O experimento contava com 65 nós sensores monitorando informações como: temperatura, umidade relativa do ar, CO, CO₂, NO₂ e localização por GPS (BIELSA, 2012).

Figura 13 – *Ekobus*. Experimento piloto no projeto SmartSantander

Fonte: Bielsa (2012).

2.5 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

A proposta da presente tese utiliza mecanismos e infraestrutura provida por Tecnologias da Informação e Comunicação, uma vez que realiza a coleta de informações por meio de sensores, que se comunica por redes sem fio, disponibilizando as informações em servidores computacionais, para que possam ser visualizadas por gestores públicos ou pela população de forma intuitiva e correlacionada com análises espaçotemporais.

O serviço provido pela plataforma proposta na presente tese poderá fazer parte de um conjunto de serviços que tornarão as cidades mais inteligentes. Atualmente no que tange ao monitoramento da qualidade do ar, e apesar da preocupação das redes implantadas no Brasil, o primeiro diagnóstico destas redes aponta algumas apreensões, principalmente ao se perceber que partes importantes do Brasil ainda estão desprovidas de monitoramento, existindo assimetrias estruturais significativas, entre as regiões. Além disso, a poluição atmosférica vem atingindo valores preocupantes (INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE, 2014). Os modelos cartográficos que são construídos com dados providos por estações tradicionais de monitoramento da qualidade do ar podem prover resolução, onde cada medida pode representar até 50 km, assim as análises em microescala não são possíveis, sendo

que características de pequenas regiões podem ser mascaradas pelas médias de grandes regiões.

A presente tese vem ao encontro do fortalecimento das redes de monitoramento de qualidade do ar, uma vez que pode gerar mais informações sobre os índices de poluição em “micro escala”. Apesar de cada nó ter uma acurácia e precisão menor que as estações das redes de monitoramento, o conjunto de nós distribuídos pela cidade, poderá oferecer um conjunto de dados confiável. Desta forma, a solução pode agregar valor ao gestor na compreensão de regiões onde as assimetrias significativas foram apontadas. Outro fator importante, para a presente tese, é a possibilidade de uso em cidades onde não exista um monitoramento constante, sendo uma informação importante para determinar se há necessidade de estabelecer a implantação de uma rede automática de monitoramento da qualidade do ar tradicional. O gestor público também poderá usufruir das informações de localização do ônibus que são geradas pelo nó sensor embarcado, o qual dispõe de GPS.

No que tange aos trabalhos relacionados a presente tese, O projeto *SmartSantander* apresenta similaridades na infraestrutura, sendo um dos principais casos de sucesso no uso de componentes *IoT*, principalmente com uso de RSSF. No entanto, seu foco é criar um ambiente de teste (*Testbed*) para facilitar os experimentos e estudos de novas tecnologias, protocolos de comunicação e estratégias computacionais. A sua infraestrutura possui um escopo muito mais amplo que o apresentado na presente tese, mas não explora com profundidade as possibilidades do uso de informações provenientes do monitoramento de gases poluentes, restringindo se à apresentação das informações individuais dos nós sensores. Em contraposição, a presente tese pretende aprofundar nas correlações entre as variáveis e estudar modelos de visualização interessantes no contexto de monitoramento de poluentes gasosos, com foco em informações para o gestor público, possibilitando análise espaçotemporais consistentes. Além de apresentar a adaptação às questões socioculturais brasileiras, em especial a cidade de São Paulo, que possui um perfil de grande metrópole.

3 INFRAESTRUTURA E METODOLOGIA PARA ANÁLISE ESPAÇOTEMPORAL DE ALTA RESOLUÇÃO

Este capítulo apresenta a abordagem tecnológica onde são expostos os componentes de *hardware* e *software* da solução construída para os experimentos; também é apresentada a metodologia da composição das análises espaçotemporais empregadas na solução, assim como, os modelos interpretativos da representação cartográfica.

Utiliza-se, nesta tese, a expressão alta resolução em função de prover informações com resoluções maiores que a dos modelos tradicionais de monitoramento por estações fixas, permitindo análises de microrregiões, identificando as características, que podem interferir na qualidade do ar, em pequenos trechos da cidade mapeados de forma móvel, as quais podem estar ocultas pelos modelos tradicionais. Os modelos tradicionais de monitoramento de qualidade do ar apresentam o cenário para a cidade como um todo utilizando estações fixas. Quando estas estações tiverem uma representação espacial extensa, elas podem não refletir a criticidade de uma microrregião que fica camuflada pela média geral, por outro lado, quando uma estação fixa tiver uma representação espacial pequena, representariam apenas a microrregião onde ela está instalada, não podendo ser extrapolado para regiões mais amplas.

A Figura 14 apresenta um diagrama geral que representa o processo e fluxo de informações em um ambiente híbrido, que integra o espaço digital e cibernético com o ambiente físico, caracterizado pela denominação de ambiente ciberfísico. Este ambiente permite realizar análises espaçotemporais de microrregiões com base em dados sensoriais sobre a qualidade do ar em ambiente urbano.

Figura 14 – Ambiente ciberfísico para análise espaçotemporais da qualidade do ar de alta resolução

Fonte: Adaptado de New York University (2017).

3.1 PLATAFORMA TECNOLÓGICA

Esta seção apresenta o detalhamento da arquitetura geral da solução; da infraestrutura de coleta de informações da qualidade do ar; da infraestrutura de processamento das informações e as ferramentas para a visualização de mapas cartográficos digitais;

De forma geral, a arquitetura computacional é composta por três blocos:

1. Sensoriamento
2. Transmissão / armazenamento
3. Processamento e visualização

Estes três blocos podem ser observados na Figura 15, incluindo os componentes de cada bloco.

Figura 15 - Arquitetura de monitoramento por sensores embarcados em ônibus

Fonte: Elaborado pelo autor.

O bloco de sensoriamento é o responsável pela coleta das informações de concentração dos gases (CO , NO_2 , O_3 , CO_2), assim como as informações de temperatura, pressão e umidade. O principal componente é o nó sensor (representado pelo elemento de número 1 na Figura 15), o qual contém os componentes eletrônicos, embutidos em um encapsulamento com o grau de proteção IP65^2 (proteção contra pó e jato de água), que são hospedados no topo de um ônibus do transporte público.

O bloco de transmissão/armazenamento é o responsável pela comunicação dos nós sensores (elementos 2 e 3 da Figura 15) na missão de transferir as informações para os componentes de armazenamento (elementos 4 e 5 da Figura 15), para posterior envio ao bloco de processamento.

O bloco de processamento e visualização é responsável por processar as operações matemáticas preliminares (elemento 5 da Figura 15), e as operações por meio de

² Níveis de classes de proteção IP são padrões internacionais definidos pela norma IEC 60529 para classificar e avaliar o grau de proteção de produtos eletrônicos fornecidos contra intrusão (partes do corpo como mãos e dedos), poeira, contato acidental e água. No caso IP65 significa à prova de poeira e protegido contra jatos de água.

Sistemas de Informações Geográficas – SIG (representado pelo elemento de número 6 na Figura 15).

Nas próximas seções serão mostrados mais detalhes de cada um dos blocos da infraestrutura da solução.

3.1.1 Infraestrutura de sensoriamento

Para a execução dos experimentos foi necessário definir, montar e encapsular os componentes do kit de sensores, o qual é hospedado externamente em veículos do transporte público. Além disso, foi necessário programá-los. Por fim, os kits deveriam ser validados para medidas em veículos em movimento. Durante todo processo de execução desta tese alguns desafios foram diagnosticados, principalmente com relação aos fatores construtivos do kit sensor. Nas próximas subseções são apresentadas estas três fases.

3.1.1.1 Definição dos nós sensores

Para esta definição, levaram-se em consideração, as opções de componentes presentes no kit do fabricante, que fossem compatíveis com os itens do monitoramento da qualidade do ar da CETESB, e que contemplassem gases primários ou secundários emitidos por fonte veicular.

Após a avaliação das várias opções de nós sensores, incluindo a análise do estudo sobre a definição de critérios e utilização de RSSF para monitoramento da qualidade do ar (HEJLOVÁ; VOŽENÍLEK, 2013) e este trabalho optou-se pelos nós sensores do fornecedor *Libelium*, que possui em seu portfolio, kits customizados para o monitoramento de vários ambientes e cenários. Inclusive, estes kits já fizeram partes de experimentos similares em outras partes do mundo (SANCHEZ et al., 2014) (BRKOVIĆ; SRETOVIĆ, 2012), favorecendo a utilização de experiências anteriores em prol do experimento do presente trabalho.

Os kits sensores de gases possuem recursos para monitorar a temperatura, umidade, pressão atmosférica e 14 tipos diferentes de gases (somente 7 simultâneos). Além destes, cada kit pode ser instrumentando com diferentes recursos de comunicação de dados (3G, WiFi, Zigbee, etc.) e localização por tecnologia GPS (LIBELIUM, 2014a).

A Tabela 3 apresenta a matriz de relacionamento dos itens monitorados associados ao kit do fabricante, monitoramento da qualidade do ar da CETESB, e inventário de emissões veiculares do Estado de SP.

Tabela 3 - Tipos de itens monitorados

Itens monitorados	Kit sensores de gases (LIBELIUM, 2014a)	Programa Qualidade do Ar (CETESB, 2017a)	Inventário de Emissões veiculares (CETESB, 2014)	Kit montado para os experimentos
Partículas inaláveis (MP_{10})		✓	✓	
Partículas inaláveis finas ($MP_{2,5}$)		✓	✓	
Partículas totais em suspensão (PTS)		✓		
Dióxido de enxofre (SO_2)		✓	✓	
Fumaça (FMC)		✓		
Chumbo (Pb)		✓		
Monóxido de carbono – CO	✓	✓	✓	✓
Dióxido de carbono - CO_2	✓			✓
Oxigênio molecular - O_2	✓			
Metano - CH_4	✓			
Hidrogênio molecular - H_2	✓			
Amônia - NH_3	✓			
Isobutano - C_4H_{10}	✓			
Etanol - CH_3CH_2OH	✓			
Tolueno - $C_6H_5CH_3$	✓			
Sulfeto de hidrogênio - H_2S	✓			
Dióxido de Nitrogênio - NO_2	✓	✓	✓	✓
Ozônio - O_3	✓	✓		✓
Compostos Orgânicos Voláteis (COV)	✓			
Hidrocarbonetos	✓	✓	✓	
NOx			✓	
Aldeídos		✓	✓	
Temperatura	✓			✓
Umidade	✓			✓

Fonte: Libelium (2014a); CETESB (2017a); CETESB (2014).

Como o objetivo deste trabalho envolve o monitoramento da qualidade do ar afetado por poluentes de emissões veiculares, não houve necessidade de incorporar todos os sensores de gases presentes nas opções do fornecedor.

O kit inicial adquirido para os testes iniciais e utilizados durante o exame de qualificação desta tese, mostrou a viabilidade de utilização do modelo apresentado por esta tese. No entanto, um fator que mereceu especial atenção, para execução do experimento de forma eficaz, foi a calibração do kit, que é realizado por empresas

especializadas e residentes fora do Brasil. Desta forma, optou-se por uma nova versão do kit, que vem calibrado de fábrica, o que uniformiza os kits que estarão coletando informações durante o experimento. Além dos sensores, os kits incorporaram comunicação de dados por *WiFi* e gravação de dados em *SD cards*.

3.1.1.2 Montagem e encapsulamento dos nós sensores

Uma vez escolhidos os componentes do kit, estes foram importados em peças individuais, para montagem e programação para a leitura das informações dos sensores.

Durante o desenvolvimento desta tese, vários desafios técnicos foram encontrados, sendo que várias versões do nó sensor tiveram que ser criadas. Cada versão do nó sensor incorporava novas especificações ou modificações para superar os desafios anteriores. Assim, a Figura 16 apresenta uma linha do tempo com o resumo das versões, enquanto a Tabela 4 apresenta os motivadores para cada nova edição.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4 – Resumo das versões dos nós sensores

Versão	Descrição	Motivação para nova versão
1.0	Primeira montagem do kit	Primeira versão do kit, incorporando os sensores de CO e CO ₂ , temperatura e umidade com a versão 1.0 do software.
1.1	Kit para embarque em uma unidade móvel	Adaptação de encapsulamento para ser acoplado em veículo, mas com restrições em dias de chuva.
1.2	Incorporação dos sensores de NO ₂ e O ₃	Incorporação de novos sensores, completando os principais gases da medição de qualidade do ar (CO, O ₃ , NO ₂), adicionalmente CO ₂ .
1.3	Kit com ventoinha	Uma vez identificadas as diferenças entre as leituras estáticas e em movimento, uma ventoinha foi incorporada no encapsulamento para eliminar o efeito da variabilidade das leituras.
2.0	Montagem do kit em encapsulamento com IP65	O kit foi incorporado em um encapsulamento com grau de proteção IP65 (poeira e jato d'água), e os sensores foram posicionados em uma nova estrutura dentro de um canal de fluxo de ar, eliminando as diferenças existentes entre leitura móveis e estáticas.
2.1	Kit com fonte regulada.	O kit anterior continha uma alimentação pela USB do kit, que era limitada em corrente, não permitindo um carregamento da bateria. Devido às características operacionais dos ônibus coletivos, o mesmo era desligado em alguns momentos do dia, momento que a bateria se descarregava. Nesta versão a fonte é conectada na entrada do carregador solar permitindo maior autonomia.
3.0	Nova versão do kit com sensores calibrados	Os sensores anteriores não eram calibrados, nesta versão os sensores de CO, CO ₂ , NO ₂ , O ₃ vem calibrados de fabrica, além disso, inclui os sensores de temperatura, pressão e umidade.
3.1	Kit com arcabouço em impressora 3D	A estrutura anterior ainda apresentava problemas com vibração, sendo minimizada com um modelo mais personalizado.

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.1.2.1 As versões 1.x

A montagem das versões iniciais envolveu o reconhecimento dos componentes básicos, a conexão dos sensores nas portas de entrada da placa principal do kit, definição dos parâmetros de configuração, testes iniciais, programação do software embarcado. Da Figura 17 até a Figura 20 encontra-se uma sequencia de etapas, que vão desde o estado inicial de todos os componentes importados até a montagem final na plataforma *Libelium*.

Figura 17 - Componentes dos kits de sensores Libelium

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 18 - Sensores de NO₂, CO₂, CO, O₃, temperatura e umidade

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 19 - Smart gases board (esquerda); Waspote com WiFi, 3G, GPS, bateria

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 20 - Kit Montado e conectado à bateria

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após os testes iniciais percebeu-se que o modelo montado, ao ser instalado em um veículo, poderia sofrer problemas de mau contato devido às vibrações naturais do movimento do veículo. Desta forma, os componentes tiveram de receber uma camada de cola quente (silicone) para minimizar os efeitos da vibração. A cola foi cuidadosamente colocada de forma a não alterar as medições dos sensores. Além disso, o modelo foi preparado para ser colocado em um invólucro de proteção, que permitiu a instalação no topo de veículo, por meio de adesivo - Velcro (Kit Versão 1.1). Da Figura 21 até a Figura 23 são apresentadas as sequências, da preparação até o estágio final do kit sensor de gases, e sua colocação em um veículo de passeio.

Figura 21 - Kit Montado com cola quente para fixar componentes

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 22 - Kit Montado no suporte para fixação em veículo

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 23 - Kit Montado fixado em veículo de passeio

Fonte: Elaborado pelo autor.

As versões 1.2 e 1.3 do kit tiveram a incorporação de novos sensores O_3 e NO_2 e o acréscimo de um cooler que promoveu um fluxo de ar constante. Este fluxo foi importante para minimizar os efeitos do deslocamento do veículo, uma vez, que testes preliminares apresentaram diferenças de medidas entre valores obtidos por sensores estáticos e sensores em movimento, devido à corrente de ar (Figura 24).

Figura 24 - Kit móvel com ventoinha instalada

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.1.2.2 As versões 2.x

O kit versão 2.0 teve como principal mudança um novo formato de encapsulamento que tornou a solução mais robusta para uso no topo de veículo do transporte público coletivo. A versão 2.0 utilizava um encapsulamento com proteção IP65 que protegia os componentes eletrônicos contra pó e jatos d'água (Figura 25), além disso, criava um túnel com cooler, gerando um fluxo de ar constante, onde os sensores ficam instalados realizando as medidas necessárias (Figura 26).

Figura 25 – Visão interna e externa do kit móvel com encapsulamento IP65

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 26 - Visão do túnel para fluxo de ar com os sensores no topo

Fonte: Elaborado pelo autor.

A versão 2.1 incorporou uma fonte chaveada para equilibrar a alimentação proveniente das baterias de 24 Volts dos ônibus, para ser compatível com a alimentação da placa do kit sensor, que recebe entre 5 V e 9 V.

3.1.1.2.3 As versões 3.x

As versões 3.x têm como principais características a incorporação de um novo modelo de kit, com sensores calibrados de fabrica (Figura 27).

Figura 27 – Kit de sensores – Waspote Gas PRO

Fonte: Libelium (2015).

O kit utilizou um encapsulamento com a prototipação por impressora 3D, que permitiram uma maior adequação dos componentes eletrônicos para resistirem às vibrações inerentes ao tráfego urbano nas vias paulistanas e em geral brasileiras (Figura 28 e Figura 29).

Figura 28 – Projeto da versão com impressão 3D

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 29 – Fotografia do módulo gerado na impressora 3D

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.1.3 Programação dos nós sensores

O kit de sensores possui um microprocessador que necessita de um software básico e um código programável para realizar suas atividades. A plataforma *Libelium* oferece um Ambiente Integrado de Desenvolvimento – IDE, que integra as bibliotecas de funções, as ferramentas de compilação e monitoramento das aplicações, facilitando e integrando todo ambiente ao hardware (LIBELIUM, 2014c). A Figura 30 apresenta a interface da IDE, que é composta pelo menu de opções, barra de ferramentas, abas de código fonte, área para edição do código fonte, barra de mensagem da IDE, console de exibição de mensagens referente à aplicação, área de exibição de informações de API e Porta de comunicação.

Figura 30 - *Libelium IDE*

Fonte: Elaborado pelo autor.

Essencialmente a aplicação embarcada é a que coleta, processa, armazena e transmite as informações dos nós sensores para a infraestrutura. Nesta etapa da presente tese, o foco se manteve no monitoramento da qualidade do ar, que fundamentalmente coleta informações dos sensores de gases, temperatura e umidade, além da posição e instante, através do GPS. A Figura 31 ilustra o fluxograma do código fonte desenvolvida para a aplicação.

Figura 31 - Fluxograma do programa de coleta de dados

* Tempo necessário para estabilização dos sensores na nova condição ambiental

Fonte: Elaborado pelo autor.

Uma forma de observar os dados coletados é extrair os arquivos armazenados no *SD Card* do nó sensor. Este arquivo é gerado pela aplicação, que armazena as medidas a cada 30 segundos, gerando um arquivo no formato CSV com itens separados por ponto-e-vírgula. A ordem e nome dos campos estão expressos na Tabela 5.

Tabela 5 - Dicionário de Dados do Arquivo Texto gerado pelo nó sensor

Ordem	Nome do campo	Formato	Unidade de medida	Significado
1	Seq	9999	--	É o número sequencial das leituras realizadas
2	Dia	99	--	Dia da coleta
3	Mês	99	--	Mês da coleta
4	Ano	99	--	Ano da coleta
5	Hora	99	--	Hora da coleta
6	Minuto	99	--	Minuto da coleta
7	Segundo	99	--	Segundo da coleta
8	Dia da semana	9	[1,2,3,4,5,6,7]	Numero que indica dia da semana
9	Temperatura	99,9999	°C	Valor obtido do sensor de temperatura
10	Umidade	999,9999	%	Valor obtido do sensor de humidade relativa do ar
11	CO2	99,99999999	ppm	Valor obtido do sensor de CO ₂
12	CO	99,99999999	ppm	Valor obtido do sensor de CO
13	O3	99,99999999	ppm	Valor obtido do sensor de O ₃ .
14	NO2	99,99999999	ppm	Valor obtido do sensor de NO ₂ .
15	Sinal de GPS Presente?	9	[0 ou 1]	Se o sinal de GPS estiver presente o valor será 1. Caso o valor for zero, todos os campos a seguir estarão zerados.
16	Latitude	99,99999999	Graus - WGS	Latitude obtida do GPS
17	Longitude	99,99999999	Graus - WGS	Longitude obtida do GPS
18	Altitude	999,9	Metros	Altitude obtida do GPS
19	Data	DDMMAA	---	Data UTC em formato Dia, Mês e Ano
20	Hora UTC	HHMMSS.s	Texto	Hora UTC em formato Hora, Minuto e Segundos.
21	Velocidade	999,9	Knots	Velocidade obtida do GPS. 1 knots é igual 1852 m/h
22	Curso	999,9	° Graus	Direção do movimento.
23	Bateria	99	%	Percentual de carga da bateria
24	Idno	XXXXXXX	--	Identificador da placa mãe do kit
25	semEnergia	9	[0 ou 1]	Se existir ou não energia de alimentação
26	Pressão	9999,999999	Pa	Pressão atmosférica

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 32 apresenta um exemplo de arquivo texto extraída do nó sensor. Este arquivo pode ser importado por uma ferramenta, como o Excel, para a realização de gráficos e cálculos matemáticos, necessários para as análises dos dados.

Figura 32 - Arquivo CSV com as informações extraídas do nó sensor

```

1;3;4;17;17;57;9;Mon,17/04/03,17:57:09;23.5300;54.1708;31.0000;9.5505399703;0.0000000000;0.412
5470161;0;0;0;0;0;0;0;0;91.00;32314;0;

2;3;4;17;17;57;26;Mon,17/04/03,17:57:26;23.5400;55.5332;31.1200;469.2050781250;0.0000000000;0.
2427353620;0;0;0;0;0;0;0;0;91.00;32314;0;

3;3;4;17;17;57;44;Mon,17/04/03,17:57:44;23.5400;57.0126;32.0000;469.2050781250;0.0000000000;0.
0000000000;0;0;0;0;0;0;0;0;91.00;32314;0;

4;3;4;17;17;58;1;Mon,17/04/03,17:58:01;23.5400;56.2031;33.0200;469.2050781250;0.0069256191;0.0
000000000;0;0;0;0;0;0;0;0;91.00;32314;0;

```

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.1.4 Validação dos kits sensores

Para validação dos kits sensores, em suas diversas versões, duas abordagens foram adotadas. A primeira abordava a questão do deslocamento do veículo que hospeda o sensor, e a segunda os fatores de calibração e equiparação de leituras de kits diferentes.

A primeira abordagem validou o kit sensor em termos de leituras em movimento de concentração de gases. Os experimentos realizados para validação estão detalhados no capítulo 4, o qual foi dedicado para este fim. Com relação à segunda abordagem, após a validação dos componentes, software e hardware do kit sensor, coube uma verificação final antes da instalação nos veículos que realizariam o projeto piloto final. Esta verificou a calibração e equiparação de leituras, sendo que esta demonstração pode ser vista a seguir.

3.1.1.4.1 Verificação de calibração e equiparação de leituras

Como apontado, durante o desenvolvimento desta tese o kit sensor foi recebendo aprimoramentos, e consequentemente novas versões do kit foram sendo estabelecidas. Uma das dúvidas sobre o processo de medição era a equiparação de leituras de todos os kits adquiridos e se estes estavam apresentando valores em unidades clássicas de mensuração de concentração de gases, temperatura e umidade.

Os kits anteriores à versão 2.0 eram compostos por sensores não calibrados, e os valores das medidas dos sensores de gases eram dados em unidades de tensão (Volts) ou resistência do sensor (Ohms), valores que são proporcionais à concentração de gases. Com estas características é possível determinar áreas com concentração de gases diferentes e definir graduações em um mapa cartográfico.

No entanto, sem um processo de calibração, não era possível saber se as concentrações estavam dentro de referências adotadas para definir se a qualidade do ar está boa ou ruim, conforme um padrão de qualidade do ar estabelecido. Ou seja, sem uma calibração, só se podia contar com um padrão relativo da qualidade do ar.

Para resolver esta questão duas opções eram apresentadas pelo fabricante, criar um procedimento de calibração local, ou adquirir sensores calibrados.

O modelo de calibração local propõe a realização de teste com o kit sensor inserido em um tanque hermeticamente fechado, recebendo uma concentração conhecida de gás, de forma a criar um gráfico de equivalência dos valores da concentração inserida no tanque com os valores numéricos apresentados pelos sensores. Este procedimento mostrou ser de grande complexidade, necessitando de laboratórios especializados, os quais poderiam acrescentar complexidade ao desenvolvimento desta tese. Assim a opção de adquirir sensores calibrados foi adotada, para minimizar problemas e aumentar a eficácia das medidas. Graças a recursos suplementares foi possível adquiri-los. A característica dos sensores deste novo kit é apresentada na Tabela 6.

Outro fator importante esta relacionado ao custo do equipamento, o qual custou em torno de 5 mil dólares, o que é considerado de baixo custo se comparado com uma estação tradicional de monitoramento automático, cujo custo fica entre 350 mil e 500 mil dólares (INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE, 2014).

Tabela 6 - Especificações dos sensores e componentes do kit montado para os experimentos

Sensor	Faixa de medida	Acurácia	Temperatura de operação	Tempo de resposta
CO	0 ~ 500ppm	± 1ppm	-40 ~ +85°C	1 segundo
CO ₂	0 ~ 5000ppm	± 50 ppm	-40 ~ +60°C	60 segundos
NO ₂	0 ~ 20ppm	± 0.1 ppm	-30 ~ +85°C	30 segundos
O ₃	0 ~ 20 ppm	± 0.015 ppm	-30 ~ +40°C	<60 segundos
Umidade	0 ~ 100 %RH	<±3 %RH	-40 ~ +85°C	<1 segundos
Temperatura	0°C ~ +65°C	±1°C	-40 ~ +85°C	1.65 segundos
GPS	--	Posicional < 2.5 m, Velocidade ± 0.01 m/s		<i>Cold start</i> <35 seg.

Fonte: Libelium (2014a).

Este kit sensor foi encapsulado e integrado a uma estrutura de suporte para ser instalado em veículos, para efeito de validação foi feito um ensaio para observar se todos os kits e os valores lidos pelos sensores eram similares, quando são utilizados em condições semelhantes.

O ensaio contava com uma fonte emissora de gases ligada a dispositivos que acumulavam e direcionavam os gases por um fluxo constante que passava por todos os kits instalados em série. A Figura 33 apresenta a instalação e os componentes utilizados para o ensaio de verificação de calibração.

Figura 33 – Ensaio de verificação de calibração dos kits sensores.

Fonte: Elaborado pelo autor.

O veículo foi ligado por 5 segundos e desligado em seguida, os valores das leituras dos sensores eram registrados e armazenados dentro do kit e apresentados na tela do computador que monitorava os valores lidos. Assim que os valores de concentração reduziam até o nível inicial do ensaio, o veículo era novamente acionado por 5 segundos, formando um ciclo de alta e baixa concentração de gases. A Figura 34 apresenta um dos gráficos gerados a partir dos dados extraídos dos kits.

Figura 34 – Dispersão dos valores de Monóxido de Carbono dos kits número 3 e 4

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores observados dos kits se mantiveram dentro do mesmo nível de valores, para os 4 kits analisados, sendo que os kits 1 e 2 apresentaram defeitos em alguns dos sensores, e os kits 3 e 4 mantiveram-se em perfeitas condições. Desta forma, os kits 3 e 4 foram selecionados para as realizações de experimentos em campo.

3.1.2 Infraestrutura de transmissão e armazenamento

A infraestrutura de transmissão e armazenamento tem a missão de extrair a informação gerada pelos sensores e integrá-la na base de sistemas de informações geográficas para a realização de análises espaciais, sendo o bloco intermediário da arquitetura apresentada na Figura 15. Nesta missão, duas fases são implementadas para este fim: O bloco de Transmissão e o bloco de armazenamento.

3.1.2.1 Bloco de transmissão

O Bloco de transmissão é o responsável pela comunicação dos kits sensores e a transferência das informações para o bloco de armazenamento. O principal componente é o roteador 3G, que estabelece a comunicação com o kit sensor por WiFi, e transfere as informações pela rede celular 3G para a Internet, integrando-o a um Servidor FTP, que acumula os arquivos originais dos sensores.

O Roteador 3G pode ser instalado em vários pontos da rota do ônibus que hospeda os sensores, e no contexto de RSSF, o Roteador é também chamado de sorvedouro. O estudo de posicionamento dos componentes de RSSF embarcados em ônibus públicos para monitoramento ambiental, realizado pelo autor desta tese, e publicados no *WSEAS TRANSACTION on Systems* (SANTOS et al., 2014), apresenta simulações do melhor posicionamento dos componentes da rede e padrões de comunicação de dados a serem utilizados, incluindo os prós e contras de cada escolha (Tabela 7).

Tabela 7 - Prós e Contras do tipo e posicionamentos dos sorvedouros

	Prós	Contras
<i>Ad-hoc</i> com sorvedouros posicionados nos terminais	<ol style="list-style-type: none"> 1. Custo de Infraestrutura: baixo 2. Roteamento adaptativo permite que a informação flua por diversas rotas dos nós sensores para os sorvedouros, utilizando inclusive outros nós como parte do caminho. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Baixa taxa de transmissão 2. Tempo de atualização é maior ou igual ao tempo de trajeto entre os terminais de origem e destino. Neste cenário, o tempo está em torno de 12 minutos.
<i>Wifi</i> com sorvedouros posicionados nos terminais	<ol style="list-style-type: none"> 1. Custo de Infraestrutura: Médio 2. Boa capacidade de volume de recepção de dados 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tempo de atualização é maior ou igual ao tempo de trajeto entre os terminais de origem e destino. 2. Necessidade de planejamento e <i>site survey</i> para determinar qual o melhor posicionamento dos <i>Hotspots</i> para cobrir a área do terminal.
Sorvedouros nas paradas de ônibus	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tempo de atualização é equivalente ao intervalo entre os ônibus (<i>headway</i>), que neste cenário está em torno de 2 minutos. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Maior custo com infraestrutura com a implantação de mais sorvedouros 2. O volume de dados transmitidos/recebidos será menor que se fosse instalado nos terminais seja no modelo <i>Wifi</i> ou <i>ad-hoc</i>
GPRS	<ol style="list-style-type: none"> 1. Resposta em tempo real 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Alto custo de transmissão uma vez que a tarifação das operadoras é baseada em volume de dados.

Fonte: Santos et al. (2014)

Para o desenvolvimento desta tese, os sorvedouros foram instalados nos terminais e garagens das operadoras de ônibus.

3.1.2.2 Bloco de armazenamento

O Bloco de armazenamento recebe as informações provenientes de todos os kits sensores da plataforma, armazena e processa as operações matemáticas simples como: conversões, cálculos de médias, etc. O primeiro componente é o servidor FTP, que recebe o arquivo transmitido pelo kit sensor, a partir deste momento, ele é direcionado para Sistemas Gerenciadores de Banco de Dados (SGBD), que irão armazenar e consolidar as informações em bases de dados, que serão manipuladas de maneira a compor análises temporais para posterior integração em SIG para análises espaciais (Figura 35).

Figura 35 - Arquitetura de transmissão/Armazenamento

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nesta tese, o SGDB utilizado foi o *PostgreSQL* 9.6.2, que é livre e de código aberto, com uma comunidade consistente e numerosa, que oferece documentação e conteúdo de suporte à resolução de problemas, além de suporte à integração com outros *softwares* como os SIGs. As estruturas das bases de dados usadas para armazenar as informações são apresentadas na Figura 36 a seguir:

Figura 36 – Script de criação da tabela principal de armazenamento de dados

```

CREATE TABLE public.sensordata (
    dia smallint NOT NULL,
    mes smallint NOT NULL,
    ano smallint NOT NULL,
    altitude double precision,
    bateria double precision,
    co double precision,
    co2 double precision,
    datahora timestamp with time zone,
    direcao double precision,
    idno character(15) NOT NULL,
    latitude double precision,
    longitude double precision,
    hora smallint NOT NULL,
    min smallint NOT NULL,
    no2 double precision,
    o3 double precision,
    seg smallint NOT NULL,
    seq numeric,
    temperatura double precision,
    temsinalgps boolean,
    umidade double precision,
    velocidade double precision,
    diadasemana smallint,
    pressao double precision,
    temenergia boolean,
    CONSTRAINT "SensorDataPrimary" PRIMARY KEY (idno, ano, mes, dia, hora, min, seg))

```

Fonte: Elaborado pelo autor.

São duas tabelas, a primeira recebe os dados brutos (originais) provenientes dos sensores (Tabela *sensordata*), e a segunda é uma tabela de apoio, com a mesma estrutura, para receber informações da Tabela dos dados brutos que foram filtradas

por critérios estabelecidos pelo usuário do sistema, durante as etapas de análises (Tabela sensorfiltro).

3.1.3 Infraestrutura de processamento e visualização

As visualizações de diferentes representações espaçotemporal são obtidas por meio de dois tipos de processamento: operações matemáticas para composição temporal e outras para a composição espacial. Estas operações são suportadas por dois componentes tecnológicos: Sistemas Gerenciadores de Banco de Dados (SGBD) e Sistemas de Informações Geográficas (SIG).

A composição temporal está a cargo do SGBD, onde são realizadas manipulações de bases de dados por meio de duas *Views*. *Views* são estruturas técnicas virtuais configuradas no SGBD que representam consultas dinâmicas às outras bases fisicamente existentes. As *Views* foram criadas para realizar operações como: médias, máximos, mínimos, desvio padrão, agrupadas por faixa horária, além destes, realizam cálculos de normalização e padronização estatística dos dados (BRAGA,2010). A estrutura de uma das consultas que formam as *Views* é apresentada na Figura 37.

Figura 37 – *Scripts da View* que representa as composições temporais

```
CREATE OR REPLACE VIEW public.sensordatarelativo AS
select sd.*,
  case when maxco=minco then 0 else ((co-minco)/(maxco-minco) ) end as conormal,
  case when maxco2=minco2 then 0 else ((co2-minco2)/(maxco2-minco2) ) end as co2normal,
  case when maxno2=minno2 then 0 else ((no2-minno2)/(maxno2-minno2) ) end as no2 normal,
  case when maxo3=mino3 then 0 else ((o3-mino3)/(maxo3-mino3) ) end as o3 normal,
  case when maxtemp=mintemp then 0 else ((temperatura-mintemp)/(maxtemp-mintemp) ) end as
    tempnormal,
  case when maxumi=minumi then 0 else ((umidade-mintemp)/(maxumi-minumi) ) end as uminormal,
  case when stdco=0 then 0 else ((co-medco)/(stdco) ) end as copadiao,
  case when stdco2=0 then 0 else ((co2-medco2)/(stdco2) ) end as co2padiao,
  case when stdno2=0 then 0 else ((no2-medno2)/(stdno2) ) end as no2padiao,
  case when stdo3=0 then 0 else ((o3-medo3)/(stdo3) ) end as o3padiao,
  case when stdtemp=0 then 0 else ((temperatura-medtemp)/(stdtemp) ) end as temppadiao,
  case when stdumi=0 then 0 else ((umidade-medumi)/(stdumi) ) end as umipadiao
from sensordata as sd,
  (select idno,dia,mes,ano,hora, max(co) as maxco, max(co2) as maxco2, max(no2) as
    maxno2, max(o3) as maxo3,max(temperatura) as maxtemp,max(umidade) as maxumi, min(co) as
    minco, min(co2) as minco2, min(no2) as minno2, min(o3) as mino3, min(temperatura) as mintemp,
    min(umidade) as minumi, stddev(co) as stdco, stddev(co2) as stdco2, stddev(no2) as stdno2,
    stddev(o3) as stdo3, stddev(temperatura) as stdtemp, stddev(umidade) as stdumi, avg(co) as
    medco, avg(co2) as medco2, avg(no2) as medno2, avg(o3) as medo3, avg(temperatura) as medtemp,
    avg(umidade) as medumi from sensordata group by idno,dia,mes,ano,hora) as sg
  where sd.idno=sg.idno and sd.dia=sg.dia and sd.mes=sg.mes and sd.ano=sg.ano and
    sd.hora=sg.hora;
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores armazenados pelas *Views* são os resultados das operações, que serão disponibilizados para serem utilizadas pelo SIG.

A composição espacial está a cargo do SIG, que permite realizar operações matemáticas relacionadas ao ambiente geográfico avaliado, com base na projeção e combinação dos dados provenientes dos sensores. O SIG utilizado para as análises foi o ArcGIS versão 10.4.1, contendo licença para uso de extensão de análises espaciais avançadas. Esta extensão oferece uma gama de características de análise e modelagem que possibilitam criar, consultar, mapear e analisar dados de uma determinada área, permitindo realizar interpolações dos valores de dados para uma área de estudo com base em amostras, criando superfícies *raster* contínuas (ESRI, 2017). Estes recursos são extremamente importantes, pois com eles é possível destacar regiões com as diferentes variações de concentração de poluentes.

3.2 PROCESSO METODOLÓGICO PARA ANÁLISE ESPAÇOTEMPORAL

O método aqui apresentado é o instrumento para atingir os objetivos propostos inicialmente por esta tese. Resumidamente, pretende-se instrumentar o gestor público com uma ferramenta para análise e tomada de decisões, que proporcione uma visão do espaço urbano, revelando a situação da qualidade do ar em micro escala territorial, utilizando referenciais nacionais de medição, ou mesmo utilizar uma nova forma de observar o território, identificando quais microrregiões possuem maiores problemas com concentração de poluentes.

Para criar um ambiente para atingir esse objetivo é necessário o suporte de uma infraestrutura tecnológica complexa, com diversos recursos técnicos e que exige conhecimento multidisciplinar. Os modelos tradicionais de monitoramento de qualidade do ar utilizam estações fixas com sensores de alta precisão, acurácia e preço. Aqui se propõe um novo paradigma de monitoramento da qualidade do ar, uma vez que se baseia na análise de informações proveniente de vários sensores, que possuem um custo menor e facilitam o uso disseminado; mesmo que com acurácia menor, as coletas por vários sensores distribuídos no espaço e no tempo agregam uma perspectiva de microrregiões, que pode complementar o modelo tradicional, ou mesmo ser um passo inicial em municípios que ainda não possuem um modelo tradicional de monitoramento automático e fixo da qualidade do ar.

A plataforma tecnológica disponibilizada para as análises permite o emprego de técnicas computacionais para o processamento, cálculo e transformações dos dados, a fim de construir representações espaçotemporais. Sendo assim, nesta

seção são apresentadas as etapas de processamento com as razões e técnicas empregadas para atingir o objetivo, assim como as interpretações utilizadas para a composição espaçotemporais.

De forma geral, a metodologia é dividida em três fases (Figura 38): A Fase de Extração, Tratamento e Carga dos dados (ETL), que é responsável pelo primeiro tratamento dos dados provenientes diretamente dos sensores; A Fase de Composição das Análises Temporais (CAT), que é responsável pelas operações que formam a perspectiva temporal para as projeções; A Fase de Composição das Análises Espaciais (CAE), que é responsável pelas operações de agregação, interpolação, recortes e projeções cartográficas.

Figura 38 – Etapas metodológica para projeção espaçotemporal

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.1 Extração, transformação e carregamento

Esta fase é o primeiro contato com os dados provenientes dos sensores, sendo responsável por carregar as informações nas bases de dados, com o devido

processamento e filtragem. Durante este processo são efetuadas três etapas (Figura 39).

Figura 39 – Etapas metodológica de ETL

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.1.1 Limpeza de dados

Durante a coleta dos dados alguns fatores podem interferir nas informações dos sensores, e estas interferências podem gerar dados incorretos ou incompletos. Desta maneira é necessária realizar uma “limpeza” nos dados. A Tabela 8 apresenta situações que são tratadas pela Limpeza, cujo dado não será considerado para as análises;

Tabela 8 - Critérios para exclusão de dados das análises

Situação	Razão para limpeza
Sem informações do GPS	Durante o trajeto do veículo, o mesmo pode se encontrar em uma região sem cobertura de sinal GPS, mesmo com informações dos sensores, se este não tiver posicionamento, ele não será considerado para as análises.
Bateria baixa	Segundo o fabricante, quando a bateria chega abaixo dos 20%, os dados passam a não ser confiáveis.
Tamanho do pacote menor que o previsto	Durante a gravação dos dados no cartão, algum dado pode não ter sido gravado corretamente.
Valores de sensores fora dos limites naturais	Durante a gravação dos dados no cartão, algum dado pode ter sido gerado com valores fora da faixa natural dos dados.

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.1.2 Ajustes de fuso horário

Os dados coletados utilizam como referência de hora a informação obtida do sistema de posicionamento global (GPS). Este sistema trabalha com o fuso horário de referência - Tempo Universal Coordenado (UTC), também conhecido como Hora de Greenwich (GMT). O horário oficial do Brasil (sem horário de verão) está com três

horas a menos que o utilizado pelo GPS (UTC -03:00), sendo assim, todos os dados deverão ter seu horário da coleta ajustado para o horário local.

3.2.1.3 Unificação e agregação de dados.

Todos os dados dos diversos sensores devem ser unificados em uma única base de dados, ordenada pela data e hora da coleta. Assim uma aplicação local, se encarrega de obter as informações do servidor FTP, e realizar as atividades de limpeza, ajuste de fuso horário e unificação e agregação de dados (Figura 40).

Figura 40 – Aplicação realizando a importação da coleta de dados dos sensores

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após esta etapa, todos os dados brutos estarão carregados no Sistema Gerenciador de Banco de Dados.

3.2.2 Composição de aspectos temporais

Uma importante questão de pesquisa é a introdução da variável tempo nos modelos espaciais. Para estudar os fenômenos ambientais reais complexos é necessário

reduzir a complexidade do mundo real através de uma etapa conceitual de modelagem. O objetivo principal é levar em conta as dimensões espaciais e temporais dos processos naturais (MOLENAAR, 1998). As versões atuais de software de SIG e bibliotecas geoespaciais estão focadas em modelos espaciais e a integração do tempo ainda é objeto de pesquisa (THIBAUD; DEL MONDO; GARLA, 2013). Ele requer alguns modelos conceituais ambiciosos com base em noções genéricas adaptadas para aplicações espaçotemporais específicas.

Nesta tese optou-se criar duas etapas para realizar a composição dos aspectos temporais (Figura 41): Agrupamento e cálculos estatísticos; Padronização e normalização estatística.

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.2.1 Agrupamento e cálculos estatísticos

Nesta tese, a qualidade do ar é o objetivo de monitoramento, e já existe legislação que define padrões e modelos de referência. Exemplos de legislações são: Resolução CONAMA nº 3, de 28 de junho de 1990, que dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previsto no Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar “PRONAR”, ou mesmo, o Decreto Estadual nº 59113 de 23/04/2013 que estabeleceu novos padrões de qualidade do ar para o Estado de São Paulo. Nestes documentos estão definidas as questões temporais para os valores de poluentes monitorados por estações automáticas. Dentre elas é comum encontrar referências como médias das últimas 8 (oito) e 24 (vinte e quatro) horas, médias diárias, mensais e anuais. Todas estas compostas a partir das médias horárias dos gases monitorados.

Desta forma, a composição base para as projeções temporárias serão agrupados por faixa horária de valores como: médias, máximo, mínimo, desvio padrão. Para melhor entendimento, iremos definir estes valores como medidas absolutas.

3.2.2.2 Padronização e normalização estatística

O comportamento típico da concentração de poluentes em ambiente urbano pode ser visto na Figura 42.

Figura 42 – Perfil típico da concentração de gases durante o dia

Fonte: Rocha, Rosa e Cardoso (2009).

Ao analisar o gráfico é possível perceber que certos horários do dia tendem a ter uma maior concentração de certos poluentes. Considerando o modelo apresentado por esta tese, que trata de coletas de amostras do ar por meio de dispositivos móveis hospedados em ônibus coletivos, as regiões coletadas no horário de pico poderiam ter uma visão destacada frente a outras regiões que tiveram a coleta em horários diferentes.

Para minimizar este fator, algumas técnicas devem ser aplicadas. O sensor está hospedado em um veículo que tem uma rota cíclica, passando pelos mesmos pontos recorrentemente, assim identificam-se em cada ciclo de viagem, quais seriam os pontos com maior concentração ao longo do dia, e observando a recorrência de pontos que apresentam maior concentração de poluentes em todos os ciclos de viagens. Frente a esta característica, técnicas de estatísticas de dispersão e associação, podem colaborar para minimizar o efeito apresentado. O efeito da escala pode ser eliminado com o emprego da técnica de padronização, a

padronização de uma observação é a transformação de seu valor em um *z-score*, obtido após subtração da média e a divisão pelo desvio padrão (BRAGA, 2010). Alternativamente pode se utilizar recursos matemáticos como normalização de dados, de forma que possam uniformizar estas diferenças sazonais durante o dia.

Ambos os casos apresentam bons modelos de dispersão de dados, com algumas características que podem afetar o resultado. No caso da padronização, as viagens que tiverem uma grande amplitude dos valores dos dados, podem concentrar os pontos mais críticos nesta viagem, enquanto na normalização este problema não acontece, no entanto, os *outliers* (valores muito acima da média) podem minimizar a representação dos demais valores, de forma que seria ideal remover os *outliers* quando utilizarmos a normalização. Para a presente tese utilizaremos a padronização.

Para esta tese, pretende-se identificar as variações dentro de períodos de uma hora, classificando cada dado de concentração de poluente, em níveis de concentrações, representando relativamente os pontos que apresentam maior ou menor tendência de concentração de poluentes. Para melhor entendimento, iremos definir estes valores como medidas relativas. As fórmulas (1) e (2), representam os cálculos para obtenção dos valores normalizados e padronizados respectivamente.

$$Vn(x) = \frac{(x - \text{mínimo}(C(x)))}{\text{máximo}(C(x)) - \text{mínimo}(C(x))} \quad (1)$$

Onde:

$C(x)$ é o conjunto de dados com a mesma data e mesma faixa horária de x
 $Vn(x)$ é o Valor normalizado do ponto x

$$Vp(x) = \frac{(x - \bar{X}(C(x)))}{\sigma(C(x))} \quad (2)$$

Onde:

$C(x)$ é o conjunto de dados com a mesma data e mesma faixa horária de x
 $Vp(x)$ é o Valor padronizado do ponto x

Figura 43 – Comparação dos gráficos de concentração diária de NO_2 com valores: absoluto, padronizado e normalizado

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.3 Composição de aspectos espaciais

As principais regiões metropolitanas brasileiras possuem mecanismos de monitoramento da qualidade do ar; no entanto, o primeiro diagnóstico das redes nacionais para este fim, menciona que existem assimetrias estruturais significativas, entre as redes de monitoramento (INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE, 2014). Este cenário não é diferente para a capital paulista, mesmo sendo a região metropolitana com maior número de estações de monitoramento contínuo e automático do país. Estas assimetrias se explicam pela característica técnica de escala de representatividade espacial das estações, que dependendo do local de sua instalação não permite cobrir todo o território do município.

A representatividade de uma estação é a representação da extensão da parcela de ar no entorno, que apresenta concentrações relativamente uniformes e similares às concentrações medidas na estação. As referências de representações espaciais de estações de monitoramento, de São Paulo são definidas pelo Decreto Estadual nº 59113, de 23 de abril de 2013 (Tabela 9).

Tabela 9 - Padrões de representação espacial das estações.

Escala	Cobertura
Microescala	Dimensão de poucos metros até 100 metros
Média escala	Blocos de áreas urbanas (poucos quarteirões com características semelhantes) com dimensões entre 101 e 500 metros
Bairro	Áreas de bairros urbanos com atividade uniforme e dimensões entre 501 e 4.000 metros
Urbana	Cidades ou regiões metropolitanas, da ordem de 4 a 50 km

Fonte: CETESB (2016).

Para exemplificar, a Tabela 10 representa os requisitos para uma estação que monitora o Monóxido de Carbono, ser considerada como de escala “Bairro”.

Tabela 10 - Requisito para representação espacial na escala bairro de estações que monitoram CO

Número médio de veículos/dia na via de tráfego	Distância mínima (m) da via de tráfego
≤10.000	10
15.000	25
20.000	45
30.000	80
40.000	115
50.000	135
≥60.000	150

Fonte: CETESB (2016).

No caso de Material Particulado (MP), as estações localizadas a distâncias entre 5 e 15 metros de um corredor de tráfego, com altura de captação da amostra entre 2 e 7 metros, são consideradas como de microescala.

Os sensores, empregados nesta tese, estão instalados no topo de ônibus de transporte coletivos de passageiros, que possuem a altura externa máxima do veículo de 3,8 metros (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009). Portanto, as medidas providas por estes sensores permitem no máximo a representação espacial de até 100 metros, isto é, de microescala.

Para a composição dos aspectos espaciais foram adotadas quatro etapas (Figura 44): Projeções UTM e georreferenciamento; Interpolações; Classificações e agrupamentos; Recortes.

Figura 44 – Etapas metodológica para a Composição de aspectos espaciais

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.3.1 Projeções UTM e georreferenciamento

O modelo proposto por esta tese viabiliza a medição de forma móvel permitindo a projeção cartográfica de uma série de pontos coletados. O ônibus de transporte coletivo que hospeda o kit sensor, enquanto transita em sua rota diária, coleta amostras do ar e registram as informações de concentrações de gases a cada 30 segundos. Cada coleta contém além das informações de concentração de poluentes, as coordenadas de latitude e longitude, que são obtidas pelo sensor GPS do kit. Estas coordenadas estão sob o sistema de referência *World Geodetic System* (WGS84), que para efeitos práticos identifica-se com o SIRGAS 2000, referencial oficial brasileiro. A partir destas coordenadas (latitude e longitude), o SIG pode realizar a projeção dos pontos na forma de uma camada cartográfica, definindo-se previamente o sistema de projeção, no caso, o Sistema Universal Transverso de Mercator (UTM), definindo-se também a unidade em metros (e não em graus). Uma vez feita, as devidas definições do sistema de coordenadas, os pontos são projetados na camada cartográfica do SIG.

3.2.3.2 Interpolações

Os pontos projetados por si só não representam uma superfície ou área contínua, necessitando passar por processamento e cálculos para geração de uma nova camada cartográfica. Este processo pode ser alcançado com uso de técnicas de interpolação.

Para este trabalho foram avaliados alguns métodos de interpolação como o *IDW* (ou ponderação pelo inverso da distância, sendo um caso particular o inverso do quadrado da distância, ou IQD), *Ordinary kriging*, *Ordinary coKriging*, dentre outros, que foram vistos na seção 2.3. Nas pesquisas de artigos sobre o assunto foi observado que o *IDW* tem sido utilizado comumente como processo de interpolação para monitoramento da qualidade do ar (LINDLEY; WALSH, 2005); (HOEK et al., 2008); (HORÁLEK et al., 2005) e nos casos que o *IDW* não tem sido utilizado, o principal argumento tem sido atribuído ao distanciamento dos pontos de coleta (estações) ou a baixa concentração de pontos em uma região contínua. Além disso, há outros métodos que utilizam outras fontes de dados para aprimorar a eficiência de métodos de interpolação como é o caso da Regressão Linear Múltipla (MESQUITA, 2009).

No caso desta tese, a coleta está distribuída em vários pontos na rota percorrida pelo ônibus, o que oferece uma boa densidade para uso de interpolações do modelo *IDW*, na geração de superfícies contínuas para representar perspectivas de visualização. Sendo assim, a fórmula (3) explicita o método de cálculo utilizado pela interpolação *IDW*, que é disponibilizado pelo SIG ArcGIS.

$$V_i = \frac{\sum_{j=1}^n \left(\frac{1}{d_{ij}^p} V_j \right)}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{d_{ij}^p}} \quad (3)$$

Onde:

V_i é o valor desconhecido i ;

n é o número de pontos utilizados para compor V_i ;

V_j é o valor conhecido j ;

d_{ij} é a distância entre ponto de cota desconhecida i e o ponto de cota conhecida j ; e

p é a potência para ser usada como ponderação (quadrado, cubo, ...).

Para realizar a interpolação IDW com o software ArcGIS, é necessário a atribuição de valores para alguns parâmetros (a potência a que está elevada a distância, número mínimo de vizinhos, tamanho da célula de saída etc.) a fim de realizar o processamento. Alguns destes parâmetros são utilizados pelos cálculos (Fórmula 3), ou para a composição da camada no SIG (Figura 45).

Figura 45 – Preenchimento de parâmetros para realização de interpolação IDW

Fonte: Elaborado pelo autor com base no Software ArcGIS (ESRI, 2015).

Os parâmetros são:

- “feições de pontos de entrada”: Os pontos coletados pelos sensores;
- “campo de valor Z”: Campo de análise para a interpolação, neste caso o campo com o nome do poluente (CO, O₃ ou NO₂);
- tamanho da célula: O tamanho do pixel a ser projetado na camada cartográfica. Neste caso foi adotado 5 metros, a fim de minimizar o efeito de “serrilhado” quando for realizada uma aproximação em uma região da projeção;
- potência: é o valor utilizado pela Fórmula (3) como expoente da distância. Em resumo, indica que quanto maior for o valor da potência, menor será a influência dos pontos mais distantes. Neste caso, adotou-se a potência

máxima permitida (três), uma vez que a distância máxima da representatividade espacial das medições é 100 metros (microescala).

- e) raio de pesquisa: Raio de cobertura da vizinhança que será utilizado para composição da interpolação. Como a representatividade espacial do valor coletado pelo sensor é de microescala, este permite no máximo que os valores lidos tenham uma cobertura de até 100 metros, o valor que foi adotado para a cobertura.

3.2.3.3 Classificações e Agrupamentos

As operações de interpolação resultam em superfícies contínuas, que representam diferentes níveis de concentração de poluentes em forma de classes ou grupos que apresentam situações / condições similares. A ferramenta *ArcGIS* oferece vários métodos de classificação como: por desvio padrão, intervalo idêntico, intervalo geométrico, quartis, etc.

Cada um dos métodos de classificação pode ser utilizado para a representação visual de agrupamentos de áreas similares. Neste caso, serão testadas duas possibilidades: desvio padrão ou quartis.

A classificação por desvio padrão utiliza-se do valor da média como elemento central, do qual deriva as demais classes, por desvios padrões acima ou abaixo da média. Já o método de classificação por quartis, divide em classes com o número igual de amostras, sendo a classe central a que contém a mediana. Este último método de classificação realiza um agrupamento de regiões na proporção exata da quantidade de quartis definidos para análise, já o outro método agrupa em classes por similaridades de medição; neste caso, podem ocorrer situações com apenas uma classe, se as medidas forem muito semelhantes. As motivações para adotar uma ou outra, serão tratadas quando forem apresentados os modelos interpretativos espaçotemporais.

3.2.3.4 Recortes

A cobertura de leitura de uma medição é determinada pelos critérios de representatividade espacial. Neste caso, as medidas são provenientes de sensores que possuem a representatividade espacial em microescala, e assim qualquer projeção feita além dos 100 metros de distância do ponto de coleta pode gerar erros

de interpretação. Dessa forma, após a interpolação devem ser feitos recortes (*buffer*) a fim de delimitar os valores representados dentro do limite de 100 metros. A Figura 46 apresenta um exemplo do resultado da aplicação do processo proposto.

3.3 CRIAÇÃO DE MODELOS ESPAÇOTEMPORAIS DE INTERPRETAÇÃO ABSOLUTA E RELATIVA

Uma vez estabelecida a plataforma tecnológica e o processo para a análise de microescala espaçotemporal, o especialista ou gestor poderá utilizar o SIG para realizar as interpretações dos resultados obtidos por campanhas de mapeamento feito pelos sensores embarcados em ônibus urbanos. Dois tipos de interpretações são propostas e explicadas a seguir, são elas: a absoluta e relativa.

3.3.1 Construção de representação espaçotemporal absoluta

Uma representação cartográfica que expresse visualmente referências já conhecidas facilita a compreensão de especialistas e gestores que utilizarão o SIG como ferramenta de apoio à tomada de decisão. Esta representação apresenta os valores na forma bruta como foram coletados, realizando as composições temporais e composições espaciais mencionados nas seções 3.2.2 e 3.2.3, respectivamente.

Esta representação presume que os resultados devem revelar diferenças entre as regiões, com base nas concentrações de poluentes coletadas usando referências nacionais tradicionais (valores absolutos de poluição de cada poluente). A

diferenciação das regiões é feita pela classificação que utiliza modelos de referência consolidados, como por exemplo, os apresentados pela CETESB.

Vale a pena ressaltar a característica apresentada na Figura 42 (página 59), que revela a variação da concentração típica de gases poluentes durante o dia, e, portanto, é válido utilizar a projeção para encontrar regiões que possuem maior exposição a poluentes, mas comparar regiões que tiveram a coleta de amostras em horários diferentes pode causar interpretações equivocadas. As representações padronizadas são categorizações horárias: 1 h, 8 h, 24 h.

3.3.2 Construção de representação espaçotemporal relativa

Esta representação apresenta uma perspectiva de visualização, onde se revelam regiões que frequentemente apresentam maiores índices de concentração de poluentes. Isto é, independente do dia ou horário, quais são as regiões que sempre estão apresentando os piores níveis. As representações desta interpretação permitem analisar visualmente os níveis relativos da concentração de poluentes e associar a características da ocupação do solo, ou a uma característica local (como tráfego intenso) que promovem uma maior concentração ou emissão de poluentes no trajeto percorrido, independentemente do valor absoluto de poluição.

A composição espaçotemporal relativa utiliza os cálculos provenientes de interpolação, com base em valores previamente processados (estatisticamente normalizados ou padronizados), dentro do intervalo de cada hora, desta forma, representam valores relativos de diferentes de concentração de poluentes por hora. Os cálculos desta composição são representados pelas fórmulas (4) e (5).

$$V_i = \frac{\sum_{j=1}^n \left(\frac{1}{d_{ij}^p} Vp(x) \right)}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{d_{ij}^p}} \quad (4) \quad \text{ou} \quad V_i = \frac{\sum_{j=1}^n \left(\frac{1}{d_{ij}^p} Vn(x) \right)}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{d_{ij}^p}} \quad (5)$$

Onde:

$$Vp(x) = \frac{(x - \bar{C}(x))}{\sigma(C(x))} \quad Vn(x) = \frac{(x - \text{mínimo}(C(x)))}{\text{máximo}(C(x)) - \text{mínimo}(C(x))}$$

$Vp(x)$ é o Valor padronizado do ponto x

$Vn(x)$ é o Valor normalizado do ponto x

$C(x)$ é o conjunto de dados com a mesma data e mesma faixa horária de x

V_i é o valor desconhecido i ;

n é o número de pontos a ser utilizados para compor V_i ;

d_{ij} é a distância entre o ponto com valor a determinar i e o ponto com valor conhecido j ; e p a potência para ser usada como ponderação.

Para fins de entendimento e ilustração, apresenta-se um exemplo de uma rota fictícia de uma linha (Figura 47) e as projeções gráficas dos dados absolutos, e os valores convertidos com base nos valores padronizados e normalizados. Neste exemplo, é possível perceber que observando o gráfico normalizado que em cada volta completa, às áreas A e B apresentam as maiores concentrações de poluentes, algo que não é tão simples de detectar observando os dados absolutos de NO_2 .

Figura 47 – Trajeto fictício de linha de ônibus coletivo

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 48 – Projeções dos valores absolutos e relativos em relação ao trajeto fictício

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para exemplificar a classificação de modelos relativos, outro caso fictício, de ônibus público coletivo transitando por duas horas em quatro trechos, coletando diferentes dados fictícios de um poluente e apresentado na Tabela 11. Neste exemplo, utilizou-se a classificação de quatro quartis de cada hora para o modelo relativo, e, desvio padrão para o modelo absoluto (Mais baixo < média- desvio; Baixo <= média; Alto < média + desvio; Mais alto >= média + desvio).

Tabela 11 – Valores fictícios de coleta de dados de 4 trechos de uma linha classificada por 4 quartis

Hora	Região	Medidas	Soma	Média	Desvio padrão	Modelo Relativo	Modelo Absoluto (média horária do trecho)
8:00 – 8:15	A	1;2;3	6	3,5	1,93	Mais baixo	2,00 - Baixo
8:15 – 8:30	B	1;2;5	8			Baixo	2,66 - Baixo
8:30 – 8:45	C	2;3;5	10			Mais alto	3,33 - Baixo
8:45 – 9:00	D	3;2;4	9			Alto	3,00 - Baixo
9:00	A	2;4;3	9			Mais baixo	3,00 - Baixo

9:15					
9:15 – B	2;3;6	11	Alto	3,66 -	Alto
9:30					
9:30 – C	6;7;8	21	Mais alto	7,00 -	Mais Alto
9:45					
9:45 – D	1;5;4	10	Baixo	3,33 -	Baixo
10:00					

Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando os dados do modelo relativo é possível perceber que a região C é que recorrentemente apresenta os maiores índices, enquanto a região A é a menor. Desta forma, por exemplo, é possível analisar as características da região C para descobrir o que pode estar causando este fenômeno. Por outro lado, no modelo absoluto, a ênfase é dada à concentração absoluta. Assim, revelam a região B e C como regiões que atingiram a maior exposição a poluentes, no horário das 09h15min as 09h45min.

Assim o modelo relativo é suficiente para reconhecer regiões onde as características da ocupação do solo, ou comportamento do tráfego podem estar influenciando na concentração de poluentes. Já o modelo absoluto, identifica absolutamente as áreas onde há maior exposição de poluentes e ajuda a caracterizar a qualidade do ar.

3.4 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

Considerando as seções deste capítulo, a primeira revela os aspectos tecnológicos da plataforma de análises espaçotemporais de alta resolução da qualidade do ar.

A montagem dos equipamentos da infraestrutura de sensoriamento foi um dos maiores desafios da tese, seja pelas vicissitudes de desenvolvimento do kit, o qual teve que passar por testes de validação, aprimoramentos, que ocasionaram a criação de várias versões do kit sensor, ou mesmo pelos diversos problemas administrativos para a aquisição e importação dos componentes do kit sensor. Para composição do kit sensor priorizaram-se as soluções que tivessem o menor impacto de customização e um histórico de utilização em casos similares. Como a tese não teve como foco a construção dos sensores optou-se por produtos consolidados de fornecedores conhecidos. A solução eleita foi composta por uma série de componentes modulares, o que ocasionou um esforço adicional na montagem e incorporação de mecanismos para minimizar o problema da vibração veicular. Nesta

solução houve a necessidade de programação da sequência de leituras e configuração do software básico do kit sensor, que exigiu conhecimento de linguagem de programação e compreensão das bibliotecas de funções do fabricante. Por fim, a calibração dos sensores tornou-se um desafio do projeto na primeira versão do kit, visto que o fabricante recomendava uma calibração dos sensores de gases com base em câmeras com quantidade de gases conhecidas. Esta versão demonstrou-se inviável, sendo adotada a aquisição de sensores calibrados diretamente de fábrica, e desta forma o processo de calibração foi resolvido.

A infraestrutura de transmissão passou por um estudo de viabilidade e as características do melhor posicionamento dos componentes da RSSF. Esta fase foi relatada e consolidada em um Artigo de Revista Internacional (SANTOS et al., 2014), e sua aceitação passou por várias fases de melhoria, sendo que sua publicação foi um marco importante para a presente tese. As simulações também apontaram quais seriam as caracterizações e classificações da RSSF a serem adotadas na presente tese.

Quanto ao fluxo de dados, a infraestrutura de processamento recebe as informações dos kits sensores, que são transmitidas e acumuladas em servidor FTP, e processadas e armazenadas em servidor de Banco de Dados. Este Banco de Dados é a fonte de informação e em conjunto com o SIG possibilita as análises espaçotemporais, por meio de georreferenciamento dos dados provenientes dos kits sensores, cálculos estatísticos e interpolações.

A realização das análises espaçotemporais de alta resolução se vale do processo metodológico estabelecido na seção 3.2, para conceber modelos de representação relativos e absolutos conforme seção 3.3. Estes modelos estarão incorporados no SIG, que se torna uma ferramenta de apoio à tomada de decisão para especialistas e gestores públicos. As representações permitem visualizar o conglomerado urbano como uma espécie de “raio x” da situação da cidade, como se verá nos casos práticos desta tese.

As análises permitem avaliar se algumas constatações de características já concebidas por pesquisas anteriores estão presentes na região monitorada, e que são perceptíveis nas representações cartográficas. Assim, nas próximas seções serão relatados experimentos de mapeamento, que foram realizados durante a elaboração deste trabalho para validar os conceitos e hipóteses propostos. A seção

posterior apresenta o uso da plataforma em um estudo de caso de longa duração, que mostra as potencialidades do sistema e metodologia propostos. Este estudo de caso pretende observar características da ocupação do solo, destacando algumas referências, já identificadas como potenciais áreas de concentração de poluentes. São elas:

- a) cânions Urbanos: Característica das ruas que são flanqueadas por altas edificações em ambos os lados. Pesquisas apontam que este tipo de formação urbanística propicia uma maior concentração de poluentes nestes locais (KRECL et al., 2016), (TARGINO; KRECL, 2016) (VARDOULAKISA et al., 2003);
- b) túneis urbanos: Características dada a estrutura que liga dois pontos de uma via, por meio de passagem subterrânea. Uma vez que por estes túneis trafegam veículos que emitem gases poluentes, naturalmente existe a tendência de concentração de poluentes nestas estruturas (VASCONCELLOS; CARVALHO; POOL, 2005); (BARREFORS, 1996), que muitas vezes instalam infraestrutura para dissipação forçada de poluentes;
- c) cruzamentos viários: característica que ocorre na interseção de vias urbanas, com ou sem controle semaforico. Pesquisas apontam que a aceleração dos veículos, após abertura do semáforo, provoca um acréscimo nas emissões de poluentes nestas regiões (GOEL; KUMAR, 2015); (AHMAD; KHARE; CHAUDHRY, 2005).

4 EXPERIMENTOS E HIPÓTESES DE VALIDAÇÃO

A plataforma proposta precisava ser testada, de forma a equacionar quais descobertas poderiam ser extraídas das informações coletadas, e assim realizar análises espaçotemporais de alta resolução das condições da qualidade do ar. Desta forma, como estratégia foram estabelecidas técnicas de pesquisa experimental para validar e apresentar o potencial da plataforma para análises espaçotemporais de alta resolução.

Do ponto de vista teórico, na pesquisa experimental é importante esquematizar um experimento para coletar dados e realizar as análises necessárias para avaliação dos cenários.

A pesquisa experimental consiste em determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis que seriam capazes de influenciá-lo, definir as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto (GIL, 2002).

As pesquisas experimentais devem apresentar algumas características para que possam ser consideradas aptas para obter os resultados desejados:

- a) manipulação: pelo menos uma das características dos elementos estudados deve ser controlável e configurável para avaliar os objetivos da pesquisa;
- b) controle: um ou mais controles devem ser introduzidos na situação experimental, sobretudo criando um grupo de controle;
- c) distribuição aleatória: deve haver um processo aleatório de designação dos elementos para participar dos grupos experimentais e de controle.

Dentro do escopo desta tese, o delineamento de experimentos de validação se valeu da observação das seguintes propriedades:

- a) mobilidade do nó sensor: determinada pela velocidade e localização do sensor de coleta;
- b) tráfego urbano: quantidade e tipo de veículos em circulação na região;
- c) variáveis do ambiente: Valores de variáveis ambientais impactadas pela questão do tráfego de veículos, como por exemplo, gases poluentes, ou mesmo características de micro clima como temperatura e umidade;
- d) ocupação do solo: é a conjuntura de uso da terra, considerando a densificação, os empreendimentos antrópicos e as características naturais em regiões geograficamente estabelecidas.

De acordo com esses princípios, operacionalmente, as validações ocorreram por meio de vários experimentos, sendo que cada um tinha seu objetivo e pretendeu esclarecer hipóteses. Cabe salientar, que os experimentos foram realizados em momentos distintos, e com versões diferentes dos kits, em diferentes fases de validação dos métodos, que foram aprimorados com o passar do tempo. Portanto, alguns resultados foram interpretados de maneira mais clara com o desenrolar da pesquisa. De qualquer forma, como experiência para outros pesquisadores, os experimentos são apresentados da forma como foram realizados, compondo um registro da evolução dos métodos e equipamentos utilizados nos experimentos. São eles:

- a) experimento 1 – Validação das leituras realizadas pelo kit sensor hospedado em veículos para coleta de informações em movimento. Os experimentos foram realizados com o intuito de avaliar a existência de interferência do movimento nas informações de concentração de gases por meio de sensor hospedado em veículo. Assim como, validar estratégias para minimizar os efeitos, caso existissem;
- b) experimento 2 – Avaliação de variáveis ambientais em vias de alto volume de tráfego. Os experimentos coletaram variáveis ambientais em vias urbanas da cidade de São Paulo;
- c) experimento 3 – Avaliação de variáveis ambientais em rota de ônibus coletivo. O experimento ocorreu na cidade de Juiz de Fora em Minas Gerais, cidade de Médio/Grande porte com aproximadamente 550 mil habitantes, segundo dados do IBGE;
- d) experimento 4 - Avaliação de coletas de informações de gases durante carreata de veículos elétricos na Avenida Paulista. O experimento ocorreu no trajeto da Av. Paulista até o estádio do Pacaembu.

Estes experimentos foram executados para coletar dados e verificar as possibilidades do mapeamento das condições da qualidade do ar, validar os kits e a plataforma e testar as seguintes hipóteses:

h1. A movimentação do veículo hospedeiro do sensor interfere nos valores das medidas dos gases poluentes coletados;

h2. A incorporação de um fluxo constante de ar passando pelos sensores permite minimizar a interferência da mobilidade nos valores coletados pelo kit sensor;

h3. Com a coleta de dados em movimento é possível perceber geograficamente os pontos mais críticos quanto à poluição do ar;

h4. Com o kit sensor hospedado em ônibus coletivo é possível perceber horários e locais mais críticos quanto à poluição do ar;

h5. Pelos dados coletados com dada plataforma é possível perceber diferenças na concentração de poluentes quando o tráfego é composto por veículos de baixa emissão de gases.

4.1 VALIDAÇÃO DO KIT SENSOR

Para validação dos kits sensores, o experimento foi composto por dois ensaios que foram realizados com o intuito de analisar os efeitos da movimentação nas medições realizadas. Esta seção descreve os objetivos, hipóteses, materiais e métodos utilizados, assim como os resultados obtidos no Experimento 1.

4.1.1 Objetivos e hipóteses de verificação

O objetivo principal do experimento é a avaliação e comparação de variáveis ambientais coletadas pelo nó sensor em movimento e estaticamente, a fim de testar as hipóteses *h1* e *h2*.

4.1.2 Materiais e métodos

a) Materiais utilizados

- Veículo automotor marca Renault modelo Logan 1.0 flex;
- kits sensores, versão 1.2 e versão 1.3 (Figura 49).

Figura 49 - kit sensor versão 1.2 e kit sensor versão 1.3 (com cooler instalado).

Fonte: Elaborado pelo autor.

b) Métodos utilizados

As pesquisas experimentais devem apresentar algumas propriedades para que possa ser considerada ideal para obter os resultados desejados, sendo assim, neste experimento foram equacionados os seguintes fatores:

- Mobilidade do nó sensor: determinada pela velocidade e localização do sensor de coleta. Neste experimento a mobilidade foi adotada como sendo estática ou em movimento (veículo transitando na velocidade limite da via);
- Tráfego urbano: quantidade e tipo de veículos em circulação na mesma região de coleta, os quais são as principais fontes de emissões de gases poluentes em centros urbanos. Neste experimento foi incorporado um requisito para o horário de realização do experimento, onde fosse avaliado no horário com o maior nível de tráfego, sendo assim, foi adotado o horário de pico da tarde (16:30 – 18:00);
- Variáveis ambientais afetadas pelo transporte: valores dos gases impactados pelo tráfego de veículos. Neste experimento foram adotados os gases O_3 , CO_2 , NO_2 , CO ;
- Local do experimento: Neste experimento foi adotado como localização a Praça da Prefeitura, no encontro da Avenida Professor Almeida Prado com a Avenida do Matão, ambos na Cidade Universitária em São Paulo, o qual possui aproximadamente 150 metros de comprimento em formato circular (Figura 50);

Figura 50 - Local da realização dos experimentos.

Fonte: Elaborado pelo autor a partir do Google Maps.

- **Duração:** Tempo de realização do experimento. Neste experimento foi adotada uma hora de coleta de dados, em ciclos alternados de 10 minutos, com medições estáticas e em movimento;
- **Amostra:** Cada sensor foi configurado para realizar coletas, a cada 30 segundos (tempo mínimo para estabilização do sensor), totalizando 120 amostras durante o tempo de realização do experimento.

Ao final do experimento eram extraídas as informações coletadas e armazenadas no kit sensor, para elaboração de comparações e cálculos estatísticos, a fim de confirmar ou não as hipóteses apresentadas inicialmente neste experimento.

4.1.3 Desenvolvimento do experimento

Neste cenário foram realizados ensaios experimentais na Cidade Universitária da USP, que observou as variáveis ambientais em diferentes condições de mobilidade do nó sensor, a fim de avaliar se existem diferenças entre as leituras feitas em movimento e as realizadas estaticamente. Foram realizados 2 (Dois) ensaios experimentais: O Ensaio 1 foi realizado com o kit sensor versão 1.2 e o Ensaio 2 foi realizado com o kit sensor versão 1.3. O Ensaio 1 foi desenvolvido de forma a validar ou não a hipótese *h1*, enquanto o Ensaio 2 foi desenvolvido de forma a validar ou não a hipótese *h2*.

Os ensaios experimentais foram realizados no início do horário de pico da tarde, das 16h30min às 18h00min, na Praça da Prefeitura da Cidade Universitária em São Paulo.

O kit sensor foi hospedado no teto de um veículo de passeio, coletando informações relativas sobre concentração de O_3 , CO_2 , CO , NO_2 , Umidade e Temperatura, a cada 30 segundos. Este veículo realizou cada ensaio em duas condições: 10 minutos estático e 10 minutos em movimento, alternando as situações até completar o período de uma hora. A velocidade ficou dentro limite da via (40 km), sem nenhuma intercorrência nos ensaios (Figura 51).

Figura 51 - Veículo no trecho do Experimento (em movimento e estático)

Fonte: Elaborado pelo autor.

O Ensaio 1 ocorreu no dia 04 de Novembro de 2014, das 17h00min às 18h00min (Horário de Verão), utilizando o kit sensor versão 1.2. O Ensaio 2 foi realizado com kit sensor versão 1.3, o qual apresentava uma atualização, que incorpora um ventilador para manter um fluxo constante de ar passando pelos sensores. O Ensaio 2 ocorreu no dia 29 de Junho de 2015, das 16h30min à 17h30min, nas mesmas condições do Ensaio 1.

4.1.4 Resultados

Os valores nativos apresentados pelos sensores de gases estão em unidades elétricas, isto é, apresentam os valores da tensão em volts (0 a 3.3 V), ou valores da resistência em Ohms (3 k a 60 k Ω no caso de O_3). Estes valores estão diretamente relacionados às unidades tradicionais de gases (ppm ou ppb). Para obter os valores nas unidades tradicionais é necessária obter os índices de calibração e efetuar os cálculos de conversão. Como o objetivo era apenas diferenciar os valores medidos em movimento dos medidos estaticamente, não houve necessidade das conversões em ppm ou ppb.

Os valores coletados do Ensaio 1 são apresentados na Tabela 12 e Tabela 13, e representados pelos gráficos da Figura 52 até a Figura 55.

Tabela 12 - Valores médios e desvio padrões obtidos com veículo estático no Ensaio 1

Horário	Temperatura	Umidade	CO	CO ₂	O ₃	NO ₂
17:00 -17:10	28,50 ±3,76	52,05 ±1,37	1,1742 ±0,0821	1,7238 ±0,1462	11,605 ±0,4906	2,3848 ±0,0021
17:20 -17:30	29,11 ±2,21	50,36 ±1,16	1,8871 ±0,1048	1,8835 ±0,1791	11,571 ±0,7144	2,3770 ±0,0034
17:40 -17:50	29,33 ±2,72	51,97 ±1,51	2,1730 ±0,0488	1,7103 ±0,0839	12,201 ±0,6134	2,3726 ±0,0073

± Desvio padrão

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 13 - Valores médios e desvio padrão obtidos com veículo em movimento no Ensaio 1

Horário	Temperatura	Umidade	CO	CO ₂	O ₃	NO ₂
17:10 -17:20	28,61 ±2,75	50,98 ±0,60	1,5917 ±0,12	1,6761 ±0,09	14,4691 ±1,46	2,3882 ±0,013
17:30 -17:40	27,48 ±1,88	50,57 ±1,34	2,0740 ±0,05	1,8657 ±0,18	15,3629 ±1,28	2,3754 ±0,003
17:50 -18:00	28,73 ±2,26	51,90 ±0,99	2,0528 ±0,04	1,8634 ±0,17	15,4732 ±1,76	2,3657 ±0,006

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 52 - Resistência do sensor de O₃ no Ensaio 1 – valor médio a cada 10 minutos

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 53 - Dispersão dos valores da Resistência do sensor de O_3 no Ensaio 1

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 54 - Tensão no sensor de CO no Ensaio 1– valor médio a cada 10 minutos

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 55 - Dispersão da Tensão no sensor de Dióxido de Carbono (CO_2)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para ter valores de referência do dia 04 de Novembro utilizaram-se duas fontes:

1. Laboratório de Análise dos Processos Atmosféricos (LAPAt) do IAG/USP, o qual se localiza a 500 metros do local do experimento, sendo que a Figura 56 apresenta a variação de concentração de Ozônio em ppb no dia do ensaio (04 de Novembro);
2. Estação CETESB da Cidade Universitária, localizada aproximadamente a 1,5 km do local do experimento (Figura 57).

Figura 56 - Gráfico de referência de O₃ em ppb apresentado pelos equipamentos do LAPAt

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 57 - Gráfico de referência de O₃ em µg/m³ apresentado pela estação USP da CETESB

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com relação ao Ensaio 2, a Tabela 14 e Tabela 15 apresentam os valores coletados, enquanto a representação gráfica é vista na Figura 58 e Figura 59.

Tabela 14 - Valores médios e desvios padrão obtidos com veículo estático no Ensaio 2

Horário	Temperatura	Umidade	CO	CO ₂	O ₃	NO ₂
16:30	24,72 ± 2,84	41,83 ± 0,47	1,1742 ± 0,1507	0,5677 ± 0,0158	44,639 ± 1,7080	2,4164 ± 0,0027
16:50	23,21 ± 2,28	41,84 ± 0,36	1,2466 ± 0,1713	0,6266 ± 0,0182	42,546 ± 3,8089	2,4129 ± 0,0036
17:10	20,32 ± 1,41	43,22 ± 0,37	1,2302 ± 0,0865	0,6216 ± 0,0701	38,635 ± 4,0087	2,4060 ± 0,0033

± Desvio padrão

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 15 - Valores médios e desvio padrão obtidos com veículo em movimento no Ensaio 2

Horário	Temperatura	Umidade	CO	CO ₂	O ₃	NO ₂
16:40	24,08 ± 2,36	41,01 ± 0,24	1,0581 ± 0,11	0,5812 ± 0,03	45,4654 ± 2,07	2,4171 ± 0,003
17:00	23,29 ± 2,12	42,29 ± 1,21	1,2631 ± 0,19	0,6282 ± 0,08	40,2548 ± 5,37	2,4183 ± 0,003
17:20	23,09 ± 2,80	42,96 ± 0,35	1,3507 ± 0,20	0,6241 ± 0,04	38,0062 ± 2,15	2,4121 ± 0,005

± Desvio padrão

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 58 – Dispersão dos valores da resistência do sensor de O₃ – Ensaio 2

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 59 - Resistência do sensor de O_3 – Ensaio 2

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.5 Discussão dos resultados

Durante a execução do Ensaio 1 foi possível coletar 3 blocos distintos para cada um dos tipos de mobilidade avaliada (estática e móvel). Cada bloco continha aproximadamente 17 amostras, totalizando 50 amostras em movimento e 53 amostras estáticas.

Para as medidas de gases procurou-se utilizar de referências de outras fontes para avaliar se o comportamento dos sensores estava coerente com a realidade, o que pode ser comprovado comparando os gráficos de referências (Figura 56 e Figura 57) com o gráfico das leituras do sensor de Ozônio (Figura 53). Todos os três gráficos apontam um leve crescimento das representações de O_3 . Inclusive o período do ensaio foi antecedido por um pequeno período de chuva leve, o que pode ter alterado a curva de redução aponta pelos gráficos de referência.

Avaliando as diferenças entre os dois tipos de blocos de dados coletados (estático e em movimento), foi possível observar dois grupos distintos de comportamento: aqueles que continham a maioria dos valores médios das leituras estáticas dentro do intervalo de desvio padrão das leituras em movimento (CO_2 , NO_2 , Temperatura, Umidade); e aqueles que não estavam dentro do intervalo (O_3 e CO). No caso particular de CO , o gráfico da Figura 54 denota que a diferença no desvio padrão pode ter sido ocasionada pelos índices de crescimento dos valores no decorrer do tempo. Já para o caso de O_3 , ao observar os gráficos da Figura 52 e Figura 53, é possível perceber agrupamentos de dados provenientes das leituras em movimento,

e agrupamentos de leituras estáticas, inclusive o ângulo da reta de tendência de ambos os agrupamento são similares, porém paralelas. Isto pode denotar que o movimento pode ter influência nas leituras. Assim a hipótese *h1* pode ser considerada verdadeira, isto é, o movimento pode interferir nos valores dos gases coletados.

Com base neste resultado foi realizado aprimoramentos no kit sensor para minimizar o efeito da mobilidade, gerando o kit sensor Versão 1.3, o qual foi incorporado no Ensaio 2 para verificar se os efeitos foram minimizados no novo protótipo.

Usando o mesmo método de avaliação do Ensaio 1 foi possível observar que na Tabela 14 e Tabela 15 apresentam comparações de valores de leituras de forma estática e movimento dentro do desvio padrão. No Ensaio 1 foi visto que os valores de O₃ apresentam grupos distintos de leituras estáticas e movimentos (Figura 52 e Figura 53), no entanto, no Ensaio 2 (Figura 58 e Figura 59) estas diferenças ou agrupamento não são representativos. Mesmo considerando que uma validação mais precisa necessitaria de um volume de amostras maior, os indícios, já sustentam que houve melhorias do kit versão 1.3 em relação ao kit versão 1.2, e favorecendo a concluir que a hipótese *h2* é verdadeira, isto é, um fluxo constante de ar passando pelos sensores minimiza os efeitos de mobilidade do kit sensor.

4.2 MAPEAMENTO DE VIAS DE ALTO VOLUME DE TRÁFEGO

Este foi o primeiro experimento em condições reais, em que o kit de sensores foi hospedado em veículo, transitando por vias de alto volume de tráfego. A plataforma possibilitou as análises espaçotemporais com base nas ferramentas e dados coletados por kits sensores, utilizando o método apresentado no Capítulo 3. Cabe salientar, que o processo metodológico foi amadurecendo e evoluindo com o desenvolvimento desta tese, e algumas análises e métodos foram ajustados com o passar do tempo. Como ficou dito, no entanto, os ensaios são relatados na forma como foram realizados, como registro do processo de amadurecimento. Esta seção descreve os objetivos, hipóteses, materiais e métodos utilizados, assim como os resultados obtidos no Experimento 2.

4.2.1 Objetivos e hipóteses de verificação

O objetivo principal do experimento é a avaliação e comparação das variáveis ambientais coletadas pelo kit sensor transitando em vias de alto tráfego associando com o posicionamento geográfico, a fim de testar a hipótese:

h3. Com a coleta de dados em movimento é possível perceber geograficamente os pontos mais críticos quanto à poluição do ar;

4.2.2 Materiais e métodos

a) Materiais utilizados

- Veículo automotor marca Renault modelo Logan 1.0 flex com o kit sensor versão 1.3 instalado.

b) Métodos utilizados

Neste experimento foram equacionados os seguintes fatores:

- Mobilidade do kit sensor: O kit sensor foi instalado no topo de um veículo de passeio, seguindo o fluxo natural do trânsito, sem exceder o limite de velocidade da via;
- Tráfego urbano: Transitar com o kit sensor em horário que possa coletar informações com a maior quantidade de veículos transitando, de diferentes tipos e enfrentando congestionamentos. Assim definiu-se o horário de pico da manhã e da tarde, como requisito para a coleta de dados;
- Variáveis ambientais coletadas: valores dos gases impactados pelo tráfego de veículos. Neste experimento foram adotados apenas os gases CO₂ e CO, além de valores de temperatura e umidade;
- Local do experimento: O trajeto escolhido compreende duas vias de alto tráfego, a Avenida dos Bandeirantes e Avenida Nações Unidas (Marginal Pinheiros), sendo que o trajeto foi dividido em 5 trechos, que estão destacados em cores diferentes na Figura 60, geralmente delimitados por

Viadutos. Em síntese, a Tabela 16 apresenta os trechos escolhidos para delimitar as análises.

Figura 60 - Trajeto do experimento em vias de alto volume de tráfego

Fonte: Elaborado pelo autor a partir do Google Maps.

Tabela 16 - Trechos de observação do experimento 2

Trecho	Início	Fim	Distância (km)
1	Av. dos Bandeirantes, 5933 - Viaduto Jabaquara	Av. dos Bandeirantes, 3999 - Viaduto João Julião da Costa Aguiar (Aeroporto)	2.1
2	Av. dos Bandeirantes, 3999 - Viaduto João Julião da Costa Aguiar (Aeroporto)	Av. dos Bandeirantes, 2255 - Viaduto Santo Amaro	1.9
3	Av. dos Bandeirantes, 2255 - Viaduto Santo Amaro	Viaduto República da Armênia	2.2
4	Viaduto República da Armênia	Av. Prof. Manuel José Alves – Ponte Cidade universitária	5.5
5	Av. Prof. Manuel José Alves – Ponte Cidade universitária	Av. Prof. Almeida Prado, 532 – IPT / USP	3.9
Total	-----	----	15.6

Fonte: Elaborado pelo autor.

- Amostra: Cada sensor foi configurado para realizar coletas, a cada 30 segundos (tempo mínimo para estabilização do sensor), coletando informações durante o período compreendido entre a partida e chegada aos pontos de controle do experimento.

Ao final do experimento eram extraídas as informações coletadas e armazenadas no kit sensor, para elaboração de comparações e cálculos estatísticos, a fim de confirmar ou não a hipótese apresentada inicialmente neste experimento.

4.2.3 Desenvolvimento do experimento

O experimento foi realizado em condições onde as influências do tráfego possam ser mais evidentes. Neste sentido, optou-se por realizar o experimento em vias de alto volume de tráfego e em horários de pico. Desta forma, avaliar a viabilidade e as melhores alternativas de visualização das informações coletadas.

O Experimento foi realizado no trajeto compreendido pela Avenida dos Bandeirantes, Avenida Nações Unidas-Marginal Pinheiros, e pela USP. Este foi dimensionado para coletar dados a cada 30 segundos, nos horários de pico da manhã e no horário de pico de tarde, de forma a validar ou não a hipótese *h3*.

O Experimento realizou coletas em 6 dias da semana (segunda a sexta), no período do dia 13 a 21 de Outubro de 2014, utilizando o kit versão 1.3, medindo os gases CO e CO₂, umidade e temperatura. Embarcou-se o kit sensor em um veículo de passeio, que transitou em vias de alto volume de tráfego da capital paulista em horários de pico matinal (Das 08h às 10h) e noturno (Das 19h às 21h). Durante os experimentos foram efetuados alguns registros fotográficos do trajeto (Figura 61).

Figura 61 - Fotos do Trajeto – Vd. Jabaquara/Aeroporto/Vd. Santo Amaro/IPT (esq. para direita)

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.4 Resultados e representações espaçotemporais

Em resumo a Tabela 17 e a Tabela 18 apresentam os valores médios por trecho, enquanto a Figura 62 exibe os seus gráficos.

Tabela 17 - Valores médios por trecho percorrido na manhã do dia 16-10

Trecho	Distancia (m)	Temperatura	Umidade	CO*	CO ₂ **	Amostras	Duração	Velocidade (km/h)
1	2100	31,77	44,30	2,4912	2,8896	54	00:30:30	4,1
2	1900	34,14	40,93	2,8737	2,9302	25	00:13:51	8,2
3	2200	35,28	42,11	2,8637	2,9278	8	00:04:02	32,7
4	5500	31,97	47,09	2,5294	2,8671	10	00:05:11	63,7
5	3900	28,33	50,28	2,2147	2,9161	11	00:05:45	40,7

* valor da medida da sensibilidade do sensor CO (Quanto maior, maior será o valor em ppm).

** Valor da tensão no sensor CO₂ - (Quanto menor, maior será o valor em ppm).

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 18 - Valores médios por trecho percorrido na noite do dia 16-10

Trecho	Distância (m)	Temperatura	Umidade	CO	CO ₂	Amostras	Duração	Velocidade (km/h)
5	2200	26,45	63,20	2,0129	2,8839	9	00:04:37	28,6
4	7000	26,51	63,79	2,5933	2,8244	16	00:08:39	48,6
3	2300	26,59	62,55	2,4882	2,9192	36	00:20:09	6,8
2	1900	24,48	62,68	2,9577	2,8032	9	00:04:37	24,7
1	1900	23,87	64,13	3,1608	2,8839	7	00:03:28	32,9

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 62 – Gráficos de valores médios por trecho durante o dia e noite

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 63 - Pontos coletados com informações dos sensores de CO de manhã

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.5 Discussão dos resultados

O Experimento foi realizado com o intuito de avaliar as variáveis ambientais em condições reais em vias de alto tráfego, assim foram coletados dados durante 6 dias, de forma a ter pelo menos três dias com informações do período de pico matinal e 3 dias com informações no período de pico da tarde. Foram coletadas informações sobre a temperatura, umidade, CO e CO₂.

No que tange a Temperatura, a característica mais evidente foi as variações constantes de temperatura durante todo o trajeto. Neste aspecto, algumas constatações puderam ser observadas, por exemplo, o nó sensor está hospedado no teto do veículo, após alguns segundos parado, com o sol atuando diretamente no sensor, existe uma elevação natural da temperatura, uma vez que o princípio de funcionamento do sensor é de transferência térmica. Essa característica pode inferir que um encapsulamento adequado pode minimizar os fatores externos, mas durante o dia este fator sempre afetará as medições. Assim, nas versões seguintes do kit este fator foi minimizado.

Com relação à umidade, esse sensor possui uma representatividade estável e com similaridades com as estações da CETESB e INMET, no município de São Paulo. Por exemplo, as leituras do dia 13 de outubro apresentadas pelo nó sensor apontavam que entre as 09h e 10h a situação da umidade já estava em estado de atenção (entre 20% e 30% de umidade relativa). Esta informação foi coerente com aquelas apresentadas pelas estações de medições da CETESB e INMET, que informaram que neste horário já se estava em situação de atenção, e que a situação chegou ao estado de alerta (entre 12% e 19%) no período da tarde, inclusive pelo segundo dia consecutivo (COM UMIDADE..., 2014). Outra constatação ao se comparar os trechos do trajeto, foi que a região da USP apresentou em todos os casos, os maiores índices de umidade.

Ao analisar os dados referentes ao Monóxido de Carbono, sem uma análise estatística detalhada, não foi possível identificar correlação visual entre os valores diurnos com o noturno. No entanto, o trecho da Cidade Universitária expôs os menores valores para CO, em todos os dias avaliados. Isto significa que a região apresentou as menores concentrações deste poluente, uma vez que a relação é diretamente proporcional à resistência do sensor.

O Dióxido de Carbono não apresentou diferença nas médias das leituras entre o dia e a noite. Entretanto, com relação ao volume de tráfego perceberam-se algumas hipóteses que merecem estudo. Por exemplo, no dia 17/10, com o tráfego congestionado, na dispersão dos valores aparecem picos de CO₂ constantes, o que não foi observado com o fluxo livre nos dias 15 e 21/10.

Além disso, recorreu-se à ferramenta web, *Google Maps*, para observar o perfil básico de tráfego durante um dia e horário típico do experimento (Figura 64). Nesta observação, foi possível perceber que os pontos com maior tráfego de veículos também eram coincidentes com os pontos de maior concentração dos gases, apontados pela representação cartográfica feita pela plataforma desta tese (Figura 63).

Figura 64 - Projeção das condições de tráfego típico de uma terça-feira as 09h

Fonte: Google Maps (2017).

Por fim, a visualização das informações em ferramenta com representação cartográfica ou com imagens do terreno (Figura 63), ajuda a associar os valores dos sensores às questões de ocupação do solo e facilita o entendimento dos resultados do experimento ou encaminhamento da solução, identificando os pontos mais críticos. Desta forma, é possível confirmar que a hipótese *h3* é verdadeira, isto é, com a projeção das informações coletadas em movimento é possível perceber geograficamente os pontos mais críticos no contexto de poluição do ar.

4.3 MAPEAMENTO DA QUALIDADE DO AR EM ROTA REGULAR DE ÔNIBUS COLETIVO

O experimento ocorreu na cidade de Juiz de Fora, que segundo o IBGE é uma cidade de médio/grande porte com aproximadamente 550 mil habitantes. Esta foi escolhida devido à realização do XXXIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações – SBrT 2015, o qual incluiu em seu programa uma competição de soluções mais inovadoras para cidades inteligentes. O projeto implementado por esta Tese foi representante da USP no evento, sendo que se aproveitou do momento para mapear a região e demonstrar os resultados do experimento. Como resultado final, a coleta dos dados está compondo um experimento da presente Tese, e também se consagrou campeã, como melhor solução da competição.

Esta seção descreve os objetivos, hipóteses, materiais e métodos utilizados, assim como os resultados obtidos no Experimento 3.

4.3.1 Objetivos e hipóteses de verificação

O objetivo principal do experimento é avaliar e comparar as variáveis ambientais coletadas pelo kit sensor transitando em linha de ônibus regular associando o posicionamento geográfico, com a concentração de gases poluentes e análises temporais, a fim de testar a hipótese:

h4. Com o kit sensor hospedado em ônibus coletivo é possível perceber horários e locais mais críticos quanto à poluição do ar.

4.3.2 Materiais e métodos

a) Materiais utilizados

- Ônibus coletivo com o kit sensor versão 2.1 instalado;
- Bateria automotiva para alimentação do kit sensor.

b) Métodos utilizados

A concepção deste experimento pressupõe que o kit seja hospedado em um ônibus coletivo, que transite por regiões com diferentes perfis, coletando dados durante um

dia completo, permitindo avaliar os resultados com visões temporais, identificando horários que podem ter maior poluição. Neste experimento foram equacionados os seguintes fatores:

- Mobilidade do kit sensor: kit sensor foi instalado no topo de um ônibus coletivo, transitando conforme sua escala de atendimento diário;
- Variáveis ambientais coletadas: Concentração de gases O_3 , NO_2 , CO_2 , além dos valores de temperatura e umidade;
- Local do experimento: O kit foi embarcado em um ônibus coletivo da linha 535 (Cidade Universitária – V.S.Pedro), na cidade de Juiz de Fora – MG. O trajeto escolhido compreende o trânsito em uma rota circular de IDA e Volta (Figura 65), passando pelas regiões da cidade universitária (região arborizada), centro da cidade em corredores de ônibus, e na avenida Pres. Itamar Franco, uma das principais vias da cidade com aproximadamente 4 km, com trechos de via dupla com pontos de subida e descida, terminando em uma das regiões mais altas da cidade.

Figura 65 - Trajeto de IDA e Volta da linha 535 em Juiz de Fora - MG

Fonte: (<https://www.cittamobi.com.br/>)

- Duração: 12 horas de coleta de dados, compreendido em duas faixas horárias: das 8h às 14h, e das 14h às 20h;
- Amostra: Cada sensor foi configurado para realizar coletas, a cada 30 segundos (tempo mínimo para estabilização do sensor), coletando informações durante todo o período de teste.

Ao final do experimento eram extraídas as informações coletadas e armazenadas no kit sensor, para elaboração de comparações e cálculos estatísticos, a fim de confirmar ou não as hipóteses apresentadas inicialmente neste experimento.

4.3.3 Desenvolvimento do experimento

O experimento ocorreu nos dias 02 e 03 de Setembro de 2015. Foram coletados a cada 30 segundos dados de todos os sensores do kit, durante dois dias consecutivos. No primeiro dia foram obtidos os dados do período das 14h às 20h, já no segundo dia, o período foi das 09h às 14h, completando um ciclo completo do horário da manhã, e até o fim de horário de pico da tarde. O kit sensor foi instalado no topo do ônibus a diesel, da linha 535 da operadora TUSMIL, durante sua parada no ponto final localizado na cidade universitária de Juiz de Fora (Figura 66).

Figura 66 – Instalação do kit sensor na Cid. Universitária

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a instalação, O ônibus coletivo iniciava seu turno de trabalho transitando pela linha 535, coletando informações sobre temperatura, umidade e os gases: CO, CO₂, O₃, NO₂. Cabe salientar que durante a coleta, o sensor de “CO” apresentou problemas, sendo assim, para este experimento esta variável foi descartada da análise. Alguns registros fotográficos foram realizados no trajeto (Figura 67).

Figura 67 - Trajeto da linha 535 (corredor no centro; av. pres. Itamar; morro e a Cid. Universitária)

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.4 Resultados e representações espaçotemporais

O Experimento foi realizado com o intuito de diagnosticar as regiões maior concentração de gases no trajeto de uma linha de ônibus coletivo, que transita sem alteração de sua atividade regular. A Figura 68 apresenta a projeção no terreno de todos os pontos coletados, os quais foram separados em 6 grupos, cada um representando uma parte da cidade, que possui características similares de ocupação de solo (Tabela 19).

Tabela 19 – Trecho segregados para estudo e suas características

Grupo	Cor	Característica da Região
1 - Centro I	Azul escuro	Centro da cidade, iniciando pelo corredor exclusivo de ônibus no centro da cidade, com alto tráfego urbano, o trecho está ligado à região arborizada do morro do imperador.
2 - Centro II	Verde	Centro da Cidade, com região urbanizada com vias duplicadas de ocupação urbana essencialmente comercial, com sobrados de 2 andares, e com alto tráfego urbano.
3 – Itamar	Azul claro	Compreendido principalmente pela av. Itamar franco, com região urbanizada com vias duplicadas, com trechos de aclave e declive, e com alto tráfego urbano.
4 – Cidade Universitária	Branca	Cidade universitária, essencialmente arborizada com poucas estruturas prediais, com baixo tráfego urbano.
5 – Kelmer	Rosa	Trecho urbano essencialmente residencial, transitando principalmente pela Av. Kelmer, que liga duas áreas arborizadas, Cidade Universitária e Morro do Imperador.
6 – Morro	Amarelo	Trecho com baixa ocupação predial, essencialmente arborizada.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 68 – Projeção dos pontos coletados durante o experimento.

Fonte: Elaborado pelo autor com base no Software ArcGIS (ESRI, 2015).

Cabe salientar, que neste experimento os valores de concentração de poluentes foram expressos em unidades elétricas (Tabela 29 até Tabela 31), o que pode dificultar a análise, no entanto, a proporcionalidade é mantida, sendo possível perceber variações em diferentes regiões. Nas novas versões do kit esta característica foi resolvida com a apresentação dos valores de concentração de gases, em unidades tradicionais como ppm (partes por milhão).

Tabela 20 – Valores médios e desvio padrão do Trecho “Cidade Universitária”

Tabela 20 - valores médios e desvio padrão do Trecho - Cidade Universitária											
hora - amostra		temperatura	dp	umidade	dp	CO2	dp	O3Res	dp	NO2Res	dp
8	12	19,65	1,55	66,81	3,98	3,0199	0,1264	25,16	2,98	13,32	2,95
9	60	18,38	1,27	71,68	1,95	3,0840	0,1036	29,59	2,75	39,90	17,76
10	64	18,75	1,21	71,00	0,91	3,1189	0,1138	30,40	3,36	76,60	21,60
11	74	22,75	1,29	61,39	1,44	3,1731	0,0939	32,76	2,21	95,09	26,07
12	73	26,13	1,96	55,62	2,49	3,2418	0,0525	33,17	3,23	125,66	40,24
13	20	26,87	1,23	54,92	1,39	3,2815	0,0254	33,39	2,93	140,54	47,43
14	23	24,25	2,04	54,56	1,73	3,2039	0,0965	32,08	3,43	42,04	4,75
15	50	24,88	1,47	54,05	1,43	3,1977	0,0853	30,14	2,78	48,30	10,17
16	66	24,44	1,49	54,87	1,77	3,1776	0,0876	27,92	2,80	53,74	9,71
17	75	22,10	1,37	63,95	1,96	3,1658	0,1009	28,17	2,54	65,82	13,86
18	15	19,91	1,32	67,95	0,85	3,1135	0,0940	28,50	3,06	79,72	16,45
19	30	20,12	1,38	69,51	1,86	3,1353	0,1107	28,09	3,49	79,01	19,29
20	84	20,73	1,50	64,85	1,95	3,1067	0,1234	26,83	3,63	77,23	23,74
Total	646										

Legenda: dp – desvio padrão; CO2 – tensão do sensor CO₂; O3Res – resistência do sensor O₃; NO2Res – resistência do sensor NO₂

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 21 – Valores médios e desvio padrão do Trecho “Centro II”

Tabela 21 - valores médios e desvio padrão do período Centro II											
hora – amostra		temperatura	dp	umidade	dp	CO2	dp	O3Res	dp	NO2Res	dp
9	17	19,73	1,16	67,85	0,65	3,0421	0,0877	24,35	2,13	57,78	7,73
10	18	21,47	1,38	65,50	1,03	3,1009	0,0915	25,06	2,72	90,56	20,93
11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	18	25,61	1,27	56,11	0,50	3,2188	0,0723	26,40	2,78	117,91	20,79
13	26	28,66	1,12	51,82	0,76	3,2701	0,0314	24,23	3,60	111,13	37,62
14	27	26,56	1,67	51,09	1,10	3,1447	0,0900	23,26	2,57	40,20	5,83
15	21	26,42	1,47	51,25	0,42	3,2135	0,0867	22,45	2,68	55,44	9,84
16	15	24,99	1,31	58,08	0,45	3,1320	0,0951	21,73	1,55	70,68	16,51
17	23	24,78	1,56	58,64	0,61	3,1724	0,1050	21,08	2,79	69,84	19,70
18	29	22,10	1,10	63,16	0,60	3,1298	0,1107	20,67	2,39	80,49	21,12
19	32	21,79	1,19	63,69	0,49	3,1662	0,1247	21,76	2,41	93,66	22,33
Total	226										

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 22 – Valores médios e desvio padrão do Trecho “Centro I”

Tabela 22 - Valores médios e desvio padrão do ponto de controle											
hora - amostra		temperatura	dp	umidade	dp	CO2	dp	O3Res	dp	NO2Res	dp
9	13	19,23	1,20	69,38	0,78	3,0717	0,1119	24,35	1,85	47,93	6,98
10	15	20,26	1,09	67,97	0,36	3,1624	0,1185	24,60	3,04	88,06	19,39
11	16	25,26	0,98	55,65	0,76	3,2300	0,0757	26,15	4,22	105,35	29,78
12	2	25,48	0,00	55,62	0,61	3,3000	0,0000	26,83	2,05	97,65	36,50
13	25	28,83	1,40	51,29	1,02	3,2586	0,0504	22,19	2,87	136,78	67,14
14	7	27,23	1,16	50,50	0,52	3,1175	0,0932	21,35	1,93	39,65	3,64
15	14	26,47	1,45	51,01	0,50	3,1899	0,0915	20,51	3,47	47,72	6,64
16	20	24,84	1,45	58,01	0,45	3,1713	0,1069	17,92	3,02	56,40	10,03
17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	23	22,41	1,25	63,03	0,37	3,1390	0,1243	19,10	2,49	79,57	21,52
19	18	21,58	1,18	64,66	0,64	3,0695	0,1000	19,94	2,79	88,53	21,08
Total	153										

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 69 – Médias horárias de temperaturas e umidade por trecho.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 70 – Médias horárias de concentração de CO₂ por trecho*.

Fonte: Elaborado pelo autor.

*Quanto menor a tensão maior a concentração de CO₂Figura 71 – Médias horárias de concentração de O₃ e NO₂ por trecho†.

Fonte: Elaborado pelo autor.

† Quanto maior a resistência, maior a concentração de gás.

Após a coleta de dados, os instrumentos da plataforma permitiram análises para observar a qualidade do ar no trajeto percorrido. Como se objetivava identificar a possibilidade de percepção de horários e locais mais críticos no contexto de poluição do ar, optou-se por dividir as análises em dois períodos: matutino (08 às 14hs) e vespertino (14 às 20hs). A seguir são apresentados alguns dos mapas mostrando os resultados do mapeamento com a plataforma, nos dias 02 e 03 de setembro na cidade de Juiz de Fora - MG (Figuras 53, 54 e 55).

Figura 72 – Mapa com o valor da resistência do sensor de O3 na rota da linha 535

Fonte: Elaborado pelo autor com base no Software ArcGIS (ESRI, 2015).

Figura 73 – Mapa com o valor da resistência do sensor de NO2 dia 03/09, período matutino

Fonte: Elaborado pelo autor com base no Software ArcGIS (ESRI, 2015).

Figura 74 – Mapa com valor da resistência do sensor de NO2 dia 02/09, período vespertino

Fonte: Elaborado pelo autor com base no Software ArcGIS (ESRI, 2015).

4.3.5 Discussão dos resultados

A cidade de Juiz de Fora em Minas Gerais é considerada pelo IBGE, como uma cidade de Médio/Grande porte, com aproximadamente 550 mil habitantes. Neste perfil apresenta características de congestionamento em horários de pico, e são sensíveis os efeitos da poluição gerada pelos veículos urbanos. Ao observar as análises de dados dos valores de gases apresentados na Figura 71, é possível observar que a média horária de poluentes apresenta variações durante o dia, e que alguns trechos possuem perfis diferentes de concentração. Este é o caso do trecho da Cidade Universitária, que apresenta as maiores concentrações de O_3 (Figura 72), sendo a região mais arborizada do trecho. Apesar de parecer incoerente, esta característica é comum em grandes centros, devido ao processo de formação do ozônio, que pode ser formado pela combinação de NO_x emitidos pelos veículos, com hidrocarbonetos também emitidos por plantas, e devido a isso, regiões arborizadas tendem a ter maior concentração de O_3 (MENDES, 2016).

Ao analisar as concentrações de NO_2 observa-se que as regiões mais críticas estão esparsas, e dependendo do horário estão localizados em pontos diferentes. O NO_2 é emitido diretamente pelos veículos; sendo assim, poderia haver uma correlação com volume de tráfego e congestionamentos; para averiguar, coletou-se o perfil típico de trânsito, que é informado pelo *Google Maps*, que apresenta a velocidade do trânsito conforme o perfil típico da hora e do dia (Figura 75).

Figura 75 – Perfil típico de trânsito dos dias e horários do experimento (manhã e tarde)

Fonte: Google Maps (2017).

Ao comparar o perfil típico de trânsito (Figura 75) com os gráficos de NO_2 (Figura 73 e Figura 74), pode-se perceber que os pontos com maior concentração de NO_2 estão próximos às regiões de tráfego lento, o que pode ser visto tanto no período da manhã como no da tarde.

Em ambos os períodos, as regiões mais críticas foram o centro da cidade e a av. Pres. Itamar Franco, com destaque para esta última, que revelou ser o pior trecho. Este é composto por quatro vias com duas faixas de ida e duas de volta, com canteiro central estreito; boa parte do trecho é composta por edificações de média e alta altura, formando os chamados “cânions urbanos” com o agravante de que o ponto mais crítico ocorre em regiões de aclive. Esta constatação é coerente com estudos que mostram que os cânions urbanos são pontos com grande concentração de poluentes (TARGINO; KRECL, 2016); (KRECL et al., 2016).

Após as análises espaçotemporais foi possível evidenciar que o kit sensor hospedado em ônibus coletivo permite coletar dados para realizar análises de pequenas regiões geográficas com diferentes graduações de concentração de poluentes com interpretações por faixa horária, inclusive apontando os locais mais críticos no contexto de poluição do ar. Desta forma, a hipótese *h4* mostra-se verdadeira.

4.4 MAPEAMENTO DA QUALIDADE DO AR DURANTE CARREATA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

Este experimento realizou um mapeamento de uma via de alto tráfego durante um evento promovido pela Associação Brasileira de Veículos Elétricos (ABVE), que realizou uma carreata de veículos elétricos (Figura 76). Esta situação promoveu uma oportunidade de avaliar a poluição no trecho percorrido, considerando que a carreata tinha baixa emissão de poluentes.

Figura 76 – Chamado para a carreata de veículos elétricos

Fonte: Twitter (2017).

A plataforma possibilitou as análises espaçotemporais com base nas ferramentas e dados coletados pelos kits sensores, utilizando o método apresentado no capítulo 3. Este experimento utilizou o kit sensor versão 3.0, que é calibrado e assim foi possível fazer a comparação com os índices padronizados e utilizados pela CETESB, que é o órgão oficial do estado de SP para monitorar a qualidade do ar. Esta seção descreve os objetivos, hipóteses, materiais e métodos utilizados, assim como os resultados obtidos no Experimento 4.

4.4.1 Objetivos e hipóteses de verificação

O objetivo principal do experimento é avaliar e comparar variáveis ambientais que foram coletadas pelo kit sensor, embarcado em ônibus elétrico, durante carreata com baixa emissão de poluentes, associando regiões geográficas com a concentração de gases poluentes, comparando com dias tradicionais de tráfego, a fim de testar a hipótese:

h5. Pela plataforma é possível perceber diferenças na concentração de poluentes quando o tráfego é composto por veículos de baixa emissão de gases.

4.4.2 Materiais e métodos

a) Materiais utilizados

- Ônibus coletivo com o kit sensor versão 3.0 instalado;
- Veículo de passeio com o kit sensor Versão 3.0 instalado;
- Bateria automotiva para alimentação do kit sensor;

b) Métodos utilizados

Para efeitos comparativos foram realizados três ensaios: O primeiro durante o sábado da carreata, e dois do grupo de controle. A fim de estabelecer o grupo de controle do experimento, o mesmo trajeto foi repetido mais duas vezes, em perfis de trânsito diferente: sexta e sábado com trânsito tradicional. A ideia de comparar a carreata com outro sábado foi a de analisar situações com perfis de tráfego similares com veículos mais poluentes, e a comparação com sexta-feira foi para confrontar com dias de semana que possuem perfil de tráfego mais intenso e lento.

Neste experimento foram equacionados os seguintes fatores:

- Mobilidade do kit sensor: O kit sensor instalado no topo do veículo hospedeiro transitando dentro das condições de tráfego da via;
- Variáveis ambientais coletadas: Neste experimento foram adotados apenas os gases O_3 , NO_2 , CO , além dos valores de temperatura e umidade;
- Local do experimento: A carreata percorreu o trecho compreendido desde a Av. Paulista até a Praça Charles Müller - Estádio Pacaembu (Figura 77).

Figura 77 - Trajeto da carreata

Fonte: Twitter (2017).

- Duração: Das 10h às 13h, para todos os três grupos;
- Amostra: Cada sensor foi configurado para realizar coletas, a cada 30 segundos (tempo mínimo para estabilização do sensor), coletando informações durante todo o período de teste.

Ao final do experimento eram extraídas as informações coletadas e armazenadas no kit sensor, para elaboração de comparações e cálculos estatísticos, a fim de confirmar ou não a hipótese apresentada inicialmente neste experimento.

4.4.3 Desenvolvimento do experimento

O primeiro ensaio experimental ocorreu no dia 27 de Agosto das 10h00min até 13h00min, completando o trajeto previsto na carreata, saindo da concentração na Avenida 13 de Maio, e chegando ao Estádio Pacaembu. O kit sensor foi instalado no topo do ônibus elétrico do fabricante BYD, conjuntamente com a bateria automotiva auxiliar, que foi colada ao teto com adesivos e Velcro (Figura 78).

Figura 78 - Fotos da instalação do kit no Ônibus da BYD no dia da carreata

Fonte: Elaborado pelo autor.

Uma característica relevante, observada durante a carreata, foi a mudança de alteração no tráfego de veículos, que promoveu um grande trecho da avenida paulista ocupada apenas por veículos híbridos e elétricos (Figura 79).

4.4.4 Resultados e representações espaçotemporais

Durante o trajeto foram coletados os valores de CO, NO₂ e O₃, durante as 3 horas da carreta.

Tabela 23 – Estatística descritiva das coletas de dados do kit sensor no dia da carreta

<i>Temperatura</i>		<i>Umidade</i>		<i>CO ppm</i>		<i>O3 ppm</i>		<i>NO2 ppm</i>	
Média	27,885853	Média	36,001343	Média	3,7600612	Média	0,2302482	Média	0,0066251
Erro padrão	0,2324916	Erro padrão	0,7166683	Erro padrão	0,507994	Erro padrão	0,046147	Erro padrão	0,0059649
Mediana	28,0699	Mediana	36,73775	Mediana	2,7886718	Mediana	0,1676474	Mediana	0
Desvio padrão	3,2879282	Desvio padrão	10,13522	Desvio padrão	7,18412	Desvio padrão	0,6526166	Desvio padrão	0,084356
Variancia da amostra	10,810472	Variancia da amostra	102,72268	Variancia da amostra	51,61158	Variancia da amostra	0,4259084	Variancia da amostra	0,0071159
Curtose	-0,8935173	Curtose	-1,137753	Curtose	89,427629	Curtose	174,05451	Curtose	194,51398
Assimetria	0,0124261	Assimetria	-0,1005732	Assimetria	8,9080295	Assimetria	12,78527	Assimetria	13,87262
Intervalo	11,4099	Intervalo	34,168	Intervalo	83,76725	Intervalo	9,10429	Intervalo	1,1854867
Mínimo	22,53	Mínimo	18,4755	Mínimo	0	Mínimo	0	Mínimo	0
Máximo	33,9399	Máximo	52,6435	Máximo	83,76725	Máximo	9,10429	Máximo	1,1854867
Soma	5577,1706	Soma	7200,2685	Soma	752,01224	Soma	46,04965	Soma	1,3250285
Contagem	200	Contagem	200	Contagem	200	Contagem	200	Contagem	200
Nível de confiança (95,0%)	0,4584634	Nível de confiança (95,0%)	1,4132387	Nível de confiança (95,0%)	1,0017421	Nível de confiança (95,0%)	0,0909998	Nível de confiança (95,0%)	0,0117625

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 24 – Estatística descritiva das coletas de dados do kit sensor no Sábado tradicional

<i>Temperatura</i>		<i>Umidade</i>		<i>CO ppm</i>		<i>O3 ppm</i>		<i>NO2 ppm</i>	
Média	28,311389	Média	48,852377	Média	5,1316992	Média	0,1645392	Média	0,0080651
Erro padrão	0,4170144	Erro padrão	0,9250745	Erro padrão	0,4078065	Erro padrão	0,016006	Erro padrão	0,0069854
Mediana	26,5499	Mediana	51,80075	Mediana	3,575685	Mediana	0,0545871	Mediana	0
Desvio padrão	5,0388041	Desvio padrão	11,177718	Desvio padrão	4,9275443	Desvio padrão	0,193401	Desvio padrão	0,084405
Variancia da amostra	25,389547	Variancia da amostra	124,94137	Variancia da amostra	24,280693	Variancia da amostra	0,037404	Variancia da amostra	0,0071242
Curtose	-1,3801208	Curtose	-1,329695	Curtose	13,629389	Curtose	0,6551972	Curtose	141,70735
Assimetria	0,2952122	Assimetria	-0,0505922	Assimetria	3,341541	Assimetria	1,0153688	Assimetria	11,83377
Intervalo	16,3299	Intervalo	36,0039	Intervalo	35,104397	Intervalo	0,9149788	Intervalo	1,0135477
Mínimo	20,77	Mínimo	31,622	Mínimo	0	Mínimo	0	Mínimo	0
Máximo	37,0999	Máximo	67,6259	Máximo	35,104397	Máximo	0,9149788	Máximo	1,0135477
Soma	4133,4628	Soma	7132,447	Soma	749,22808	Soma	24,022719	Soma	1,177506
Contagem	146	Contagem	146	Contagem	146	Contagem	146	Contagem	146
Nível de confiança (95,0%)	0,8242121	Nível de confiança (95,0%)	1,8283723	Nível de confiança (95,0%)	0,806013	Nível de confiança (95,0%)	0,0316352	Nível de confiança (95,0%)	0,0138064

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 25 – Estatística descritiva das coletas de dados do kit sensor no Sexta tradicional

Temperatura		Umidade		CO ppm		O3 ppm		NO2 ppm	
Média	33,347659	Média	40,983716	Média	6,315195	Média	0,2704706	Média	0,0522851
Erro padrão	0,2756859	Erro padrão	0,4835173	Erro padrão	1,0473266	Erro padrão	0,1118533	Erro padrão	0,0125729
Mediana	32,27495	Mediana	41,9731	Mediana	4,102489	Mediana	0	Mediana	0
Desvio padrão	2,7011592	Desvio padrão	4,7374826	Desvio padrão	10,261663	Desvio padrão	1,095934	Desvio padrão	0,123189
Variância da amostra	7,296261	Variância da amostra	22,443741	Variância da amostra	105,30174	Variância da amostra	1,2010714	Variância da amostra	0,0151755
Curtose	-0,7944038	Curtose	-1,0622995	Curtose	35,72077	Curtose	38,493788	Curtose	7,5771619
Assimetria	0,8153266	Assimetria	-0,5070592	Assimetria	5,338495	Assimetria	6,14389	Assimetria	2,7413444
Intervalo	10,02	Intervalo	15,9424	Intervalo	83,86409	Intervalo	7,5224013	Intervalo	0,645317
Mínimo	28,84	Mínimo	31,831	Mínimo	0	Mínimo	0	Mínimo	0
Máximo	38,86	Máximo	47,7734	Máximo	83,86409	Máximo	7,5224013	Máximo	0,645317
Soma	3201,3753	Soma	3934,4367	Soma	606,25872	Soma	25,965176	Soma	5,0193715
Contagem	96	Contagem	96	Contagem	96	Contagem	96	Contagem	96
Nível de confiança (95,0%)	0,5473057	Nível de confiança (95,0%)	0,9599032	Nível de confiança (95,0%)	2,0792063	Nível de confiança (95,0%)	0,2220569	Nível de confiança (95,0%)	0,0249604

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a coleta de dados, com a plataforma foi possível analisar a qualidade do ar no trajeto percorrido, através das representações espaçotemporais. A seguir são apresentadas algumas das representações, nos 3 dias de medição.

Figura 81 – Mapeamento de concentração de CO no dia da Carreata

Fonte: Elaborado pelo autor com base no Software ArcGIS (ESRI, 2015).

Figura 82 – Mapeamento de concentração de CO no sábado normal

Fonte: Elaborado pelo autor com base no Software ArcGIS (ESRI, 2015).

Figura 83 – Mapeamento de concentração de CO na sexta normal

Fonte: Elaborado pelo autor com base no Software ArcGIS (ESRI, 2015).

4.4.5 Discussão dos resultados

Um dos principais atrativos de mapear a qualidade do ar em uma carreata de veículos elétricos é analisar o comportamento da concentração de poluentes em uma região coberta por mobilidade elétrica, que por esse fato deve possuir baixo ou nulo índice de emissão. Durante o dia da carreata, a expectativa era que a mesma transitasse livremente na Avenida Paulista como uma estratégia de divulgação de mobilidade elétrica; no entanto, devido ao alto número de veículos na carreata, o trânsito local foi alterado, de forma que no sentido Consolação, só estavam transitando veículos com mobilidade elétrica. Neste cenário, a expectativa era de termos apenas regiões com boa qualidade do ar, no entanto, na Figura 81 foi observada próximo ao MASP, uma região com qualidade do ar ruim (concentração de CO). Como foram poucas medições, a primeira interpretação seria de ter ocorrido uma anomalia pontual ou um erro de medição. Ao analisar o grupo de controle, nos dois ensaios: sábado e sexta sem carreata, esta mesma região voltou a se destacar pelos níveis ruins de qualidade do ar, o que levaria a crer não se tratar de uma exceção, mas de um local onde realmente a qualidade é pior que o resto, por motivos a serem esclarecidos. Além disso, nos ensaios de controle, a região de qualidade do ar ruim, era mais ampla do que o dia da carreata (Figura 82).

Comparando o mapa da concentração de CO dos três ensaios (Figura 81 à Figura 83), foi possível perceber que o dia da carreata apresentou menos pontos críticos que os demais; no entanto, a região pior é a mesma nos três ensaios (redondezas do MASP). A estação da CETESB mais próxima, Estação Cerqueira Cezar, apontava que no horário da carreata a qualidade do ar estava boa (0,3 ppm de CO), o mesmo aconteceu nos dias dos experimentos de controle. No entanto, cabe salientar que a estação CETESB Cerqueira Cezar é de microescala, portanto as medidas obtidas na Avenida Paulista não estão dentro da cobertura desta estação, ou melhor, de nenhuma estação fixa da CETESB.

De qualquer forma, fica a questão da causa deste nível de poluição nessa área. Uma possível explicação, se dá pelo fato de o ponto crítico estar logo acima do túnel da Av. 9 de julho, na qual continuava circulando uma grande quantidade de veículos de passeio tradicionais e ônibus a diesel. Como os veículos transitando na Av. 9 de julho estavam emitindo gases poluentes, estes poderiam dirigir-se para Avenida Paulista na região que apresentou os resultados mais críticos pois o MASP está

sobre a 9 de julho. No entanto, para uma acurácia de interpretação dos resultados da plataforma, uma análise de especialistas é necessária contando com mais dados, por exemplo, do nível dos poluentes de outras avenidas próximas e na embocadura do respectivo túnel.

No contexto de validação da hipótese levantada por este experimento, o mapeamento com característica da poluição medida durante a carreata, ou durante os demais grupos de controle, apresentam informações sobre os cenários observados. Comparando os valores médios dos poluentes, é possível perceber que o menor valor ocorreu no sábado da carreata, depois sábado tradicional, e sexta tradicional. No entanto, os valores do intervalo de confiança denotam que houve um empate técnico entre os três dias (Tabela 26).

Tabela 26 – Valores comparativos dos índices de poluição com nível de confiança de 95%

	<i>CO ppm</i> <i>Média ± Intervalo de Confiança</i>		<i>O3 ppm</i> <i>Média ± Intervalo de Confiança</i>		<i>NO2 ppm</i> <i>Média ± Intervalo de Confiança</i>	
Sábado da carreata	3,7600612	± 1,0017421	0,2302482	± 0,0909998	0,0066251	± 0,0117625
Sábado Tradicional	5,1316992	± 0,806013	0,1645392	± 0,0316352	0,0080651	± 0,0138064
Sexta tradicional	6,315195	± 2,0792063	0,2704706	± 0,2220569	0,0522851	± 0,0249604

Fonte: Elaborado pelo autor.

Sendo assim, não nos permite dizer que houve variação substancial entre o dia com mobilidade elétrica, e os demais dias do grupo de controle. Assim, não é possível afirmar se a hipótese *h5* é verdadeira ou falsa.

A fim de evitar experimentos cuja coleta de dados não permita conclusões efetivas sobre a análise espaçotemporal, adotou-se que na área de estudo, a quantidade de amostras deverá ser maior que 30 (amostra não pequena), uma vez que o teorema do limite central afirma que a soma de muitas variáveis independentes aleatórias e com a mesma distribuição de probabilidades sempre tende a uma distribuição normal, considerando uma amostra suficientemente grande, o resultado se assemelha as características da população. Na prática sempre que a amostra for maior que 30, o teorema pode ser aplicado (MEYER, 1983). Considerando que pretende alcançar resolução de permita análise em áreas de 100 metros, um delimitador interessante aceitado pela presente tese para validade da amostragem, foi a adoção de 30 pontos a cada 100 metros do território de análise.

4.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS EXPERIMENTOS

Os experimentos tiveram uma função importante para esclarecer e validar alguns fatores das medições, que permitiram a evolução do kit sensor e do processo metodológico empregado na solução. Nos experimentos de alto volume de tráfego, além de validar as hipóteses propostas, foi possível perceber a necessidade de reduzir as vibrações provenientes da movimentação do veículo sobre as vias, assim como construir um encapsulamento do tipo IP65 para resistir à chuva e intempéries.

No que tange ao mapeamento em rota regular de ônibus, foi possível criar representações espaçotemporais durante o período equivalente a um dia, que mostraram as variações de concentração dos gases durante esse período, assim como identificaram regiões mais suscetíveis à concentração de poluentes. Ao observar, por exemplo, o padrão de concentração do NO₂, este apresentou níveis crescentes no decorrer do dia, seria mais acertada uma interpretação que comparasse as regiões mais críticas a cada jornada do ônibus, e assim haveria mais chances de entender quais eram os pontos mais críticos e não apenas o ponto que apresentou a média maior em todo o período do experimento. Assim, percebeu-se a necessidade de incorporar técnicas de padronização e normalização de dados para minimizar esses efeitos. Além disso, a versão do kit deveria ser aprimorada para registrar unidades tradicionais de concentração de poluentes (ppm), pois um método visualização com esta unidade, ajuda na interpretação por especialistas e gestores públicos. Todos os aprimoramentos e mudanças foram incorporados nas novas versões do kit sensor, como se comentou na seção 3.1.1 - Infraestrutura de sensoriamento.

Por fim, o experimento na Avenida Paulista na carreata de veículos elétricos, utilizando a última versão do kit, esclareceu que os mapeamentos em apenas um momento é uma fotografia da situação que não reflete nem o dia nem a época, ou seja, é uma situação momentânea, que não reflete necessariamente cenários de longo prazo. Para maiores conclusões há necessidade de maior tempo de monitoramento, e assim foram programados novos experimentos que deveriam envolver um período mais longo de observação.

De forma resumida, ao final de todos os experimentos e validações podemos registrar o resultado dos testes das hipóteses da seguinte forma:

Tabela 27 – Resultados dos testes das hipóteses

Hipóteses	Resultado
<i>h1. A movimentação do veículo hospedeiro do sensor interfere nos valores das medidas dos gases poluentes coletados</i>	Testada pelo Experimento 1 – ensaio 1, sendo a hipótese confirmada como verdadeira. Este resultado foi importante para perceber que os sensores desenvolvidos inicialmente para medições fixas precisariam de adaptações;
<i>h2. A incorporação de um fluxo constante de ar passando pelos sensores permite minimizar a interferência da mobilidade nos valores coletados pelo kit sensor</i>	Testada pelo Experimento 1 – ensaio 2, sendo a hipótese confirmada como verdadeira. Este resultado foi importante para validar as adaptações feitas no kit sensor para minimizar os efeitos da mobilidade;
<i>h3. Com a coleta de dados em movimento é possível perceber geograficamente os pontos mais críticos quanto à poluição do ar</i>	Testada pelo Experimento 2, sendo a hipótese confirmada como verdadeira. Este resultado foi importante para perceber a viabilidade do mapeamento móvel, mas também aprimorar o kit sensor para resistir aos intemperes e vibrações;
<i>h4. Com o kit sensor hospedado em ônibus coletivo é possível perceber horários e locais mais críticos quanto à poluição do ar</i>	Testada pelo Experimento 3, sendo a hipótese confirmada como verdadeira. Este resultado foi importante para perceber as características temporais do mapeamento, e incorporar aprimoramentos matemáticos, na análise de dados;
<i>h5. Pelos dados coletados com dada plataforma é possível perceber diferenças na concentração de poluentes quando o tráfego é composto por veículos de baixa emissão de gases</i>	Testada pelo Experimento 4, sendo que pelo volume de dados coletados, não foi possível declarar a hipótese verdadeira ou falsa. Este resultado foi importante para delimitar uma amostragem mínima de dados para obter análises espaçotemporais mais consistentes.

5 ESTUDO DE CASO: CIDADE DE SÃO PAULO

Com a realização dos experimentos mencionados anteriormente, foi possível ter uma noção melhor do potencial da plataforma para realizar análises espaçotemporais de alta resolução da qualidade do ar. No entanto, para uma análise consistente, um período mais longo de monitoramento se fazia necessário para entender as principais características de concentração de poluentes da região monitorada, assim como identificar regiões que apresentam maior tendência de problemas com os poluentes.

A cidade de São Paulo, e melhor dito, algumas regiões dela, foi escolhida para aplicação das proposições aqui apresentadas. Em São Paulo, todas as linhas de ônibus são operadas por consórcio de empresas privadas, sob a gestão da São Paulo Transporte S.A. – SPTrans, responsáveis pela operação de 15 mil veículos em mais de 1.300 linhas (SPTRANS, 2017). Para evitar uma hipotética interferência nas medidas provocada pelo próprio veículo hospedeiro, decidiu-se por utilizar ônibus elétricos, trólebus, operados pela Empresa AMBIENTAL. Toda a negociação de instalação foi realizada com a SPTrans, a qual intermediou o processo com a operadora privada. Este processo de negociação iniciou em meados de 2016. Apesar de ter realizados alguns experimentos preliminares em 2016, a autorização de instalação só foi concedida em março de 2017, devido ao processo eleitoral em 2016 e a mudança de gestão municipal ocorrida no início de 2017. Após a instalação, o processo de acompanhamento transcorreu diretamente com a empresa AMBIENTAL. Embora o alinhamento com a SPTrans ter ocorrido de forma solista, a operacionalização dos estudos implicam em mudanças operacionais na operadora, gerando resistências naturais, seja pelo processo de instalação dos kits nos ônibus, exigindo instalações elétricas adicionais nos ônibus para realizar a ligação de alimentação do kit sensor. Ou mesmo, mudanças da infraestrutura com a incorporação de roteador de comunicação no pátio da empresa, o qual foi instalado próximo ao estacionamento dos trólebus, obrigando aos ônibus, sempre estacionarem em local único.

Então, após uma série de testes e experimentos de validação apresentado no capítulo anterior, os equipamentos foram instalados em 19 de abril de 2017, em dois veículos da frota da AMBIENTAL, veículo número 1592 e veículo de número 1596 (Figura 84). Além dos sensores, um roteador 3G foi instalado na garagem dessa

empresa, que disponibilizava sinal *Wifi* para os sensores encaminharem os dados, pela Internet, para a infraestrutura computacional da plataforma. Este roteador ficou instalado a 100 metros das vagas reservadas para os veículos repousarem após sua jornada diária, assim os dados eram transmitidos nas madrugadas (01h a 04h).

Figura 84 – Veículos instrumentados

Fonte: Elaborado pelo autor.

A retirada dos kits sensores estava prevista para setembro de 2017, e durante o período do experimento, os ônibus transitaram por várias linhas de trólebus. Para as diversas análises do estudo de caso, utilizaram-se os dados do período de 19 de abril até 28 de julho de 2017, sendo que as duas linhas escolhidas cobrem a Zona Central e a região Centro-Leste de São Paulo. Assim, este capítulo detalha os resultados e análises dos experimentos de monitoramento dividindo-os em três subseções: Caracterização da região de estudo, Mapeamento da Zona Central e do Centro-Leste do município.

5.1 REGIÕES DE ESTUDO: ZONAS CENTRAL E CENTRO-LESTE DE SP

A cidade de São Paulo está localizada na região sudeste do Brasil, possui área aproximada de 1.521,11 km², é o município de maior ocupação territorial, maior contingente populacional, em torno de 11,2 milhões de habitantes (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2011).

No contexto da qualidade do ar, a cidade é monitorada pela rede de monitoramento da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) que é gerenciada pelo Órgão Estadual de Meio Ambiente, a CETESB. Esta região concentra a maior frota veicular do País, que em 2014 contava com aproximadamente 7.386.283 veículos, sendo que concentra 48% da frota do Estado em apenas 3,2% do território, que possui 47% da população total do Estado (CETESB, 2014).

A CETESB mantém sua rede ativa, monitorando constantemente os índices de qualidade do ar. A localização das estações de monitoramento de qualidade do ar na RMSP é vista na Figura 85. Já a Tabela 28 apresenta o endereço das estações automáticas que monitoram o Monóxido de Carbono na capital paulista.

Fonte: CETESB (2017a).

Tabela 28 - Estações de monitoramento de CO na cidade de SP e sua classificação

Estação	Endereço	Classificação
Cerqueira César (A)	Av. Dr. Arnaldo, 725, Faculdade de Saúde Pública, Sumaré, São Paulo	MICRO
Cid. Universitária USP - IPEN (A)	Av. Prof. Lineu Prestes, 2242, Cid. Universitária, Butantã, São Paulo	URBANA
Congonhas (A)	Al. dos Tupiniquins, 1571, E.M.Prof.J.C. da Silva Borges, Planalto Paulista, São Paulo	MICRO
Ibirapuera (A)	Pq. do Ibirapuera, s/nº, Setor 25, Parque do Ibirapuera, São Paulo	URBANA
Marg.Tietê - Pte.Remédios (A)	Av. Embaixador Macedo Soares, 12889, Vila Leopoldina, São Paulo	MICRO
Moóca (A)	R. Bresser, 2341, Adm. Reg. da Moóca e Centro Esportivo Municipal, Moóca, São Paulo	BAIRRO
Parelheiros (A)	Av. Paulo Guilguer Reimberg, 2448, E.E. Pres. Tancredo A. Neves, Jd Novo Horizonte, São Paulo	MICRO
Parque Dom Pedro II (A)	Pq. D. Pedro II, s/nº, Palácio das Indústrias, Centro, São Paulo	BAIRRO
Pinheiros (A)	Av. Prof. Frederico Herman Júnior, 345, CETESB, Alto de Pinheiros, São Paulo	MICRO
Santo Amaro (A)	R. Pe.José Maria, 555, Acesso pela Rua Humboldt - Centro Ed. Esp. Mun. Joerg Brüder, Santo Amaro, São Paulo	MÉDIA

Fonte: CETESB (2016).

As informações de caracterização são baseadas no Relatório de qualidade do ar da CETESB de 2016 (CETESB, 2017a), que apresenta os resultados da sua rede de monitoramento do Estado, sendo que aqui estão representados os destaques da RMSP.

Na RMSP as fontes emissoras de poluentes, sejam móveis ou fixas, são estimadas em 131 mil t/ano de monóxido de carbono (CO), 38 mil t/ano de hidrocarbonetos (HC), 80 mil t/ano de óxidos de nitrogênio (NOx), 5,1 mil t/ano de material particulado (MP) e 6,7 mil t/ano de óxidos de enxofre (SOx). Desses totais, os veículos são responsáveis por 97% das emissões de CO, 76% de HC, 68% de NOx, 40% de MP e 17% de SOx.

A RMSP tem apresentado redução na concentração destes poluentes nos últimos anos, por exemplo, com relação ao CO, desde 2008, não se ultrapassa o padrão de máximo da qualidade do ar em 8 horas (9 ppm) em nenhuma das estações da RMSP. Em 2016, a qualidade do ar no nível BOM foi a que vigorou em todas as estações da RMSP (CETESB, 2017a). A Figura 86 apresenta os índices das estações da região Centro-Leste, nos últimos anos.

Figura 86 – Médias anuais de CO nas estações das Zonas Central e Leste da RMSP

Fonte: CETESB (2017a).

De forma equivalente, a tendência de melhora é também verificada no caso de O₃, que nos três últimos anos tem aumentado o percentual de qualidade do ar, no nível BOM a cada ano (Figura 87), com um ano excepcional (2013).

Fonte: CETESB (2017a).

As condições climáticas têm influência na concentração de poluentes, e, o ano de 2016 foi caracterizado pela neutralidade das condições oceânicas e atmosféricas no Pacífico Equatorial, indicando o término do fenômeno de escala global El Niño-Oscilação Sul (ENOS) que atuou durante todo o ano de 2015, de acordo com a publicação Infoclima (CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS, 2017). Em 2017, as condições climáticas se assemelharam com a mesma neutralidade.

No que tange aos trajetos dos veículos e sensores, estes trafegaram em regiões próximas às estações de monitoramento da CETESB, respectivamente Estações Pq. Dom Pedro II e Mooca, o que permitiu certa comparação. A Figura 88 e a Figura 89 apresentam o relatório do sistema QUALAR da CETESB, com a distribuição da qualidade do ar, durante o período de mapeamento. Estes relatórios apontam a predominância de boa qualidade do ar durante os meses de maio, junho e julho de 2017, considerando os três gases monitorados.

Figura 88 – Relatório de Sistema sobre a distribuição da qualidade do ar para Est. Parque D. Pedro II

Fonte: CETESB (2017b).

Figura 89 – Relatório de Sistema sobre a distribuição da qualidade do ar para Estação Mooca

Fonte: CETESB (2017b).

5.2 ANÁLISE ESPAÇOTEMPORAL DA REGIÃO CENTRAL DE SP

A análise foi realizada com base no mapeamento da região central de São Paulo, que foi obtido por meio da coleta de dados dos kits sensores que estavam hospedados nos ônibus selecionados transitando no trajeto da linha 2002-10 - TERM. PQ. D. PEDRO II/TERM. BANDEIRA. Este é um trajeto circular de 7 km, que se inicia pelo Terminal Parque Dom Pedro II, passando por vias tradicionais do centro da cidade, como a Rua Boa Vista, Rua Libero Badaró, Praça da República e Terminal Bandeira. A Figura 90 mostra o trajeto realizado pela Linha 2002-10 demarcado pelos pontos coletados durante o monitoramento; além destes, o logotipo da CETESB marca o local da estação Parque Dom Pedro II, que monitora a qualidade do ar.

Para criar os modelos espaçotemporais da região, foram utilizados dados de quatro dias completos de monitoramento em dias típicos de meio de semana, ou seja, de terça a quinta feira. Os dados selecionados para a análise foram coletados entre os dias 25 e 27 de abril e 03 de maio de 2017, considerando o horário das 05h às 20h. Este período resultou em uma amostra com 6.307 pontos coletados.

Figura 90 – Trajeto da Linha 2002-10 com a demarcação dos pontos coletados

Fonte: Elaborado pelo autor com base no Software ArcGIS (ESRI, 2015).

Como o intuito é ter uma maior resolução dos mapas cartográficos, se determinou que as representações concebesssem pequenas áreas, aumentando a resolução e permitindo a realização de análises espaço temporais de microrregiões de 100 metros (cobertura máxima da medida do kit), algo não possível atualmente com os modelos tradicionais das redes de monitoramento automático de qualidade do ar. Com esta premissa, estabeleceu-se uma amostra de dados não pequena, isto é, em 100 metros mais de 30 pontos para análise (BRAGA, 2010). Como houve mais de 6 mil amostras coletadas de forma distribuída no tempo e no espaço por todo trajeto, isto implicou que em 7 km tínhamos mais de 30 pontos a cada 100 metros, valor este utilizado como fronteira para determinar uma amostra não pequena.

Os quatro dias de mapeamento tiveram perfis similares para os valores de medições para CO e O₃, conforme pode ser visto nas Tabela 29 e Tabela 30. Já para o NO₂ os valores médios variaram de forma mais acentuada nas terças (Tabela 31).

Tabela 29 – Estatística descritiva dos valores de monóxido de carbono coletados

CO	25/abr	26/abr	27/abr	03/mai	Geral
	Terça	Quarta	Quinta	Terça	
Média	1,250	1,053	1,194	1,246	1,18
Erro padrão	0,044	0,038	0,046	0,041	0,02
Mediana	0,619	0,512	0,454	0,675	0,56
Modo	0,000	0,000	0,000	0,000	0,00
Desvio padrão	1,736	1,529	1,834	1,637	1,69
Variância da amostra	3,012	2,338	3,364	2,678	2,85
Curtose	5,888	7,796	11,141	5,103	7,99
Assimetria	2,199	2,447	2,725	2,077	2,40
Intervalo	13,910	12,865	17,310	11,319	17,31
Mínimo	0,000	0,000	0,000	0,000	0,00
Máximo	13,910	12,865	17,310	11,319	17,31
Soma	1943,561	1683,733	1858,991	1986,112	7472,40
Contagem	1555	1599	1557	1594	6307
Nível de confiança (95,0%)	0,086	0,075	0,091	0,080	0,04

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 30 – Estatística descritiva dos valores de ozônio coletados

O₃	25/abr	26/abr	27/abr	03/mai	Geral
Média	0,622	0,524	0,557	0,566	0,567
Erro padrão	0,006	0,007	0,006	0,005	0,003
Mediana	0,636	0,574	0,598	0,572	0,596
Modo	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Desvio padrão	0,227	0,260	0,219	0,210	0,233
Variância da amostra	0,052	0,068	0,048	0,044	0,054
Curtose	17,936	-0,092	0,416	23,283	8,245
Assimetria	1,137	0,097	-0,495	1,794	0,486
Intervalo	3,565	1,956	1,391	3,095	3,565
Mínimo	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Máximo	3,565	1,956	1,391	3,095	3,565
Soma	966,445	837,469	867,104	901,986	3573,831
Contagem	1555	1599	1557	1594	6307
Nível de confiança (95,0%)	0,011	0,013	0,011	0,010	0,006

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 31 – Estatística descritiva dos valores de NO₂ coletados

NO₂	25/abr	26/abr	27/abr	03/mai	Geral
Média	0,225	0,019	0,020	0,129	0,098
Erro padrão	0,007	0,001	0,002	0,005	0,002
Mediana	0,117	0,000	0,000	0,015	0,000
Modo	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Desvio padrão	0,274	0,053	0,077	0,203	0,196
Variância da amostra	0,075	0,003	0,006	0,041	0,038
Curtose	0,950	51,753	55,175	3,367	6,955
Assimetria	1,400	5,505	6,583	1,985	2,663
Intervalo	1,121	0,822	0,970	0,911	1,121
Mínimo	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Máximo	1,121	0,822	0,970	0,911	1,121
Soma	349,536	30,848	31,352	205,313	617,049
Contagem	1555	1599	1557	1594	6307
Nível de confiança (95,0%)	0,014	0,003	0,004	0,010	0,005

Fonte: Elaborado pelo autor.

De forma complementar são apresentados os gráficos com os valores de referência da estação Parque Dom Pedro II (Figura 91), a mais próxima, assim como, o gráfico com os valores horários médios das medidas coletadas (Figura 92). No entanto, as duas estações são de escala bairro, isto é, projetam a situação do entorno com raio entre 501 m até no máximo de 4 km. Sendo assim, os gráficos não serão iguais, até porque as estações e os sensores (escala de 100m) não estão cobrindo a mesma região, devido à escala de representação espacial de cada uma delas, no entanto é possível notar alguma similaridade.

Figura 91 – Gráfico dos valores horários médios dos poluentes coletados pela Estação CETESB - Pq. Dom Pedro II

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 92 – Gráfico dos valores horários médios dos poluentes coletados pelo mapeamento na Linha 2002-10.

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2.1 Representações espaçotemporais

As representações em alta definição estão contidas no APÊNDICE B, sendo dois modelos: *relativo*, que apresenta microrregiões destacadas em três classes de tendência de concentração de poluentes e o *absoluto*, que apresenta os valores médios de concentração dos poluentes em ppm. Para cada modelo, dois mapas são elaborados, um com os resultados gerais e outro com a comparação das faixas horárias. Destaca-se na Figura 93 o resultado geral do modelo relativo para CO, enquanto a Figura 94 apresenta o modelo absoluto.

Figura 93 – Modelo de representação relativo da concentração de CO na Zona Central de SP

Fonte: Elaborado pelo autor com base no Software ArcGIS (ESRI, 2015).

Figura 94 – Modelo de representação absoluto da concentração de CO na Zona Central de SP

Fonte: Elaborado pelo autor com base no Software ArcGIS (ESRI, 2015).

Além dos modelos com os resultados gerais apresentados nas figuras anteriores, um modelo comparativo por faixa horária, ajuda a compreender a sazonalidade de alguns gases poluentes, um exemplo clássico é NO_2 . A Figura 95 apresenta parte do resultado da concentração de NO_2 por faixa horária. O gráfico completo pode ser visto no APÊNDICE B.

Figura 95 – Parte de Modelo absoluto por faixa horária de concentração de NO_2 na Zona Central

Fonte: Elaborado pelo autor com base no Software ArcGIS (ESRI, 2015).

Ao observar os resultados das representações surgem dúvidas sobre as características que levam as regiões a terem maior ou menor nível de poluentes. As razões da situação apresentada pelos modelos podem ser analisadas por especialistas, inclusive com mais dados estatísticos de suporte. As representações cartográficas apresentam informações relevantes para uma análise consistente e, na próxima seção apresenta-se uma caracterização dos pontos relevantes, a fim de

tentar identificar razões da situação encontrada, ou seja, possíveis causas para índices maiores em algumas regiões.

5.2.2 Caracterização dos pontos relevantes das representações

Ao observar os modelos apresentados é possível perceber que algumas regiões tendem a ter maior nível de poluentes que outros. Desta forma, esta seção estudam-se as características das regiões de destaque evidenciadas com maiores índices nos modelos de representação cartográfica relativa e absoluta. Para isso, serão destacados quatro pontos assinalados na Figura 96, para as interpretações.

Figura 96 – Modelo de representação relativa de CO com vista de satélite da Zona central de SP

Fonte: Elaborado pelo autor com base no Software ArcGIS (ESRI, 2015).

5.2.2.1 Região de destaque 1 - região crítica

A região assinalada pelo número 1 na Figura 96 foi a que revelou maior tendência de concentração de poluentes no modelo relativo e apresentou maiores concentrações de CO no modelo absoluto. Esta região tem aproximadamente 500 metros, e se inicia no final da Rua Dona Maria de Paula, no encontro com o viaduto Dona Paulina, seguindo pela Praça Dr. João Mendes, atrás da Igreja da Sé, chegando ao cruzamento com a Rua Anita Garibaldi. A Figura 97 apresenta a região

crítica em duas representações (mapa e imagem), enquanto a Figura 98 apresenta uma visão 3D da região, incluindo a condição de tráfego típica de terça às 18h.

Figura 97 – Detalhe da região crítica de CO com duas vistas superiores da Zona central de SP

Fonte: Elaborado pelo autor com base no Software ArcGIS (ESRI, 2015).

Figura 98 – Visão 3D da região crítica de CO da Zona central de SP

Fonte: Google Maps (2017).

O viaduto Dona Paulina está sobre a Avenida 23 de Maio, uma via com alto volume de tráfego que é um eixo de ligação da região norte-sul de São Paulo, além disso, o trajeto do ônibus neste trecho é congestionado em boa parte do dia, sendo que a via é composta por cinco faixas, uma delas dedicada para fluxo de ônibus coletivos.

Ao final do viaduto, a via é circundada de prédios altos e grandes cruzamentos (Figura 99), sendo que neste pequeno trecho são encontrados quatro conjuntos semafóricos.

Figura 99 – Foto do cruzamento com a Praça João Mendes

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 100 apresenta os valores de concentração de CO coletados na região crítica durante o período de coleta.

Figura 100 – Gráfico de dispersão das amostras de CO coletadas na região crítica

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como pode ser visto, a região tem vários fatores contribuintes para justificar a maior tendência de concentração de CO, uma vez que recebe as emissões da Avenida 23 de Maio, canalizando as emissões por um cânion urbano, em vias de cinco faixas com congestionamentos e conjuntos semafóricos, como analisado e previsto por algumas pesquisas (KRECL, TARGINO, *et al.*, 2016) (TARGINO; KRECL, 2016); (VARDOULAKISA *et al.*, 2003); (VASCONCELLOS; CARVALHO; POOL, 2005);

(BARREFORS, 1996); (GOEL; KUMAR, 2015); (AHMAD; KHARE; CHAUDHRY, 2005).

5.2.2.2 Região de destaque 2 - Viadutos

Realizando a análise dos resultados de CO também foi possível perceber que todos os viadutos do trajeto dos ônibus estavam sendo classificados com alta tendência de concentração de CO, estes viadutos estão indicados pelo número 2 na Figura 96. No caso em questão, todos os viadutos destacados estavam sobre vias de alto volume de tráfego, por exemplo, o caso mencionado anteriormente na Figura 98, que é o viaduto sobre a Avenida 23 de Maio; o viaduto acima da Avenida Nove de julho (Figura 101), e o viaduto do Chá (Figura 102).

Figura 101 – projeção 3D do viaduto sobre a avenida 9 de julho

Fonte: Google Maps (2017).

Figura 102 – projeção 3D do viaduto do Chá sobre o vale do Anhangabaú

Fonte: Google Maps (2017).

Nos três casos, os viadutos estão sobre vias de alto tráfego, recebendo também os poluentes emitidos pelos veículos que transitam por baixo do viaduto. Além disso, o Viaduto do Chá está próximo à entrada do túnel do Anhangabaú, o qual pode se tornar uma espécie de “chaminé” dos poluentes emitidos no seu interior.

5.2.2.3 Região de destaque 3 - Túneis

A região indicada pelo número 3 na Figura 96 não apresentava nenhuma característica relevante para explicar a tendência de concentração de CO, uma vez que é uma via de duas faixas, em frente ao Largo São Bento, no encontro com a Rua Libero Badaró, que é uma área aberta e com boa ventilação. Explorando as possibilidades, ao ampliar o campo de observação, percebeu-se que o local está a poucos metros da saída do túnel Papa João Paulo II (Figura 103), cuja entrada pode ser vista na Figura 102. Esta característica pode ser uma das causas do maior índice na região.

Figura 103 – projeção 3D do largo de são bento

Fonte: Google Maps (2017).

5.2.2.4 Região de destaque 4 - Grandes Cruzamentos

A região indicada pelo número 4 na Figura 96 e na Figura 104 aponta para grandes cruzamentos no trajeto. Entende-se como grandes cruzamentos aqueles que excedem mais que oito faixas encontrando se em uma esquina. Para exemplificar esta situação, os dois cruzamentos da Av. Ipiranga com a Praça da República, atendem a características de grandes cruzamentos e estes também são

classificados nas representações cartográficas do modelo relativo como pontos com alta tendência de concentração de CO (Figura 96).

Figura 104 – projeção 3D da praça da República

Fonte: Google Maps (2017).

Outro bom exemplo é o cruzamento das avenidas São Luiz, Consolação, Xavier de Toledo e a Rua Martins Fontes, as quais envolvem mais de 20 faixas. A Figura 105 apresenta registro fotográfico da região. Esta região também está identificada como região de alta tendência de concentração de CO.

Figura 105 – Foto panorâmica do cruzamento Av. São Luiz e Av. Consolação

Fonte: Elaborado pelo autor

5.3 ANÁLISE ESPAÇOTEMPORAL DA REGIÃO CENTRO-LESTE DE SP

A análise foi realizada com base no mapeamento da região Centro-Leste de São Paulo, que foi obtido por meio da coleta de dados dos kits sensores que estavam hospedados nos ônibus selecionados transitando na linha 3160-10 - TERM. PQ. D. PEDRO II / VILA PRUDENTE. Este trajeto se inicia no Terminal Parque Dom Pedro II, passando pela Avenida Alcântara Machado (Radial Leste), uma das principais avenidas da Zona Leste, e seguindo na Avenida Paes de Barros no bairro da Mooca, avenida onde também está localizado o Terminal da Vila Prudente. A Figura 106 mostra o trajeto realizado pela Linha 3160-10 e os pontos coletados durante o monitoramento. O logo da CETESB indica o local das suas estações de monitoramento da qualidade do ar, a Estação Parque Dom Pedro II e Mooca.

Para criar os modelos espaçotemporais da região, foram utilizados três meses completos de monitoramento, de segunda a domingo. Os dados selecionados para a análise estão compreendidos entre os dias 04 de maio e 28 de julho de 2017, considerando o horário das 07h às 22h. Este período resultou em uma amostra com 67.361 pontos coletados.

Figura 106 – Pontos no trajeto da Linha 3160-10 TERM. PQ. D. PEDRO II / TERM. VL. PRUDENTE

Fonte: Elaborado pelo autor com base no Software ArcGIS (ESRI, 2015).

Durante os três meses de monitoramento o perfil dos valores médios de medições para CO e O₃ ficaram uniformes, conforme pode ser visto na Tabela 32 e 20. Já para o NO₂ os valores médios variaram entre os meses (Tabela 21).

Tabela 32 – Estatística descritiva dos valores de CO coletados na Linha 3160-10

CO	maio/17	junho/17	julho/17	Geral
Média	1,149	1,461	1,138	1,268
Erro padrão	0,018	0,032	0,013	0,014
Mediana	0,495	0,909	0,467	0,639
Modo	0,000	0,000	0,000	0,000
Desvio padrão	2,549	4,962	1,673	3,549
Variância da amostra	6,498	24,620	2,799	12,596
Curtose	7585,764	6349,500	5,885	10174,769
Assimetria	67,970	71,217	2,226	84,691
Intervalo	288,051	498,122	16,628	498,122
Mínimo	0,000	0,000	0,000	0,000
Máximo	288,051	498,122	16,628	498,122
Soma	24303,395	35812,426	19439,087	79554,908
Contagem	21154	24517	17077	62748
Nível de confiança(95,0%)	0,034	0,062	0,025	0,028

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 33 – Estatística descritiva dos valores de O₃ coletados na Linha 3160-10

O₃	maio/17	junho/17	julho/17	Geral
Média	0,583	0,583	0,527	0,568
Erro padrão	0,002	0,002	0,002	0,001
Mediana	0,609	0,570	0,543	0,577
Modo	0,000	0,000	0,000	0,000
Desvio padrão	0,227	0,241	0,210	0,229
Variância da amostra	0,051	0,058	0,044	0,053
Curtose	1,870	0,714	1,183	1,214
Assimetria	-0,058	0,180	-0,019	0,089
Intervalo	3,267	2,740	2,792	3,267
Mínimo	0,000	0,000	0,000	0,000
Máximo	3,267	2,740	2,792	3,267
Soma	12331,334	14296,655	8999,879	35627,868
Contagem	21154	24517	17077	62748
Nível de confiança(95,0%)	0,003	0,003	0,003	0,002

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 34– Estatística descritiva dos valores de NO₂ coletados na Linha 3160-10

NO ₂	maio/17	junho/17	julho/17	Geral
Média	0,100	0,064	0,135	0,095
Erro padrão	0,001	0,001	0,002	0,001
Mediana	0,007	0,000	0,040	0,000
Modo	0,000	0,000	0,000	0,000
Desvio padrão	0,186	0,133	0,201	0,174
Variância da amostra	0,034	0,018	0,040	0,030
Curtose	41,722	20,843	3,588	23,406
Assimetria	4,293	3,780	1,942	3,375
Intervalo	3,952	2,021	1,619	3,952
Mínimo	0,000	0,000	0,000	0,000
Máximo	3,952	2,021	1,619	3,952
Soma	2105,572	1572,908	2305,514	5983,993
Contagem	21154	24517	17077	62748
Nível de confiança(95,0%)	0,003	0,002	0,003	0,001

Fonte: Elaborado pelo autor.

Adicionalmente são apresentados os gráficos com os valores das médias diárias das medidas coletadas (Figura 107 e Figura 109), assim como, gráficos com valores de referência das estações CETESB mais próximas, a estação Parque Dom Pedro II e Mooca (Figura 108 e Figura 110).

Figura 107 – Gráfico de valores médios diários de NO₂ coletados na Linha 3160-10

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 108 – Gráfico de valores médios diários de NO₂ da estação CETESB - Parq. Dom Pedro II

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 109 – Gráfico de valores médios diários de CO coletados na Linha 3160-10

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 110 – Gráfico de valores médios diários de CO da estação CETESB - MOOCA

Fonte: Elaborado pelo autor.

Cabe salientar que a estação Mooca não registrou medições entre dias 19 e 25 de maio de 2017, por problemas operacionais.

Ao analisar a curtose e os valores máximos, se observou que poderia conter alguns valores fora da curva, no entanto, nos valores médios diários não revelaram algo que chamasse a atenção. Assim, foi necessário observar todas as amostras, as quais estão expressas nos gráficos no APÊNDICE A. Adotando como critério para pontos fora da curva, como valores acima de três desvios padrões acima da média, nesta análise foi possível observar poucos pontos fora da curva, os quais não tiveram impacto relevante nas médias. A Figura 111 apresenta o dia onde apareceram os pontos mais elevados para NO_2 . Apesar dos pontos serem valores válidos e registrados pelos sensores, para os cálculos estatísticos seria interessante novo cálculo para ver o impacto destes pontos. Assim, novas tabelas foram elaboradas com a retirada dos valores acima de três desvios padrões acima da média.

Figura 111 – Gráfico do dia que revelou valores mais elevados para NO₂

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 35 – Estatística descritiva dos valores de CO após retirada de valores elevados

CO	maio/17	junho/17	julho/17	Geral
Média	1,115	1,372	1,156	1,233
Erro padrão	0,011	0,010	0,013	0,006
Mediana	0,469	0,916	0,481	0,649
Modo	0,000	0,000	0,000	0,000
Desvio padrão	1,591	1,542	1,672	1,600
Variância da amostra	2,530	2,378	2,797	2,560
Curtose	4,942	3,620	4,872	4,355
Assimetria	2,122	1,687	2,115	1,942
Intervalo	11,533	11,732	11,896	11,896
Mínimo	0,000	0,000	0,000	0,000
Máximo	11,533	11,732	11,896	11,896
Soma	24516,338	33160,186	18781,643	75051,546
Contagem	21996	24167	16251	60871
Nível de confiança(95,0%)	0,021	0,019	0,026	0,013

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 36 – Estatística descritiva dos valores de NO₂ após retirada de valores elevados

NO₂	mai/17	jun/17	jul/17	Geral
Média	0,078	0,054	0,104	0,076
Erro padrão	0,001	0,001	0,001	0,001
Mediana	0,003	0,000	0,028	0,000
Modo	0,000	0,000	0,000	0,000
Desvio padrão	0,128	0,100	0,146	0,125
Variância da amostra	0,016	0,010	0,021	0,016
Curtose	4,455	6,826	2,061	4,342
Assimetria	2,155	2,469	1,629	2,111
Intervalo	0,617	0,617	0,617	0,617
Mínimo	0,000	0,000	0,000	0,000
Máximo	0,617	0,617	0,617	0,617
Soma	1713,533	1313,071	1691,713	4638,478
Contagem	21996	24167	16251	60871
Nível de confiança(95,0%)	0,002	0,001	0,002	0,001

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 37 – Estatística descritiva dos valores de O₃ após retirada de valores elevados

O ₃	mai/17	jun/17	jul/17	Geral
Média	0,574	0,579	0,514	0,561
Erro padrão	0,001	0,002	0,002	0,001
Mediana	0,604	0,569	0,536	0,573
Modo	0,000	0,000	0,000	0,000
Desvio padrão	0,216	0,236	0,200	0,223
Variância da amostra	0,047	0,056	0,040	0,050
Curtose	-0,014	-0,203	0,004	-0,067
Assimetria	-0,370	-0,009	-0,269	-0,133
Intervalo	1,257	1,257	1,255	1,257
Mínimo	0,000	0,000	0,000	0,000
Máximo	1,257	1,257	1,255	1,257
Soma	12620,612	13995,709	8358,194	34119,147
Contagem	21996	24167	16251	60871
Nível de confiança(95,0%)	0,003	0,003	0,003	0,002

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao final foram extraídos 1.877 pontos, em torno de 3% dos pontos coletados. Mesmo com a redução, a média de nenhum poluente foi impactada.

5.3.1 Representações espaçotemporais

As representações em alta definição estão contidas no APÊNDICE B, sendo dois modelos, como em casos anteriores: relativo e absoluto. Para cada modelo, quatro mapas foram elaborados, um para cada mês e um com os resultados gerais. Por fim um mapa com o comparativo dos dias da semana e outro por faixa horária. Destacamos aqui a Figura 112, que apresenta o resultado geral do modelo relativo para CO, enquanto a Figura 113 apresenta o modelo absoluto.

Figura 112 – Modelo de representação relativo da concentração de CO na Zona Centro-Leste de SP

Fonte: Elaborado pelo autor com base no Software ArcGIS (ESRI, 2015).

Figura 113 – Modelo de representação absoluta da concentração de CO na Zona Centro-Leste de SP

Fonte: Elaborado pelo autor com base no Software ArcGIS (ESRI, 2015).

Além dos modelos com os resultados gerais apresentados nas figuras anteriores, um modelo comparativo por dia da semana, ajuda a compreender a sazonalidade semanal, principalmente para os gases diretamente influenciados pelo tráfego urbano. Um exemplo clássico é NO_2 . A Figura 114 apresenta o resultado por dia da semana do poluente NO_2 .

Figura 114 – Modelo absoluto por dia da semana de concentração de CO na Zona Centro-Leste

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao observarmos os mapas apresentados, algumas regiões se destacam seja por apresentarem alta tendência de concentrações, ou mesmo pela característica da ocupação de solo de alguns pontos de destaque. As representações cartográficas apresentam informações relevantes para uma análise consistente e, na próxima seção apresenta-se uma caracterização dos pontos relevantes.

5.3.2 Caracterização dos pontos relevantes das representações

Com base nos modelos relativo e absoluto, algumas características foram reveladas e nesta seção serão discutidas. Para isso, serão destacados três pontos para as interpretações; aqueles que estão assinalados na Figura 115.

Figura 115 – Modelo de representação relativa de CO com vista de satélite do Centro-Leste de SP

Fonte: Elaborado pelo autor com base no Software ArcGIS (ESRI, 2015).

5.3.2.1 Região de destaque 1 – região crítica

A região assinalada pelo número 1 na Figura 115 foi a que revelou maior tendência de concentração de poluentes no modelo relativo e apresentou maiores concentrações de CO no modelo absoluto. Esta região tem aproximadamente 1 km, sendo mais conhecida como Radial Leste, iniciando especificamente na subida do viaduto Alcântara Machado até a Rua dos Trilhos. Esta avenida segundo a CET conta com o maior tráfego urbano da cidade, com mais de 2,7 veículos por segundo, nos horários de pico, chegando a um volume de 29.620 veículos no fim de tarde, sendo o trecho mais congestionado entre o viaduto Alcântara Machado e a Rua dos Trilhos (PEREIRA, 2014). Este trecho mencionado é exatamente o trecho apontado

Figura 118 – Gráfico de dispersão das concentrações de CO coletadas na região crítica

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3.2.2 Região de Destaque 2 - Viadutos

Realizando a análise dos resultados de CO também foi possível perceber que os viadutos do trajeto dos ônibus estavam sendo classificados com alta tendência de concentração de CO, viadutos que estão apontados pelo número 2 na Figura 115. No caso em questão, três viadutos se destacaram, seja porque continham ou estavam sobre vias de alto volume de tráfego. O caso da Figura 116 - Viaduto Alcântara Machado, o Viaduto Trinta e Um de Março (Figura 119 e Figura 120) e o Viaduto Antônio Nakashima, este dois últimos sobre a Avenida do Estado, via de alto volume de tráfego (Figura 121). Adicionalmente, as figuras 3D com vistas 3D contém a indicação de cor dada pelo *Google* que representa a velocidade do trânsito típico de sexta às 18h.

Figura 120 – projeção 3D do viaduto Trinta e Um de Março sobre a Av. do Estado

Fonte: Google Maps (2017).

Figura 121 – Detalhe da região destaque 2 com duas vistas superiores do viaduto Antônio Nakashima

Fonte: Google Maps (2017).

5.4 CONSIDERAÇÕES DO ESTUDO DE CASO

Cada modelo gerado pela plataforma durante o presente estudo de caso permitiu perceber que existem certas variações de concentração de poluentes em diferentes perspectivas, sejam elas relativa ou absoluta, associadas a características locais. Na perspectiva relativa cada região foi dividida em três classes de tendência de concentração de poluentes: baixa, média e alta. A divisão é feita em 3 grupos com quantidades de amostras iguais, onde a menores (um terço) são classificadas como baixa, e assim por diante. Esta divisão revelou diferenças espaciais com escala menores de 100 metros, permitindo uma resolução maior que a obtida por modelos tradicionais que podem ter tradicionalmente resolução na escala de quilômetros e não menores que 100 metros.

Com base, nestas classificações foi possível realizar análises sobre a Zona Central de São Paulo e da Zona Centro-Leste, que indicaram que algumas características de ocupação do solo se destacavam nos mapeamentos, como locais de concentração de poluentes: viadutos, túneis e grandes cruzamentos. Estas características são preconizadas na literatura como pontos frequentes de problemas com poluentes emitidos por veículos (KRECL, TARGINO, *et al.*, 2016) (TARGINO; KRECL, 2016); (VARDOULAKISA *et al.*, 2003); (VASCONCELLOS; CARVALHO; POOL, 2005); (BARREFORS, 1996); (GOEL; KUMAR, 2015); (AHMAD; KHARE; CHAUDHRY, 2005).

Também foi possível perceber as melhores práticas para uso dos modelos de representação apresentados por esta tese, sendo que o modelo relativo ajuda a identificar áreas que frequentemente apresentam maiores concentrações de poluentes, e a partir desta usar os modelos absolutos para verificar os níveis com medidas tradicionais de concentração de poluentes. O modelo relativo minimiza o efeito da sazonalidade, já o modelo absoluto permite verificar os índices em unidades de ppm, o que facilita o entendimento e comparativos com os padrões de qualidade do ar, no entanto quanto mais longo for o período de coleta, as médias tendem a amenizar as diferenças, por isso, o modelo absoluto pode ser melhor aplicado em períodos mais curtos, como os tradicionalmente utilizados por Órgãos Estaduais de Meio Ambiente, como por exemplo em períodos de 1h, 8h, 24h.

Portanto, o uso combinado dos dois modelos cartográficos é uma boa prática, para realizar interpretações mais claras do conglomerado urbano.

Além dos modelos cartográficos, os valores apresentados nos gráficos comparativos entre as estações oficiais de monitoramento da qualidade do ar e os valores medidos pelo mapeamento não são iguais, até porque as estações não estão cobrindo a mesma região, devido à escala de representação espacial de cada uma delas, no entanto é possível notar alguma similaridade. Cabe uma ressalva sobre o O_3 , que segundo a documentação técnica do respectivo sensor (LIBELIUM, 2014a), há situações em que a presença de NO_2 , pode influenciar no nível de O_3 .

Para os dias monitorados, os valores médios absolutos de CO não ultrapassaram o valor de 9 ppm, que é o limite superior para o índice de boa qualidade do ar. Assim, se fossemos utilizar a referência de cores dada pela CETESB e elaborar o mapa da concentração de CO, toda a região apresentaria a cor verde. Apesar da informação ser correta e coerente, algumas regiões apresentadas pelos modelos relativos, deixaram claro que algumas regiões são mais críticas que outras, mesmo estando dentro do limite de boa qualidade para CO, indicando que quando houver um aumento de poluentes, as regiões críticas seriam as primeiras a refletir os sintomas.

Após a aplicação das representações cartográficas com os modelos relativo e absoluto, novas perspectivas de caracterização da poluição associadas ao espaço urbano tornam-se possíveis, o que pode ser comprovado com os estudos de casos, os quais tiveram a caracterização de suas regiões com base nos resultados dos modelos construídos pelo monitoramento dos kits sensores.

6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

No desenvolvimento da presente tese foi possível perceber alternativas tecnológicas e experiências internacionais que oferecem mecanismos para que as cidades possam se tornar mais “sensitivas” apresentando assim informações que possibilitem um melhor reflexo da situação das condições ambientais e outras, das cidades. Os resultados e as etapas concluídas durante a presente tese revelaram que a solução tecnológica empregada para coletar informações sobre as condições ambientais é viável e tem grande potencial para agregar valor aos sistemas fixos de monitoramento da qualidade do ar instalados nas regiões metropolitanas brasileiras, ou mesmo apontar o perfil de regiões que ainda não são cobertas por esse monitoramento.

Os modelos cartográficos de representação gerados pela plataforma podem ser empregados em cenários específicos. Por exemplo, o modelo relativo permite perceber que certas regiões tendem a ter maior concentração de poluentes, dividindo-as em três classes: baixa, média e alta. A cada hora a região é classificada relativamente com base nos valores de concentrações de poluentes, assim os efeitos da sazonalidade e médias de períodos longos são minimizados, ajudando na interpretação de possíveis fenômenos ou comportamentos provocados pelas características de geometria urbana, ocupação do solo, condições de tráfego, condições meteorológicas. No entanto, como os valores não são apresentados em unidade tradicionais, como ppm, é difícil saber se uma área apontada com alta tendência de concentração de poluentes, está apresentando um índice ruim ou não. Desta forma, o modelo absoluto permite verificar os índices em unidades de ppm, o que facilita o entendimento por especialistas; no entanto quanto mais longo for o período de coleta, as médias tendem a amenizar as diferenças.

Além dos modelos gerais, os mapas horários permitem visualizar a sazonalidade das concentrações de poluentes, o que permite entender e perceber as variações naturais da concentração de gases poluentes, ou mesmo perceber momentos em que as emissões de gases primários (CO, NO₂) são maiores, por exemplo, nos horários de pico de tráfego urbano. Já para o ozônio (gás secundário), este é gerado por combinações de NO₂, hidrocarbonetos e incidência solar, e normalmente o pico de O₃ acontece em dias ensolarados no período da tarde. Neste sentido, os

mapas horários também ajudam a perceber o ciclo do ozônio. De forma análoga, diferentes perspectivas temporais podem ser analisadas, como por exemplo, dias da semana, meses, estação do ano (outono, inverno), etc.

No momento em que as informações são integradas no SIG, como se mostrou no presente trabalho, este se torna uma importante ferramenta de tomada de decisões com potencial de análises em micro escala (até uma centena de metros), podendo ser ampliada com informações adicionais como, por exemplo, dados oficiais de estações automáticas de monitoramento de qualidade do ar, ampliando a capacidade dos modelos tradicionais, permitindo expandir e melhorar a interpretação dos fenômenos atmosféricos e de poluentes nas cidades.

Ao encontro ao objetivo geral da presente tese, os modelos cartográficos criados permitem realizar análises das regiões mapeadas usando perspectivas espaciais e temporais com informações obtidas, para análises de pelo menos a cada 100 metros, o que promove uma resolução maior que os modelos tradicionais de monitoramento da qualidade do ar (escala quilométrica), os quais ainda não oferecem esta possibilidade. Esta maior resolução permite uma nova perspectiva de análises de microrregiões e, desta forma, permite que os especialistas ou gestores urbanos possam entender melhor as situações, ao utilizarem as ferramentas e recursos disponibilizados pela plataforma para suas análises.

Para atingir os objetivos optou-se pela criação e validação de um kit sensor para ser hospedado em ônibus coletivo, o qual foi validado e testado, quanto a sua eficiência de medição. Este foi integrado a uma plataforma computacional construída para extrair e processar informações com algoritmos matemáticos, incorporando métodos para construções de modelos espaciais e temporais dos dados coletados sobre as condições ambientais. Todos os componentes da plataforma foram validados com experimentos que confirmaram as hipóteses apresentadas. E por fim, os modelos criados pela plataforma foram base de estudo de caso, de análises espaçotemporais de regiões da cidade de São Paulo, os quais denotaram os potenciais construídos pela presente tese.

Como fonte de reflexão final, algumas dificuldades são apresentadas como perspectivas de boas práticas em trabalhos semelhantes, pois se revelaram como grandes desafios para o desenvolvimento desta tese. Relatam-se também os principais resultados e perspectivas futuras para esta tese.

6.1 PRINCIPAIS DIFICULDADES E APRENDIZADOS

Na elaboração desta tese alguns fatores foram desafiadores. A fim de registrar a experiência e dificuldades, para futuras pesquisas, mencionam-se alguns destes desafios:

- a) construção do equipamento sensor – este foi um dos principais desafios, visto que precisou incorporar características adicionais para as pretensões desta tese. A partir de um modelo básico inicial, muitas adaptações e testes foram demandados. Este desafio incorporou desde decisões de quais componentes deveriam ser incluídos na solução, até o entendimento do comportamento de cada sensor e adaptação para o cenário de coleta móvel. Todo esse processo passou por desenvolvimento de encapsulamento específico e personalizado, incorporando componentes adicionais para criar um fluxo de ar constante, para minimizar as influências das variações com a movimentação. A calibração dos sensores só foi possível graças à aquisição de novos equipamentos já calibrados de fábrica. Estes novos equipamentos ocasionaram o reinício de todo o processo de análise estrutural e funcional. Este desafio exigiu certo conhecimento de eletrônica para a montagem dos circuitos elétricos, compreensão de características mecânicas para proteger o equipamento de intempéries e vibrações provenientes do trânsito em vias brasileiras. Além disso, houve a necessidade de desenvolver software embarcado para registrar, processar as informações e transmiti-las para a infraestrutura da plataforma. Ao contabilizar todas as linhas de código desses programas, considerando as diversas versões, chegou-se a um total de cerca de 33.000 linhas de código fonte;
- b) financiamento dos equipamentos – este item que inicialmente não parecia ser um empecilho, com a mudança da conjuntura nacional, tornou-se um desafio para a execução da tese, visto que os equipamentos são importados, e apesar do baixo custo (aproximadamente 5 mil dólares) se comparado com uma estação CETESB (aproximadamente 350 mil dólares), foram adquiridos, após várias tentativas junto a agências de fomento. A versão inicial foi financiada por um projeto de pesquisa do Departamento de Engenharia de Transportes. Após as experiências dessa etapa, chegou-se a conclusão da necessidade de aquisição de quatro novos kits, calibrados, para suprir as

necessidades operacionais dos experimentos em campo. Essa tarefa decorreu mais de um ano, com duas tentativas de solicitação de recursos a entidades de financiamento como o CNPq e a efetiva aquisição pela Fundação de apoio ao IPT (FIPT) dos quatro kits;

- c) ônibus coletivo hospedeiro dos experimentos em São Paulo – para o estudo de caso apresentado nesta tese, houve a necessidade de escolher uma região para explorar as possibilidades da plataforma, sendo assim, a cidade de São Paulo foi a opção mais alinhada com as estratégias desta tese. Após a instalação, o processo de acompanhamento transcorreu diretamente com a empresa AMBIENTAL. Embora o alinhamento com a SPTrans tenha ocorrido de forma solista, o processo de instalação dos kits nos ônibus, da infraestrutura de comunicação no pátio da empresa, obrigam a empresa a mudar sua escala de atendimento operacional da linha, gerando os problemas de mudança logística e atrapalhando o planejamento tradicional da empresa. Os trólebus são frequentemente levados para a manutenção no pátio, desprovendo o monitoramento de dados na região da linha. Além disso, qualquer manutenção no kit sensor deveria ser feito nestes momentos, para evitar e minimizar os problemas operacionais. Desta forma, teve-se que aguardar momentos específicos para realizar a manutenção no kit sensor, fato que ocorreu várias vezes com um dos kits do experimento. Por fim, a grande maioria dos dados foi provida por um dos kits sensores, o qual teve menos intercorrência de manutenção.
- d) multidisciplinaridade – esta tese envolveu competências de diferentes áreas de atuação da Engenharia. O que se tornou um desafio para o autor ao trabalhar com assuntos que não eram de seu domínio, e exigiram um amadurecimento e complemento de formação para conduzir as pesquisas. De forma geral, a elaboração desta tese envolveu conhecimentos multidisciplinares:
- de Engenharia de Transporte, que passam pela operação de sistemas de transporte urbano, cartografia digital e posicionamento geodésico por satélite, dentre outros;
 - de Engenharia Ambiental, na compreensão dos efeitos e das características de gases poluentes emitidos em centros urbanos, assim como a compreensão de fatores que compõem a avaliação da

qualidade do ar e os sistemas de monitoramento instituídos por Órgãos Estaduais de Meio Ambiente;

- de Engenharia Elétrica e Eletrônica, na montagem e nos aprimoramentos construtivos dos kits sensores;
- de Engenharia da Computação, no desenvolvimento de *firmware* do kit, infraestrutura computacional de suporte para os dados provenientes dos kits, e operação de Sistemas Gerenciadores de Banco de Dados e Sistema de Informações Geográficas.

6.2 PRINCIPAIS RESULTADOS E CONTRIBUIÇÕES

Uma das principais contribuições foi o desenvolvimento de métodos e estratégias para criar modelos de representação cartográfica que ampliam o entendimento dos dados e auxiliam na interpretação de mapas de gases poluentes permitindo análises espaçotemporais em microescala, que atualmente não são possíveis com os modelos tradicionais.

Os modelos relativos e absolutos gerados pela plataforma mostraram-se instrumentos para gestores e especialistas realizarem análises sobre os resultados, e estabelecerem estratégias de melhoria da qualidade de vida dos cidadãos. Além dos modelos apresentados nesta tese, todos os dados coletados estão incorporados em um SIG, o que permite análises adicionais. Assim as várias estratégias e modelos de mapeamento que foram experimentados promoveram uma série de resultados, que foram se consolidando e estão agora disponíveis para a comunidade acadêmica e técnica.

Ao realizar a contabilidade da quantidade de pontos coletados a partir da instalação dos kits sensores, chegou-se a marca de mais de 211 mil pontos, considerando que cada ponto carrega 26 atributos, tem-se o total de 5,4 milhões de atributos sensoriais coletados. Estes dados foram obtidos em 7 linhas de trólebus, circulando por mais de 15.000 quilômetros (Figura 122).

dólares de uma estação tradicional). A instalação em veículos que trafegam em outras rotas amplia a cobertura de dados e podem propiciar uma visão conjunta da cidade. Uma vez analisado o comportamento de certa região, com seus pontos críticos, os sensores podem ser deslocados para outras rotas. Assim políticas públicas podem ser adotadas com base nos mapeamentos, definindo estratégias de mitigação e melhoria de qualidade de vida nas regiões mais afetadas.

6.3 PERSPECTIVAS FUTURAS

Com os resultados dos mapeamentos percebeu-se que existem muitas variáveis passíveis de análise e possibilidades de correlação com fatores externos. Além disso, os resultados mostraram que existe correlação entre alguns fatores e a concentração de poluentes, como por exemplo, as características de ocupação do solo e o nível de congestionamentos.

Com a existência de muitos pontos coletados, abre-se a perspectiva de utilizar a técnica de Mineração de Dados, como é o caso de *SOM – Self Organized Maps*, que é uma técnica que utiliza algoritmos computacionais de redes neurais artificiais para realizar agrupamentos e visualização de dados de alta dimensionalidade. Este permite encontrar similaridade e não similaridades, possibilitando encontrar padrões subjacentes escondidos entre registros e atributos dos dados. Com base neste modelo é possível inclusive fazer predições (KOHONEN, 2001). Assim, seria possível avaliar a viabilidade de realizar predições espaçotemporais, usando a técnicas de SOM.

Outra perspectiva é a construção de interfaces web, que congreguem as principais informações dos mapeamentos, realizando a construção de gráficos e filtros dinâmicos com base nos dados coletados, que podem passar a integrar as APIs do SIG - ArcGIS para realizar os modelos de representação cartográfica como os propostos nesta tese, criando um ambiente único e integrado.

Como apontado, uma representação utilizando os mesmos modelos discutidos por esta tese, pode ser construída para representar características espaçotemporais, para mapear ilhas de calor pela cidade, ampliando as análises para além do escopo de qualidade do ar, incluindo fatores de monitoramento de condições climáticas. Este tópico é discutido para definir, por exemplo, estratégias de arborização, e estudos sobre microclima (DUARTE; SOUZA, 2004). Os estudos de microclima já

deixam claro, a falta de informações de regiões sobre áreas densamente urbanizadas, uma vez que a maioria das estações oficiais está localizada em parques e não oferecem informações nos eixos de maior verticalização, como são os cânions urbanos.

Finalmente a tese mostrou que a ferramenta desenvolvida (equipamentos e sistema) tem um grande potencial para análises de informações de sensores móveis, criando conhecimento em microescala para aumentar a quantidade e a granularidade de informações e análises do espaço urbano.

REFERÊNCIAS³

AHMAD, K.; KHARE, M.; CHAUDHRY, K. K. Wind tunnel simulation studies on dispersion at urban street canyons and intersections - a review. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 93, n. 9, p. 697 - 717, Sept. 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15570**: Transporte — Especificações técnicas para fabricação de veículos de características urbanas para transporte coletivo de passageiros. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 59 p.

BAILEY, T. C. A review of statistical spatial analysis in geographical information. In: FOTHERINGHAM, S.; ROGERSON, P. **Spatial analysis and GIS**. London: Taylor & Francis 1994. Cap. 2, p. 8-26.

BARREFORS, G. Air pollutants in road tunnels. **The science of Total environment**, v. 189, p. 431-435, 1996.

BIELSA, A. Smart City project in Serbia for environmental monitoring by Public Transportation. **Libelium Web Site**, Jan. 2012. Disponível em: <http://www.libelium.com/smart_city_environmental_parameters_public_transportation_wasmote/>. Acesso em: 18 nov. 2014.

BRAGA, L. P. V. Estatísticas de dispersão e de associação. In: BRAGA, L. P. V. **Compreendendo probabilidade e estatística**. Rio de Janeiro: E-papers, 2010. Cap. 5, p. 97-106.

BRKOVIĆ, M.; SRETOVIĆ, V. Urban sensing – smart solutions for monitoring environmental. In: INTERNATIONAL SOCIETY OF CITY AND REGIONAL PLANNERS WORLD CONGRESS, 48., 2011, Perm. **Proceedings...** Perm, Russia: ISOCARP, 2012. p. 11.

BURROUGH, P. A. **Principles of geographic information systems of land resources assessment**. Oxford: Oxford University Press, 1986. 220 p.

CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS. Previsão de chuvas abaixo da média nas regiões norte e centro-oeste do Brasil. **Infoclima**, v. 24, n. 8, 30 ago. 2017. Disponível em: <<http://infoclima1.cptec.inpe.br/>>. Acesso em: 10 set. 2017.

CETESB. **Classificação expedita da representatividade espacial das estações de monitoramento da qualidade do ar da CETESB no Estado de São Paulo**. São Paulo: CETESB, 2016. 29 p.

CETESB. **Emissões veiculares no estado de São Paulo 2013**. São Paulo: CETESB, 2014. 150 p.

³ De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR 6023).

CETESB. Qualar - Qualidade do Ar - Sistema Ambiental Paulista - Governo de SP. **Site da CETESB**, 2017b. Disponível em: <<http://ar.cetesb.sp.gov.br/qualar/>>. Acesso em: 27 ago. 2017.

CETESB. **Qualidade do ar no estado de São Paulo 2016**. São Paulo: CETESB, 2017a. 198 p.

COM UMIDADE entre 20% sp decreta estado de alerta pelo 2 dia seguido. **Folha de São Paulo**, São Paulo, 13 out. 2014. (Caderno Cotidiano). Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2014/10/1531662-com-umidade-entre-20-sp-decreta-estado-de-alerta-pelo-2-dia-seguido.shtml>>. Acesso em: 16 nov. 2014.

COSTA, H. **Urbanismo sustentável em área de proteção ambiental**: O caso de drenagem urbana no Setor de Mansões Park Way, em Brasília – DF. 2008. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

COSTA, S.; CINTRA, J. P. Proposta de estudo de áreas metropolitanas: um modelo utilizando as tecnologias de sig e sensoriamento remoto. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 9., 1998. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1998. p. 885-896.

DELIN, K. The Sensor web: a macro-instrument for coordinated sensing. **Sensors**, v. 2, n. 7, p. 270-285, 14 July 2002.

DRUCKER, P. **The age of discontinuity**: guidelines to our changing society. London: Transaction Publishers, v. 1, 1992. 420 p.

DUARTE, D.; SOUZA, T. Padrões de ocupação do solo e microclimas urbanos em São Paulo. In: NUTAU, 2004, São Paulo. **Anais...** São Paulo: USP-FAU, 2004.

ESRI. **Software ArcGIS**. Berkeley: Esri, 2015.

ARCGIS. **What is the Spatial Analyst extension?** ArcGIS Help - ArcGIS Desktop, 2017. Disponível em: <<http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.4/extensions/spatial-analyst/what-is-the-spatial-analyst-extension.htm>>. Acesso em: 29 jul. 2017.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GOEL, A.; KUMAR, P. Characterisation of nanoparticle emissions and exposure at traffic intersections through fast-response mobile and sequential measurements. **Atmospheric Environment**, v. 107, p. 374 - 390, Apr. 2015.

GOOGLE MAPS. **Trânsito típico**. Disponível em: <<http://www.googlemap.com>>. Acesso em: 1 ago. 2017.

HARRISON, C. et al. Foundations for smarter cities. **IBM Journal of Research and Development**, v. 54, n. 4, p. 1-16, July 2010.

HEJLOVÁ, V.; VOŽENÍLEK, V. Wireless sensor network components for air pollution monitoring in the urban environment: criteria and analysis for their selection. **Wireless Sensor Network Journal**, v. 5, n. 10, p. 229-240, Dec. 2013.

HEMPSTEAD, M. et al. Survey of hardware systems for wireless sensor networks. **Journal of Low Power Electronics**, v. 4, n. 1, p. 11-20, Apr. 2008.

HOEK, G. et al. A review of land-use regression models to assess spatial variation of outdoor air pollution. **Atmospheric Environment**, v. 42, n. 33, p. 7561-7578, Oct. 2008

HORÁLEK, J. et al. **Interpolation and assimilation methods for European scale air quality assessment and mapping: Part II: development and testing new methodologies**. [S. l.]: The European Topic Centre on Air and Climate Change (ETC/ACC), 2005.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico 2010 - características da população e domicílios - resultados do universo**. Rio de Janeiro: IBGE, 2011. 270 p.

INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE. **1º Diagnóstico da rede de monitoramento da qualidade do ar no Brasil**. São Paulo: Instituto de Energia e Meio Ambiente, 2014. 277 p.

KOHONEN, T. **Self-Organizing Maps**. 3. ed. Berlin: Springer, 2001. v. 1, 487 p.

KRECL, P. et al. Screening of short-lived climate pollutants in a street canyon in a mid-sized city in Brazil. **Atmospheric Pollution Research**, v. 7, n. 6, p. 10022-1036, 2016.

LEE, G.; NA, S. H.; HUH, E. N. **Modeling for congestion prediction in wireless sensor network using traffic demands analysis: mathematical methods for information science and economics**. montreux - Switzerland: Wseas Press. 2012. p. 206-211.

LIBELIUM. **Gases Board Technical Guide - Document version: v4.7**. Zaragoza, Spain: 2014a. Disponível em: <http://www.libelium.com/downloads/documentation/gases_sensor_board_2.0.pdf>. Acesso em: 01 nov. 2014.

LIBELIUM. **New calibrated air quality sensors for smart cities**. 2015. Disponível em: <<http://www.libelium.com/calibrated-air-quality-gas-dust-particle-matter-pm10-smart-cities/>>. Acesso em: 10 set. 2017.

LIBELIUM. **Waspnote IDE user guide - Document Version: v4.1**. Zaragoza, Spain: 2014c. 16 p. Disponível em: <http://www.libelium.com/downloads/documentation/waspnote_ide_user_guide.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2014.

LIBELIUM. **Waspnote Technical Guide - Document version: v5.5**. Zaragoza, Spain: 2014b. 178 p. Disponível em: <http://www.libelium.com/downloads/documentation/waspnote_technical_guide.pdf>. Acesso em: 01 nov. 2014.

LIN, C. A. et al. Association between air pollution and ischemic cardiovascular emergency room visits. **Environmental Research**, v. 92, n. 1, p. 57-63, May 2003.

LINDLEY, S.; WALSH, T. Inter-comparison of interpolated background nitrogen dioxide concentrations across Greater Manchester, UK. **Atmospheric Environment**, v. 39, n. 15, p. 2709-2724, May 2005.

LONGLEY, P. A. et al. **Sistemas e ciência da informação geográfica**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2011.

MARTE, C. L. et al. In: ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES PÚBLICOS. **Sistemas inteligentes de transporte**. São Paulo, 2012. cap. 6, p. 100-121. (Série Cadernos Técnicos, 8).

MARTINS, C. et al. Air pollution and emergency room visits due to chronic lower respiratory diseases in the elderly: an ecological time-series study in São Paulo, Brazil. **Journal of Occupational and Environmental Medicine**, v. 44, n. 7, p. 622-627, July 2002.

MEMSIC. **IRIS Datasheet**. MEMSIC Inc. San Jose, California: 2014b. 3 p. (6020-0124-02 Rev A).

MEMSIC. **LOTUS Datasheet**. MEMSIC Inc. San Jose, California: 2014c. 3 p. (6020-0705-01 Rev A).

MEMSIC. **MICAz Datasheet**. MEMSIC Inc. San Jose, California: 2014a. 3 p. (6020-0065-05 Rev A).

MEMSIC. **TelosB Datasheet**. MEMSIC Inc. San Jose, California: 2014d. 3 p. (6020-0094-03 Rev A).

MENDES, S. USP apresenta taxas elevadas de ozônio. **Jornal do Campus**, São Paulo, 10 jun. 2016.

MESQUITA, S. M. P. **Modelação da distribuição espacial da qualidade do ar em Lisboa usando Sistema de Informação Geográfica**. 2009 119 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Instituto Superior de Estatística e Gestão de Informação, Universidade Nova Lisboa. Lisboa, Portugal, 2009.

MEYER, P. L. **Probabilidade – aplicações à Estatística**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC S.A, 1983.

MOLENAAR, M. **An introduction to the theory of spatial object modelling for GIS**. London: Taylor & Francis, 1998.

MURTY, R. N. et al. **CitySense**: an urban-scale wireless sensor network and testbed. In: IEEE CONFERENCE ON TECHNOLOGIES FOR HOMELAND SECURITY, 2008, Waltham, MA – USA. **Proceedings...** Washington.: IEEE, 2008. p. 583-588.

NATIONAL RESEARCH CONCIL. **Air quality management in the United States**. Washington DC: National Academy of Science, 2004. 401 p.

NEW YORK UNIVERSITY. The SONYC **Cyber-Physical System**. 2017. Disponível em: <<https://wp.nyu.edu/sonyc/>>. Acesso em: 28 jul. 2017.

OJALA, T. Open urban testbed for ubiquitous computing. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATIONS AND MOBILE COMPUTING, Shenzhen, China, 2010. **Proceedings...** Washington:: IEEE, p. 442-447.

OLIVEIRA, M. D. P. G. **Sistema espacial de apoio à decisão: modelos para análise do adensamento de atividades econômicas no espaço urbano**. 1997. 71 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola de Governo de Minas Gerais, Fundação João Pinheiro, Belo Horizonte, 1997.

PEREIRA, E. Histórias e curiosidades da Radial Leste, via que ganha o mundo na Copa. **Folha de São Paulo Online**, São Paulo, 4 maio, 2014. Disponível em: <<http://folha.com/no1448624>>. Acesso em: 08 set. 2017.

POTTIE, G. J.; KAISER, W. J. Wireless integrated network sensors (WINS). **Communications of the ACM**, New York, v. 43, n. 5, p. 51-58, May 2000.

RAKOČEVIĆ, G. Sensors. In: GAVRILOVSKA, L., et al. **Application and multidisciplinary aspects of wireless sensor networks**. London: Springer-Verlag, 2011. v. 1, Cap. 2, p. 13-31.

ROCHA, J. C.; ROSA, A. H.; CARDOSO, A. A. **Introdução à química ambiental**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

ROSALES, M. S.; GARCIA, G.; SANCHEZ, G. D. Efficient message authentication protocol for WSN. **Wseas Transaction on Computers**, v. 8, n. 6, p. 895-904, June 2009.

RUIZ, B.; LOUREIRO, A. A. F **Maná: uma arquitetura para gerenciamento de redes de sensores sem fio**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2003. 214 p.

SANCHEZ, L. et al. SmartSantander: IoT experimentation over a smart city testbed. **Computer Networks**, v. 61, p. 217 - 238, Mar. 2014.

SANTOS, A. S. D. et al. AIA: Monitor da poluição do ar por meio de redes de sensores sem fio embarcados em ônibus urbano. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE TRANSPORTE E TRÂNSITO, 20., 2015, Santos. **Anais...** São Paulo: ANTP, 2015.

SANTOS, A. S. D. et al. Estudo de viabilidade do uso de rede de sensores integrada a sistemas inteligentes de transportes para monitoramento de condições ambientais. In: CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTE, 27., 2013, Belem. **Anais...** Rio de Janeiro: Anpet, 2013a.

SANTOS, A. S. D. et al. Integration of wireless sensor network to intelligent transportation system for environmental monitoring. **Recent Advances in Electrical Engineering**, Baltimore, v. 23, n. 1, p. 224-231, 2013b.

SANTOS, A. S. D. et al. Optimal placement of sensor network hosted in public transport vehicles for environmental monitoring. **WSEAS Transactions on Systems**, v. 13, p. 177-186, 2014.

SAVVIDES, A.; PARK, S.; SRIVASTAVA, M. On modeling networks of wireless microsensors. In: JOINT INTERNATIONAL CONFERENCE ON MEASUREMENT AND MODELING OF COMPUTER SYSTEMS, 2001, Cambridge, MA/USA. **Proceedings...** New York: ACM, 2001. p. 318-319.

SMARTSANTANDER. **Mitos - Interface web do Experimento piloto no projeto SmartSantander** Disponível em: <<http://smartsantander.eu/index.php/mitos>>. Acesso em: 10 set. 2017.

SPTRANS. **A SPTans - Histórico.** Disponível em: <http://www.sptrans.com.br/a_sptrans/>. Acesso em: 09 set. 2017.

TARGINO, C.; KRECL, P. Local and regional contributions to black carbon aerosols in a mid-sized city in Southern Brazil. **Aerosol and Air Quality Research**, v. 16, p. 125–137, 2016.

THIBAUD, R.; DEL MONDO, G.; GARLA, T. A spatio-temporal graph model for marine dune dynamics analysis and representation. **Transactions in GIS**, v. 17, n. 5, p. 742–762, Oct. 2013.

TILAK, S.; ABU-GHAZALEH, N. B.; HEINZELMAN, W. A taxonomy of wireless micro-sensor network models. **ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review**, New York, v. 6, n. 2, p. 28-36, Apr. 2002.

TWITTER. Trajeto da carreta de veículos elétricos. Disponível em: <<https://twitter.com/velatinoameric1>>. Acesso em: 10 set. 2017.

U.S. GOVERNMENT. CFR. Part 58 – Ambient Air Quality Surveillance – Probe and Monitoring Path Siting Criteria for Ambient Air Quality Monitoring. In: **Code of Federal Regulations - Title 40 – Protection of Environment**. Washington: U.S. Government Printing office, 2010. Cap. 40, p. 242-303.

UNITED NATIONS. **World Urbanization Prospects the 2011 Revision - highlights**. New York: United Nations, 2012. 33 p.

VARDOULAKISA, S. et al. Modelling air quality in street canyons: a review. **Atmospheric Environment**, v. 37, p. 155-182, Jan. 2003.

VASCONCELLOS, P. C.; CARVALHO, L. R. F.; POOL, C. S. Volatile organic compounds inside urban tunnels of São Paulo City Brazil. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, São Paulo, v. 16, n. 6, p. 1210-1216, Dec. 2005.

WARNEKE, B. et al. Smart dust: communicating with a cubic-millimeter computer. **Computer**, v. 34, p. 44-51, Jan. 2001.

WILHEIM, J. Compreensão da Cidade. In: WILHEIM, J. **Cidades: o substantivo e o adjetivo**. 3. ed. São Paulo: Perspectiva, 2008. v. 1, Cap. 3, p. 245.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Air Quality Guidelines for Europe**. 2. ed. Copenhagen: WHO Regional Publications, 2000. 288 p. (WHO Regional Publications European Series, 91).

APÊNDICE A – Gráficos das amostras

Outono 2017

Inverno 2017

APÊNDICE B – Representações cartográficas dos modelos espaçotemporais

LINHA

2002-10

Região: Centro de São Paulo

Amostras: 6.307 pontos

Dias: 25; 26; 27/04 e 03/05/17

Horário: 05h até 19h

Distância: 7 km

USP
Universidade de São Paulo

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
DE TRANSPORTES

Orientador
Dr. Jorge Pimentel Cintra

Aluno
Alessandro Santiago dos Santos

Análise espaçotemporal da
qualidade do ar por meio de rede
de sensores com nós embarcados
em ônibus coletivos

Modelo de representação
VISTA DE RUAS

Região: Centro de São Paulo
Amostras: 6307 pontos
Dias: 25;26;27/04 e 03/05/17
Horário: 05h até 19h
Linha 2002-10 Distância: 7 km

LINHA 2002-10

• Pontos coletados

PROJEÇÃO UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR
Origem da quilometragem UTM: Equador e Meridiano 45° W Gr.,
Datum horizontal: SIRGAS2000

©OpenStreetMap (and) contributors, CC-BY-SA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
DE TRANSPORTES

Orientador
Dr. Jorge Pimentel Cintra

Aluno
Alessandro Santiago dos Santos

Análise espaçotemporal da
qualidade do ar por meio de rede
de sensores com nós embarcados
em ônibus coletivos

**Modelo de representação
VISTA DE RUAS**

Região: Centro de São Paulo
Amostras: 6307 pontos
Dias: 25;26;27/04 e 03/05/17
Horário: 05h até 19h
Linha 2002-10 Distância: 7 km

LINHA 2002-10

Rota_3160_buffer

1:8000

0 150 300
Metros

PROJEÇÃO UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR
Origem da quilometragem UTM: Equador e Meridiano 45° W Gr.,
Datum horizontal: SIRGAS2000

Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and the
GIS User Community

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
DE TRANSPORTES

Orientador
Dr. Jorge Pimentel Cintra

Aluno
Alessandro Santiago dos Santos

Análise espaçotemporal da
qualidade do ar por meio de rede
de sensores com nós embarcados
em ônibus coletivos

Modelo de representação
RELATIVO - GERAL
CO

Região: Centro de São Paulo
Amostras: 6307 pontos
Dias: 25;26;27/04 e 03/05/17
Horário: 05h até 19h
Linha 2002-10 Distância: 7 km

Tendência de Concentração
CO

Baixa
Média
Alta

PROJEÇÃO UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR
Origem da quilometragem UTM: Equador e Meridiano 45° W Gr.,
Datum horizontal: SIRGAS2000

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
DE TRANSPORTES

Orientador
Dr. Jorge Pimentel Cintra

Aluno
Alessandro Santiago dos Santos

Análise espacotemporal da
qualidade do ar por meio de rede
de sensores com nós embarcados
em ônibus coletivos

Modelo de representação
ABSOLUTO - GERAL
CO

Região: Centro de São Paulo
Amostras: 6307 pontos
Dias: 25;26;27/04 e 03/05/17
Horário: 05h até 19h
Linha 2002-10 Distância: 7 km

Concentração
CO (ppm)

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
DE TRANSPORTES

Orientador
Dr. Jorge Pimentel Cintra

Aluno
Alessandro Santiago dos Santos

Análise espaçotemporal da
qualidade do ar por meio de rede
de sensores com nós embarcados
em ônibus coletivos

**Modelo de representação
ABSOLUTO POR HORA
CO**

Região: Centro de São Paulo
Amostras: 6307 pontos
Dias: 25;26;27/04 e 03/05/17
Horário: 05h até 19h
Linha 2002-10 Distância: 7 km

**Concentração
CO**

Valores médios de concentração

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
DE TRANSPORTES

Orientador
Dr. Jorge Pimentel Cintra

Aluno
Alessandro Santiago dos Santos

Análise espaçotemporal da
qualidade do ar por meio de rede
de sensores com nós embarcados
em ônibus coletivos

Modelo de representação
RELATIVO - GERAL
 O_3

Região: Centro de São Paulo
Amostras: 6307 pontos
Dias: 25;26;27/04 e 03/05/17
Horário: 05h até 19h
Linha 2002-10 Distância: 7 km

Tendência de Concentração
 O_3

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
DE TRANSPORTES

Orientador
Dr. Jorge Pimentel Cintra

Aluno
Alessandro Santiago dos Santos

Análise espaçotemporal da
qualidade do ar por meio de rede
de sensores com nós embarcados
em ônibus coletivos

Modelo de representação
ABSOLUTO - GERAL
 O_3

Região: Centro de São Paulo
Amostras: 6307 pontos
Dias: 25;26;27/04 e 03/05/17
Horário: 05h até 19h
Linha 2002-10 Distância: 7 km

Concentração
 O_3 (ppm)

0,010 - 0,426
0,426 - 0,501
0,501 - 0,577
0,577 - 0,653
0,653 - 0,729
0,729 - 2,934

PROJEÇÃO UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR
Origem da quilometragem UTM: Equador e Meridiano 45° W Gr.,
Datum horizontal: SIRGAS2000

Orientador
Dr. Jorge Pimentel Cintra

Aluno
Alessandro Santiago dos Santos

Análise espaçotemporal da
qualidade do ar por meio de rede
de sensores com nós embarcados
em ônibus coletivos

Modelo de representação
ABSOLUTO POR HORA
O₃

Região: Centro de São Paulo
Amostras: 6307 pontos
Dias: 25;26;27/04 e 03/05/17
Horário: 05h até 19h
Linha 2002-10 Distância: 7 km

Concentração
O₃ (ppm)

- 0,010 - 0,426
- 0,426 - 0,501
- 0,501 - 0,577
- 0,577 - 0,653
- 0,653 - 0,729
- 0,729 - 2,934

USP
Universidade de São Paulo

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
DE TRANSPORTES

Orientador
Dr. Jorge Pimentel Cintra

Aluno
Alessandro Santiago dos Santos

Análise espaçotemporal da
qualidade do ar por meio de rede
de sensores com nós embarcados
em ônibus coletivos

Modelo de representação
RELATIVO - GERAL
NO₂

Região: Centro de São Paulo
Amostras: 6307 pontos
Dias: 25;26;27/04 e 03/05/17
Horário: 05h até 19h
Linha 2002-10 Distância: 7 km

**Tendência de Concentração
NO₂**

Baixa
Média
Alta

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
DE TRANSPORTES

Orientador
Dr. Jorge Pimentel Cintra

Aluno
Alessandro Santiago dos Santos

Análise espaçotemporal da
qualidade do ar por meio de rede
de sensores com nós embarcados
em ônibus coletivos

Modelo de representação
ABSOLUTO - GERAL
NO₂

Região: Centro de São Paulo
Amostras: 6307 pontos
Dias: 25;26;27/04 e 03/05/17
Horário: 05h até 19h
Linha 2002-10 Distância: 7 km

**Concentração
NO₂ (ppm)**

0,000 - 0,014
0,014 - 0,060
0,060 - 0,105
0,105 - 0,151
0,151 - 0,196
0,196 - 0,954

PROJEÇÃO UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR
Origem da quilometragem UTM: Equador e Meridiano 45° W Gr.,
Datum horizontal: SIRGAS2000

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
DE TRANSPORTES

Orientador
Dr. Jorge Pimentel Cintra

Aluno
Alessandro Santiago dos Santos

Análise espaçotemporal da
qualidade do ar por meio de rede
de sensores com nós embarcados
em ônibus coletivos

Modelo de representação ABSOLUTO POR HORA NO₂

Região: Centro de São Paulo
Amostras: 6307 pontos
Dias: 25;26;27/04 e 03/05/17
Horário: 05h até 19h
Linha 2002-10 Distância: 7 km

Concentração (ppm)

- 0,000 - 0,014
- 0,014 - 0,060
- 0,060 - 0,105
- 0,105 - 0,151
- 0,151 - 0,196
- 0,196 - 0,954

LINHA

3160-10

Região: Centro-Leste de São Paulo

Amostras: 62.748 pontos

Meses: Maio a Julho de 2017

Horário: 07h até 23h

Distância: 7.8 km

USP
Universidade de São Paulo

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
DE TRANSPORTES

Orientador
Dr. Jorge Pimentel Cintra

Aluno
Alessandro Santiago dos Santos

Análise espaçotemporal da
qualidade do ar por meio de rede
de sensores com nós embarcados
em ônibus coletivos

Modelo de representação
VISTA DE RUAS

Região: Centro-Leste de São Paulo
Amostras: 60.871 pontos
Meses: Maio a Julho de 2017
Horário: 07h até 23h
Linha: 3160-10 Distância: 7.8 km

LINHA 3160-10

Área de Cobertura

N
0 300 600
Metros

PROJEÇÃO UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR
Origem da quilometragem UTM: Equador e Meridiano 45° W Gr.,
Datum horizontal: SIRGAS2000

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
DE TRANSPORTES

Orientador
Dr. Jorge Pimentel Cintra

Aluno
Alessandro Santiago dos Santos

Análise espaçotemporal da
qualidade do ar por meio de rede
de sensores com nós embarcados
em ônibus coletivos

**Modelo de representação
ORTOFOTO**

Região: Centro-Leste de São Paulo
Amostras: 60.871 pontos
Meses: Maio a Julho de 2017
Horário: 07h até 23h
Linha: 3160-10 Distância: 7.8 km

LINHA 3160-10

Área de Cobertura

PROJEÇÃO UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR
Origem da quilometragem UTM: Equador e Meridiano 45° W Gr.,
Datum horizontal: SIRGAS2000

Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and the GIS User Community

Análise espaço temporal da
qualidade do ar por meio de rede
de sensores com nós embarcados
em ônibus coletivos

**Modelo de representação
RELATIVO - GERAL**

Região: Centro-Leste de São Paulo
Amostras: 62.748 pontos
Meses: Maio a Julho de 2017
Horário: 07h até 23h
Linha: 3160-10 Distância: 7.8 km

**Tendência de concentração
CO**

PROJEÇÃO UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR
Origem da quilometragem UTM: Equador e Meridiano 45° W Gr.,
Datum horizontal: SIRGAS2000

Orientador
Dr. Jorge Pimentel Cintra

Aluno
Alessandro Santiago dos Santos

Análise espaço temporal da
qualidade do ar por meio de rede
de sensores com nós embarcados
em ônibus coletivos

Modelo de representação ABSOLUTO - GERAL

Região: Centro-Leste de São Paulo

Amostras: 62.748 pontos

Meses: Maio a Julho de 2017

Horário: 07h até 23h

Linha: 3160-10 Distância: 7.8 km

Concentração Absoluta CO (ppm)

PROJEÇÃO UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR
Origem da quilometragem UTM: Equador e Meridiano 45° W Gr.,
Datum horizontal: SIRGAS2000

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
DE TRANSPORTES

Orientador
Dr. Jorge Pimentel Cintra

Aluno
Alessandro Santiago dos Santos

Análise espaço temporal da
qualidade do ar por meio de rede
de sensores com nós embarcados
em ônibus coletivos

**Modelo de representação
ABSOLUTO POR MÊS**

Região: Centro-Leste de São Paulo

Amostras: 62.748 pontos

Meses: Maio a Julho de 2017

Horário: 07h até 23h

Linha: 3160-10 Distância: 7.8 km

Concentração

CO (ppm)

Valores médios mensais

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
DE TRANSPORTES

Orientador
Dr. Jorge Pimentel Cintra

Aluno
Alessandro Santiago dos Santos

Análise espaço temporal da
qualidade do ar por meio de rede
de sensores com nós embarcados
em ônibus coletivos

**Modelo de representação
ABSOLUTO POR DIA DA SEMANA**

Região: Centro-Leste de São Paulo
Amostras: 67.462 pontos
Meses: Maio a Julho de 2017
Horário: 07h até 23h
Linha: 3160-10 Distância: 7.8 km

**Concentração
CO (ppm)**

Análise espaço temporal da
qualidade do ar por meio de rede
de sensores com nós embarcados
em ônibus coletivos

**Modelo de representação
RELATIVO - GERAL**
O₃

Região: Centro-Leste de São Paulo
Amostras: 62.748 pontos
Meses: Maio a Julho de 2017
Horário: 07h até 23h
Linha: 3160-10 Distância: 7.8 km

Tendência de Concentração

O₃

Baixa
Média
Alta

N
0 300 600
Metros

PROJEÇÃO UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR
Origem da quilometragem UTM: Equador e Meridiano 45° W Gr.,
Datum horizontal: SIRGAS2000

Orientador
Dr. Jorge Pimentel Cintra

Aluno
Alessandro Santiago dos Santos

Análise espaço temporal da
qualidade do ar por meio de rede
de sensores com nós embarcados
em ônibus coletivos

Modelo de representação
ABSOLUTO - GERAL
O₃

Região: Centro-Leste de São Paulo
Amostras: 62.748 pontos
Meses: Maio a Julho de 2017
Horário: 07h até 23h
Linha: 3160-10 Distância: 7.8 km

Concentração Absoluta
O₃ (ppm)

PROJEÇÃO UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR
Origem da quilometragem UTM: Equador e Meridiano 45° W Gr.,
Datum horizontal: SIRGAS2000

USP
Universidade de São Paulo

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
DE TRANSPORTES

Orientador
Dr. Jorge Pimentel Cintra

Aluno
Alessandro Santiago dos Santos

Análise espaço temporal da
qualidade do ar por meio de rede
de sensores com nós embarcados
em ônibus coletivos

**Modelo de representação
ABSOLUTO POR MÊS**

Região: Centro-Leste de São Paulo
Amostras: 62.748 pontos
Meses: Maio a Julho de 2017
Horário: 07h até 23h
Linha: 3160-10 Distância: 7.8 km

**Concentração
O₃ (ppm)**

Valores médios mensais

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
DE TRANSPORTES

Orientador
Dr. Jorge Pimentel Cintra

Aluno
Alessandro Santiago dos Santos

Análise espaço temporal da
qualidade do ar por meio de rede
de sensores com nós embarcados
em ônibus coletivos

**Modelo de representação
ABSOLUTO POR DIA DA SEMANA
O₃**

Região: Centro-Leste de São Paulo
Amostras: 62.748 pontos
Meses: Maio a Julho de 2017
Horário: 07h até 23h
Linha: 3160-10 Distância: 7.8 km

Concentração

O₃ (ppm)

Valores médios semanais

Orientador
Dr. Jorge Pimentel Cintra

Aluno
Alessandro Santiago dos Santos

Análise espacotemporal da
qualidade do ar por meio de rede
de sensores com nós embarcados
em ônibus coletivos

**Modelo de representação
ABOLUTO POR HORA
O₃**

Região: Centro-Leste de São Paulo
Amostras: 60.871 pontos
Meses: Maio a Julho de 2017
Horário: 07h até 23h
Linha: 3160-10 Distância: 7.8 km

**Concentração
O₃ (ppm)**

Valores médios horários

Análise espaço temporal da
qualidade do ar por meio de rede
de sensores com nós embarcados
em ônibus coletivos

**Modelo de representação
RELATIVO - GERAL
NO₂**

Região: Centro-Leste de São Paulo
Amostras: 62.748 pontos
Meses: Maio a Julho de 2017
Horário: 07h até 23h
Linha: 3160-10 Distância: 7.8 km

Tendência Concentração

PROJEÇÃO UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR
Origem da quilometragem UTM: Equador e Meridiano 45° W Gr.,
Datum horizontal: SIRGAS2000

Análise espaço temporal da
qualidade do ar por meio de rede
de sensores com nós embarcados
em ônibus coletivos

**Modelo de representação
ABSOLUTO - GERAL
NO₂**

Região: Centro-Leste de São Paulo
Amostras: 62.748 pontos
Meses: Maio a Julho de 2017
Horário: 07h até 23h
Linha: 3160-10 Distância: 7.8 km

**Concentração Absoluta
NO₂ (ppm)**

USP
Universidade de São Paulo

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
DE TRANSPORTES

Orientador
Dr. Jorge Pimentel Cintra

Aluno
Alessandro Santiago dos Santos

Análise espaço temporal da
qualidade do ar por meio de rede
de sensores com nós embarcados
em ônibus coletivos

**Modelo de representação
ABSOLUTO POR MÊS
NO₂**

Região: Centro-Leste de São Paulo

Amostras: 62.748 pontos

Meses: Maio a Julho de 2017

Horário: 07h até 23h

Linha: 3160-10 Distância: 7.8 km

**Concentração
NO₂ (ppm)**

Valores médios mensais

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
DE TRANSPORTES

Orientador
Dr. Jorge Pimentel Cintra

Aluno
Alessandro Santiago dos Santos

Análise espaço temporal da
qualidade do ar por meio de rede
de sensores com nós embarcados
em ônibus coletivos

Modelo de representação ABSOLUTO POR DIA DA SEMANA NO₂

Região: Centro-Leste de São Paulo
Amostras: 62.748 pontos
Meses: Maio a Julho de 2017
Horário: 07h até 23h
Linha: 3160-10 Distância:7.8 km

Concentração NO₂ (ppm)

Valores médios semanais

Orientador
Dr. Jorge Pimentel Cintra

Aluno
Alessandro Santiago dos Santos

Análise espaçotemporal da
qualidade do ar por meio de rede
de sensores com nós embarcados
em ônibus coletivos

**Modelo de representação
ABOLUTO POR HORA
NO₂**

Região: Centro-Leste de São Paulo
Amostras: 60.871 pontos
Meses: Maio a Julho de 2017
Horário: 07h até 23h
Linha: 3160-10 Distância: 7.8 km

Concentração

NO2 (ppm)

Valores médios horários